



Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Postgrado en Modelado y Simulación de Sistemas

Sistema de Estimación de Riesgo de Incendio Forestal para la Cuenca Alta del Río Chama

Proyecto de Grado presentado ante la ilustre Universidad de los Andes
como requisito para optar al título de Magister Scientiarum en
Modelado y Simulación de Sistemas

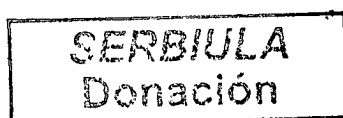
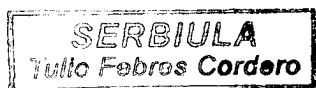
Autora:
Ing. Marilena Yeguez Ruiz

Tutora:

Dra. Magdiel Ablan

Co-Tutor:

Dr. Alexander Parra



Marzo 2010

A Dios, por la vida

A mi familia, siempre incondicional

Al CIAT, por su gentileza y las imágenes MODIS

Al Ingeniero Ramón Jáuregui, por su gran colaboración

A mi tutora, la Dra. Magdiel Ablan, por guiarme durante todo el desarrollo

A mi cotutor, Dr. Alexander Parra, por haber facilitado gran parte de los datos

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

RESUMEN

La presente investigación tiene como propósito el desarrollo de un Sistema de Estimación de Riesgo de Incendios Forestales para la Cuenca Alta del Río Chama, ubicada en el Estado Mérida - Venezuela, destinado para el uso del Grupo de Bomberos Forestales de la Universidad de Los Andes (ULA). Dicho sistema se logra gracias a la ejecución del ciclo de desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la puesta en práctica del paradigma de construcción de prototipos. El sistema consta de seis módulos, tres de ellos reservados para la gestión de los datos de los incendios forestales de la zona, un módulo para la generación de estadísticas de incendios espacio - temporales, y los dos restantes para el cálculo de índices de riesgo de incendios forestales estáticos y dinámicos.

El módulo Índice de Riesgo Estático permite calcular índices de riesgo de incendios estáticos usando la Técnica de Evaluación Multicriterio Punto Ideal. Mientras que el módulo Índice de Riesgo Dinámico facilita el cálculo de índices de stress de vegetación a partir de composiciones Modis NDVI. Estos módulos responden a modelos desarrollados y validados satisfactoriamente. Para la validación de los modelos se usaron los datos de los incendios registrados por el grupo de bomberos forestales y por el producto *Modis active fire*.

Los módulos no son más que extensiones del SIG software libre gvSIG, que a su vez hacen uso de la biblioteca de algoritmos de análisis espacial libre SEXTANTE, conectados a una base de datos espacial PostGIS.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	III
TABLA DE CONTENIDO	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE ANEXOS	XI
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 – IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Objetivos	5
1.2.1 General	5
1.2.2 Específicos:	5
1.3 Alcance.....	5
1.4 Justificación.....	6
CAPÍTULO 2 – MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 Antecedentes	7
2.2 Bases Teóricas	9
2.2.1 Descripción del Área de Estudio	9
2.2.2 Incendio Forestal	12
2.2.3 Estadísticas de Incendios	13
2.2.4 Riesgo de Incendio	14
2.2.5 Índices Dinámicos	15
2.2.6 Índices de Largo Plazo	17
2.2.7 Variables geográficas del riesgo de incendios.....	17
2.2.8 Riesgo obtenido por teledetección	20
2.2.9 Productos MODIS active fire	23
2.2.10 Evaluación Multicriterio	24
2.2.11 Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	31
2.2.12 Bases de Datos Espaciales	35

CAPÍTULO 3 – MARCO METODOLÓGICO	37
3.1 Tipo de Investigación	37
3.2 Diseño de la Investigación	37
3.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de datos.....	38
3.4. Ciclo de desarrollo de los SIG	38
CAPÍTULO 4 – DESARROLLO.....	44
4.1 Evaluación de las Necesidades	44
4.1.1 Limitar el área de estudio.....	44
4.1.2 De la planilla “Informe del Incendio o Conato”.....	46
4.1.3 De las Estadísticas espacio – temporales.....	50
4.1.4 Del cálculo del índice de riesgo de incendio forestal estático	53
4.1.5 Del cálculo del índice de riesgo de incendio forestal dinámico	55
4.2. Diseño Conceptual.....	58
4. 3 Revisión de datos disponibles.....	58
4.3.1 Datos de incendios.....	58
4.3.2 Datos de la Corporación de los Andes	60
4.3.3 Datos del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente	61
4.3.4 Datos de la Estación de la Fuerza Aérea Venezolana – Aeropuerto “Alberto Carnevali”.....	63
4.3.5 Datos facilitados por la Red Bioclimática de Mérida	64
4.3.6 Imágenes MODIS NDVI del Centro Internacional de Agricultura Tropical	64
4.4. Revisión de software SIG.....	67
4.5. Planificación y Diseño detallado de la Base de Datos	70
4.5.1 Selección de una fuente para cada entidad/atributo de la Lista Principal de Datos	70
4.5.2 Diseño de la base de datos actual (diseño lógico)	72
4.5.3 Definición de procedimientos para convertir los datos desde el medio fuente a la base de datos.....	74
4.6 Construcción de la Base de Datos	76
4.7 Desarrollo de la Aplicación SIG.....	78
4.7.1 Preparación del entorno de desarrollo.....	78
4.7.2 Módulos Parámetros y Registro de incendios	79
4.7.3 Módulos Gestión de incendios y Estadísticas.....	87
4.7.4 Módulo Índice de Riesgo de Incendios Estático	93

4.7.5 Módulo Índice de Riesgo de Incendios Dinámico	98
4.8 Modelado del Índice de Riesgo de Incendios Estático para el año 2004	99
4.8.1 Definición del problema.....	99
4.8.2 Generación de alternativas.....	100
4.8.3 Modelado de los criterios.....	100
4.8.4 Evaluación de las alternativas.....	106
4.9 Índices de Riesgo de Incendios Dinámico	108
4.9.1 Esfuerzos por construir un índice de Riesgo de Incendios Dinámico Tradicional	108
4.9.2 Índice de Stress de Vegetación temporada Noviembre 2007 - Abril 2008.....	109
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	115
5. 1 Validación del Índice de Riesgo de Incendios Estático para el año 2004.....	115
5.2 Análisis de Sensibilidad del Índice de Riesgo de Incendios Estático para el año 2004.....	117
5.3 Validación del Índice de Stress de Vegetación temporada Noviembre 2007 - Abril 2008 ...	119
CONCLUSIONES	122
RECOMENDACIONES.....	124
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
ANEXOS	134

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Estado Mérida.....	10
<i>Figura 2.</i> Evaluación de Riesgo de Incendio.	15
<i>Figura 3.</i> Sistema de integración entre SIG y EMC.....	25
<i>Figura 4.</i> Fases de un proceso de EMC en un entorno SIG.....	29
<i>Figura 5.</i> Escala de medida	30
<i>Figura 6.</i> Análisis de punto ideal, aspectos básicos	30
<i>Figura 7.</i> Operaciones de los SIG.....	33
<i>Figura 8.</i> Componentes básicos de SEXTANTE	35
<i>Figura 9.</i> Proceso de desarrollo SIG.....	39
<i>Figura 10.</i> Estructura interna del símbolo entidad.....	40
<i>Figura 11.</i> El Paradigma de construcción de prototipos	43
<i>Figura 12.</i> Área de estudio	45
<i>Figura 13.</i> Aplicación 1: Registrar “Informe del Incendio o Conato”	47
<i>Figura 14.</i> Aplicación 2: Consultar “Informe del Incendio o Conato”	48
<i>Figura 15.</i> Salida gráfica de la aplicación 2.....	48
<i>Figura 16.</i> Aplicación 3: Modificar “Informe del Incendio o Conato”.....	49
<i>Figura 17.</i> Aplicación 4: Eliminar “Informe del Incendio o Conato”	50
<i>Figura 18.</i> Interfaz gráfica del SIPCIV (consulta).....	51
<i>Figura 19.</i> Interfaz gráfica del SIPCIV (mapa)	51
<i>Figura 20.</i> Aplicación 5: Estadística espacio - temporal.....	53
<i>Figura 21.</i> Aplicación 6: Cálculo de índice de riesgo de incendio estático	54
<i>Figura 22.</i> Salida gráfica de la aplicación 6.....	55
<i>Figura 23.</i> Aplicación 7: Cálculo de índice de riesgo de incendio dinámico	56
<i>Figura 24.</i> Salida gráfica de la aplicación 7.....	56
<i>Figura 25.</i> Primer modelo Entidad - Relación.....	58
<i>Figura 26.</i> Producto MODIS active fire.....	60
<i>Figura 27.</i> Composición 16 días MODIS NDVI.....	65
<i>Figura 28.</i> Imagen de calidad (QA).....	66
<i>Figura 29.</i> Diseño lógico de la Base de Datos (Parte I)	73

<i>Figura 30. Diseño lógico de la Base de Datos (Parte II).....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 31. Archivo CVS para la conversión de datos.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 32. Comando SQL para la conversión de datos.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 33. Opción Exportar a PostGIS</i>	<i>77</i>
<i>Figura 34. Tabla creada por gvSIG en PostGIS</i>	<i>78</i>
<i>Figura 35. Espacio de trabajo Eclipse listo para el desarrollo.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 36. Archivo config.xml</i>	<i>80</i>
<i>Figura 37. Clase extensión Parámetros.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 38. Menú Incendios</i>	<i>81</i>
<i>Figura 39. Interfaz gráfica del módulo Parámetros.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 40. Interfaz gráfica para agregar valor de parámetro</i>	<i>83</i>
<i>Figura 41. Interfaz gráfica para modificar valor de parámetro.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 42. Interfaz gráfica para eliminar valor de parámetro.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 43. Interfaz gráfica del Módulo Registro de Incendios (primera pestaña).....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 44. Vista de incendio.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 45. Interfaz gráfica del Módulo Registro de Incendios (segunda pestaña).....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 46. Interfaz gráfica del Módulo Gestión de Incendios</i>	<i>88</i>
<i>Figura 47. Interfaz gráfica modificando registro de incendios.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 48. Interfaz gráfica eliminando registro de incendios</i>	<i>89</i>
<i>Figura 49. Interfaz gráfica del Módulo Estadísticas.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 50. Interfaz gráfica del Módulo Estadísticas (en resumen).....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 51. Archivo CSV con las estadísticas.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 52. Número total de incendios por día y por municipio.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 53. Vista de estadística.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 54. Interfaz gráfica del módulo Índice de Riesgo Estático</i>	<i>94</i>
<i>Figura 55. Interfaz gráfica Crear Grupo.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 56. Interfaz gráfica Crear Factor.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 57. Interfaz gráfica Crear Restricción</i>	<i>96</i>
<i>Figura 58. Comparación por pares de los grupos y los criterios del árbol de criterios.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 59. Interfaz gráfica del módulo Índice de Riesgo Dinámico</i>	<i>99</i>
<i>Figura 60. Mínima área afectada por incendios</i>	<i>100</i>
<i>Figura 61. Riesgo Integrado.....</i>	<i>101</i>

<i>Figura 62. Cálculo del Riesgo Integrado</i>	<i>107</i>
<i>Figura 63. Valores de riesgo del índice de riesgo estático.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 64. Salida del módulo Índice de Riesgo Estático</i>	<i>108</i>
<i>Figura 65. Mapa de riesgo climático de incendios de vegetación.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 66. Valores de riesgo del índice de riesgo dinámico.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 67. Capa AS₁.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 68. Histograma de la capa AS₁</i>	<i>111</i>
<i>Figura 69. Capa AS₂.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 70. Histograma de la capa AS₂</i>	<i>112</i>
<i>Figura 71. Capa AS₃.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 72. Histograma de la capa AS₃.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 73. Capa AS₉.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 74. Histograma de la capa AS₉</i>	<i>114</i>
<i>Figura 75. Histograma del raster con valores de riesgo</i>	<i>115</i>
<i>Figura 76. Niveles de riesgo de incendio forestal para el 2004.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 77. Niveles de riesgo cuando se aumenta en 20% el peso de Combustible.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 78. Índice de stress de vegetación para el periodo del 06-04-2008 al 21-04-2008</i>	<i>121</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Índice de Utilidad, valores y descripciones	23
Tabla 2 Relaciones espaciales en un SIG	41
Tabla 3 Puntos que limitan el área de estudio	45
Tabla 4 Lista Principal de Datos	57
Tabla 5 Incendios registrados por los Bomberos Forestales de la ULA durante 2001 - 2009	59
Tabla 6 Datos de estaciones meteorológicas disponibles en la Red Bioclimática	64
Tabla 7 Características de GRASS 6.3.0 y gvSIG 1.1	69
Tabla 8 Asociación entre entidad/atributo y fuente	72
Tabla 9 Buffers de Cercanía a Poblados	101
Tabla 10 Matriz de comparación de las categorías de Cercanía a Poblados	101
Tabla 11 Buffers de Cercanía a Vialidad	102
Tabla 12 Matriz de comparación de las categorías de Cercanía a Poblados	102
Tabla 13 Categorías del criterio Vegetación	103
Tabla 14 Matriz de comparación de las categorías de Vegetación	103
Tabla 15 Categorías del criterio Humedad	103
Tabla 16 Matriz de comparación de las categorías de Humedad	104
Tabla 17 Categorías del criterio Temperatura	104
Tabla 18 Matriz de comparación de las categorías de Temperatura	104
Tabla 19 Categorías del criterio Pendiente	105
Tabla 20 Matriz de comparación de las categorías de Pendiente	105
Tabla 21 Matriz de comparación de los objetivos de Riesgo integrado	105
Tabla 22 Matriz de comparación de los objetivos de Ignición	106
Tabla 23 Matriz de comparación de los criterios de Agente causal	106
Tabla 24 Matriz de comparación de los criterios de Combustible	106
Tabla 25 Composiciones NDVI usadas para el índice de riesgo de incendios dinámico	110
Tabla 26 Incendios para validar el Índice de Riesgo de Incendios Estático para el año 2004	117
Tabla 27 Análisis de Sensibilidad de los pesos de los objetivos Agente Causal y Combustible	118
Tabla 28 Incendios temporada Noviembre 2007 - Abril 2008	120
Tabla 29 Incendios temporada Noviembre 2007 - Abril 2008 con confianza > 50	120

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 - Planilla “Registro de Incendio o Conato”	135
--	-----

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son un tipo de incendio que se produce y desarrolla generalmente en zonas de abundante vegetación. Estos incendios se suceden por diferentes causas, provocando daños ecológicos, económicos e incluso la pérdida de vidas humanas. Los Bomberos Forestales de la Universidad de Los Andes son una organización constituida por un grupo de voluntarios que trabajan arduamente en operaciones de control y extinción de incendios forestales, contribuyendo de esta forma en la reducción del área afectada por incendios.

El objetivo general de los Bomberos Forestales de la ULA es evaluar la problemática de los incendios forestales en el ámbito nacional, sin embargo su radio de acción es principalmente el Eje Chama - Mocotíes. Para Hernández y Balbuena (2001) el eje Chama - Mocotíes tiene un área de 150 Km de largo por 2 Km de ancho; es decir, aproximadamente 30000 hectáreas del fondo del valle de las cuencas de los ríos Chama y Mocotíes, ubicados al centro y suroeste del estado Mérida - Venezuela.

Los escasos recursos, tanto humanos como materiales, con los que cuentan los Bomberos Forestales de la ULA podrían ser optimizados si se dispone de una herramienta que permita ubicarlos de una manera apropiada, minimizando el impacto adverso de los incendios forestales. Esta investigación consiste entonces en el desarrollo de un Sistema de Estimación de Riesgo de Incendios Forestales para la Cuenca Alta del Río Chama del Estado Mérida, compuesto básicamente por un índice de riesgo de incendio forestal dinámico y un índice de riesgo de incendio forestal estático, que apoyaran la toma de decisiones respecto a la ubicación de los recursos a corto y largo plazo, respectivamente. El modelado del riesgo de incendio implica el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), ya que se consideran variables que ofrecen mucha variación espacial.

Para lograr el objetivo planteado es necesario procurar el almacenamiento de los datos de los incendios forestales. Por esta razón, se usa la extensión PostGIS que añade

soporte de objetos geográficos a la base de datos libre PostgreSQL. Esta base de datos geográfica se conecta a las extensiones desarrolladas para el SIG libre gvSIG, que facilitan la gestión de los datos de los incendios y generan un conjunto de estadísticas a partir de dichos datos.

Además, se modela y valida un índice de riesgo de incendio forestal estático para el año 2004, usando los datos disponibles y la Técnica de Evaluación Multicriterio Punto Ideal. Se construye una extensión para gvSIG que automatiza el proceso y que a su vez hace uso de la biblioteca de algoritmos de análisis espacial libre SEXTANTE.

Se calculan índices de stress de vegetación para la temporada de incendios Noviembre 2007 – Abril 2008. Estos índices de riesgo de incendios forestales dinámicos se validan y para facilitar su uso a posteriori se construye una extensión para gvSIG que automatiza los cálculos.

La investigación está estructurada de la siguiente manera, en el Capítulo 1 se expone el planteamiento del problema, los objetivos, el alcance y la justificación; en el Capítulo 2 se presentan antecedentes y bases teóricas que sustentan la investigación; en el Capítulo 3 se precisa el tipo y diseño de la investigación, las técnicas e instrumentos de recolección de datos usadas y el ciclo de desarrollo del SIG; en el Capítulo 4 se explica la ejecución del ciclo de desarrollo del SIG y la construcción de los modelos (índices de riesgo de incendios); el Capítulo 5 se dedica a los resultados y a su discusión, resultados fundamentados básicamente en la validación de los modelos. Para finalizar con las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO 1 – IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El propósito de este capítulo es exponer el planteamiento del problema, el objetivo general y los objetivos específicos; así como también el alcance y la justificación de la investigación.

1.1 Planteamiento del problema

Los incendios forestales son un tipo de incendio que se produce y desarrolla principalmente en zonas naturales con vegetación abundante y sus causas pueden ser naturales o no.

Los incendios forestales se suceden a lo largo y ancho del Estado venezolano durante todo el año, pero con mayor intensidad y daño durante la época de sequía, de Noviembre y hasta Abril de cada año, cuando su ocurrencia, generalmente de origen antrópico intencional, crece en forma alarmante. Las regiones con mayor incidencia en el país son la nor-central y central, la oriental y la occidental, en ese orden. Estos incendios producen elevados daños ecológicos que además de la pérdida de la vegetación, incluyen daños tales como la degradación de los suelos, la extinción de la fauna silvestre, la disminución del caudal de los ríos que conforman las cuencas productoras de agua, la contaminación del aire y cambios climáticos; también causan daños económicos tales como la afectación de embalses y sistemas de riego, daños estructurales, disminución en la energía hidroeléctrica generada, deterioro del paisaje, e incluso causan pérdida de vidas humanas (León, 2005).

En Mérida el fuego surge por diversas razones. Sin embargo, los datos sobre las causas de los incendios forestales en el estado demuestran que el 76,23% de las mismas son de origen humano, dando pocas oportunidades a las causas naturales. El estado Mérida es un importante productor de agua para las cuencas del Orinoco y del lago de Maracaibo. Una práctica común en las actividades agrícolas y pastoriles de la región de los andes, es la

utilización del fuego. Esto ha aumentado el riesgo de incendios forestales, trayendo como consecuencia el deterioro de las cabeceras de los ríos y por lo tanto la disminución de la cantidad y calidad del agua y el deterioro del suelo (Jáuregui, 2005).

Los Bomberos Forestales de la ULA reciben de INPRADEM (Instituto de Protección Civil y Administración de Desastres del Estado Mérida) cada dos meses una asignación de Bs. 160. Por otra parte, la Facultad de Ciencias Forestales de la ULA si bien no les asigna dinero, les facilita: comida, un vehículo y artículos de limpieza. El resto de necesidades se cubren gracias a los donativos recibidos de diversas instituciones, en respuesta a las solicitudes presentadas. Además, la condición de “voluntario” de los integrantes del grupo de Bomberos Forestales de la ULA obliga a depender de su disposición.

Como se puede evidenciar, el Grupo de Bomberos Forestales de la ULA cuenta con recursos limitados (tanto humanos como materiales) para el cumplimiento de su labor, convirtiéndose esto en la problemática.

Ampliar el número de recursos humanos hasta el nivel de cobertura que garantice el control de las actuaciones y actividades de riesgo, además de tener difícil viabilidad económica, podría considerarse un gasto innecesario por superfluo al poder actuar sobre la eficacia del recurso existente (Mascaraque et al., 2007). Dado que incrementar el número de recursos muchas veces no es la solución, se propone el desarrollo de un sistema que permita a los Bomberos Forestales de la ULA gestionar datos de su área de influencia; para así generar información que apoye la toma de decisiones respecto a la organización del servicio de prevención.

Estimar el riesgo de incendio forestal involucra identificar la contribución potencial de variables e integrarlas dentro de una expresión matemática, por ejemplo un índice. Este índice cuantifica e indica el nivel de riesgo (San Miguel, 2002). El Sistema de Estimación de Riesgo de Incendios Forestales para la Cuenca Alta del Río Chama del Estado Mérida, consiste en la implementación de: a) un índice de riesgo de incendio forestal estático que

modele aquellas condiciones que permanecen más o menos constantes en el tiempo y que permita planificar las dimensiones y la posición de los distintos tipos de recursos necesarios para gestionar el riesgo de incendios en un amplio territorio, y b) un índice dinámico que modele las condiciones que cambian continuamente y facilite las acciones preventivas capaces de reducir el impacto adverso de incendios sobre una zona y período de tiempo específico.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Desarrollar un Sistema de Estimación de Riesgo de Incendios Forestales para la Cuenca Alta del Río Chama del Estado Mérida.

1.2.2 Específicos:

1. Determinar las fuentes de datos disponibles para seleccionar las que se usarán.
2. Diseñar un módulo que permita la gestión de los datos.
3. Modelar un índice de riesgo de incendio estático para la zona de estudio.
4. Diseñar un módulo que calcule el índice de riesgo de incendio estático modelado.
5. Evaluar diferentes índices de riesgo de incendio dinámicos existentes que puedan ser ajustados a la zona de estudio, a fin de seleccionar el mejor.
6. Diseñar un módulo que calcule el índice de riesgo dinámico seleccionado.

1.3 Alcance

El Sistema de Estimación de Riesgo de Incendios Forestales para la Cuenca Alta del Río Chama del Estado Mérida se implementa usando un Sistema de Información Geográfica (SIG), dada la naturaleza de los datos. Este estudio evalúa la factibilidad de usar diferentes fuentes de datos para la implementación de los índices, entre ellas, imágenes satelitales.

El sistema cuenta con las siguientes funcionalidades: a) Fácil ingreso, acceso e impresión de datos geoespaciales, meteorológicos y de incendios forestales ocurridos en la zona de estudio, b) Elaboración de análisis estadísticos de los incendios forestales, c) Identificación de áreas en riesgo, peligro y posible daño a partir de los índices de riesgo de incendio forestal implementados, d) Evaluación de las predicciones, y e) Análisis de la evolución de las áreas en riesgo, peligro y posible daño.

1.4 Justificación

Los técnicos forestales expertos en la lucha contra incendios son capaces generalmente de evaluar futuras tendencias y localizaciones en la ocurrencia de incendios, pero rara vez pueden proporcionar predicciones concretas para áreas geográficas específicas (Vega et al., 1999). El sistema de estimación de riesgo de incendios forestales propuesto complementaría la experiencia y conocimientos de los expertos del Grupo de Bomberos Forestales ULA. La gestión de todos los datos disponibles se realizará gracias a la capacidad y velocidad de cómputo propia de las computadoras, facilitando de esta forma la planificación de recursos a corto y largo plazo.

En la elección de un índice de peligro se recomienda un análisis preliminar del fenómeno fuego (estacionalidad, distribución, características), así como de la variabilidad ambiental que debe incluirse en el modelo. Este estudio previo permitirá elegir entre los diversos índices existentes o bien desarrollar y formular un índice teóricamente idóneo para la zona (Aguado y Camia, 1998). No hay mucha investigación ni desarrollo en lo que se refiere a índices de riesgo de incendios forestales para regiones de Venezuela. Esta investigación pretende ahondar en este tema, constituyéndose en una contribución importante.

CAPÍTULO 2 – MARCO TEÓRICO

Conociendo la problemática existente y planteado el objetivo de la investigación, para paliar dicha problemática, se hace una revisión de literatura a fin de identificar antecedentes y bases teóricas que la sustenten. Existe un voluminoso cuerpo de literatura relacionada con estimación de riesgo de incendios forestales, un número sustancial se revisó para este trabajo. Sin embargo, a continuación se resumen las consideradas más relevantes.

2.1 Antecedentes

Metodologías para la Evaluación de Riesgo de Incendio Forestal: desde Índices de Largo Plazo (Estáticos) a Índices Dinámicos (Methodologies for the Evaluation of Forest Fire Risk: from Long - Term (Static) to Dynamic Indices), constituye un importante antecedente internacional para esta investigación, por presentar diferentes enfoques para la evaluación del riesgo de incendio forestal que han sido desarrollados en el Centro Unificado de Investigación (Joint Research Center, JRC) en apoyo a la Administración de Incendios Forestales y Protección Civil Nacional y a los cuerpos políticos de la Comisión Europea, responsables por la legislación de este tópico. El Centro de Investigación además de desarrollar nuevos índices de riesgo de incendio forestal, se ha centrado principalmente en la adaptación de los enfoques utilizados por los índices de riesgo de incendio forestal nacionales y locales, que han demostrado su utilidad a nivel de la Unión Europea. Según la escala de tiempo, este conjunto de índices incluye índices estáticos o de largo plazo, índices dinámicos, índices integrados o avanzados que incluyen variables de largo y corto término (San Miguel, 2002).

Como antecedente nacional se presenta *Modelado cartográfico de riesgo de incendios en el Parque Nacional Henri Pittier. Estudio de caso: Vertiente sur, área colindante con la ciudad de Maracay*. En este trabajo se utilizó un Sistema de Información Geográfica aplicado a la vertiente sur del Parque Nacional Henry Pittier, en especial sus

herramientas de análisis multicriterio, para lo cual se digitalizaron algunas variables. Cada una de estas variables se procesó para generar los criterios de las dos capas, objetivos principales escogidas en el modelo de evaluación: riesgo de ignición (RI) y riesgo de propagación (RP). La capa objetivo RI está constituida por los criterios pisos altitudinales, uso de la tierra colindante con el parque, accesibilidad y vegetación sensible a la ignición. La capa objetivo RP fue evaluada para los criterios pendiente, vegetación sensible a la propagación, influencia del viento, pisos altitudinales, hidrografía y cortafuegos. Estos criterios se ponderaron utilizando el Método de las Jerarquías Analíticas y posteriormente se introdujeron en la regla de decisión multicriterio estructurada e incorporada al SIG, generando la cartografía de riesgo para cada capa objetivo. Finalmente se integraron las dos capas objetivos para generar la cartografía definitiva de riesgo de incendios de vegetación (Abarca y Quiroz, 2005). Esta investigación facilitó la estructuración del índice de riesgo de incendio forestal estático a desarrollar.

Índices Predictivos del Riesgo de Incendios para La Cuenca Alta del Río Caroní, es otro antecedente nacional. Plantea el desarrollo y la implementación de un sistema de riesgo de incendios para la cuenca alta del río Caroní, como una herramienta integrada dentro de un SIG. En el sistema se contemplan cuatro índices, dos índices estructurales: el índice de Extremadura y el índice Cartográfico del Caroní, y dos índices meteorológicos: el índice de Monte Alegre y el índice meteorológico de Canadá; estos tipos de índices se complementan. El sistema integrado de los índices se denominó Sistema Apok, este sistema fue implementado como un menú desplegable y una barra de herramientas dentro del software Arcview 3.2. El sistema permite generar los índices para una fecha o rango de fechas en específico a partir de información meteorológica y cartográfica de la zona y datos históricos provenientes del sistema de información para el control de incendios de vegetación (SIPCIV). El sistema Apok ha de utilizarse en el Programa de Control de Incendios de Vegetación (PCIV) de la Compañía Electrificación del Caroní (CVG-EDELCA), como una herramienta para el soporte en la toma de decisiones relacionadas al manejo y control de los incendios de vegetación en el área de influencia del programa (Dávila, 2005). Los primeros índices meteorológicos o dinámicos que considera la presente investigación son los implementados por el Sistema Apok.

Un antecedente local es el trabajo titulado: *Índice de peligro de incendios forestales Mérida y sus alrededores, 1972-1976*. Se hizo una revisión de los sistemas utilizados en varios países; se seleccionó una de las metodologías, la Canadiense. El inicio del cálculo del índice se logró a través de tres elementos: 1) Balance Hídrico Diario; 2) Relación Gráfica Evaporación - Precipitación Total Mensual; 3) Reportes de Incendios Ocurredos. Se determinó el índice de peligro para las 24 horas del día, en los períodos de verano desde el año 1972 hasta 1976 y un período especial (agosto - septiembre 1976) por presentar un número elevado de incendios forestales, para esto se elaboró un programa de computación. Se seleccionó la hora más propicia para el cálculo del índice. Posteriormente, se valoraron los resultados obtenidos del cálculo del índice al correlacionar este con los parámetros meteorológicos utilizados en el sistema y con los incendios forestales ocurridos; también se correlacionó la ocurrencia de incendios con algunas variables climáticas no consideradas para el cálculo (Evaporación, Inundación y Temperatura). Se obtienen correlaciones de significancia entre el índice obtenido y la ocurrencia de incendios y entre el índice y las variables humedad relativa, viento y precipitación. También entre la ocurrencia de incendios y las variables insolación y humedad relativa; pero poca o nula entre la ocurrencia de incendios y las variables viento, precipitación acumulada, evaporación y temperatura (Yegres, 1977). Este trabajo proporcionó una primera lista de variables meteorológicas a considerar para la construcción del índice de riesgo de incendio dinámico.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Descripción del Área de Estudio

Se describe brevemente la ubicación geográfica, el relieve, el clima, la vegetación, la hidrografía y las actividades económicas del Estado Mérida; para luego hacer referencia a la cuenca objeto de estudio, la Cuenca del Río Chama, ubicada en el Estado Mérida. Toda la información que se presenta a continuación es extraída de una página oficial (Gobierno en Línea, 2009).

El Estado Mérida limita al norte con el Lago de Maracaibo y el Estado Trujillo; al sur con los Estados Táchira y Barinas; al oeste con los Estados Táchira y Zulia; y al este con el Estado Barinas, ver Figura 1.

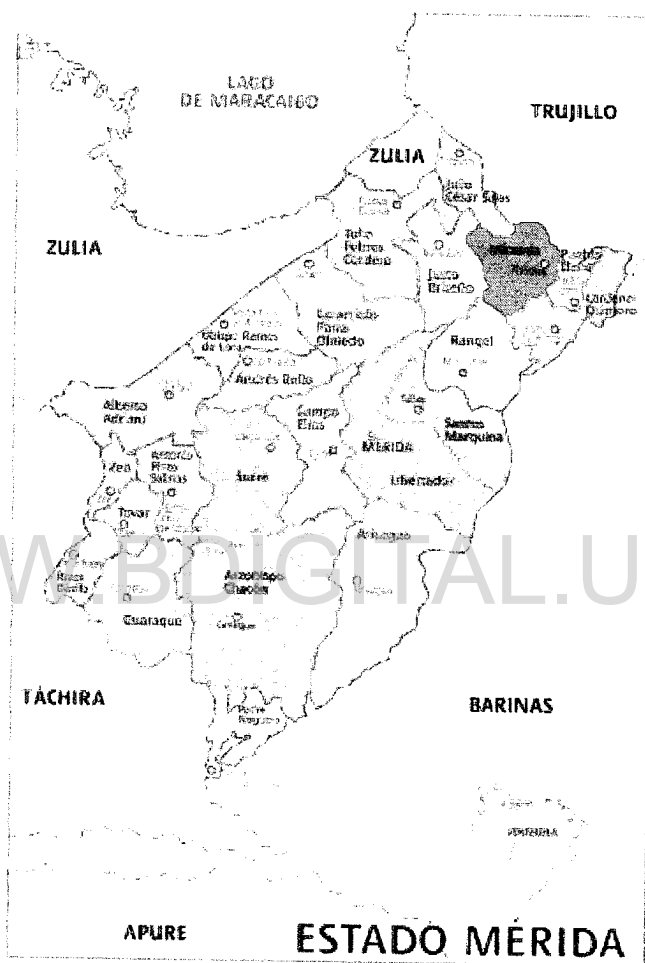


Figura 1. Estado Mérida
Fuente: Gobierno en Línea (2009).

El Estado Mérida es casi totalmente montañoso, salvo una pequeña extensión cerca al lago de Maracaibo con relieve situado por debajo de los 500 metros, al igual que una zona inmediata a la desembocadura del río Chama. La franja de la llanura que se extiende al sur del Lago de Maracaibo y que corresponde al estado Mérida tiene su mayor anchura entre los ríos Escalante y Chama; terminando a orillas del lago, en una llanura cenagosa. La Sierra Nevada constituye el núcleo dominante y reúne las mayores altitudes de Venezuela, como el pico Bolívar a 5.007 m.s.n.m, Bonpland a 4.883 m.s.n.m, entre otras.

Debido a las variaciones altitudinales que presenta el Estado Mérida, se tiene una variación climática enorme, que va desde los climas semiáridos en las partes más bajas del Estado, hasta los climas de páramo y nieves perpetuas en las zonas de mayor altitud. Los tres tipos principales de clima presente son: el clima tropical semiárido, el clima tropical de altura y el clima tropical de alta montaña. El clima tropical semiárido se caracteriza por precipitaciones que oscilan entre 520 mm y temperaturas medias anuales cercanas a 27°C. El clima tropical de altura se localiza por encima de los 1.200 metros, con precipitaciones que oscilan entre 1.648 mm y 1.700 mm, y temperatura media entre los 19°C y 22°C. El clima tropical de alta montaña, se localiza en las zonas por encima de los 2.500 metros, con precipitaciones medias anuales cercanas a los 1.400 mm. Las temperaturas disminuyen a medida que asciende la altitud, oscilando entre 18°C a 12°C, en las zonas de nieves perpetuas alcanzan los 0°C. Los diferentes pisos altitudinales se ven reflejados en una vegetación que varía entre arbustivas y de sabana, pasando por formaciones de selva nublada en las zonas más altas hasta llegar a una vegetación de páramo en las grandes altitudes.

Las aguas del estado Mérida se distribuyen en dos vertientes: La del Caribe a través del Lago de Maracaibo y la del Atlántico, mediante las aguas que van al Orinoco. En la vertiente del Caribe, destaca la cuenca del Chama y sus afluentes. En ella, así como en las cuencas que drenan al sur del lago, se presentan hermosas lagunas formadas por efectos de los glaciares en las cumbres andinas.

Las actividades económicas merideñas se han basado tradicionalmente en el desarrollo de la agricultura. La ganadería de leche y de carne se ha fortalecido en la entidad, gracias a las condiciones climáticas de los pisos más altos, en donde el ganado bovino Holstein se ha aclimatado perfectamente. En las zonas más bajas de El Vigía, la ganadería de carne tiene singular importancia. La actividad piscícola ha tenido un gran auge en los últimos años, creándose numerosos centros de truchicultura con fines comerciales. El desarrollo del turismo, aprovechando la variedad paisajística existente, se ha convertido en una de las principales fuentes de empleos directos e indirectos para un segmento importante de la población, ha contribuido notablemente al mejoramiento y crecimiento de los

servicios hoteleros y de servicios en general. La industria maderera, con la presencia cinco industrias forestales de aserrio, contribuye a la economía estatal.

El río Chama y su afluente el río Mocotíes conforman la cuenca del Río Chama. Para Silva (1999), los ríos Chama y Mocotíes confluyen a 320 m.s.n.m. generando allí una cuenca de 3219 Km², que representa 1/10 del área andina venezolana y 28,5% del Estado Mérida. Esta cuenca tiene diversidad de paisajes producto de la variación de altitud, pluviosidad, insolación de vertientes, geformas y de la intervención del hombre.

Silva (1999) divide la cuenca del río Chama en alta, media y baja tomando en consideración la hipsometría, el perfil longitudinal del río, la orografía y el clima. La cuenca alta llega hasta la desembocadura del río La González en la cota 740 del Chama, más no incluye la quebrada la Sucia que desemboca inmediatamente después de ese río. En esta propuesta, la cuenca baja comprende el área de drenaje posterior a la influencia del río Mocotíes.

2.2.2 Incendio Forestal

Se presentan dos definiciones de incendio forestal. La primera desde un punto de vista técnico, proporcionada por Proyecto FAO TCP/GUA/2903 (2005), fuego que se propaga libremente sin límites preestablecidos que consume material vegetal leñoso o de cualquier otra característica que se encuentre incluido en áreas rurales denominadas forestales, entendiéndose por tales a los terrenos de aptitud preferentemente forestal y aquellos que sin serlo tengan en la actualidad un aprovechamiento forestal.

Ahora, se presenta una definición de incendio forestal desde el punto de vista de la legislación venezolana, según León (2005, p. 216)

“El incendio forestal es un evento provocado o fortuito que causa destrucción del bosque, natural o plantado y de la biodiversidad animal, por la combustión de sus partes componentes, y el mismo encuadra dentro de la calificación de emergencia contenido en la ley del sistema nacional de protección civil y administración de desastres”.

Son muchos los factores que intervienen en la producción y en la propagación de un incendio forestal. Según Vélez (2000), tres elementos forman el clásico triángulo del fuego: combustible, oxígeno y calor. El oxígeno del aire se encuentra siempre en la atmósfera del monte, sin experimentar apenas variaciones. El calor es aportado por la causa (negligencia humana, incendiarios, rayos, etc.) y su efecto es instantáneo, por lo que no se puede predecir con seguridad su aparición. En cambio, el combustible formado por la vegetación forestal en este caso sufre variaciones continuas que influyen decisivamente tanto en la aparición como en la propagación del fuego.

Por otro lado, la Gran Tríada del Comportamiento del Fuego está formada por Topografía, Meteorología y Combustible. Para Vélez (2000), los factores topográficos son inmutables al menos en escalas cortas del tiempo. Los valores de los factores meteorológicos son cambiantes, pero, al contrario de los combustibles, no pueden ser alterados por el hombre; sin embargo, pueden ser objeto de predicción. De ahí la importancia de su conocimiento para poder prever situaciones críticas.

2.2.3 Estadísticas de Incendios

Los entes responsables de la defensa contra los incendios forestales, han de desarrollar programas integrados que actúen en varias direcciones, desde la prevención hasta el combate del fuego y la posterior regeneración de los terrenos afectados. Para dimensionar adecuadamente las líneas de actuación es requisito imprescindible el conocimiento detallado del problema y sus manifestaciones. La herramienta más útil para ello es la Estadística de Incendios, donde cada siniestro constituye un registro de una base de datos y las conclusiones se obtienen a través de su proceso informático (Vélez, 2000).

A propósito, el Grupo de Bomberos Forestales de la ULA requiere de Estadística de Incendios, que facilite la explotación de una base de datos en dos ámbitos: el temporal y el espacial. Al momento de diseñar la base de datos para la Estadística de Incendios, Vélez (2000) recomienda una serie de salidas normalizadas usadas en todos los países del mundo

que disponen de un programa estadístico específico de incendios forestales. Entre ellas se encuentran: Incendios según la extensión, incendios por causas, incendios y superficies afectadas por meses, incendios según condiciones meteorológicas, horas de inicio de los incendios, procedimientos de detección, medios de extinción de incendios.

2.2.4 Riesgo de Incendio

La investigación sobre el uso de los términos peligro y riesgo de incendio se puede resumir en las siguientes líneas: La bibliografía española, al igual que la europea, no diferencia entre los términos riesgo y peligro. Por el contrario, la bibliografía anglosajona sí distingue entre ambos conceptos. En la bibliografía anglosajona, el peligro de incendio es el resultado de la acción de factores constantes y variables que afectan el inicio, desarrollo y dificultad de control de los incendios; así como el daño que ocasionan. Mientras que el riesgo de incendio queda definido por la probabilidad de que se produzca un incendio en un lugar, considerando la naturaleza e incidencia de los agentes causantes (Aguado y Camiá, 1998).

La definición de riesgo de incendio que fundamenta este trabajo, es la presentada por la bibliografía anglosajona. Para San Miguel (2002), estimar el riesgo de incendio forestal implica identificar la contribución potencial de variables e integrarlas dentro de una expresión matemática, un índice. Este índice cuantifica e indica el nivel de riesgo.

Según Chuvieco et al. (1997), la ocurrencia del riesgo de incendio forestal puede ser considerado a diferentes resoluciones espaciales y temporales. Esta investigación es un estudio local (resolución espacial) y de corto y largo plazo (resolución temporal), por eso se compone de un índice dinámico y otro estático o estructural. En la Figura 2, se muestra un índice dinámico y un índice estático, propuesto por San Miguel (2002), así como la integración de estos en un índice avanzado.

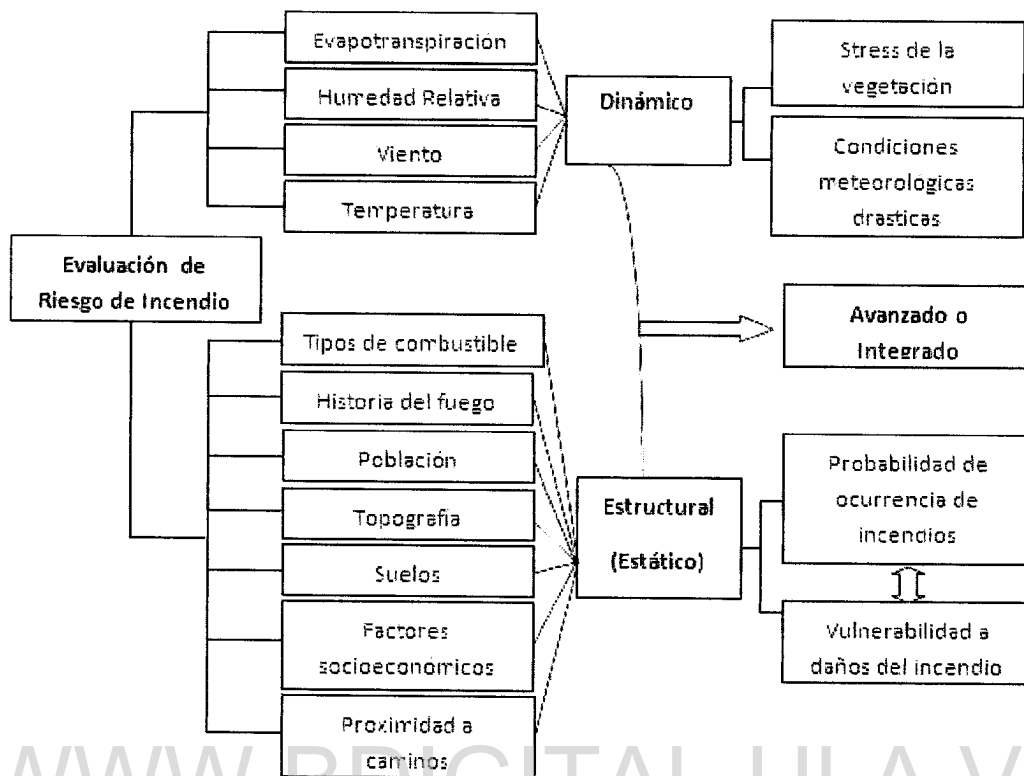


Figura 2. Evaluación de Riesgo de Incendio.
Fuente: San Miguel, Jesús (2002).

2.2.5 Índices Dinámicos

San Miguel (2002) define los Índices Dinámicos como los basados en variables que cambian casi continuamente. Su objetivo es estimar el contenido de agua de la vegetación, o lo que también se conoce como estrés hídrico de la vegetación. Se supone que la vegetación más seca es la más propensa a quemarse. Ya que es difícil y costoso estimar directamente el contenido de agua de la vegetación, variables sustitutas son usadas para estimarlo. Esto se hace a menudo mediante el uso de las variables meteorológicas o mediante el uso de índices de vegetación calculados usando datos de sensores remotos. Otros estudios han usado datos de sensores remotos junto con datos meteorológicos medidos desde tierra para inferir tasas de evapotranspiración, los cuales fueron entonces usados como índices de riesgo de incendio dinámico.

Una práctica frecuente es dividir la estimación del contenido de humedad del combustible en dos tipos, según se trate de combustibles vivos o muertos. El contenido de humedad de los combustibles muertos resulta algo más sencillo de estimar ya que está directamente asociado a las variaciones de las condiciones atmosféricas, principalmente temperatura, lluvia, viento y humedad relativa. En cuanto a la estimación del contenido de humedad de los combustibles vivos, su estimación operativa es más compleja que en los combustibles muertos, ya que varían con mayor independencia de las condiciones atmosféricas, al estar también influida por la capacidad de retención de humedad en el suelo y, sobre todo, la fisiología de las plantas, que hacen que se puedan dar valores muy diversos con las mismas condiciones atmosféricas por eso se plantea la estimación del contenido de humedad de los combustibles vivos a partir de la teledetección espacial. (Nieto et al., 2008)

Los parámetros meteorológicos, considerados de manera individual, presentan generalmente un grado de correlación débil con la ocurrencia de incendios. Por el contrario, cuando estos parámetros se consideran de forma conjunta los resultados son más satisfactorios (Aguado y Camia, 1998).

Los Índices de Peligro Meteorológico integran diferentes variables del tiempo que afectan la ignición o propagación del fuego, tales como temperatura y humedad del aire, precipitación y flujos de viento. Los métodos tradicionales para la estimación del peligro de incendios presentan algunos problemas operacionales, ya que los datos meteorológicos para áreas forestales no están disponibles con frecuencia y las técnicas de interpolación espacial no son siempre apropiadas en áreas de terreno complejo (Aguado et al., 1998)

Aguado y Camia (1998, p. 52) proponen algunos aspectos que son importantes considerar a la hora de utilizar un Índice Meteorológico: "Definición de un índice adaptado a la estimación del peligro de incendio en este territorio, Determinación de clases de peligro, Resolución temporal de la adquisición y de la estimación del grado de peligro, Diseño de la red de estaciones meteorológicas".

2.2.6 Índices de Largo Plazo

El índice de riesgo de incendios de largo plazo está basado en parámetros que no cambian en un corto periodo de tiempo. Ellos incluyen variables que son relativamente estables tales como la topografía y otras variables cuya tasa de cambio es tan lento que pueden ser consideradas estables para un período dado (no más pequeño que un año). Se presentan dos enfoques para el cálculo del índice de riesgo de largo plazo, el primero hace uso de técnicas de decisión multicriterio y el segundo de métodos estadísticos y matemáticos (San Miguel, 2002).

San Miguel (2002) explica cómo desarrollar el índice de riesgo de incendios de largo plazo, usando técnicas multicriterio. Consiste en seleccionar las variables sobre la base de una revisión de la literatura y producir un modelo ponderado en un ambiente SIG. Para integrar esas variables dentro de un índice, los expertos son a menudo provistos de un conjunto de variables candidatas. Entonces, se les pide clasificar esas variables en grupos, y asignar a cada variable un peso de acuerdo a su contribución potencial al riesgo. Esta metodología es algunas veces acompañado por técnicas de decisión multicriterio para remover parte de la subjetividad en la selección e integración de variables.

San Miguel, también se refiere a los métodos matemáticos y estadísticos usados para calcular el índice de riesgo de largo plazo; incluye técnicas de regresión múltiple, desde modelos lineales a modelos logísticos probabilísticos y redes neurales. En el enfoque estadístico, técnicas de regresión graduales son usadas con frecuencia para seleccionar variables explicativas. Sin embargo, este método automático para la selección de variables puede dar lugar a modelos que no reflejan la realidad que se desea analizar.

2.2.7 Variables geográficas del riesgo de incendios

Chuvieco et al. (1997), listan las variables comúnmente utilizadas en la construcción de índices de riesgo de incendio forestal: topografía (elevación, pendiente, aspecto e insolación), vegetación (tipos de combustible, inflamabilidad de las especies), patrones de

tiempo (temperatura, humedad relativa, viento y precipitación), accesibilidad a carreteras, tipo de propiedad de la tierra, distancia a ciudades, suelos, historia del fuego, disponibilidad de agua. A continuación se desarrollan con más detalle estas variables.

2.2.7.1 Topografía

McCombs II (1997) define el término pendiente como el ángulo de inclinación de la superficie de la tierra por encima de la horizontal. Para Vélez (2000), la pendiente es el factor topográfico de mayor importancia en la propagación del fuego. Ejerce influencia en las formas de transmisión de energía haciendo que aguas arriba los fenómenos de convección y radiación sean más eficientes; por ello, mientras más inclinadas sean las laderas, mayores serían las velocidades de propagación de un fuego que asciende por ellas.

2.2.7.2 Vegetación

Para Chuvieco et al. (1997, p. 95)

“La gran variedad de características de la vegetación relacionadas a la difusión del fuego ha sido resumidas por la definición de diferentes tipos de combustibles (Deeming et al., 1978; Andrews, 1986). Un tipo de combustible puede ser definido como una clasificación de especies de vegetación de acuerdo a sus propiedades para combustión (carga de combustible, densidad, continuidad vertical, compactación, área al radio de volumen; Anderson, 1982)”.

De los combustibles depende, más que de cualquier otro factor, el inicio y la propagación del fuego, constituyendo el punto esencial de todo sistema de protección contra incendios y sobre el que debe recaer el mayor esfuerzo, por ser el único factor sobre el que cabe actuar directamente y de manera preventiva. Los otros factores que influyen en el incendio deben ser considerados en relación con los combustibles (Vélez, 2000).

2.2.7.3 Patrones de Tiempo o Meteorológicas

Vélez (2000) clasifica las variables meteorológicas que influyen en los incendios forestales en dos grupos, las que afectan la posibilidad de inicio del fuego (Radiación solar, Precipitación, Temperatura del aire, Humedad relativa) y las que inciden en la velocidad de propagación (Velocidad del viento, Dirección del viento). El primer grupo de factores influye en la humedad de los combustibles y, aunque también afectan a la propagación del fuego, tienen una mayor influencia en su inicio. El segundo grupo afecta fundamentalmente al aporte de comburente, oxígeno, a la combustión y a los procesos de transmisión de energía en el incendio, por lo que influyen decisivamente en el comportamiento del fuego.

2.2.7.4 Factor humano

Evaluar la acción humana como agente de ignición resulta una tarea compleja, entre otras razones por la dificultad para obtener datos sobre la cantidad de personas presentes en una zona forestal, las actividades que realizan y cómo utilizan el fuego. De hecho, los datos temporales y diarios necesarios para evaluar el factor humano del riesgo de incendio no están generalmente disponibles tal y como lo pueden estar otras variables como la temperatura. Además, el hombre, es uno de los elementos más dinámicos del espacio y su actividad o actitudes, en ciertas ocasiones, no tiende a seguir patrones espaciales determinados, o al menos, resulta más difícil determinarlos, como es el caso de la piromanía o ciertas motivaciones intencionadas. Sin embargo, para otro tipo de causas, como las relacionadas con las actividades recreativas o con las quemas agrícolas y ganaderas, sí que parece más sencillo obtener variables espaciales.

Todas estas dificultades han llevado frecuentemente a adoptar dos tipos de soluciones al respecto; por una parte a dejar el componente de riesgo humano fuera de los modelos de predicción o, al menos, a tratarlo de manera muy marginal, y, por otra, a obtener algunos estimadores indirectos de las actividades humanas de riesgo, es decir, indicadores de actividades que sean causa habitual de incendio, y que principalmente son

de carácter estructural, es decir, hacen referencia a los rasgos más permanentes del territorio y la población. Los estudios de riesgo de incendios recientes consideran, junto a variables físicas, factores o variables humanas. En ellos se utilizan fundamentalmente variables relacionadas con las actividades recreativas en el monte, las vías de comunicación (proximidad a carreteras y sendas, etc.), o con la presión y presencia antrópica (densidad de población, asentamientos humanos). Este tipo de variables son las que, desde el principio, más se han utilizado en casi todas las investigaciones, ya que son las más fácilmente espacializables, aunque, dependiendo de las zonas, no siempre son las más importantes (Martínez, 2000).

2.2.8 Riesgo obtenido por teledetección

En esta sección se retoma el tema de los Índices Dinámicos, pero esta vez no se abordan los métodos tradicionales, sino la alternativa que representa el uso de imágenes satelitales. Se descartan los métodos tradicionales por no contar con los datos necesarios para su implementación.

Numerosos autores han señalado el interés de utilizar imágenes de satélite para efectuar un seguimiento y valoración del peligro de incendio, principalmente por su capacidad en proporcionar información sobre áreas extensas, a veces inaccesibles, con la frecuencia temporal que requiere esta. Sin embargo, el riesgo obtenido por teledetección no corresponde exactamente con los riesgos típicos considerados habitualmente: ignición, propagación, etc. Es más bien un riesgo derivado de la condición de la vegetación, dado que el sensor informa de la situación de esta y de las condiciones meteorológicas determinadas a partir de las medidas del satélite (Vélez, 2000).

Los Índices de Vegetación, obtenidos a partir de imágenes satelitales, están diseñados para proveer una comparación permanente y consistente de los cambios temporales y espaciales de la vegetación al responder a la cantidad de radiación fotosintética activa en determinado pixel, al contenido de clorofila, área foliar y a las características estructurales de las plantas (Barona et al., n.d.).

Estudios previos han examinado correlaciones entre índices de vegetación y la humedad del combustible vivo (Peterson et al., 2008). El contenido de humedad de la vegetación es calculada por Chuvieco et al. (2001), con la Ecuación 1:

$$CH = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad (1)$$

donde:

CH: contenido de humedad, expresado en porcentaje.

P_h : es el peso en gramos de la muestra verde

P_s : el peso en seco

Peterson et al. (2008) se refieren a la humedad del combustible vivo usando sus siglas en inglés (LFM), ellos exponen:

“Weise et al. (1998) sugieren que el peligro de incendio puede ser aproximado usando LFM, con peligro de incendio bajo para $LFM > 120\%$, peligro de incendio moderado para $120\% > LFM > 80\%$, peligro de incendio alto para $80\% > LFM > 60\%$ y peligro de incendio extremo para $LFM < 60\%$ ”.

Para estos mismos autores el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI) ha sido el más comúnmente usado en investigación de Humedad de Combustible Vivo. Illera (1995) presenta un procedimiento basado en el análisis de la evolución temporal del NDVI, para evaluar peligro de incendio forestal de larga escala, por medio de imágenes NOAA-AVHRR. El autor describe el índice de peligro como la suma de las pendientes NDVI de la temporada de incendios. La Ecuación 2 es utilizada para el cálculo de dicho índice.

$$AS_n = \sum_{i=1}^n \frac{NDVI(t_i) - NDVI(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \quad (2)$$

donde:

AS: indicador de pendiente acumulada

t: es el día del año

El valor de AS es calculado con la frecuencia dada por las composiciones NDVI. Se presume que en áreas forestales el índice presente valores negativos durante los periodos de peligro. También presume que el decremento supone un incremento en el stress hídrico y en consecuencia un incremento en el peligro de incendios.

2.2.8.1 Índices de Vegetación usando MODIS

MODIS (*Moderate- Resolution Imaging Spectroradiometer*) incluye dos satélites (MODIS-Terra y MODIS-Aqua) que proporcionan imágenes de la superficie entera del globo cada 1 a 2 días. Estas imágenes contienen información de alta sensibilidad radiométrica en 36 bandas espectrales y a tres diferentes resoluciones: 250 m, 500 m y 1000 m. El área de cobertura es de $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ divididos en “tiles” o cuadros con una cobertura global (Barona et al., n.d.).

Son dos los índices de vegetación MODIS, el clásico Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI) y uno recientemente desarrollado el Índice de Vegetación Mejorado (EVI), que son medidas espectrales de la cantidad de vegetación presente en la tierra. MODIS-NDVI describe el verdor relativo de la vegetación de la tierra en una escala de menos uno (-1) a más uno (+1). Las composiciones de 16 días del producto minimizan los problemas de cobertura de nubes sustituyendo un pixel cubierto de nubes con un pixel posterior no contaminado dentro del período de los 16 días. Esas composiciones reflejan el estado de la vegetación actual a una resolución temporal suficiente (Neteler, 2004)

Aparte del NDVI, de las imágenes se puede extraer información sobre su calidad, conocida como Evaluación Científica de la Calidad del Conjunto de Datos (*Quality Assessment Science Data Set*, QASDS). Para Knight et al. (2006) QASDS proveen una gran cantidad de información relacionada a problemas de calidad potenciales de píxeles NDVI individuales, incluyendo cantidad de aerosol atmosférico, presencia de cobertura de

nubes, presencia de cobertura de nieve y hielo, probabilidad de sombra, entre otras. Esta información es resumida en el Índice de Utilidad el cual oscila entre “calidad demasiado baja para ser útil” a “calidad perfecta”.

La Tabla 1 muestra los diferentes valores que puede tomar el Índice de Utilidad y sus descripciones, según *The Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC). Estos valores corresponden a los bits del 2 al 5 (leídos de derecha a izquierda) de un código binario de 16 bits.

Valor	Descripción
0000	La más alta calidad
0001	De menor calidad
0010	Calidad decreciendo
0100	Calidad decreciendo
1000	Calidad decreciendo
1001	Calidad decreciendo
1010	Calidad decreciendo
1100	De calidad más baja
1101	Calidad tan baja que no es útil
1110	Datos erróneos
1111	No útil por alguna otra razón/no procesada

Tabla 1 Índice de Utilidad, valores y descripciones
Fuente: *The Land Processes Distributed Active Archive Center*

2.2.9 Productos MODIS active fire

Giglio et al. (2003) caracterizan los productos MODIS active fire como aquellos que proveen información acerca de incendios que arden activamente, siendo la base de estos productos un algoritmo de detección que identifica los incendios activos, dentro de cada banda MODIS.

La ubicación de un punto de calor/fuego activo MODIS corresponde al centro de un pixel, de un kilómetro, aproximadamente, que contiene uno o más puntos de

calor/incendios que arden activamente. En la mayoría de los casos, los puntos de calor son incendios de vegetación, pero a veces corresponden a una erupción volcánica o el destello de un pozo de gas. No hay forma de saber qué tipo de anomalía térmica se detecta sobre la base únicamente de datos MODIS. Los atributos de los puntos de calor/fuegos activos son, entre otros: latitud y longitud del punto central del pixel, la fecha de adquisición, la hora del sobrevuelo del satélite, si la detección fue hecha por el satélite Terra o Aqua, la confianza de la detección que es una bandera de la calidad del pixel con punto de calor/fuego activo (Fire Information for Resource Management System, 2009).

2.2.10 Evaluación Multicriterio

La Evaluación Multicriterio puede definirse como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones, situándose en el ámbito de la teoría de decisiones (Gómez y Barredo, 2004).

La diferencia más significativa entre el Análisis de Decisión Multicriterio Espacial y el Análisis de Decisión Multicriterio convencional es la presencia explícita de un componente espacial (Sharifi y Retsios, 2004). La Figura 3 presenta un diagrama de Gómez y Barredo (2004), que engloba los elementos que constituyen el proceso de Evaluación Multicriterio (EMC) en el entorno de los SIG, y además muestra las relaciones que entre ellos se establecen.

Un objetivo puede entenderse como una función a desarrollar, estos pueden ser múltiples en determinados problemas y a su vez ser complementarios o conflictivos. Los criterios son el punto de referencia para una decisión a ser tomada, pudiendo ser medidos y evaluados. Los criterios son de dos tipos: factores y limitantes. Los factores realzan o detractan la capacidad de asentamiento de una alternativa específica, medidos en escala continua. Por otra parte, los limitantes restringen la disponibilidad de algunas alternativas, generando una capa binaria (Gómez y Barredo, 2004).

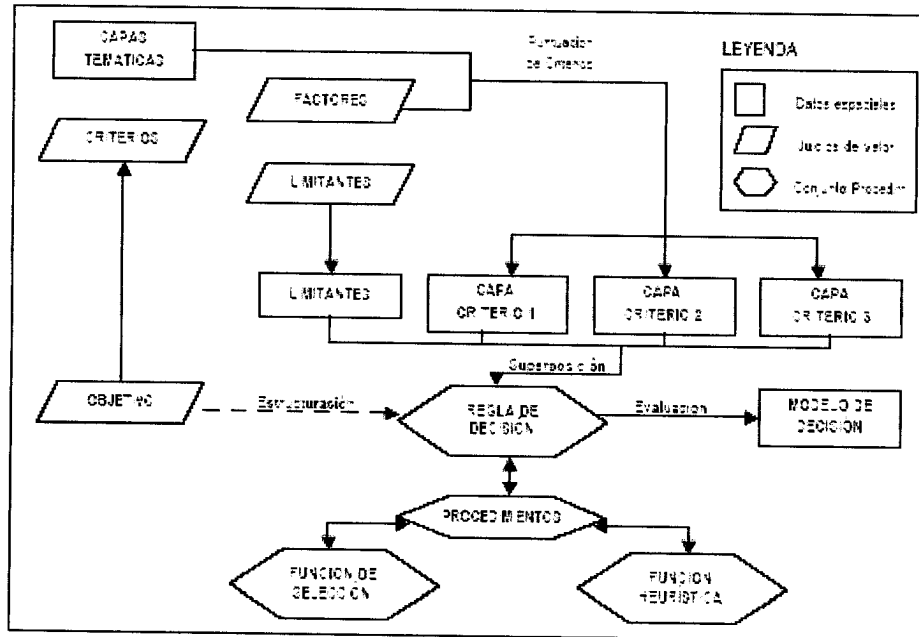


Figura 3. Sistema de integración entre SIG y EMC
Fuente: Gómez y Barredo (2004)

La regla de decisión es el procedimiento a través del cual cada alternativa ha recibido un valor, orden o rango de capacidad de acuerdo con la actividad evaluada. La regla de decisión puede realizar a priori dos tipos de procedimientos: la función de selección y la selección heurística. La primera ofrece un medio matemático realizando algún tipo de optimización, mientras que la función heurística especifica un procedimiento a seguir, en vez de una función a evaluar. El proceso de aplicar la regla de decisión sobre las capas - criterio se ha llamado evaluación, y producirá finalmente el modelo de decisión (Gómez y Barredo, 2004).

Malczewski (1999) presenta una clasificación de los problemas de decisión multicriterio, basado en sus componentes: Toma de decisión multiatributo contra toma de decisión multiobjetivo, problemas de toma de decisión individual contra grupal, y decisiones bajo certidumbre contra bajo incertidumbre.

Para Musso y Taboada (2005) las Técnicas de Decisión Multiatributo se adaptan mejor a procesos de selección o evaluación de un conjunto discreto de alternativas y al

modelo de representación raster o matricial, mientras que los procedimientos de las Técnicas de Decisión Multiobjetivo se adecúan a problemas de diseño o búsqueda y al modelo de representación vectorial.

Los problemas de toma de decisión multiatributo y toma de decisión multiobjetivo son clasificados como problemas de toma de decisión individual o grupal dependiendo de la estructura del objetivo de preferencia. Si hay un solo objetivo de preferencia, el problema es considerado como una toma de decisión individual a pesar del número de tomadores de decisiones involucrados en el proceso. Sin embargo, si los intereses individuales o de grupo son caracterizados por diferentes objetivos, el problema se convierte en una toma de decisión grupal. Si el tomador de decisión tiene conocimiento perfecto del ambiente de decisión y la cantidad de conocimiento disponible es suficiente, entonces la decisión es considerada como decisión bajo certidumbre, en otro caso es considerada bajo incertidumbre, subdividiéndose esta última en toma de decisión difusa o probabilística (Malczewski, 1999).

Kodikara (2008) citó a Stewart quien categorizó la incertidumbre en dos grupos, la incertidumbre interna relacionada a los procesos de análisis y estructuración del problema, y la incertidumbre externa referida a la naturaleza del medio ambiente y, por ende, las consecuencias de un determinado curso de acción que pueden estar fuera del control del tomador de decisiones. Además, reportó que bajo muchas circunstancias, la incertidumbre interna puede ser manejada con una mejor estructuración del problema y/o por un apropiado análisis de sensibilidad y robustez, pero la incertidumbre externa es mejor manejada con respuestas de una técnica natural como el pronóstico.

A continuación, se tratará sobre los métodos o técnicas de la Evaluación Multicriterio (EMC). Para Gómez y Barredo (2004, p. 85).

“Una clasificación de métodos de EMC, desde el punto de vista del tipo de procedimientos que desarrollan, es presentado por Jankowski (1995). En ellas las técnicas de EMC son clasificadas de acuerdo al nivel del proceso de demanda cognitiva que demandan del centro decisor y el método de agregación de puntuaciones de criterios y prioridades establecidos”.

Según dicha clasificación, se distinguen las técnicas compensatorias y las no compensatorias. Para Bosque y García (2000) existen algunos problemas importantes para un correcto uso de la EMC dentro de un SIG. En especial el amplio número de alternativas habitualmente existentes en un problema de planificación ambiental, que en muchas ocasiones coinciden con los puntos del territorio, dificulta el empleo de muchas Técnicas de Evaluación Multicriterio. La razón estriba en que algunas de las reglas de decisión usadas a veces no son capaces de comparar entre sí, en un período de tiempo razonable, todas las alternativas. Por ello, lo habitual es utilizar reglas de decisión compensatorias, en ellas el mecanismo de combinación de los criterios permite que las valoraciones bajas en uno o varios factores se compensen con el valor alto en uno (o más de uno) de los restantes factores. De este modo la solución elegida puede resultar poco adecuada en alguno de los factores.

Se hizo una revisión de literatura para conocer las técnicas compensatorias de Evaluación Multicriterio que pueden ser utilizadas en conjunto con un SIG. Para Bosque y García (2000, p. 8-9)

“Entre las reglas de decisión compensatorias más empleadas en los SIG se encuentran las de la suma lineal ponderada de los criterios (ver el trabajo de Eastman y otros, 1993 y el programa SIG: IDRISI para WINDOWS) o el análisis de la distancia del conjunto de los criterios al punto ideal (Barredo, 1996). Con cualquiera de ellas es posible obtener muy interesantes resultados, de manera que se consigue valorar de modo muy detallado y preciso las distintas soluciones generadas, estableciendo de este modo un buen planeamiento ambiental, bien fundado y por ello más viable de aplicar y desarrollar”.

Siendo más específicos, entre las técnicas de Evaluación Multicriterio utilizadas para la construcción de índices de riesgo de incendios tenemos: Método de las Jerarquías Analíticas que generó la cartografía de riesgo de incendio en el Parque Nacional Henri Pittier (Abarca y Quiroz, 2005) y la Técnica para el Orden de las Preferencias por Similitud a la Solución Ideal con que se calculó un índice estático de riesgo de incendio forestal en la comunidad autónoma de Galicia (Musso y Taboada, 2005). Para Santé y Crecente (2005), el análisis de punto ideal es más fácil de implementar en SIG que otras técnicas más

complejas, basadas en la comparación de alternativas, que requieren un mayor tiempo de procesamiento informático.

Como en otros tipos de modelos, la aplicación de una Evaluación Multicriterio debería finalizar con un análisis de sensibilidad que permita conocer la robustez de los resultados. Ya se ha mencionado la importancia del análisis de sensibilidad en el manejo de la incertidumbre interna en este tipo de problemas. Para Chen et al. (2009) la propuesta más común se basa en variar criterios y sus pesos los cuales representan parámetros de entrada con el fin de comprender el modelo y sus limitaciones.

La Figura 4 presenta las fases de un proceso de EMC en un entorno SIG, según Gómez y Barredo (2004).

A continuación se describe el método de ponderación y la técnica de evaluación multicriterio utilizados para la construcción del índice de riesgo de incendio estático.

2.2.10. 1 Método de Comparación por Pares de Saaty

Es necesario determinar los pesos de los factores que van a ser considerados en la regla de decisión. Un método que permite hacer esto es el de Comparación por Pares de Saaty, procedimiento que parte de establecer una matriz cuadrada en la cual el número de filas y columnas está definido por el número de factores a ponderar, así se establece una matriz de comparación entre pares de factores, comparando la importancia de uno sobre cada uno de los demás, posteriormente se determina el vector propio principal, el cual establece los pesos y el valor propio que proporciona una medida cuantitativa de la consistencia de los juicios de valor entre pares de factores. La escala de medida establecida para la asignación de los juicios de valor, es una escala de tipo continuo (razón) que va desde un valor mínimo de $1/9$ hasta 9, ver Figura 5 (Gómez y Barredo, 2004).

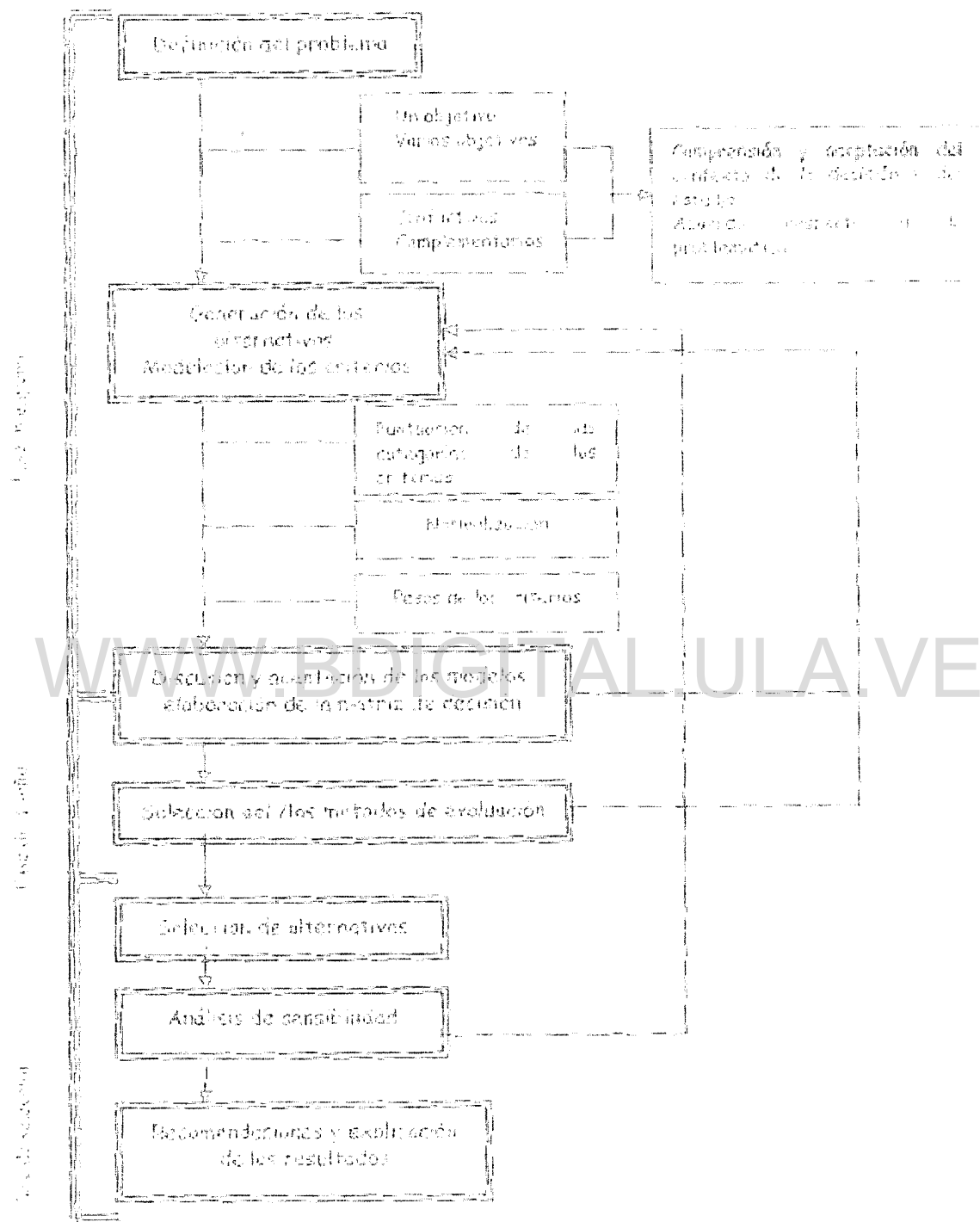


Figura 4. Fases de un proceso de EMC en un entorno SIG
Fuente: Gómez y Barredo (2004)



Figura 5. Escala de medida
Fuente: Gómez y Barredo, 2004

2.2.10.2 Técnica de Punto Ideal

La técnica del punto ideal se basa en el cálculo de los desvíos de cada alternativa con un punto ideal que se debe considerar inalcanzable; posteriormente es comparada la distancia entre cada alternativa y el ideal en un espacio multivariado, donde cada criterio representa un eje (Gómez y Barredo, 2004).

La Figura 6 muestra los aspectos básicos del Análisis de Punto Ideal, donde se consideran los criterios como ejes de un sistema de referencia (X, Y) y M el punto ideal inalcanzable para las alternativas del conjunto disponible, las cuales están constreñidas dentro de P . x^* se constituye en la alternativa ideal, formada por los atributos máximos de cada criterio, que fija un punto de referencia cuantificable y medible en relación al conjunto de alternativas seleccionables P (Gómez y Barredo, 2004).

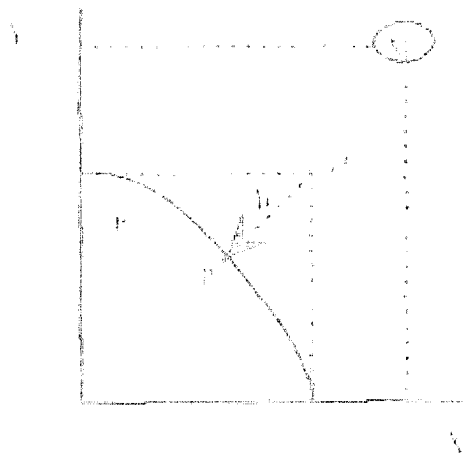


Figura 6. Análisis de punto ideal, aspectos básicos
Fuente: Gómez y Barredo, 2004

Es posible asignar pesos a los criterios, los cuales pueden introducirse en la ecuación de cálculo de la distancia como un factor modificador de los desvíos. Por otro lado, al normalizar el valor de las alternativas entre 0 y 1 las coordenadas del punto ideal serán 1 en cada uno de los criterios. Las Ecuaciones 3 y 4 son presentadas por Gómez y Barredo (2004), la primera permite calcular la distancia al punto ideal y la segunda es usada para normalizar:

$$L_p = \left[\sum_{j=1}^n w_j |x_{ij} - 1|^p \right]^{1/p} \quad (3)$$

donde:

L_p : distancia de cada alternativa al punto ideal x^*

w_j : peso del criterio j

x_{ij} : valor de la alternativa i en el criterio j

p : métrica para el cálculo de la distancia ($p=2$ corresponde a la distancia euclidiana)

$$e_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (4)$$

donde:

e_{ij} : valor normalizado de la alternativa i en el criterio j

x_{ij} : valor de la alternativa i en el criterio j

max y min: los valores mínimos y máximos de las alternativas en cada criterio

2.2.11 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Gómez y Barredo (2004, p. 1) definen los Sistemas de Información Geográfica como “una tecnología integradora que une varias disciplinas con el objetivo común del análisis, creación, adquisición, almacenamiento, edición, transformación, visualización, distribución, etc. de información geográfica (Goodchild, 2000)”.

En la Figura 7 se pueden apreciar seis grupos genéricos de operaciones SIG, presentados por Gómez y Barredo (2004).

Chuvieco et al. (1997) justifican el uso de los SIG en la construcción de índices de riesgo de incendios, porque estos índices implican considerar varias variables que ofrecen mucha variación espacial. Las capacidades de integración y de análisis espacial de un SIG las hacen herramienta ideales para el modelado del riesgo de incendio.

2.2.11.1 gvSIG

gvSIG es un SIG de escritorio. Anguix y Díaz (2008) definen a los SIG de escritorio como un software que es instalado y se ejecuta en una computadora personal y permite a usuarios mostrar, consultar, actualizar y analizar datos acerca de ubicaciones geográficas y la información asociada a esas ubicaciones. Esto significa que el software no es ejecutado en un servidor ni accedido remotamente o controlado desde una computadora diferente.

Para Steiniger y Bocher (2009) probablemente, el proyecto de mayor envergadura en términos de recursos financieros y desarrollo es actualmente el proyecto gvSIG. Ha sido fundado por el Consejo Regional de Infraestructura y Transporte (Council for Infrastructures and Transportation, CIT) de Valencia - España para sustituir software de funcionalidad similar como ArcView de ESRI, usado por autoridades municipales. Ya que el gobierno regional se propone migrar todos los sistemas a una infraestructura informática basada en Linux. El desarrollo de gvSIG comenzó a finales de 2003 y está liderado por la empresa IVER SA (España). Varias universidades y otras compañías están incluidas en el proyecto.

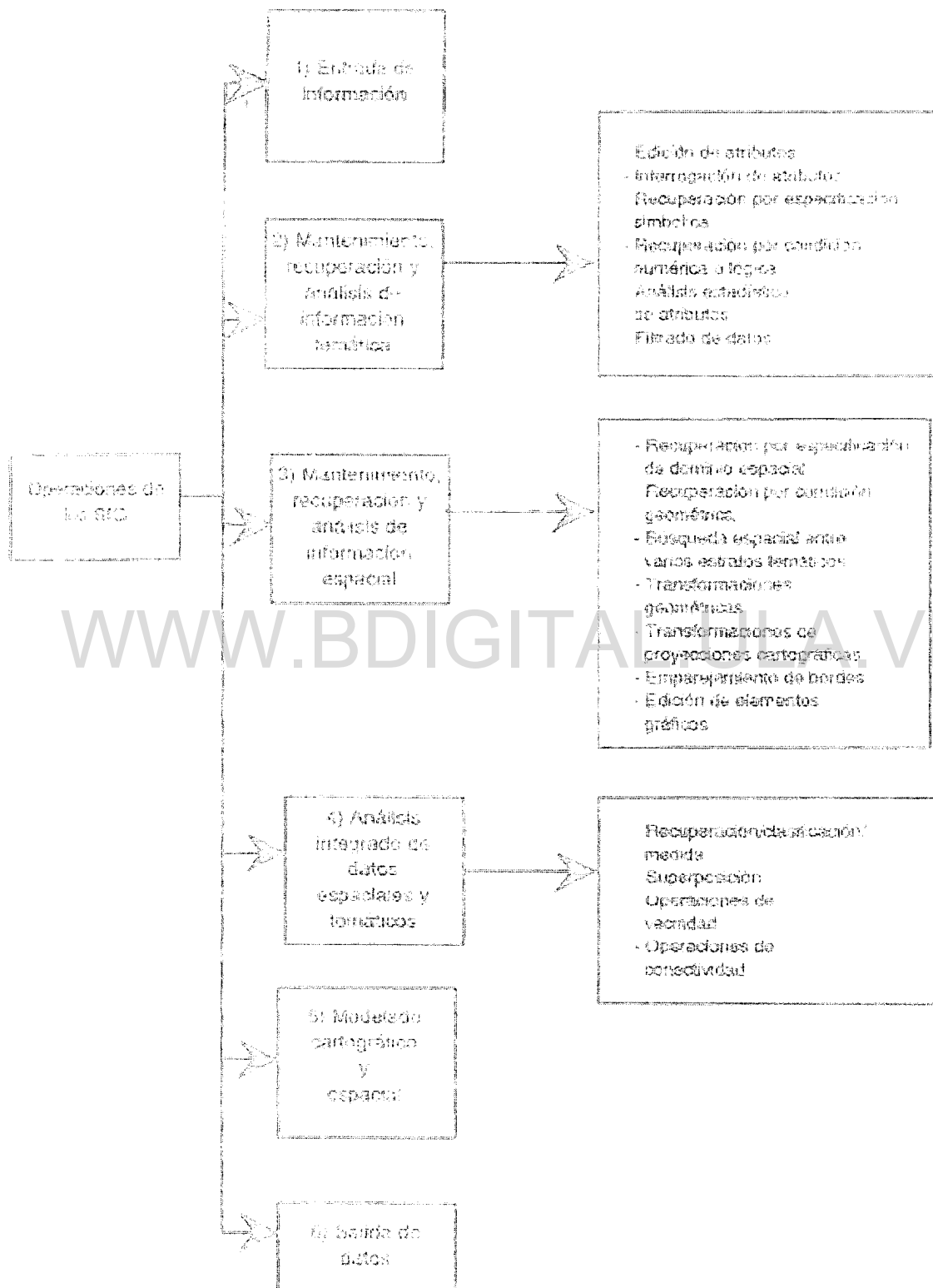


Figura 7. Operaciones de los SIG
Fuente: Gómez y Barredo (2004)

gvSIG es definido en su portal como una herramienta orientada al manejo de información geográfica, que se caracteriza por una interfaz amigable, siendo capaz de acceder a los formatos más usuales de forma ágil tanto raster como vectoriales. Integra en una vista datos tanto locales como remotos a través de un origen WMS, WCS o WFS. Está orientada a usuarios finales de información de naturaleza geográfica, de cualquier parte del mundo (actualmente dispone de interfaz en castellano, valenciano, inglés, alemán, checo, chino, euskera, gallego, griego, francés, italiano, polaco, portugués, portugués-brasileño, rumano, ruso, serbio, swahili y turco). Dada su naturaleza de software libre se ha hecho un especial hincapié en la extensibilidad del proyecto de forma que los posibles desarrolladores puedan ampliar las funcionalidades de la aplicación fácilmente, así como desarrollar aplicaciones totalmente nuevas a partir de las librerías utilizadas en gvSIG, siempre y cuando cumplan la licencia GPL (gvSIG, 2009).

Para Peñarrubia (2009) al momento de desarrollar una extensión en gvSIG, se parte de una aplicación prácticamente vacía que aporta básicamente una gestión de ventanas y una carga de plugins basada en ficheros de configuración.

2.2.11.2 SEXTANTE

SEXTANTE es una plataforma para análisis especial que hace fácil implementar y usar geoalgoritmos. Los elementos principales que componen la arquitectura de SEXTANTE son:

- ✓ Un conjunto de clases bases las cuales definen un proceso API.
- ✓ Un conjunto de algoritmos basados en esas clases.
- ✓ *Bindings* que conectan los algoritmos con las fuentes de datos

La Figura 8 ilustra la estructura de SEXTANTE. Los *bindings* de datos son los mecanismos usados por SEXTANTE para conectar los algoritmos a diferentes fuentes de datos. Usando esto, SEXTANTE puede ejecutarse en diferentes SIG y puede proveer capacidades de análisis espacial a diferentes aplicaciones, independientemente del modelo

de datos que ellos usen. gvSIG es uno de ellos y probablemente la plataforma más popular de usar SEXTANTE.

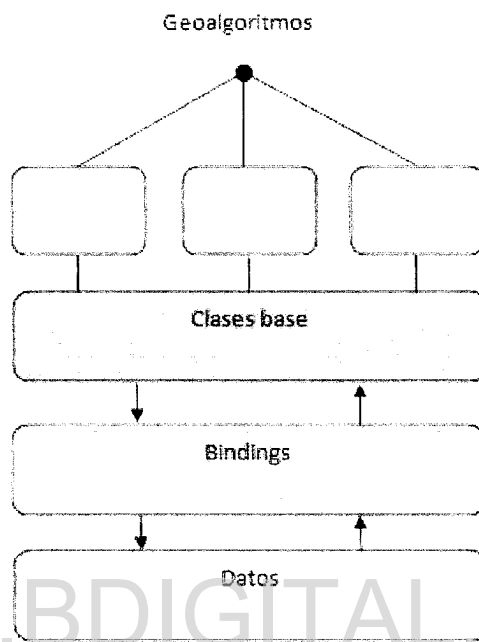


Figura 8. Componentes básicos de SEXTANTE
Fuente: Olaya, 2009

SEXTANTE provee tres interfaces básicas que han sido implementadas para permitir a los algoritmos acceder a los datos: *IRasterLayer*, *IVectorLayer* e *ITable* (Olaya, 2009).

2.2.12 Bases de Datos Espaciales

Hartmut (1994) presenta una definición de Base de Datos Espacial, como la de un sistema de base de datos que ofrece tipos de datos espaciales en su modelo de datos y lenguaje de consulta, y soporta tipos de datos espaciales en su implementación, proporcionando por lo menos indexado espacial y métodos de unión espacial. Los sistemas de base de datos espaciales ofrecen la tecnología de base de datos para los sistemas de información geográfica y otras aplicaciones.

2.2.12.1 PostGIS

PostGIS es definido en su portal como un módulo que añade soporte de objetos geográficos a la base de datos objeto-relacional PostgreSQL. En efecto, PostGIS habilita espacialmente al servidor PostgreSQL, lo que le permite ser utilizado como una base de datos espacial para Sistemas de Información Geográfica. PostGIS ha sido desarrollado por la empresa canadiense Refraction Research, como un proyecto en tecnología de base de datos espacial de código libre. PostGIS es liberado bajo la Licencia Pública General de GNU (PostGIS, 2009).

Con PostGIS se pueden usar todos los objetos que aparecen en la especificación OpenGIS como puntos, líneas, polígonos, multilíneas, multipuntos y colecciones geométricas. Ejemplos de la representación en modo texto:

```
POINT(0 0 0)
LINESTRING(0 0,1 1,1 2)
POLYGON((0 0 0,4 0 0,4 4 0,0 4 0,0 0 0),(1 1 0,2 1 0,2 2 0,1 2 0,1 1 0))
MULTIPOINT(0 0 0,1 2 1)
MULTILINESTRING((0 0 0,1 1 0,1 2 1),(2 3 1,3 2 1,5 4 1))
MULTIPOLYGON(((0 0 0,4 0 0,4 4 0,0 4 0,0 0 0),(1 1 0,2 1 0,2 2 0,1 2 0,1 1 0)),((-1 -1 0,-1 -2 0,-2 -2 0,-2 -1 0,-1 -1 0)))
GEOMETRYCOLLECTION(POINT(2 3 9),LINESTRING(2 3 4,3 4 5))
```

OpenGIS define dos formas de representar los objetos espaciales: (WKT) *Well-know text* como los ejemplos anteriores y (WKB) *Well-know binary*. Las dos formas guardan información del tipo de objeto y sus coordenadas. La especificación OpenGIS requiere que los objetos incluyan el identificador del sistema de referencia espacial (SRID) (Manual PostGIS).

Cuando se inserta un objeto espacial en la base de datos el SRID es requerido, por ejemplo:

```
INSERT INTO SPATIALDATABASE(THE_GEOM,THE_NAME)
VALUES (GeometryFromText('POINT(-126.4 45.32)',312),'Un Lugar')
```

CAPÍTULO 3 – MARCO METODOLÓGICO

Asimilada la literatura referente a estimación de riesgo de incendios, recopilada en el capítulo anterior, se procede a precisar el tipo y diseño de la investigación; así como las técnicas e instrumentos de recolección de datos a usar. Como se sabe, el uso de los SIG está justificada en el modelado del riesgo de incendios; por lo tanto en este capítulo también se explica la metodología a seguir para el desarrollo del SIG.

3.1 Tipo de Investigación

Hurtado (2000, p. 325) define la investigación proyectiva como:

“la elaboración de una propuesta o de un modelo, como solución a un problema o necesidad de tipo práctico, ya sea de un grupo social, o de una institución, en un área particular del conocimiento, a partir de un diagnóstico preciso de las necesidades del momento, los procesos explicativos o generadores involucrados y las tendencias”.

Este trabajo se puede considerar una investigación proyectiva, ya que consiste en el desarrollo de una aplicación informática y la construcción de modelos destinados a satisfacer necesidades de los Bomberos Forestales de la ULA.

3.2 Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación se refiere a la manera en que se recolectan los datos relevantes para su desarrollo. Los dos tipos básicos son el diseño de campo y el diseño bibliográfico.

En los diseños de campo los datos de interés se recogen en forma directa de la realidad, mediante el trabajo concreto del trabajador y su equipo. Estos datos, que son obtenidos directamente por el investigador, son llamados primarios, debido al hecho de que son datos de primera mano, originales, producto de la investigación en curso y sin la

intermediación. Ahora cuando los datos a utilizar ya han sido recolectados en otras investigaciones y que son conocidas nos referimos entonces a datos secundarios, ya que han sido obtenidos y procesados por otros investigadores. Como estas informaciones proceden de documentos escritos, pues esa es la forma en la que se emiten los informes científicos, a estos diseños les damos el nombre de bibliográficos (Sabino, 1992).

En base a las definiciones presentadas por Sabino, el diseño de la investigación es de campo y también bibliográfico. De campo sobre todo para lograr determinar los requerimientos de la aplicación informática, y bibliográfico ya que los mapas y datos tabulares utilizados para los modelos son recolectados, pero no precisamente de informes científicos.

3.3 Técnicas e Instrumentos de Recolección de datos

Las técnicas de recolección de datos comprenden procedimientos y actividades que permiten obtener la información necesaria para dar respuesta a la pregunta de investigación (Hurtado, 2000). Entre las técnicas de recolección de datos más conocidas se encuentran: la observación, la entrevista y la encuesta, entre otras.

Para identificar los requerimientos de la aplicación se usaron entrevistas no estructuradas, que consisten en formular preguntas de manera libre, basadas en las respuestas que va dando el interrogado. No existe estandarización del formulario y las preguntas pueden variar de un interrogado a otro (Hurtado, 2000).

3.4. Ciclo de desarrollo de los SIG

Para Becker et al. (n.d.) La Guía de Desarrollo SIG es un documento de soporte técnico para ayudar a administraciones locales en el desarrollo de un SIG. Dicho documento presenta el ciclo de desarrollo de los SIG descrito en término de once actividades principales, comenzando con Evaluación de necesidades y terminando con Uso del SIG y mantenimiento de la base de datos, ver Figura 9.

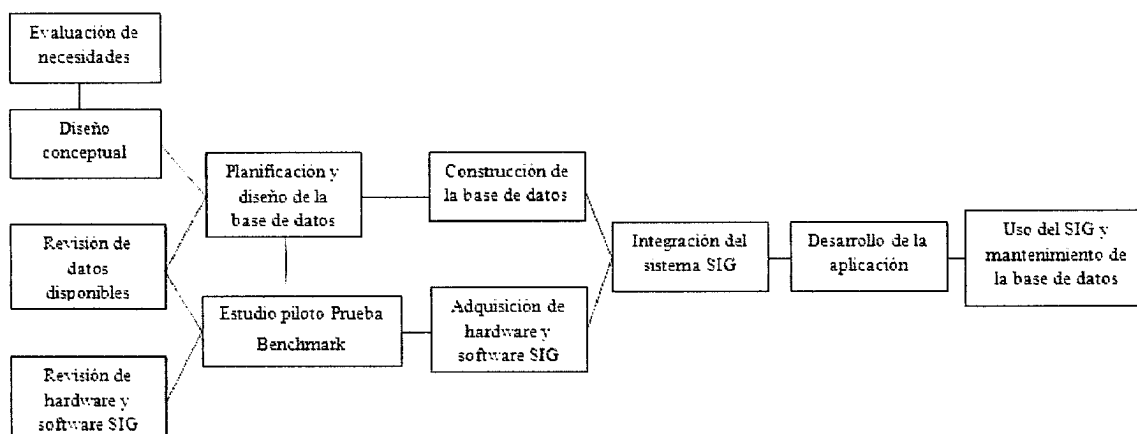


Figura 9. Proceso de desarrollo SIG
Fuente: Becker et al. (n.d.)

Para el desarrollo de esta investigación se obviaron algunas actividades, por no ser pertinentes, quedando de la siguiente manera:

1. Evaluación de las necesidades
2. Diseño Conceptual del SIG
3. Revisión de datos disponibles
4. Revisión de software SIG
5. Planificación y Diseño detallado de la Base de Datos
6. Construcción de la Base de Datos
7. Desarrollo de la Aplicación SIG

A continuación se explica en qué consiste cada una de estas actividades, las cuales se adaptaron a la situación particular.

3.4.1. Evaluación de las Necesidades

La Evaluación de Necesidades consistió básicamente en realizar entrevistas y documentar las necesidades de los usuarios potenciales del SIG. Estas necesidades fueron documentadas usando los formatos Descripción de la Aplicación SIG (para describir

productos producidos por el SIG y actividades soportadas por el SIG) y Lista Principal de Datos, proporcionados por la guía.

3.4.2. Diseño Conceptual

Para esta actividad se tomó la información desarrollada durante la Evaluación de Necesidades, el resultado de esta actividad fue un modelo de datos SIG y especificaciones funcionales para el sistema SIG.

El modelo de datos se construyó en forma de un diagrama Entidad - Relación. Su propósito fue garantizar que los datos se identificaron y describieron de una manera completamente rigurosa y no ambigua y que el usuario está de acuerdo con las definiciones de los datos. El proceso de construcción del diagrama E-R involucró tomar entidades de la Lista Principal de Datos una a la vez y poner cada una en el diagrama. Para cada nueva entidad, alguna relación a alguna entidad previamente entrada debió ser incluida. Las relaciones fueron encontradas examinando las Descripciones de la Aplicación y determinando si los procesos SIG requieren una operación específica.

La Figura 10 muestra la estructura interna del símbolo entidad, que contiene el nombre de la entidad, la objeto espacial correspondiente (punto, línea o polígono), un código indicando topología, y otro código que indica la codificación de la entidad espacial por medio de coordenadas. El código de coordenadas, en el momento actual, es redundante ya que todos los SIG contemporáneos representan entidades espaciales con coordenadas X, Y. Del mismo modo, la codificación topológica es normalmente de un solo tipo y puede, por el momento, ser indicada por un código simple.

Nombre de la entidad		
Objeto espacial	Código de coordenadas X,Y	Código de Topología

Figura 10. Estructura interna del símbolo entidad
Fuente: Becker et al. (n.d.)

La Tabla 2 lista las relaciones espaciales que se pueden encontrar en un SIG: relaciones por topología y relaciones por operaciones de coordenadas (X, Y).

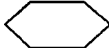
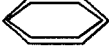
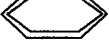
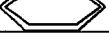
Relación espacial	Ejemplo de descriptor	Implementación común en SIG	Símbolo en modelo E-R
Conectividad	Conectado	Topología	
Contigüidad	Adyacente	Topología	
Inclusión	Contenido	Operación coordenadas (X,Y)	
Proximidad	Próximo	Operación coordenadas (X,Y)	
Coincidencia	Coincidente	Operación coordenadas (X,Y)	

Tabla 2 Relaciones espaciales en un SIG
Fuente: Becker et al. (n.d.)

3.4.3 Revisión de Datos Disponibles

Esta etapa consistió en determinar qué datos estaban disponibles para usar en el SIG y en que condición estaban los datos. El primer paso fue documentar los datos desarrollando archivos de metadatos para cada base de datos disponible. El archivo de metadatos es necesario por dos razones: 1) como información para evaluar los datos a usar en un SIG y 2) para cumplir con los requerimientos de metadatos para los datos una vez usados en un SIG.

Los mapas, datos tabulares y datos de sensores remotos son los tipos de datos más probables, provenientes de fuentes gubernamentales o privadas, y se documentaron en lo que respecta a: organización de origen, tipo de documento, proyección, sistema de coordenadas, fecha de creación, fecha de la última actualización, control de calidad, escala, revisado por, fecha de revisión, extensión espacial, formato del archivo. Para finalmente determinar, ¿Son datos actuales y cuál es su disponibilidad?, ¿Son los datos adecuados para las aplicaciones?, ¿Los datos son rentables?

3.4.4 Revisión de Hardware y Software SIG

Para conseguir información acerca de sistemas SIG se consultó: Revistas, actas de conferencia, grupos de usuarios, usuarios actuales.

En la etapa Evaluación de Necesidades se determinó la funcionalidad deseada, que es parte de la funcionalidad total requerida para el sistema, pero también ha de considerarse: uso de estándares, funcionamiento, expansibilidad, licencia (software libre) y portabilidad. Se tomaron en cuenta productos que han sido probados en el mercado y siguen teniendo un desarrollo claro.

3.4.5 Planificación y Diseño detallado de la Base de Datos

La planificación y diseño de la base de datos involucró definir como los gráficos serían simbolizados (por ejemplo, color, tamaño, símbolos, etc.) como los archivos gráficos serían estructurados, como los archivos de atributos no gráficos serían estructurados, como los directorios de archivos serían organizados, como los archivos serían denominados, como el área del proyecto sería subdividida geográficamente, que restricciones de manejo y seguridad serían impuestas en el acceso a los archivos. Esta etapa implicó las siguientes actividades:

- ✓ Selección de una fuente (documento, mapa, archivo digital, etc.) para cada entidad y atributo incluido en el diagrama Entidad – Relación
- ✓ Diseño de la base de datos actual (diseño lógico)
- ✓ Definición de procedimientos para convertir los datos desde el medio fuente a la base de datos

3.4.6 Construcción de la Base de Datos

El proceso de construcción de la base de datos consistió en la creación de archivos digitales a partir de mapas, tablas y otros documentos fuentes.

3.4.7 Desarrollo de la aplicación SIG

Para el desarrollo de la aplicación se usa el paradigma de construcción de prototipos. Según Pressman (1998) un cliente a menudo define un conjunto de objetivos generales para el software, pero no identifica los requisitos detallados de entrada, procesamiento, o salida. En esta y en otras muchas otras situaciones, un paradigma de construcción de prototipos puede ofrecer el mejor enfoque.

En la Figura 11 se puede apreciar la esencia del paradigma de construcción de prototipos.

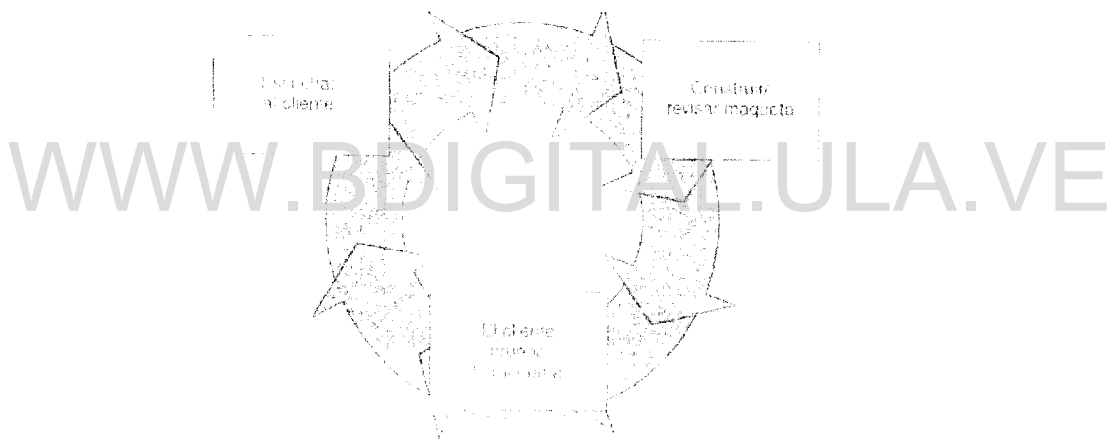


Figura 11. El Paradigma de construcción de prototipos
Fuente: Pressman (1998)

CAPÍTULO 4 – DESARROLLO

En este capítulo se explica la ejecución del ciclo de desarrollo del SIG y la construcción de los modelos, los índices de riesgo de incendios.

4.1 Evaluación de las Necesidades

Gracias a las entrevistas que se sostuvieron con miembros del Grupo de Bomberos Forestales de la ULA, entre ellos el Ingeniero Ramón Jáuregui, se logró identificar las siguientes necesidades:

4.1.1 Limitar el área de estudio

El Grupo de Bomberos Forestales de la ULA propone limitar la Cuenca del Chama, y en consecuencia el área de estudio, a partir de un conjunto de puntos. La Tabla 3 muestra los puntos proporcionados por los Bomberos Forestales de la ULA, en coordenadas UTM, y la Figura 12 el polígono que se forma a partir de ellos. Sin embargo, se acordó encuadrar el polígono dentro de un rectángulo y extender el área de estudio a los límites de este último. De aquí en adelante, se conocerá como Cuenca la superficie del rectángulo de referencia.

La Cuenca incluye la totalidad o parte de los siguientes municipios del Estado Mérida: Campo Elías, Libertador, Obispo Ramos de Lora, Santos Marquina, Rangel, Justo Briceño, Andrés Bello, Aricagua, Sucre, Antonio Pinto Salinas, Guaraque, Caracciolo Parra y Olmedo, Cardenal Quintero, Miranda, Tulio Febres Cordero, Arzobispo Chacón y Alberto Adriani.

Punto	Este	Norte	Cota	Observación
01	293.961	985.331	4.400	Filo Las Teas
02	303.388	979.471	4.000	Cerro Cruz Chiquita
03	303.485	969.433	4.400	Páramo Sto. Domingo
04	297.816	960.865	3.800	Páramo Llano
05	283.766	950.805	4.600	Páramo Sto. Cristo
06	284.554	939.500	3.400	Loma de Apure
07	271.521	923.767	3.300	Páramo Don Pedro
08	223.957	911.907	3.200	Molino
09	213.719	918.321	1.800	Quebrada San Isidro
10	221.326	942.277	1.400	El Filo
11	235.392	953.292	3.000	Páramo El Tambor
12	255.554	965.232	4.400	Páramo Los Conejos

Tabla 3 Puntos que limitan el área de estudio

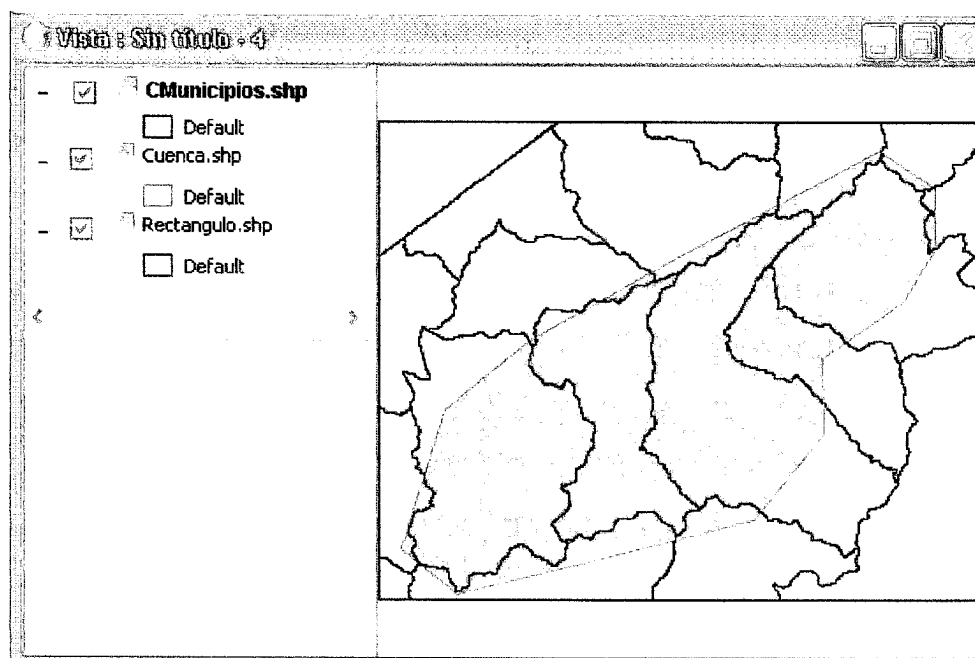


Figura 12. Área de estudio

4.1.2 De la planilla “Informe del Incendio o Conato”

El Anexo 1 muestra la planilla “Informe del Incendio o Conato”. Cuando ocurre un incendio o conato, los Bomberos Forestales de la ULA llenan esta planilla de forma manual, la cual está estructurada en 1) Datos del informante, 2) Ubicación del incendio forestal o conato, 3) Tipo de propiedad, 4) Combate, 5) Características del incendio, y 6) Posible causa del incendio.

Los Bomberos Forestales de la ULA mantienen archivadas en físico las planillas desde los años 70 hasta nuestros días. Para empezar, se requiere el almacenamiento de estas planillas en formato digital, de manera de preservarlas los datos por más tiempo y facilitar su gestión. Además del registro de la planilla es necesario su consulta, modificación y eliminación. Para efectos de esta investigación, se obvian todos los datos de la planilla asociados al combate.

Los requerimientos asociados a la planilla “Informe del Incendio o Conato” fueron documentados usando los formatos Descripción de la Aplicación SIG. La Figura 13 presenta la documentación de la aplicación Registrar “Informe del Incendio o Conato” y la Figura 14 muestra la documentación de la aplicación Consultar “Informe del Incendio o Conato”. Esta última aplicación requirió especificar una salida gráfica, para establecer la representación gráfica de los incendios o conatos. En la Figura 15 se observa que los incendios o conatos han de representarse como puntos sobre el área de estudio.

Identificador de la Aplicación: 1
Nombre de la Aplicación: Registrar Informe del Incendio o Conato

Propósito y descripción:
 Permite almacenar los datos de un incendio o conato mediante una interfaz amigable, hace uso de las capas o mapas existentes a fin de facilitar el ingreso de datos

Tipo de Aplicación: Mantenimiento de información temática
 Mantenimiento de información espacial

Escala del mapa/despliegue:
Clave de consulta:
Tiempo de Respuesta:
Frecuencia: n/día

Datos requeridos:

Entidades:	Atributos:
Incendio	identificador fecha de aviso hora de aviso vía de aviso nombre de quien aviso organismo que aviso fecha de inicio hora de inicio día de inicio estado municipio parroquia sector norte este clasificación área afectada causa propiedad altitud inclinación vegetación estado de la vegetación resinas tipo de combustible temperatura humedad relativa velocidad del viento dirección del viento
Estado	identificador nombre polígono
Municipio	identificador identificador estado nombre polígono
Parroquia	identificador identificador municipio nombre polígono
Propiedad	identificador descripción polígono
Inclinación	identificador descripción polígono
Vegetación	identificador descripción polígono
Estado de la vegetación	identificador descripción polígono
Resinas	identificador descripción polígono
Tipo de combustible	identificador descripción polígono

Figura 13. Aplicación 1: Registrar "Informe del Incendio o Conato"

Identificador de la Aplicación: 2	
Nombre de la Aplicación: Consultar "Informe del Incendio o Conato"	
Propósito y descripción: Permite visualizar los datos de un incendio o conato previamente guardado	
Tipo de Aplicación: Recuperación de información temática Recuperación de información espacial Despliegue	Escala del mapa/despliegue: 1 x m Clave de consulta: fecha de inicio Tiempo de Respuesta: Frecuencia: n/día
Datos requeridos: Entidades: Incendio	Atributos: identificador fecha de aviso hora de aviso via de aviso nombre de quien aviso organismo que aviso fecha de inicio hora de inicio día de inicio estado municipio parroquia sector norte este clasificación area afectada causa propiedad altitud inclinación vegetación estado de la vegetación resinas tipo de combustible temperatura humedad relativa velocidad del viento dirección del viento punto identificador nombre

Figura 14. Aplicación 2: Consultar "Informe del Incendio o Conato"

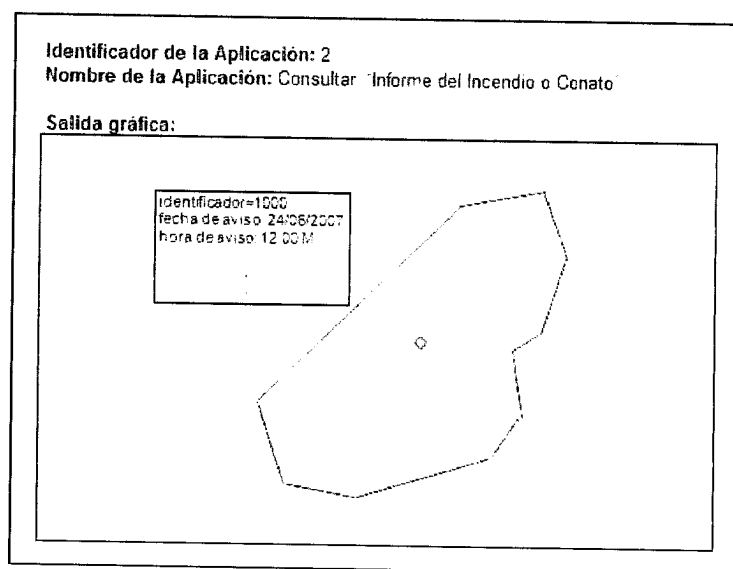


Figura 15. Salida gráfica de la aplicación 2

La Figura 16 muestra la documentación de la aplicación Modificar “Informe del Incendio o Conato” y la Figura 17 la documentación de Eliminar “Informe del Incendio o Conato”

Identificador de la Aplicación: 3																							
Nombre de la Aplicación: Modificar Informe del Incendio o Conato																							
Propósito y descripción: Permite modificar los datos de un incendio o conato a excepción de su identificador. hace uso de las capas o mapas existentes a fin de facilitar el ingreso de datos																							
Tipo de Aplicación: Mantenimiento de información temática Mantenimiento de información espacial	Escala del mapa/despliegue: Clave de consulta: fecha de inicio Tiempo de Respuesta: Frecuencia: n/día																						
Datos requeridos: <table border="0"> <tr> <td>Entidades:</td> <td>Atributos:</td> </tr> <tr> <td>Incendio</td> <td>identificador, fecha de aviso, hora de aviso, vía de aviso, nombre de quien aviso, organismo que aviso, fecha de inicio, hora de inicio, día de inicio, estado, municipio, parroquia, sector, norte, este, clasificación, área afectada, causa, propiedad, altitud, inclinación, vegetación, estado de la vegetación, resinas, tipo de combustible, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento, punto</td> </tr> <tr> <td>Estado</td> <td>identificador, nombre, polígono</td> </tr> <tr> <td>Municipio</td> <td>identificador, identificador estado, nombre, polígono</td> </tr> <tr> <td>Parroquia</td> <td>identificador, identificador municipio, nombre, polígono</td> </tr> <tr> <td>Propiedad</td> <td>identificador, descripción, polígono</td> </tr> <tr> <td>Inclinación</td> <td>identificador, descripción, polígono</td> </tr> <tr> <td>Vegetación</td> <td>identificador, descripción, polígono</td> </tr> <tr> <td>Estado de la vegetación</td> <td>identificador, descripción, polígono</td> </tr> <tr> <td>Resinas</td> <td>identificador, descripción, polígono</td> </tr> <tr> <td>Tipo de combustible</td> <td>identificador, descripción, polígono</td> </tr> </table>		Entidades:	Atributos:	Incendio	identificador, fecha de aviso, hora de aviso, vía de aviso, nombre de quien aviso, organismo que aviso, fecha de inicio, hora de inicio, día de inicio, estado, municipio, parroquia, sector, norte, este, clasificación, área afectada, causa, propiedad, altitud, inclinación, vegetación, estado de la vegetación, resinas, tipo de combustible, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento, punto	Estado	identificador, nombre, polígono	Municipio	identificador, identificador estado, nombre, polígono	Parroquia	identificador, identificador municipio, nombre, polígono	Propiedad	identificador, descripción, polígono	Inclinación	identificador, descripción, polígono	Vegetación	identificador, descripción, polígono	Estado de la vegetación	identificador, descripción, polígono	Resinas	identificador, descripción, polígono	Tipo de combustible	identificador, descripción, polígono
Entidades:	Atributos:																						
Incendio	identificador, fecha de aviso, hora de aviso, vía de aviso, nombre de quien aviso, organismo que aviso, fecha de inicio, hora de inicio, día de inicio, estado, municipio, parroquia, sector, norte, este, clasificación, área afectada, causa, propiedad, altitud, inclinación, vegetación, estado de la vegetación, resinas, tipo de combustible, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento, punto																						
Estado	identificador, nombre, polígono																						
Municipio	identificador, identificador estado, nombre, polígono																						
Parroquia	identificador, identificador municipio, nombre, polígono																						
Propiedad	identificador, descripción, polígono																						
Inclinación	identificador, descripción, polígono																						
Vegetación	identificador, descripción, polígono																						
Estado de la vegetación	identificador, descripción, polígono																						
Resinas	identificador, descripción, polígono																						
Tipo de combustible	identificador, descripción, polígono																						

Figura 16. Aplicación 3: Modificar “Informe del Incendio o Conato”

Identificador de la Aplicación: 4			
Nombre de la Aplicación: Eliminar Informe del Incendio o Conato			
Propósito y descripción: Da la oportunidad de eliminar los datos de un incendio o conato			
Tipo de Aplicación: Mantenimiento de información temática Mantenimiento de información espacial	Escala del mapa/despliegue: Clave de consulta: fecha de inicio Tiempo de Respuesta: Frecuencia: n-día		
Datos requeridos: <table border="0"> <tr> <td>Entidades: Incendio</td> <td>Atributos: identificador fecha de aviso</td> </tr> </table>		Entidades: Incendio	Atributos: identificador fecha de aviso
Entidades: Incendio	Atributos: identificador fecha de aviso		

Figura 17. Aplicación 4: Eliminar "Informe del Incendio o Conato"

4.1.3 De las Estadísticas espacio – temporales

Las estadísticas que han de desarrollarse para los Bomberos Forestales de la ULA, están inspiradas en el Sistema de Información para el Programa de Control de Incendios de Vegetación de EDELCA (SIPCIV) (Zerpa, 2001). Las Figuras 18 y 19 muestran algunas interfaces del SIPCIV.

El procesamiento estadístico, ha de realizarse mediante un conjunto de parámetros o criterios de selección, específicamente:

Criterio de Tiempo: indica si la información a obtener esta referida al día, mes o año.

- ✓ Si está referida al día, puede ser para todos los días de la semana o un día en particular, dentro del período.

- ✓ Si está referida al mes, puede ser para todos los meses del año o un mes en particular, dentro del período.
- ✓ Si está referida al año, para todos los años dentro del período.

Período: Indica que la información a obtener se refiere a un período de tiempo definido por una fecha inicial y final.

Hora: Indica que la información a obtener debe estar referida a un lapso de tiempo en el día, definida por una hora inicial y final.

Estadística: La información estadística a obtener pueden ser totales, promedio, máximo o mínimo.

Variable: Se refiere al atributo o característica del incendio para el cual se genera la información estadística, por ejemplo: tipo de incendio, causa, Estado, etc.

Resumen: Indica si la información según el criterio de tiempo seleccionado es en forma de resumen o no.

Días sin incendio: Indica si incluye en la consulta los días en los que no ocurrieron incendios dentro del período indicado.

La Figura 20 presenta una documentación genérica de la aplicación Estadística espacio – temporal. Considérese por salida gráfica, las Figuras 18 y 19.

Identificador de la Aplicación: 5 Nombre de la Aplicación: Estadística espacio – temporal	
Propósito y descripción: Genera estadísticas espacio - temporales en función de los valores dados al conjunto de parámetros	
Tipo de Aplicación: Recuperación de información temática Recuperación de información espacial Despliegue	Escala del mapa/despliegue: 1 x m Clave de consulta: criterio de tiempo (día, mes o año); periodo (fecha de inicio); hora (hora de inicio); estadística (totales, promedio, máximo, mínimo); variable (atributo de incendio a excepción de fecha - hora de inicio y punto); resumen (verdadero o falso); días sin incendio (verdadero o falso); Tiempo de Respuesta: Frecuencia: n/día
Datos requeridos: Entidades: Incendio Cuenca Estado Municipio Parroquia Propiedad Inclinación Vegetación Estado de la vegetación Resinas Tipo de combustible	Atributos: fecha de inicio, hora de inicio, vía de aviso, estado, municipio, parroquia, clasificación, causa, propiedad, inclinación, vegetación, estado de la vegetación, resinas, tipo de combustible, punto identificador, nombre identificador, nombre, polígono identificador, identificador estado, nombre, polígono identificador, identificador municipio, nombre, polígono identificador, descripción, polígono identificador, descripción, polígono identificador, descripción, polígono identificador, descripción, polígono identificador, descripción, polígono

Figura 20. Aplicación 5: Estadística espacio - temporal

4.1.4 Del cálculo del índice de riesgo de incendio forestal estático

Se espera identificar zonas de riesgo de incendio forestal en el área de estudio, utilizando para ello variables que cambian poco en el tiempo, como la cercanía a la vialidad, cercanía a centros poblados, etc. A priori es complicado determinar el número de niveles de riesgo, tarea que se pospone para más adelante. Los resultados han de ser

validados utilizando los datos de los incendios o conatos almacenados. La Figura 21 presenta la documentación de la aplicación Cálculo de índice de riesgo de incendio estático y la Figura 22 un ejemplo de salida gráfica esperada. Obsérvese que se espera calcular el riesgo de incendio estático para toda el área de estudio.

Identificador de la Aplicación: 6																											
Nombre de la Aplicación: Cálculo de índice de riesgo de incendio estático																											
Propósito y descripción: Para el cálculo de este índice el usuario seleccionará las variables a considerar y las agrupará a su gusto. El índice ha de validarse con los datos de los incendios o conatos																											
Tipo de Aplicación: Modelado espacial Mantenimiento de información temática Mantenimiento de información espacial Despliegue	Escala del mapa/despliegue: 1 x m Clave de consulta: Tiempo de Respuesta: Frecuencia: 1/año																										
Datos requeridos: <table border="0"> <tr> <td>Entidades:</td> <td>Atributos:</td> </tr> <tr> <td>Cercanía a vialidad</td> <td>identificador descripción polígono</td> </tr> <tr> <td>Cercanía a poblados</td> <td>identificador descripción polígono</td> </tr> <tr> <td>Propiedad</td> <td>identificador descripción polígono</td> </tr> <tr> <td>Tipo de combustible</td> <td>identificador descripción polígono</td> </tr> <tr> <td>Estado de la vegetación</td> <td>identificador descripción polígono</td> </tr> <tr> <td>Inclinación</td> <td>identificador descripción polígono</td> </tr> <tr> <td>Resinas</td> <td>identificador descripción polígono</td> </tr> <tr> <td>Cuerpos de agua</td> <td>identificador descripción polígono</td> </tr> <tr> <td>Uso de suelos</td> <td>identificador descripción polígono</td> </tr> <tr> <td>Incendio</td> <td>fecha de inicio punto</td> </tr> <tr> <td>Cuenca</td> <td>identificador descripción</td> </tr> <tr> <td>Índice estático</td> <td>año descripción polígono</td> </tr> </table>		Entidades:	Atributos:	Cercanía a vialidad	identificador descripción polígono	Cercanía a poblados	identificador descripción polígono	Propiedad	identificador descripción polígono	Tipo de combustible	identificador descripción polígono	Estado de la vegetación	identificador descripción polígono	Inclinación	identificador descripción polígono	Resinas	identificador descripción polígono	Cuerpos de agua	identificador descripción polígono	Uso de suelos	identificador descripción polígono	Incendio	fecha de inicio punto	Cuenca	identificador descripción	Índice estático	año descripción polígono
Entidades:	Atributos:																										
Cercanía a vialidad	identificador descripción polígono																										
Cercanía a poblados	identificador descripción polígono																										
Propiedad	identificador descripción polígono																										
Tipo de combustible	identificador descripción polígono																										
Estado de la vegetación	identificador descripción polígono																										
Inclinación	identificador descripción polígono																										
Resinas	identificador descripción polígono																										
Cuerpos de agua	identificador descripción polígono																										
Uso de suelos	identificador descripción polígono																										
Incendio	fecha de inicio punto																										
Cuenca	identificador descripción																										
Índice estático	año descripción polígono																										

Figura 21. Aplicación 6: Cálculo de índice de riesgo de incendio estático

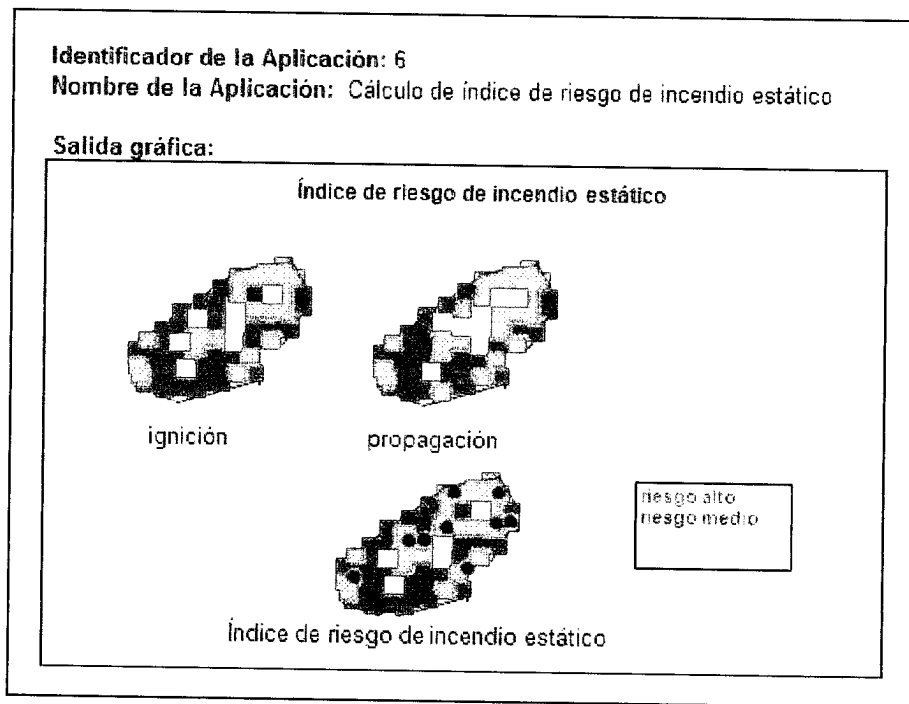


Figura 22. Salida gráfica de la aplicación 6

4.1.5 Del cálculo del índice de riesgo de incendio forestal dinámico

En este caso, las zonas de riesgo de incendio forestal se identifican utilizando variables que cambian continuamente, como las meteorológicas. Tampoco se determina a priori el número de niveles de riesgo. Los resultados han de ser validados utilizando los datos de los incendios o conatos almacenados.

La Figura 23 presenta la documentación de la aplicación cálculo del índice de riesgo de incendio forestal dinámico y la Figura 24 un ejemplo de salida gráfica esperada. En este caso, se espera estimar el riesgo de incendio dinámico solo para las inmediaciones de las estaciones meteorológicas presentes en el área de estudio y cuyos datos se hayan utilizado para el cálculo del índice. El área de estudio presenta un relieve muy irregular para intentar interpolar el índice.

Identificador de la Aplicación: 7
Nombre de la Aplicación: Cálculo de índice de riesgo de incendio dinámico

Propósito y descripción:
 Para el cálculo de este índice se usan datos meteorológicos provenientes de estaciones matereológicas. El índice ha de validarse con los datos de los incendios o conatos

Tipo de Aplicación: Escala del mapa/despliegue: 1 x m
 Modelado espacial
 Clave de consulta:
 Mantenimiento de información temática
 Tiempo de Respuesta:
 Mantenimiento de información espacial
 Frecuencia: n/día
 Despliegue

Datos requeridos:
Entidades: Estación Metereológica
 Incendio
 Cuenca
 Índice dinámico
Atributos: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento, precipitaciones, fecha de inicio, punto, identificador, nombre, fecha, descripción, polígono

Figura 23. Aplicación 7: Cálculo de índice de riesgo de incendio dinámico

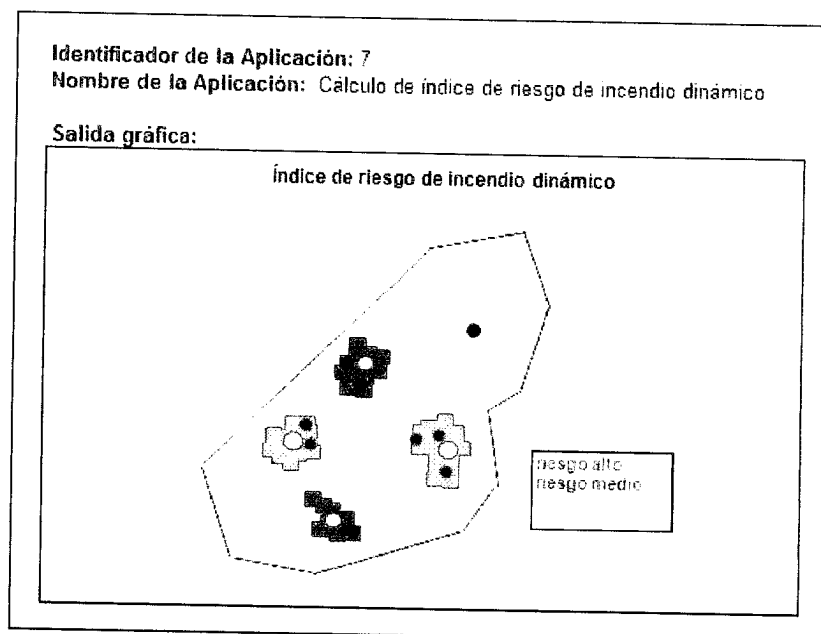


Figura 24. Salida gráfica de la aplicación 7

La Tabla 4 presenta la Lista Principal de Datos, que recoge las entidades, sus atributos y objeto espacial correspondiente.

Entidad	Atributos	Objeto espacial
Incendio	identificador, fecha de aviso, hora de aviso, vía de aviso, nombre de quien aviso, organismo que aviso, fecha de inicio, hora de inicio, día de inicio, estado, municipio, parroquia, sector, norte, este, clasificación, área afectada, causa, propiedad, altitud, inclinación, vegetación, estado de la vegetación, resinas, tipo de combustible, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento.	Punto
Cuenca	identificador, nombre	Polígono
Estado	identificador, nombre	Polígono
Municipio	identificador, identificador estado, nombre	Polígono
Parroquia	identificador, identificador municipio, nombre	Polígono
Propiedad	identificador, descripción	Polígono
Inclinación	identificador, descripción	Polígono
Vegetación	identificador, descripción	Polígono
Estado de Vegetación	identificador, descripción	Polígono
Resinas	identificador, descripción	Polígono
Tipo de combustible	identificador, descripción	Polígono
Cercanía a vialidad	identificador, descripción	Polígono
Cercanía a poblados	identificador, descripción	Polígono
Cuerpos de agua	identificador, descripción	Polígono
Uso de suelos	identificador, descripción	Polígono
Estación Meteorológica	Fecha, temperatura, precipitación, humedad relativa, velocidad del viento y dirección del viento	Punto
Índice estático	Año, descripción	Polígono
Índice dinámico	Fecha, descripción	Polígono

Tabla 4 Lista Principal de Datos

4.2. Diseño Conceptual

La Figura 25 corresponde a un primer modelo Entidad – Relación (ER), construido a partir de la Lista Principal de Datos, y que permite visualizar las relaciones espaciales entre las entidades.

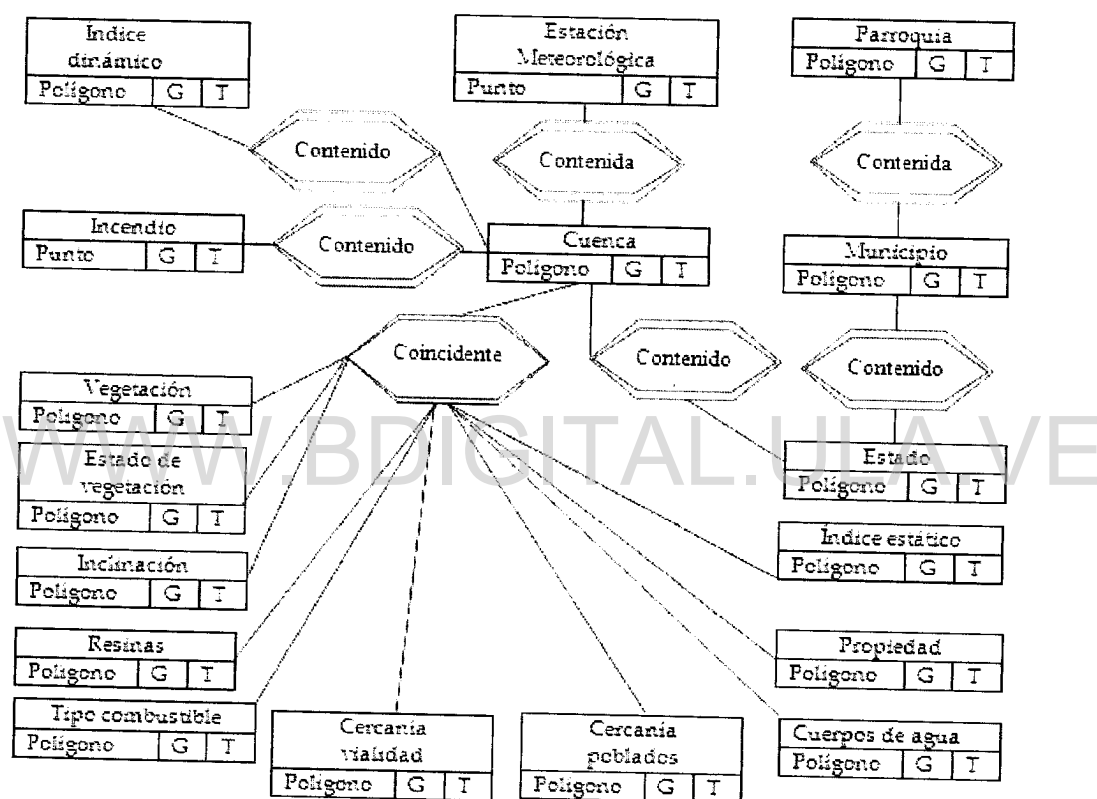


Figura 25. Primer modelo Entidad - Relación

4.3 Revisión de datos disponibles

4.3.1 Datos de incendios

El Ingeniero Ramón Jáuregui proporcionó lo que el Centro Estatal de Operaciones Contra Incendios Forestales (CEOCIF) denomina “Base de Datos Forestal”, hojas de cálculo Excel donde se registraron los datos de los incendios ocurridos en los distintos

municipios del Estado Mérida, como por ejemplo: fecha, sitio, municipio, área afectada, vegetación afectada, causa y otros que hacen referencia al combate. La “Base de Datos Forestal” facilitada almacena datos de los incendios ocurridos entre los años 1982 hasta 2007.

El CEOCIF no georreferencia los incendios; es decir, no guarda las coordenadas UTM del lugar donde ocurrió, siendo estos datos fundamentales para el desarrollo de la investigación. Razón por la que se pidió a los Bomberos Forestales de la ULA transcribir las planillas “Informe del Incendio o Conato” en un formato digital, procurando los datos de georreferenciación de los incendios.

El Ingeniero Jáuregui fue el encargado de transcribir las planillas “Informe del Incendio o Conato” de los años 2001 hasta principios del 2009, en unas hojas de cálculo Excel. Durante el proceso, encontró muchos registros de incendios sin coordenadas UTM (solo con referencia al sector en que ocurrieron), por lo que se dispuso a reconstruir la mayor cantidad esos datos, haciendo uso de su experiencia y otros existentes.

La Tabla 5 presenta los 157 incendios registrados por los Bomberos Forestales de la ULA durante el lapso 2001- 2009, donde se especifica el número de incendios por año y el porcentaje de los georreferenciados.

Año	Número de incendios	% incendios georreferenciados
2001	3	100
2002	24	95.84
2003	38	97.37
2004	11	100
2005	40	95
2006	12	100
2007	13	84.62
2008	6	50
2009	10	70

Tabla 5 Incendios registrados por los Bomberos Forestales de la ULA durante 2001- 2009

Además el Profesor Alexander Parra, cotutor de este trabajo de investigación, proporcionó un conjunto de mapas vectoriales que corresponden al producto *MODIS active fire* y que contienen los puntos de calor/fuegos activos detectados en Venezuela en un año específico (del 2001 hasta el 2008). La Figura 26 muestra los puntos de calor/fuegos activos detectados en Venezuela durante el año 2007. Estos puntos de calor/fuegos activos vienen georreferenciados, gracias a sus campos altitud y longitud, pero se debe evitar usar aquellos con valores de confianza (*Confidence*) bajos. En la revisión de literatura, no se encontró un valor de confianza límite que permita aceptar o rechazar puntos de calor/fuegos activos, y que pueda ser utilizado en Venezuela.

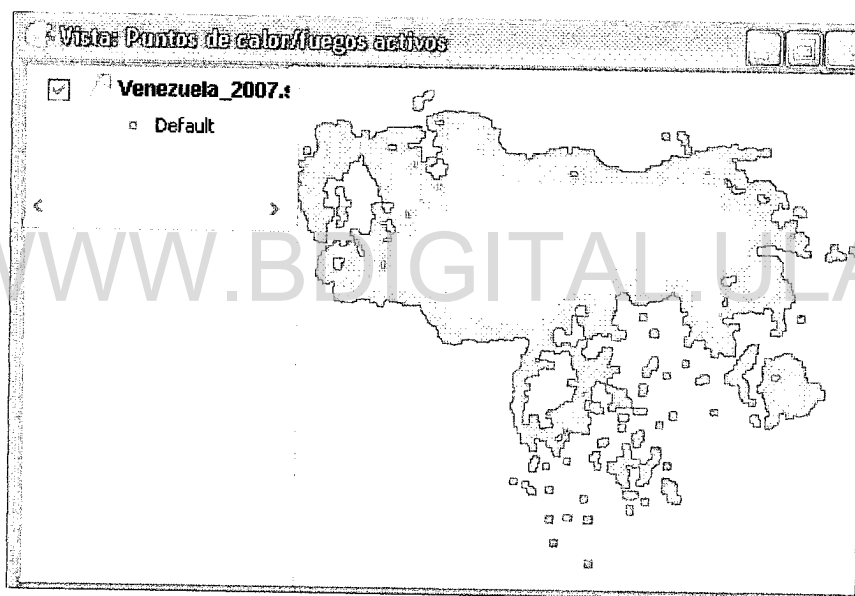


Figura 26. Producto MODIS active fire

4.3.2 Datos de la Corporación de los Andes

El Ingeniero Ramón Jáuregui suministro un conjunto de mapas vectoriales, provenientes de la Corporación de los Andes (CORPOANDES), ellos son: el mapa de Estados, el mapa de Municipios y el mapa de Parroquias. A continuación, su metadata:

Organización de origen: Corporación de los Andes.

Tipo de documento: mapa.

Proyección: UTM zona 19.

Sistema de Coordenadas: datum REGVEN.

Fecha de creación: desconocida.

Fecha última actualización: desconocida.

Control de calidad: desconocido.

Escala: sin escala.

Revisado por: Ing. Ramón Jáuregui.

Fecha de revisión: Febrero 2009.

Extensión espacial: Andes Venezolanos.

Formato del archivo: digital (shape)

A pesar de desconocerse la fecha de creación y/o la fecha de última actualización de los mapas, se consideran datos útiles por exhibir la división política territorial actual del país. Por estos mapas no se pagó.

4.3.3 Datos del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente

El Profesor Alexander Parra, facilitó un conjunto de mapas del año 2003, provenientes del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (Minamb). Estos mapas se han agrupado en dos grupos: raster y vectorial, a fin de especificar la correspondiente metadata.

4.3.3.1 Mapas vectoriales

Entre los mapas vectoriales se encuentran: Bioclima, Centros poblados, Ciudades, Cuerpos Agua, Fisiografía, Unidades geológicas, Hidrografía, Inundación, Isotermas, Isoyetas, Posición orográfica, Régimen de humedad, Régimen de temperatura, Vegetación, Vialidad.

Los mapas vectoriales, comparten la siguiente metadata:

Organización de origen: Ministerio del Poder Popular para el Ambiente.

Tipo de documento: mapa.

Proyección: UTM zona 19.

Sistema de Coordenadas: datum REGVEN.

Fecha de creación: 2003

Fecha última actualización: desconocido.

Control de calidad: Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar.

Escala: sin escala.

Revisado por: Prof. Alexander Parra.

Fecha de revisión: Febrero 2009.

Extensión espacial: Cuenca

Formato del archivo: digital (shape)

4.3.3.2 Mapas Raster

Los mapas raster facilitados fueron un Modelo digital terreno y un mapa de Sombreado, cuya metadata es:

Organización de origen: Ministerio del Poder Popular para el Ambiente.

Tipo de documento: mapa.

Proyección: UTM zona 19.

Sistema de Coordenadas: datum REGVEN.

Fecha de creación: 2003.

Fecha última actualización: desconocido.

Control de calidad: Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar.

Escala: sin escala.

Revisado por: Prof. Alexander Parra.

Fecha de revisión: Febrero 2009.

Extensión espacial: Cuenca

Formato del archivo: digital (tif)

Tanto los mapas vectoriales como raster se consideran adecuados para ser usados como variables que cambian poco a lo largo del tiempo. Respecto a la calidad, estos mapas fueron creados por el Instituto Geográfico Simón Bolívar, organismo oficial responsable de esta función a nivel nacional. Por estos mapas tampoco fue necesario pagar.

4.3.3.3 Datos de las Estaciones Meteorológicas

Se visitó la sede del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente en el Estado Mérida, con la intención de conocer la situación de las estaciones meteorológicas a su cargo y ubicadas en el estado. El personal encargado de proporcionar información sobre las estaciones meteorológicas reconoció que muchas de ellas no están en funcionamiento y que muchas otras son tan antiguas que ya no es posible extraer de ellas los datos registrados. Esto significa que no se puede contar con este grupo de estaciones meteorológicas para la construcción del índice de riesgo de incendio dinámico. Aún así, se recibió un archivo con datos mensuales históricos de sus estaciones, entre ellas destacan: La Culata, Santo Domingo, Pueblo Llano, Mucubají, Páramo Pico el Águila etc.

4.3.4 Datos de la Estación de la Fuerza Aérea Venezolana – Aeropuerto “Alberto Carnevali”

Esta estación meteorológica se encuentra ubicada en la Ciudad de Mérida a una altura de 1497 msnm, sus coordenadas son 08°38' N, 71°10' W. Fue la estación meteorológica usada por Yegres en su investigación. No es fácil el acceso a los datos directamente, la única forma que se consiguió para acceder a ellos fue gracias a la página Web “Weather Underground” que publica variables meteorológicas de la estación (temperatura, humedad, punto de rocío, velocidad del viento, dirección del viento y presión) diariamente.

4.3.5 Datos facilitados por la Red Bioclimática de Mérida

Red Bioclimática del Estado Mérida facilita el acceso a información recopilada y generada por una red de estaciones meteorológicas. Entre ellas destacan: Estación Santa Rosa, Estación Mucujún, Estación la Hechicera, Estación San Juan, Estación Pico Espejo - Estación de Investigación Atmosférica Mérida (MARS).

La Tabla 6 resume para qué años la Red Bioclimática facilita datos de las distintas estaciones meteorológicas. Como se puede apreciar estos datos llegan hasta el año 2005 y como la intención es construir un índice que pueda ser calculado en adelante, se investiga de qué estaciones meteorológicas se pueden obtener datos actualizados y diariamente.

Estación	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Meteorológica						
Santa Rosa	X	x				
Mucujún	X	x	x	X	x	x
Hechicera	X	x	x	X	x	
San Juan	X	x				
Pico Espejo					x	x

Tabla 6 Datos de estaciones meteorológicas disponibles en la Red Bioclimática

Datos más actualizados, pero no diarios, solo se pueden obtener de la estación meteorológica Pico Espejo, gracias a la página MIRA-Team (M_I_crowave R_A_diometry).

4.3.6 Imágenes MODIS NDVI del Centro Internacional de Agricultura Tropical

En vista de los pocos datos meteorológicos encontrados, que permitan construir el índice de riesgo de incendios dinámico tradicional, se optó por buscar datos para construir el índice de riesgo de incendios dinámico por medio de la teledetección. El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) publicó en Internet un documento donde explican como lograron generar un método de procesamiento de productos MODIS para

toda Colombia, con la colaboración de USGS/EROS Data Center. Como en el documento se indicaba que el área de estudio cubría toda Colombia pero en un futuro Suramérica, se les solicitó vía correo electrónico composiciones MODIS NDVI (16 días) de la Cuenca y de los años 2007, 2008 y parte del 2009. El CIAT pidió las coordenadas que delimitan el área de estudio, para recortar sus imágenes y así disminuir el volumen de datos. Los recortes fueron alojados muy gentilmente en uno de sus servidores para facilitar la descarga. La Figura 27 muestra una composición MODIS NDVI (16 días) de la Cuenca, del año 2007 y a partir del día juliano número 33.

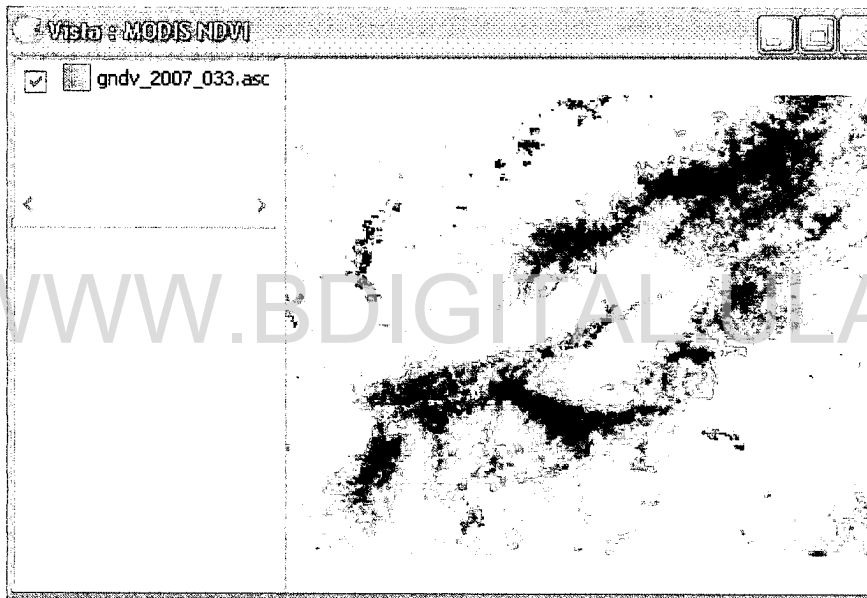


Figura 27. Composición 16 días MODIS NDVI

El CIAT sugirió usar la información de calidad de las composiciones MODIS NDVI, ver Figura 28, las cuales fueron descargadas también de su servidor. Para verificar la calidad de las composiciones MODIS NDVI se usó el módulo `r.bitpattern` del SIG GRASS 6.3.0., que permite desarrollar comparación de patrones de bit. Todas las composiciones MODIS NDVI facilitadas fueron revisadas y ninguno de sus pixeles obtuvo un Índice de Utilidad con la descripción: De calidad más baja, de calidad tan baja que no es útil, datos erróneos, o no útil por alguna otra razón/no procesada, por lo que todos los pixeles fueron usados.

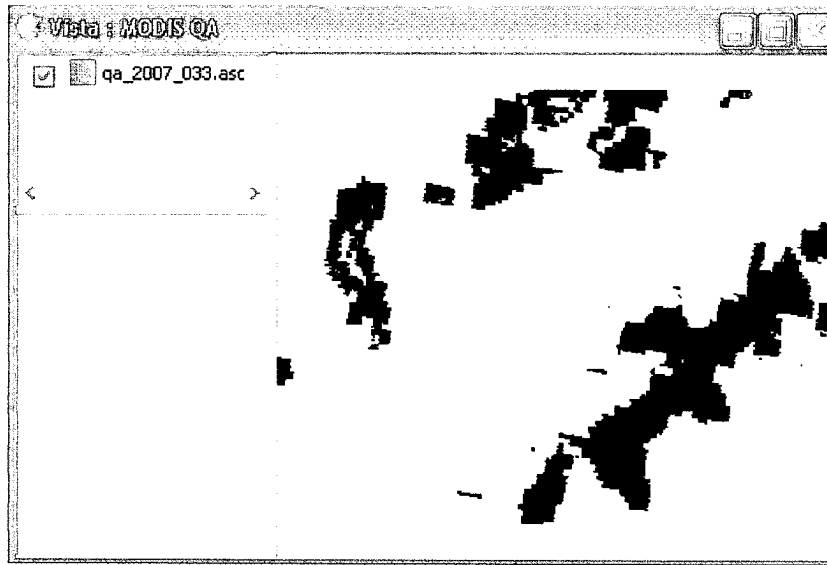


Figura 28. Imagen de calidad (QA)

A continuación se presenta un ejemplo, los comandos GRASS utilizados para determinar la calidad de la composición MODIS NDVI de los primeros 16 días del año 2008. El comando `r.stats` de GRASS se utilizó para verificar que efectivamente ninguna celda de la capa creada con `r.bitpattern` tiene el Índice de Utilidad definido por los valores `pattern` y `patval`.

```
r.bitpattern      input=qa2008-1@PERMANENT      output=LowestQuality
pattern=60 patval=48
r.stats -c input=LowestQuality
0 153560
```

```
r.bitpattern      input=qa2008-1@PERMANENT      output=SoLowNotUseful
pattern=60 patval=49
r.stats -c input=SoLowNotUseful
0 153560
```

```
r.bitpattern input=qa2008-1@PERMANENT output=DataFaulty pattern=60
patval=50
r.stats -c input=DataFaulty
0 153560
```

```
r.bitpattern      input=qa2008-1@PERMANENT      output=NotProcessed
pattern=60 patval=51
r.stats -c input=NotProcessed
0 153560
```

4.4. Revisión de software SIG

“The Global Geospatial Magazine” dedicó el número del mes de Agosto del 2007 al tema “Open Source Gis”. En el artículo “Open Source Tools for GIS Professionals” de dicho número se menciona a PostGIS como base de datos, GRASS como ambiente para el análisis de datos y gvSIG como herramienta de escritorio profesional, haciendo especial énfasis en este último. Mientras que en el artículo “Open Source GIS Software” se listan algunos de los SIG que mantienen estándares OGC y tienen una comunidad de usuarios activa, ellos son: GRASS, ILWIS, JUMP GIS, MapWindowGIS, SAGA GIS, uDig. También se dedica un artículo exclusivamente a QuantumGis denominado “Free GIS desktop and analyses: QuantumGIS, the easy way”.

Se buscó en actas de conferencias, de años recientes, los softwares SIG referidos por la revista “The Global Geospatial Magazine” en el número del mes de Agosto del 2007.

El acta de conferencia del FOSS4G 2007 (Free and Open Source Software for Geospatial) presenta un caso de estudio denominado “GRASS GIS and Modeling of Natural Hazards”. En el acta de conferencia del ISESS 2007 (International Symposium on Environmental Software Systems) aparecen las siguientes presentaciones: “Environmental Data Management, Analysis and Modeling in GRASS6”, “WaterBase: Prototype of Open Source Toolkit for Environmental Modeling using SWAT in MapWindow” y “GIS Extension Prototype UStudio Based on uDig Project”.

En el acta de conferencia del OSWC Málaga 2008 (Open Source World Conference) se listan las siguientes presentaciones de gvSIG: “gvSIG, el Sistema de Información Geográfica libre”, “gvSIG-Infraestructuras de Datos Espaciales” y “Ponencia gvSIG Mobile: gvSIG en dispositivos”.

Se decide reducir la lista de SIG libres candidatos a: GRASS y gvSIG. Ya que ambos han sido recomendados, aunque con fines distintos, en el artículo “Open Source Tools for GIS Professionals”, han tenido participación en las actas de conferencias antes mencionadas y sus listas de usuarios son muy activas. Surgen entonces dos interrogantes: ¿el sistema ha construir requiere de tantas capacidades de análisis de datos como las que presenta GRASS? y ¿son suficientes las capacidades de gvSIG para el desarrollo del sistema?

A fin de dar respuesta a estas dos interrogantes, se hace una investigación de ambos candidatos en aspectos como: uso de estándares, funcionamiento, expansibilidad, licencia, portabilidad y otros. Así como la conexión de estos SIG con la base de datos PostGIS, que también ha sido recomendada en la revista. La Tabla 7 resume algunas características de GRASS 6.3.0 y gvSIG 1.1. Para una mayor comprensión entiéndase los superíndices de la Tabla 6 de la siguiente manera:

- 1, Para dar soporte a formatos OGR, incluyendo entre otros: SHP, GML, GRASS, DGN, MapInfo, SDTS, TIGER, Arc/Info Bin, KML.
 - 2, Para dar soporte a formatos GDAL, incluyendo entre otros: Arc/Info GRID, ECW, GeoTIFF, JPEG, JPEG2000, IMG.
 - 3, GML creado con un software que no puede ser leído con otro software dada la ambigüedad de la especificación OGC.
- P, Indica si la funcionalidad es provista por un *plugin* adicional.

Criterio	GRASS 6.3.0	gvSIG 1.1
Enfoque de la aplicación	Análisis y visualización científica, Cartografía, Modelado y simulación	Visualización, Edición, Análisis
Nivel de usuario	Experimentado, ..., investigador	novato, ..., investigador
Sistemas operativos soportados	MS-Win, Linux, MacOSX	MS-Win, Linux, MacOSX
Plataforma de desarrollo	C, Shell, Tcl/Tk, Python	JAVA
Desarrollado por	Institutos de investigación, Universidades, Compañías, Voluntarios del mundo	Compañías, Universidades, Gobierno
Licencia del software	GPL	GPL
Lectura de datos vectoriales	SHP	S
	GML 2	(usa OGR ¹) S
	DXF	(usa OGR ¹) S
Escritura de datos vectoriales	SHP	S
	GML 2 ³	(usa OGR ¹) S
	DXF	(usa OGR ¹) S
Lectura de datos raster	JPEG	S
	GeoTIFF	S
	ECW	S (usa GDAL ²) S
	Arc/InfoGRID	-
Escritura de datos raster	JPEG	S
	GeoTIFF	S
	ECW	S (usa GDAL ²) S
	Arc/InfoGRID	-
Enlace a base de datos	PostGIS	R+W (P, limited) R+W
Cumplimiento OGC (soporte a estándares)	WMS, WFS, GML, WPS (vía pyWPS)	WMS, WFS, WCS, CSW, Filter, WFS-G
Impresión	S	S
API de desarrollo	S	-
Funcionalidad de scripting	Bash, Python, Perl	Jython
Transformación de coordenadas/Proyecciones	S	S(P)
Creación de datos y edición	S	S

Tabla 7 Características de GRASS 6.3.0 y gvSIG 1.1.

Fuente: Anguix y Díaz (2008)

Además de la revisión de documentación que se hizo de ambos software, se instaló gvSIG 1.1, PostgreSQL 8.3 y PostGIS 1.3.6, se llevaron a cabo algunas operaciones básicas, como por ejemplo: agregar vistas, asignar proyecciones a las vistas, agregar capas (vectoriales y raster) a vistas, consultar, filtrar y modificar información temática de capas vectoriales, exportar capas vectoriales a PostGIS, entre otras. También se constató información encontrada en algunas documentaciones, respecto a la necesidad de conectar gvSIG con la biblioteca de algoritmos geoespaciales SEXTANTE, para poder hacer análisis sobre capas raster. Entonces, se instaló SEXTANTE sobre gvSIG y se realizaron satisfactoriamente algunas operaciones raster como: cálculo de estadísticas, reclasificaciones, operaciones binarias.

No se hicieron mayores pruebas con el SIG GRASS, ya que la investigadora lo ha usado en oportunidades anteriores. Concluyendo que gvSIG resulta más amigable al usuario.

El hecho que gvSIG sea más amigable que GRASS es un gran punto a favor; sin embargo, gvSIG presenta dos grandes desventajas: no proporciona capacidades de modelado y simulación, y tampoco cuenta con una API de desarrollo. Pero, considerando que los módulos del sistema que requieren precisamente de modelado, son los módulos de los índices y que para el cálculo de ambos se va a usar principalmente SEXTANTE, plataforma que facilita la implementación y uso de geoalgoritmos, se decide usar para el desarrollo de la aplicación la combinación gvSIG – SEXTANTE y PostGIS como base de datos geográfica.

4.5. Planificación y Diseño detallado de la Base de Datos

4.5.1 Selección de una fuente para cada entidad/atributo de la Lista Principal de Datos

La Tabla 8 asocia cada entidad y atributo, identificado en la fase Evaluación de Necesidades, con la fuente de datos respectiva. Se agregan entidades que no se tenían previstas, para las que se consiguieron datos y que serán útiles.

Entidad	Atributos	Fuente
Incendio	fecha de aviso hora de aviso, vía de aviso, nombre de quien aviso, organismo que aviso, fecha de inicio, hora de inicio, día de inicio, estado, municipio, parroquia, sector, norte, este, clasificación, área afectada, causa, propiedad, altitud, inclinación, vegetación, estado de la vegetación, resinas, tipo de combustible, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, dirección del viento	Planillas “Informe del Incendio o Conato” (hojas de cálculo Excel)
Puntos de calor/ Fuegos activos	Latitud, longitud, brillo, scan, track, fecha, hora, satélite, confianza, versión	<i>MODIS active Fire</i>
Cuenca	identificador, nombre	Elaboración propia
Estado	identificador, nombre	Mapa de Estados (CORPOANDES)
Municipio	identificador, identificador estado, nombre	Mapa de Municipios (CORPOANDES)
Parroquia	identificador, identificador municipio, nombre	Mapa de Parroquias (CORPOANDES)
Propiedad	identificador, descripción	-
Inclinación	identificador, descripción	A partir del Modelo Digital del Terreno (Minamb)
Vegetación	identificador, descripción	Mapa de Vegetación (Minamb)
Estado de Vegetación	identificador, descripción	-
Resinas	identificador, descripción	-
Tipo de combustible	identificador, descripción	-
Cercanía a vialidad	identificador, descripción	A partir del Mapa de Vialidad (Minamb)
Cercanía a poblados	identificador, descripción	A partir del Mapa de

		Centros Poblados (Minamb)
Cuerpos de agua	identificador, descripción	Mapa Cuerpos de Agua (Minamb)
Uso de suelos	identificador, descripción	-
Régimen de Temperatura	identificador, descripción	Mapa de Régimen de Temperatura (Minamb)
Régimen de Humedad	identificador, descripción	Mapa de Régimen de Humedad (Minamb)
Estación Meteorológica	Fecha, temperatura, precipitación, humedad relativa, velocidad del viento y dirección del viento	Estación de la Fuerza Aérea Venezolana – Aeropuerto “Alberto Carnevali”
NDVI		Imágenes MODIS NDVI (CIAT)
Índice estático	Año, descripción	-
Índice dinámico	Fecha, descripción	-

Tabla 8 Asociación entre entidad/atributo y fuente

4.5.2 Diseño de la base de datos actual (diseño lógico)

Las Figuras 29 y 30 presentan el diseño lógico de la base de datos del sistema.

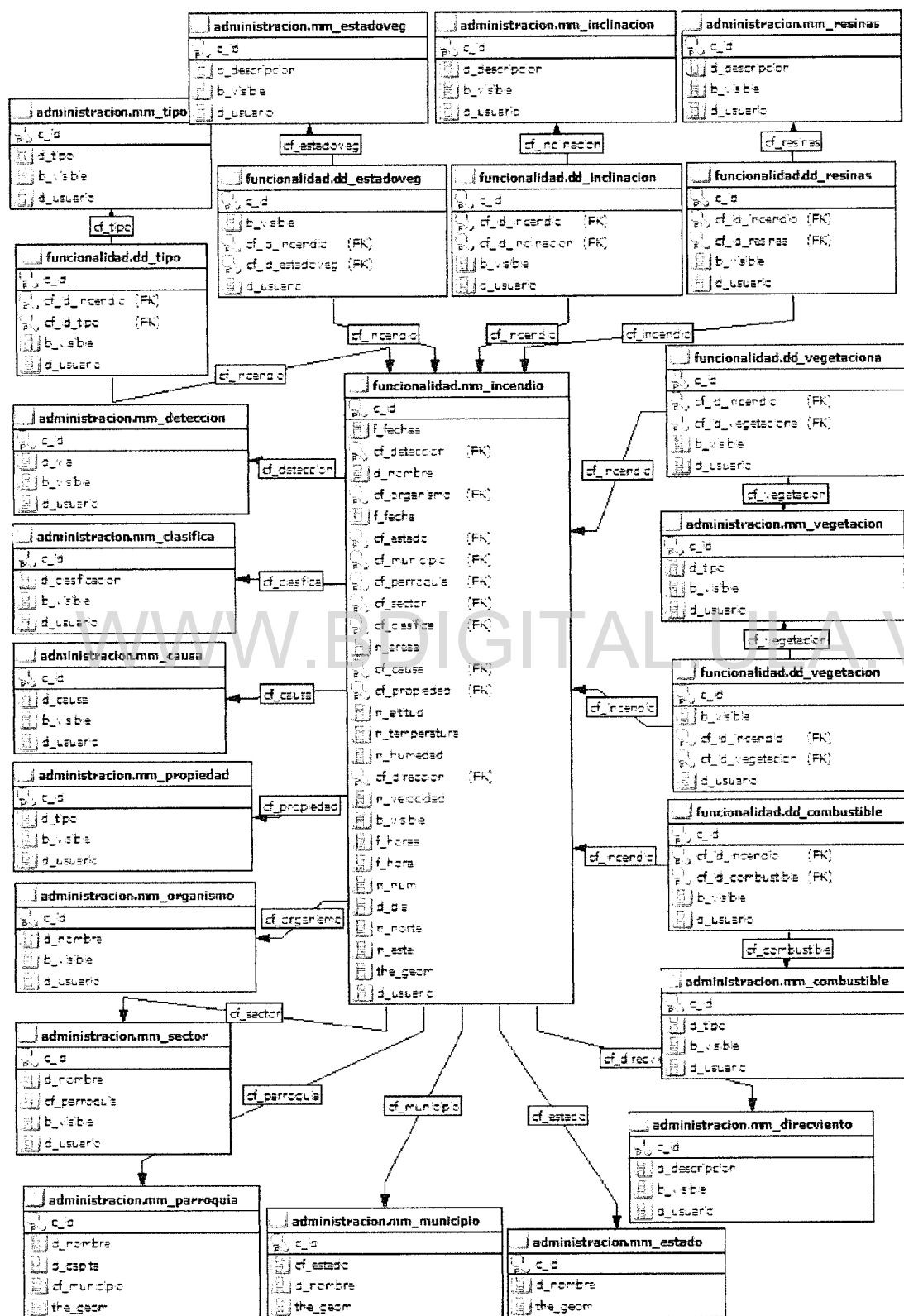


Figura 29. Diseño lógico de la Base de Datos (Parte I)

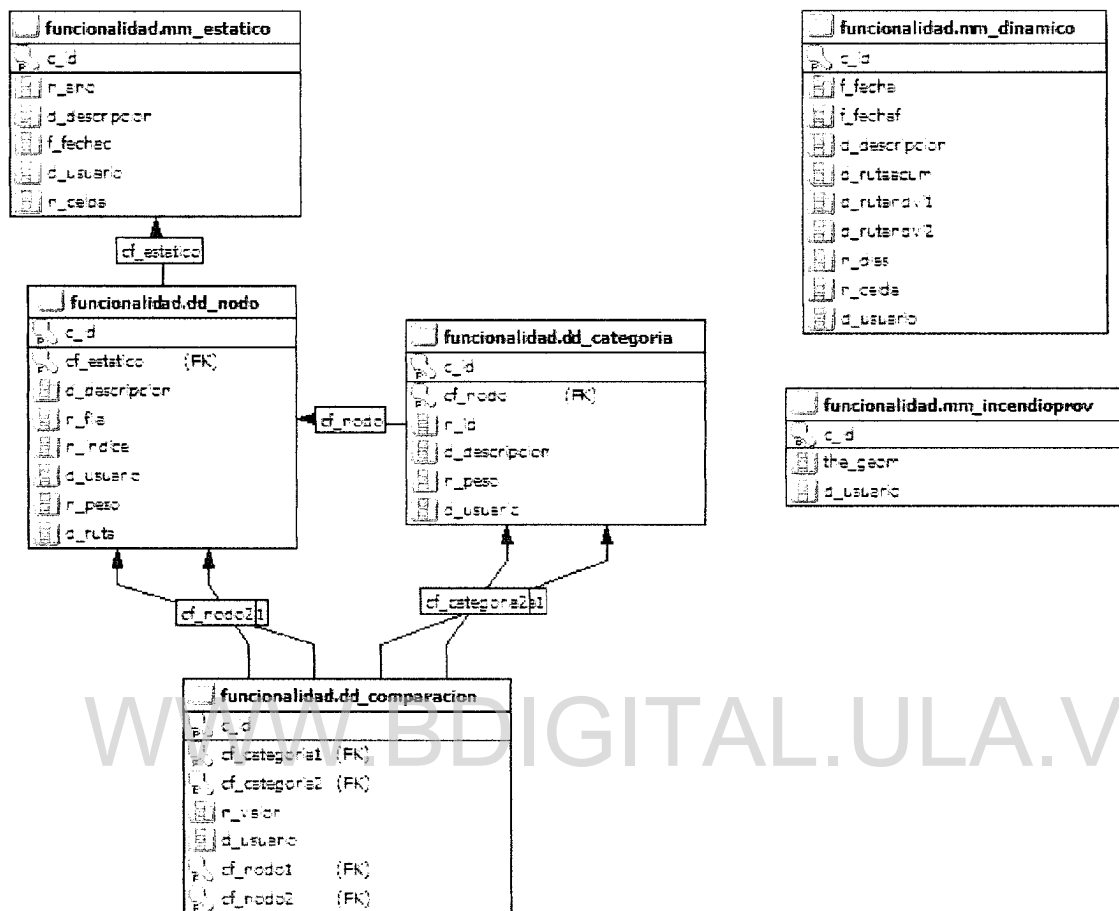


Figura 30. Diseño lógico de la Base de Datos (Parte II)

4.5.3 Definición de procedimientos para convertir los datos desde el medio fuente a la base de datos

4.5.3.1 Planillas “Informe del Incendio o Conato”

Para migrar los datos de las Planillas “Informe del Incendio o Conato” desde las hojas de cálculo Excel a PostGIS, se generan archivos CSV (del inglés comma-separated values). Se comienza determinando los valores que pueden tomar los atributos de los incendios, para entonces crear un archivo CSV que permita almacenar en la tabla respectiva (tal es el caso de las tablas: `administracion.mm_causa`, `administración.mm_tipo`,

administración.mm_propiedad, administración.mm_organismo, entre otras) estos valores, generándose automáticamente un identificador para cada uno de ellos.

Luego se sustituyen los valores de los atributos que se almacenan directamente en la tabla maestra funcionalidad.mm_incendio, por sus identificadores y se crea un archivo CSV para migrar todos los datos que corresponden a esta tabla maestra. Generándose también, de forma automática, un identificador para cada registro de incendio.

Finalmente y para cada tabla detalle (de incendio) se crea un archivo CSV, con el identificador del incendio correspondiente, el identificador del valor y otros datos más. Las tablas detalle son: funcionalidad.dd_combustible, funcionalidad.dd_inclinacion, funcionalidad.dd_resinas, funcionalidad.dd_estadoveg, funcionalidad.dd_vegetacion y funcionalidad.dd_vegetaciona.

Hasta el momento, se ha relatado el procedimiento para la creación de tablas no espaciales; sin embargo la tabla maestra funcionalidad.mm_incendio requiere una columna (campo) espacial para almacenar el punto que representará el incendio forestal. Para lograr esto se usa la función *AddGeometryColumn* de OpenGIS, un ejemplo se presenta a continuación:

```
SELECT AddGeometryColumn('funcionalidad', 'mm_incendio', 'the_geom',-
1,'POINT',2)
```

4.5.3.2 Mapas Estados, Municipios y Parroquias

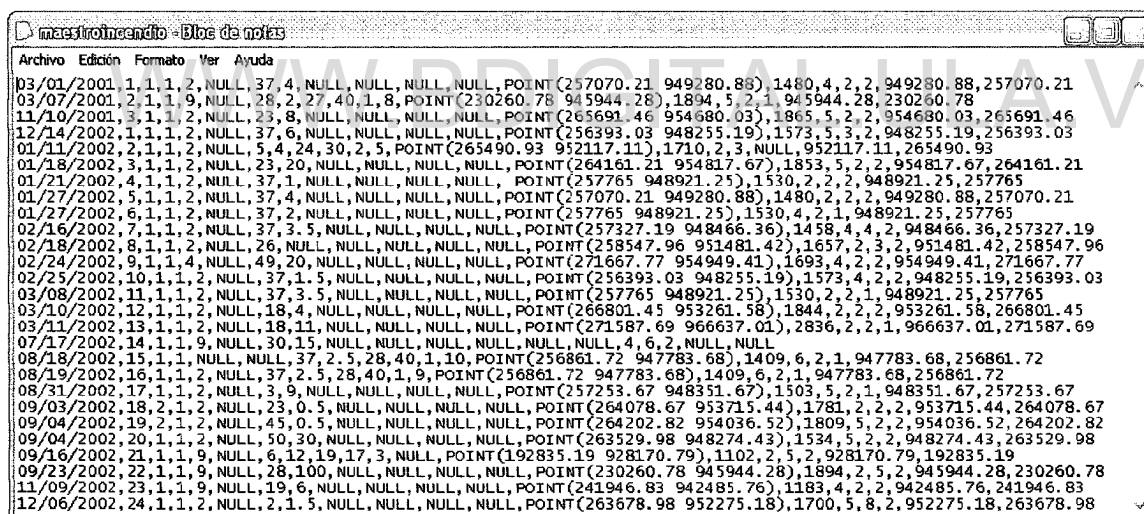
Con los mapas Estados, Municipios y Parroquias se alimentan las tablas administración.mm_estado, administración.mm_municipio y administración.mm_parroquia de la base de dato. Primero se recortaron los tres mapas, para que tuvieran la misma extensión que el área de estudio. Usando gvSIG se editan campos de las capas, para procurar un identificador único para cada objeto espacial. Usando la opción Exportar a

PostGIS, también de gvSIG, se almacenan automáticamente tanto los campos temáticos como espaciales de los mapas.

4.6 Construcción de la Base de Datos

Se implementa la base de datos en PostGIS, a partir del diseño lógico, con el nombre de bdincendios. También se llevan a cabo los procedimientos de conversión de datos.

La Figura 31 muestra uno de los archivo CVS, con datos para ser almacenados en la tabla maestra funcionalidad.mm_incendio, y en la Figura 32 se observa el comando SQL utilizado.



Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
03/01/2001	1,1,1,2	NULL,37,4	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(257070.21 949280.88)	1480,4,2,2,949280.88,257070.21
03/07/2001	2,1,1,9	NULL,28,2,27,40,1,8	POINT(230260.78 945944.28)	1894,5,2,1,945944.28,230260.78
11/10/2001	3,1,1,2	NULL,23,8	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(265691.46 954680.03)	1865,5,2,2,954680.03,265691.46
12/14/2002	1,1,1,2	NULL,37,6	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(256393.03 948255.19)	1573,5,3,2,948255.19,256393.03
01/11/2002	2,1,1,2	NULL,5,4,24,30,2,5	POINT(265490.93 952117.11)	1710,2,3, NULL,952117.11,265490.93
01/18/2002	3,1,1,2	NULL,23,20	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(264161.21 954817.67)	1853,5,2,2,954817.67,264161.21
01/21/2002	4,1,1,2	NULL,37,1	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(257765 948921.25)	1530,2,2,2,948921.25,257765
01/27/2002	5,1,1,2	NULL,37,4	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(257070.21 949280.88)	1480,2,2,2,949280.88,257070.21
01/27/2002	6,1,1,2	NULL,37,2	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(257765 948921.25)	1530,4,2,1,948921.25,257765
02/16/2002	7,1,1,2	NULL,37,3,5	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(257327.19 948466.36)	1458,4,4,2,948466.36,257327.19
02/18/2002	8,1,1,2	NULL,26	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(258547.96 951481.42)	1657,2,3,2,951481.42,258547.96
02/24/2002	9,1,1,4	NULL,49,20	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(271667.77 954949.41)	1693,4,2,2,954949.41,271667.77
02/25/2002	10,1,1,2	NULL,37,1,5	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(256393.03 948255.19)	1573,4,2,2,948255.19,256393.03
03/08/2002	11,1,1,2	NULL,37,3,5	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(257765 948921.25)	1530,2,2,1,948921.25,257765
03/10/2002	12,1,1,2	NULL,18,4	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(266801.45 953261.58)	1844,2,2,2,953261.58,266801.45
03/11/2002	13,1,1,2	NULL,18,11	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(271587.69 966637.01)	2836,2,2,1,966637.01,271587.69
07/17/2002	14,1,1,9	NULL,30,15	NULL, NULL, NULL, NULL, NULL, NULL, NULL, NULL, NULL	4,6,2, NULL, NULL
08/18/2002	15,1,1,1	NULL, NULL,37,2,5,28,40,1,10	POINT(256861.72 947783.68)	1409,6,2,1,947783.68,256861.72
08/19/2002	16,1,1,2	NULL,37,2,5,28,40,1,9	POINT(256861.72 947783.68)	1409,6,2,1,947783.68,256861.72
08/31/2002	17,1,1,2	NULL,3,9	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(257253.67 948351.67)	1503,5,2,1,948351.67,257253.67
09/03/2002	18,2,1,2	NULL,23,0,5	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(264078.67 953715.44)	1781,2,2,2,953715.44,264078.67
09/04/2002	19,2,1,2	NULL,45,0,5	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(264202.82 954036.52)	1809,5,2,2,954036.52,264202.82
09/04/2002	20,1,1,2	NULL,50,30	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(263529.98 948274.43)	1534,5,2,2,948274.43,263529.98
09/16/2002	21,1,1,9	NULL,6,12,19,17,3	NULL, POINT(192835.19 928170.79)	1102,2,5,2,928170.79,192835.19
09/23/2002	22,1,1,9	NULL,28,100	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(230260.78 945944.28)	1894,2,5,2,945944.28,230260.78
11/09/2002	23,1,1,9	NULL,19,6	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(241946.83 942485.76)	1183,4,2,2,942485.76,241946.83
12/06/2002	24,1,1,2	NULL,2,1,5	NULL, NULL, NULL, NULL, POINT(263678.98 952275.18)	1700,5,8,2,952275.18,263678.98

Figura 31. Archivo CVS para la conversión de datos

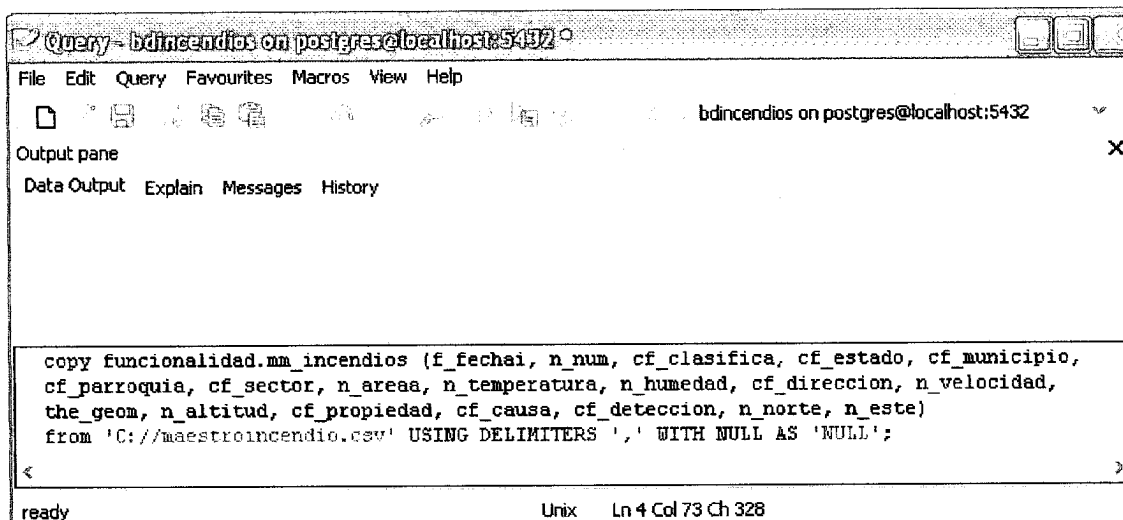


Figura 32. Comando SQL para la conversión de datos

La Figura 33 muestra la opción Exportar a PostGIS de gvSIG. Y la Figura 34 la tabla administración.mm_municipio creada por gvSIG en PostGIS.

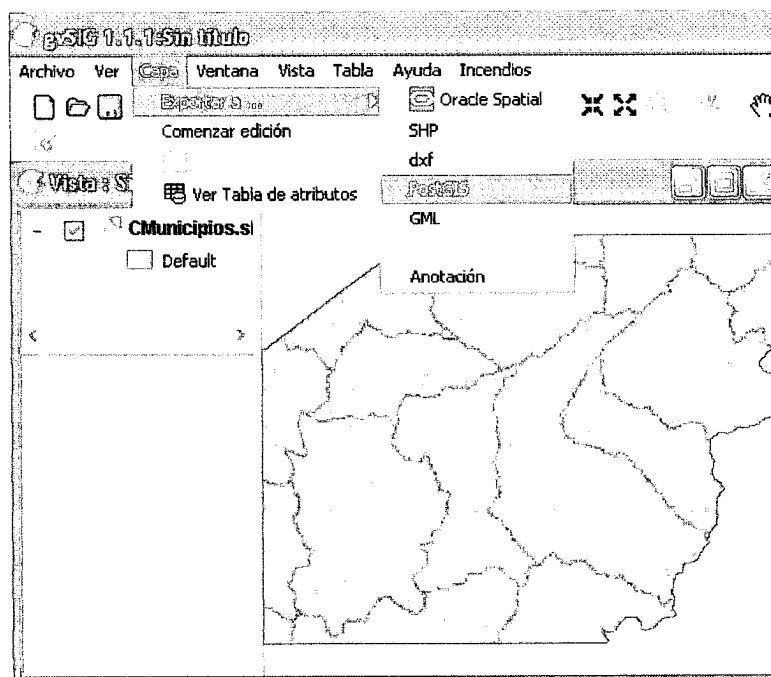


Figura 33. Opción Exportar a PostGIS

```
-- Table: administracion.mm_municipio
-- DROP TABLE administracion.mm_municipio;

CREATE TABLE administracion.mm_municipio
(
  c_id integer NOT NULL DEFAULT nextval('administracion.mm_municipio_gid_seq'::regclass),
  cf_estado integer,
  d_nombre text,
  the_geom geometry,
  CONSTRAINT mm_municipio_pkey PRIMARY KEY (c_id),
  CONSTRAINT enforce_dims_the_geom CHECK (ndims(the_geom) = 3),
  CONSTRAINT enforce_geotype_the_geom CHECK (geometrytype(the_geom) = 'MULTIPOLYGON'::text OR the_geom IS NULL),
  CONSTRAINT enforce_srid_the_geom CHECK (srid(the_geom) = 2200)
)
WITH (OIDS=FALSE);
ALTER TABLE administracion.mm_municipio OWNER TO postgres;
```

Figura 34. Tabla creada por gvSIG en PostGIS

4.7 Desarrollo de la Aplicación SIG

4.7.1 Preparación del entorno de desarrollo

Para el desarrollo de la aplicación se requería de un entorno de desarrollo. Se seleccionó Eclipse Ganymede como entorno de desarrollo, ya que gvSIG fue desarrollado usando Eclipse.

Se descargó el código fuente de gvSIG 1.1.1 desde la Web de gvSIG, se usó Eclipse para compilar los proyectos de gvSIG, usando el método semiautomático. El siguiente paso fue descargar la extensión del piloto raster para gvSIG 1.1.x, desde la Web de gvSIG, extensión que permite abrir nuevos formatos de imagen y otras funcionalidades más. Se descomprimió el paquete del piloto raster dentro del directorio de código fuente gvSIG, se importaron los proyectos que estaban dentro del paquete y luego se compilaron.

Para integrar SEXTANTE con gvSIG, se removieron algunas librerías presentes en el directorio gvSIG-1_1_1-src/_fwAndami/gvSIG/extensiones/com.iver.cit.gvsig/lib. Se descargaron las carpetas bajo sextante_lib y la carpeta gvSIG bajo bindings, del repositorio SVN con URL <https://svn.forge.osor.eu/svn/sextante>, estos proyectos fueron compilados. La Figura 35 muestra el espacio de trabajo Eclipse, listo para el desarrollo.

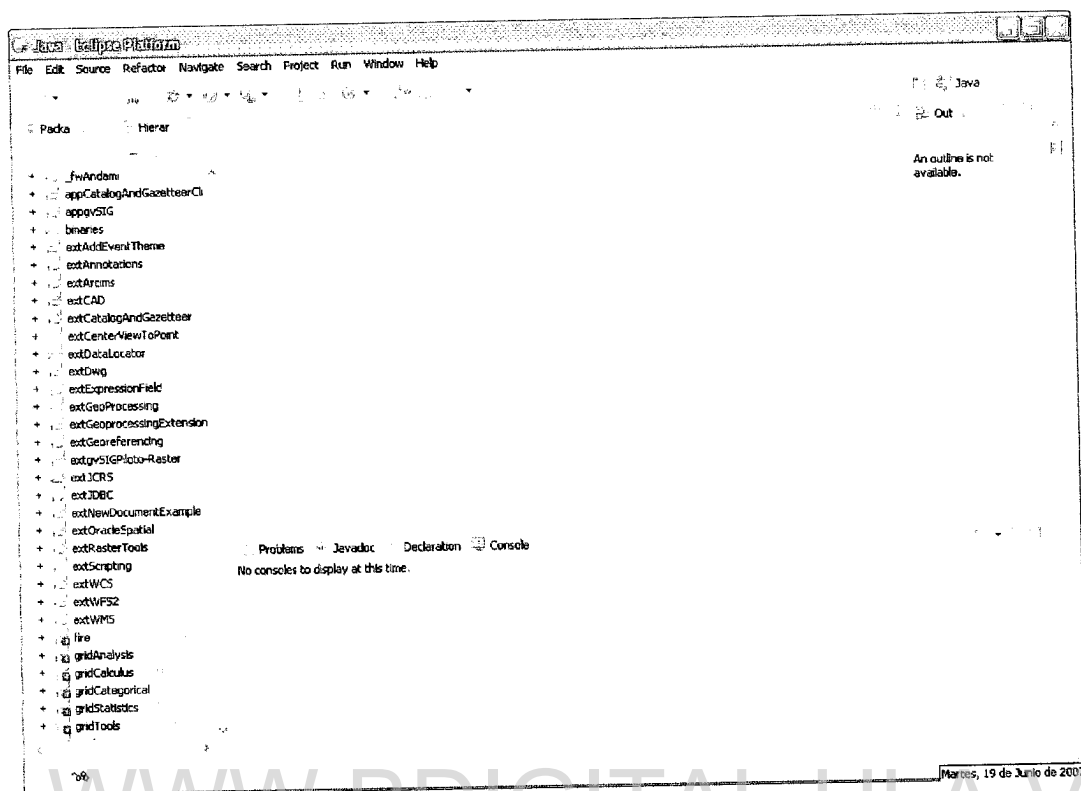


Figura 35. Espacio de trabajo Eclipse listo para el desarrollo

4.7.2 Módulos Parámetros y Registro de incendios

Se usa el proyecto de ejemplo `extNewDocumentExample`, que trae gvSIG, como punto de partida para el *plugin*. Este proyecto contenía un archivo `build.xml` y un archivo `config.xml` base, los cuales fueron modificados a lo largo del desarrollo. En el archivo `build.xml` se define el nombre del *plugin*, así como las librerías y archivos que se necesitan para funcionar.

El desarrollo se comienza con dos extensiones. La primera corresponde al prototipo del módulo que permite insertar, modificar o eliminar valores de parámetros. La intención de parametrizar la aplicación es dar mayor flexibilidad al usuario. La segunda extensión corresponde al prototipo del módulo Registro de Incendios, que depende en gran medida del módulo Parámetros, y que facilita el almacenamiento de la planilla “Informe del Incendio o Conato” en formato digital.

Se modifica el archivo `config.xml`, para definir un menú Incendios que se añada a gvSIG y cuando el usuario haga clic sobre una de sus entradas (Registro o Parámetros) se ejecute el método `execute` de la extensión asociada (las clases extensión son: `RegistroIncendio` y `Parametros` respectivamente). La Figura 36 muestra el archivo `config.xml` y la Figura 37 la clase extensión `Parametros`.

```

config.xml
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>
<plugin-config>
  <depends plugin-name="com.iver.cit.gvsig"/>
  <libraries library-dir="."/>
  <resourceBundle name="text"/>
  <extensions>
    <extension class-name="com.iver.cit.gvsig.RegistroIncendio"
      description="Registro de incendios"
      active="true"
      priority="1">

      <menu text="Incendios/Registro"
        key="r" mnemonic="r"
        tooltip="Registro de Incendios"
        icon="images/edit.gif"
      />
    </extension>
    <extension class-name="com.iver.cit.gvsig.Parametros"
      description="Parámetros"
      active="true"
      priority="1">

      <menu text="Incendios/Parámetros"
        key="p" mnemonic="p"
        tooltip="Parámetros"
        icon="images/folder_page.gif"
      />
    </extension>
  </extensions>
</plugin-config>

```

Figura 36. Archivo config.xml

Al compilar y ejecutar, se observa que se ha agregado el menú Incendios, ver Figura

```

VentanaParametros.java  Parametros.java
▶ extNewDocumentExample ▶ src ▶ com.iver.cit.gvsig ▶ Parametros ▶
package com.iver.cit.gvsig;

+import com.iver.andami.PluginServices;

public class Parametros extends Extension{

    public void execute(String actionCommand) {
        // Auto-generated method stub
        VentanaParametros ventana= new VentanaParametros();
        PluginServices.getMdiManager().addWindow(ventana);
    }

    public void initialize() {
        // Auto-generated method stub
    }
}

```

Figura 37. Clase extensión Parámetros

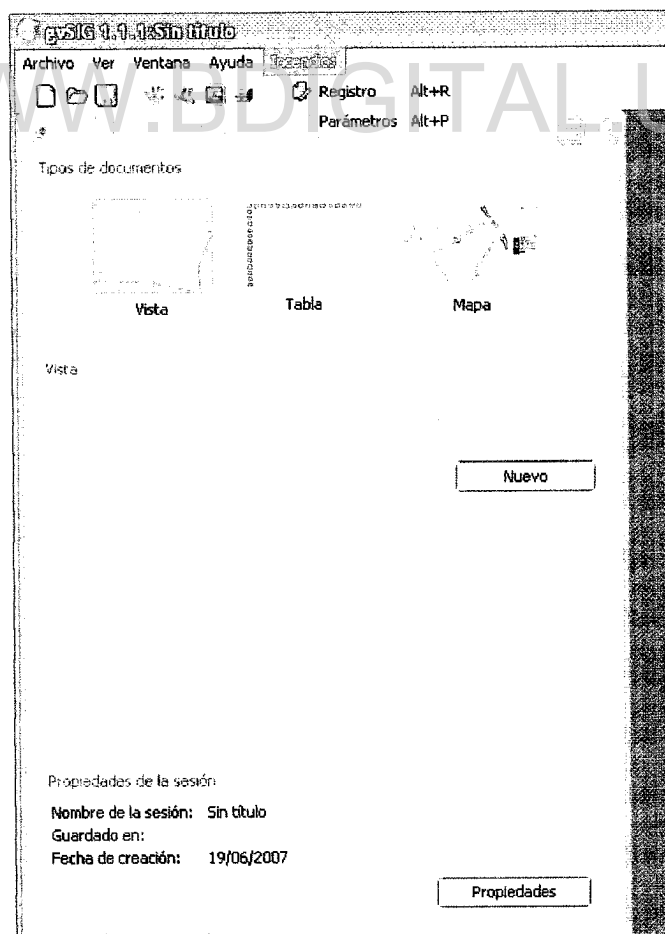


Figura 38. Menú Incendios

Se crearon e implementaron muchas otras clases para lograr los prototipos de los módulos Registro de Incendios y Parámetros. Estos se sometieron a evaluación por parte del usuario, el Ingeniero Ramón Jáuregui, quien solicitó:

- ✓ Depurar los valores del parámetro dirección del viento.
- ✓ Listar los valores de los parámetros, ordenados de manera ascendente por identificador único.
- ✓ Que por defecto, la fecha de inicio del incendio sea la fecha de aviso ingresada por el usuario.
- ✓ Facilitar al usuario información sobre el municipio y parroquia donde ocurre el incendio, a partir de las coordenadas UTM del incendio.

La Figura 39 muestra la interfaz gráfica del módulo Parámetros, ya depurado, y listando los valores del parámetro Propiedad.

Id	Propiedad
1	Nación
2	Privadas
3	Ejidos
4	Baldío
5	Entidad Pública
6	Municipal

Figura 39. Interfaz gráfica del módulo Parámetros

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Los parámetros de la aplicación son: Causa del incendio, Clasificación del incendio, Combustible, Detección, Dirección del viento, Estado de la vegetación, Inclinación, Organismo, Propiedad, Resinas, Sector, Tipos de incendio y Vegetación. Al hacer clic sobre los botones de la interfaz, se despliegan las ventanas que permiten agregar, modificar o eliminar valores de estos parámetros. Ver Figuras 40, 41 y 42.

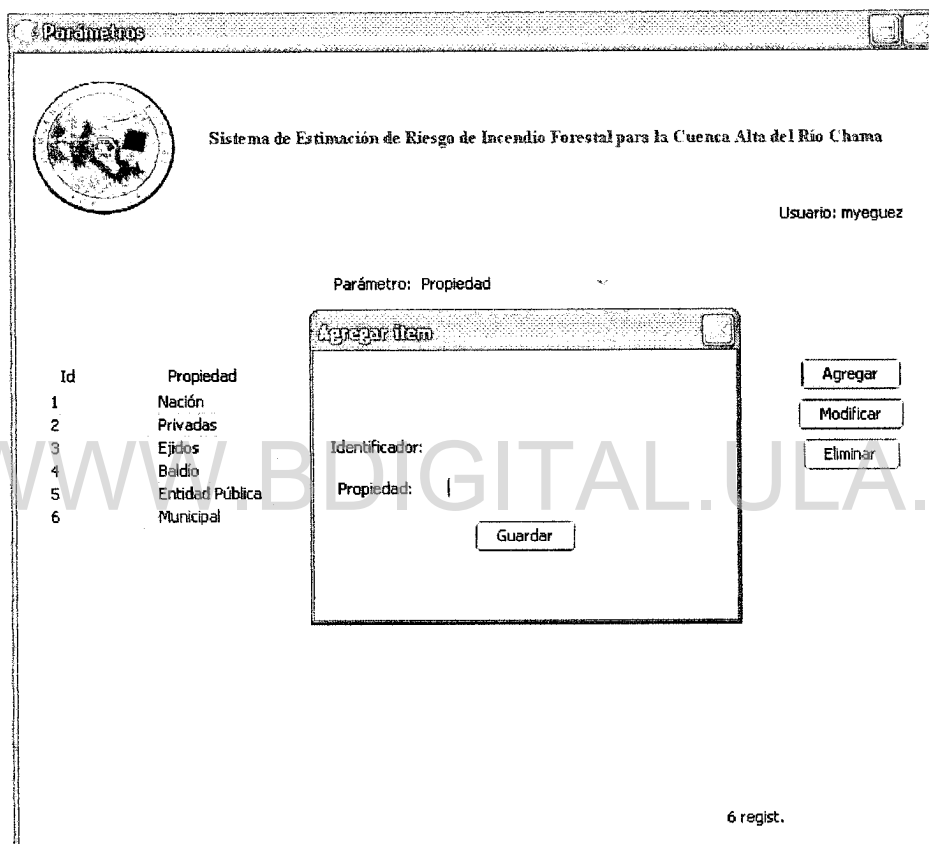


Figura 40. Interfaz gráfica para agregar valor de parámetro

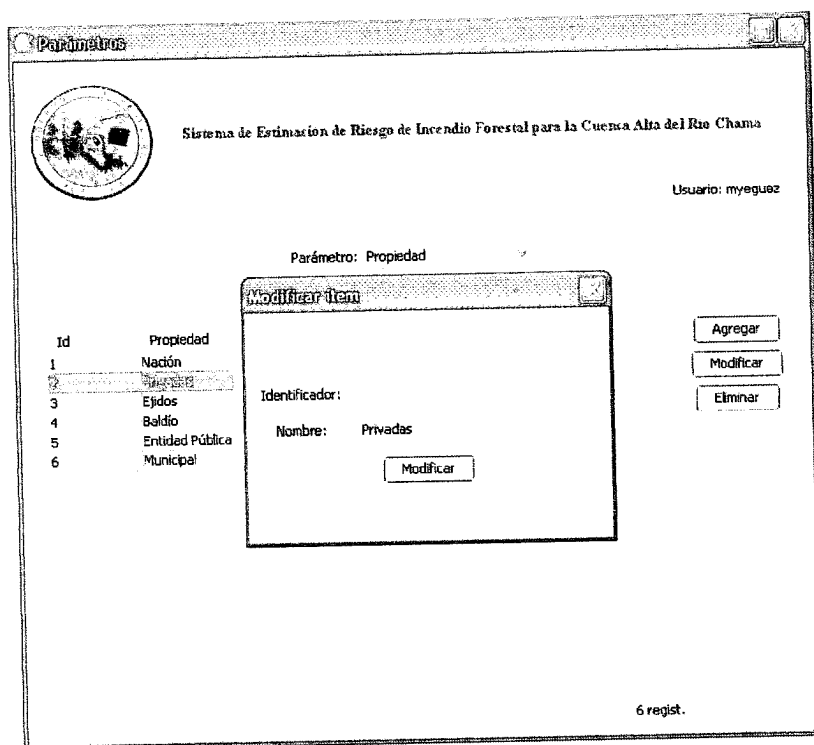


Figura 41. Interfaz gráfica para modificar valor de parámetro

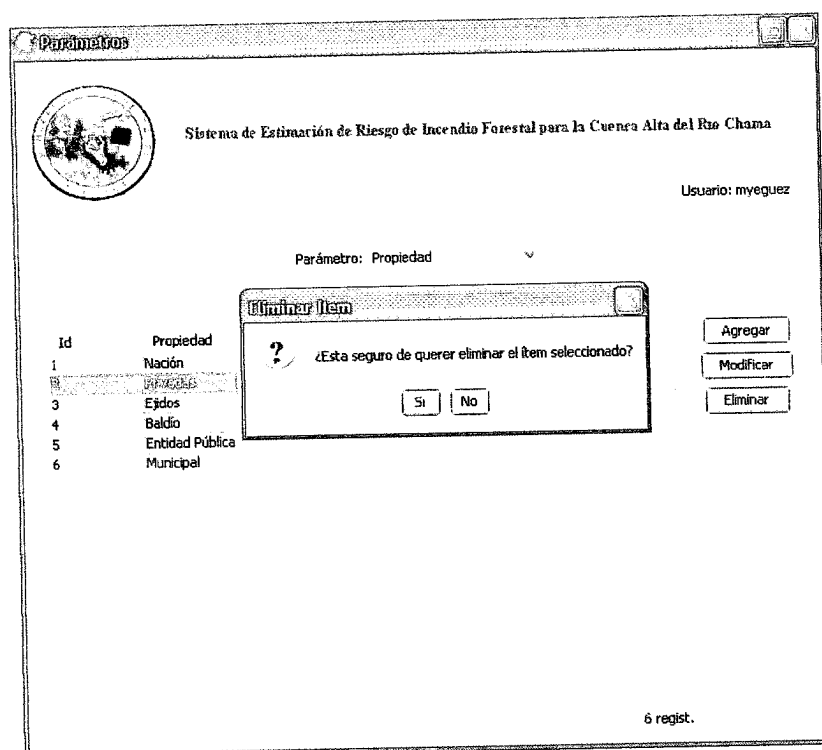


Figura 42. Interfaz gráfica para eliminar valor de parámetro

La interfaz gráfica del Módulo Registro de Incendios se ha estructurado en dos pestañas, la primera se ha destinado para los datos generales del incendio. Estos a su vez se han organizado en varios paneles: Aviso, Inicio y Ubicación (ver Figura 43).

Registro de Incendios

Sistema de Estimación de Riesgo de Incendio Forestal para la Cuenca Alta del Río Chama

Usuario: myeguez

General | Elementos

Nº:

Aviso

Fecha (d/m/a): Hora (h:m): Detección:

Nombre: Organismo:

Inicio

Día: Fecha (d/m/a): Hora (h:m):

Ubicación

Estado: Sector:

Municipio: Norte: Este:

Parroquia: Visualizar

Clasificación: Tipo: Terrestre

Área afectada (ha): Vegetación afectada: Subterráneo

Causa: Propiedad: Matorral

Guardar

Figura 43. Interfaz gráfica del Módulo Registro de Incendios (primera pestaña)

La Figura 44 muestra una vista que puede desplegar el usuario, al hacer clic sobre el botón Visualizar, siempre y cuando haya ingresado unas coordenadas UTM validas para la Cuenca. Esta vista proporciona información sobre el municipio y parroquia donde ha ocurrido el incendio.

Vista: Incendio (945944.28, 230260.78)

☒ mm_inceni
☐ Default
☒ mm_parroquia
☐ Default
☒ mm_municipio
☐ Default
☒ mm_estado
☐ Default

General Elementos

Nº:

Aviso:

Fecha (d/m/a):

Nombre:

Inicio:

Día: Domingo

Ubicación:

Estado: Merida

Municipio: Sucre

Parroquia: LA TRAMPA

Norte: 945944.28 Este: 230260.78

Visualizar

Clasificación: Incendio

Tipo: Copa

Vegetación afectada: Matorral

Propiedad: Nación

Causa: Naturales

Área afectada (ha):

Guardar

Figura 44. Vista de incendio

La Figura 45 muestra la segunda pestaña de la interfaz del módulo Registro de Incendios, que permite capturar los datos asociados a los tres elementos que conforman la Gran Tríada del Comportamiento del Fuego: Combustible, Topografía y Meteorología. Al hacer clic sobre el botón Guardar, se almacenan los datos registrados del incendio.

Registro de Incendios

Sistema de Estimación de Riesgo de Incendio Forestal para la Cuenca Alta del Río Chama

Usuario: myeguez

General Elementos

Combustible:

Vegetación: Estado:

Resinas: Tipo:

Topografía:

Altitud (m.s.n.m.): Inclinación:

Meteorología:

Temperatura (°C): Humedad relativa:

Dirección del viento: NE Velocidad del viento (Km/h):

Guardar

Figura 45. Interfaz gráfica del Módulo Registro de Incendios (segunda pestaña)

4.7.3 Módulos Gestión de incendios y Estadísticas

Aprobados los dos primeros módulos, se empiezan a desarrollar mediante prototipos los módulos Gestión de Incendios (para visualizar, modificar y eliminar registros de incendios) y el de Estadísticas. El primer paso fue crear las clases de extensión, para luego agregar las correspondientes entradas al menú Incendios, modificando nuevamente el archivo `config.xml`.

Estos dos módulos fueron sometidos a evaluación por parte del usuario, el Ingeniero Ramón Jáuregui, quien solicitó mantener en la interfaz del módulo Estadísticas el rango de horas como un parámetro, a pesar de que en estos momentos no se cuenta con esos datos.

El módulo Gestión de Incendios permite visualizar los registros de incendios que han ocurrido dentro de un rango de fechas definidas por el usuario. En la Figura 46 se muestra el Módulo Gestión de Incendios, listando los incendios ocurridos entre el 20/06/2007 y el 20/06/2008.

Gestión de Incendios

Sistema de Estimación de Riesgo de Incendio Forestal para la Cuenca Alta del Río Chama

Usuario: myeguez

Fecha inicial (d/m/a): 20/6/2007 Fecha final (d/m/a): 20/6/2008 Buscar

Id	Fecha. aviso	Hora aviso	Detección	Nombre	Organismo	Día inicio
142			Radio			
144			Radio			
145			Radio			
146			Telefónica			
147			Radio			

Modificar Eliminar

5 regis.

Figura 46. Interfaz gráfica del Módulo Gestión de Incendios

Para modificar o eliminar un registro de incendio basta con seleccionarlo y hacer clic sobre el botón respectivo (Modificar o Eliminar), ver Figuras 47 y 48.

Registro de incendios

Sistema de Estimación de Riesgo de Incendio Forestal para la Cuenca Alta del Río Chama

Usuario: myeguez

General Elementos

Fecha inicial: Nº: 144

Aviso

Fecha (d/m/a): 21/6/ Hora (h:m): 13 : 00 Detección: Radio

Nombre: Manuel Peña Organismo: Centro Estatal de Operaciones Contra Incendios Forestales

Inició

Día: Domingo Fecha (d/m/a): 21/6/2007 Hora (h:m): 11 : 00

Ubicación

Estado: Merida Sector: Chorro de Milla

Municipio: Libertador Norte: 949260.88 Este: 257070.21

Parroquia: MILLA

Visualizar

Clasificación: Incendio Tipo: Terrestre

Vegetación afectada: Herbazal

Área afectada (ha): 2

Causa: Desconocida Propiedad: Nación

Guardar

Figura 47. Interfaz gráfica modificando registro de incendios

Gestión de incendios

Sistema de Estimación de Riesgo de Incendio Forestal para la Cuenca Alta del Río Chama

Usuario: myeguez

Fecha inicial (d/m/a): 20/6/2007 Fecha final (d/m/a): 20/6/2008

Buscar

Id	Fecha aviso	Hora aviso	Detección	Nombre	Organismo	Día inicio	
142			Radio				Modificar
143			Radio				Eliminar
145			Radio				
146							
147							

Eliminar Registro

¿Esta seguro de querer eliminar el registro seleccionado?

SI No

5 regis.

Figura 48. Interfaz gráfica eliminando registro de incendios

La Figura 49 presenta la interfaz gráfica del módulo Estadísticas, en este caso muestra el número total de incendios por mes y por tipo de combustible, entre el rango de fechas 20/06/2005 y 20/06/2007. Y la Figura 50 muestra las mismas estadísticas pero en Resumen.

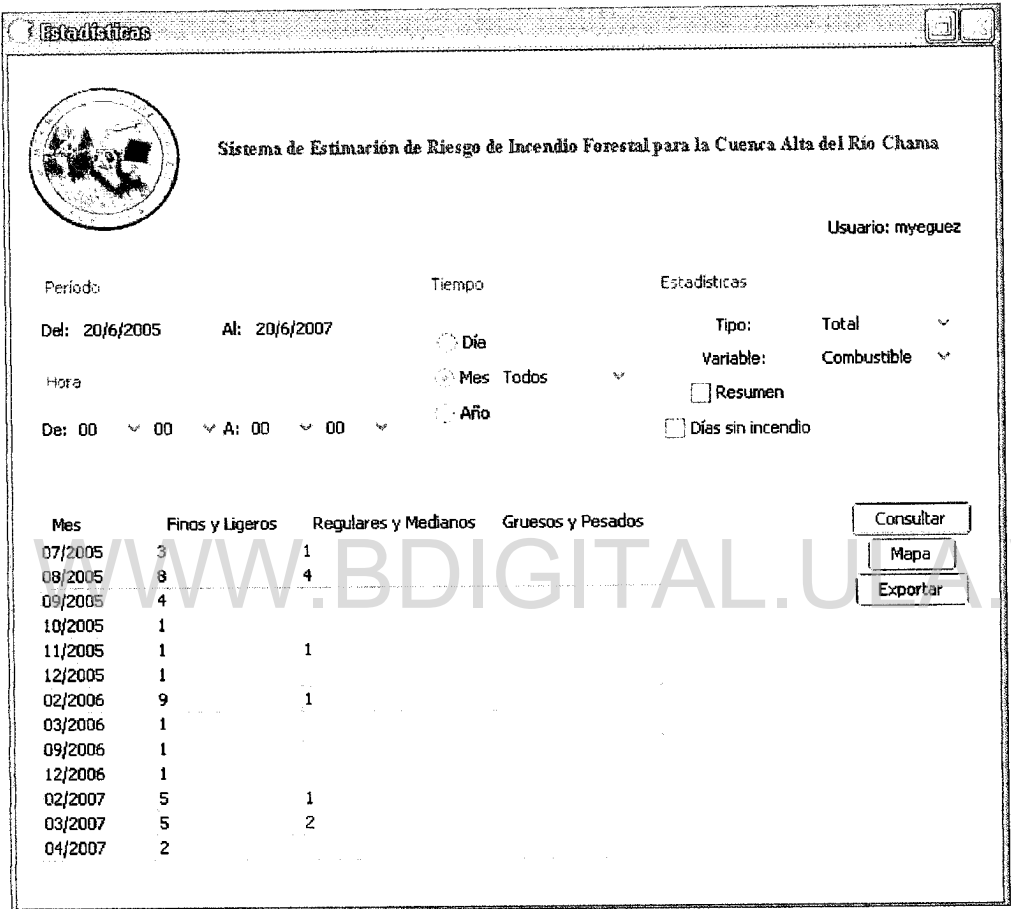


Figura 49. Interfaz gráfica del Módulo Estadísticas

Estadísticas

Sistema de Estimación de Riesgo de Incendio Forestal para la Cuenca Alta del Río Chama

Usuario: myeguez

Periodo: Del: 20/6/2005 Al: 20/6/2007

Tiempo: ☐ Día ☐ Mes ☐ Año

Estadísticas: Tipo: Total Variable: Combustible ☒ Resumen ☐ Días sin incendio

Mes	Finos y Ligeros	Regulares y Medianos	Gruesos y Pesados
02	14	2	
03	6	2	
04	2		
07	3	1	
08	8	4	
09	5		
10	1		
11	1	1	
12	2		

Consultar Mapa Exportar

Figura 50. Interfaz gráfica del Módulo Estadísticas (en resumen)

El módulo permite generar un archivo CSV con las estadísticas, al hacer clic sobre el botón Exportar, ver Figura 51.

```

Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Combustible-Totales, 20/06/2005, 20/06/2007
Mes,Finos y Ligeros,Regulares y Medianos,Gruesos y Pesados
07/2005,3,1,0
08/2005,8,4,0
09/2005,4,0,0
10/2005,1,0,0
11/2005,1,1,0
12/2005,1,0,0
02/2006,9,1,0
03/2006,1,0,0
09/2006,1,0,0
12/2006,1,0,0
02/2007,5,1,0
03/2007,5,2,0
04/2007,2,0,0
  
```

Figura 51. Archivo CSV con las estadísticas

En la Figura 52 se presenta el número total de incendios por día y por municipio, entre el rango de fechas 01/03/2006 y 31/07/2006. Al seleccionar una de las filas y luego hacer clic sobre el botón Mapa, la aplicación despliega una vista con los incendios asociados, ver Figura 53.

Estadísticas

Sistema de Estimación de Riesgo de Incendio Forestal para la Cuenca Alta del Río Chama

Usuario: myeguez

Período: Del: 01/03/2006 Al: 31/07/2006

Hora: De: 00:00 A: 00:00

Tiempo: ☒ Día ☐ Mes ☐ Año

Estadísticas: Tipo: Total Variable: Municipio

☐ Resumen ☐ Días sin incendio

Día	Municipio	Incendios
01/03/2006 (Mie)	Libertador	1

Consultar Mapa Exportar

Figura 52. Número total de incendios por día y por municipio

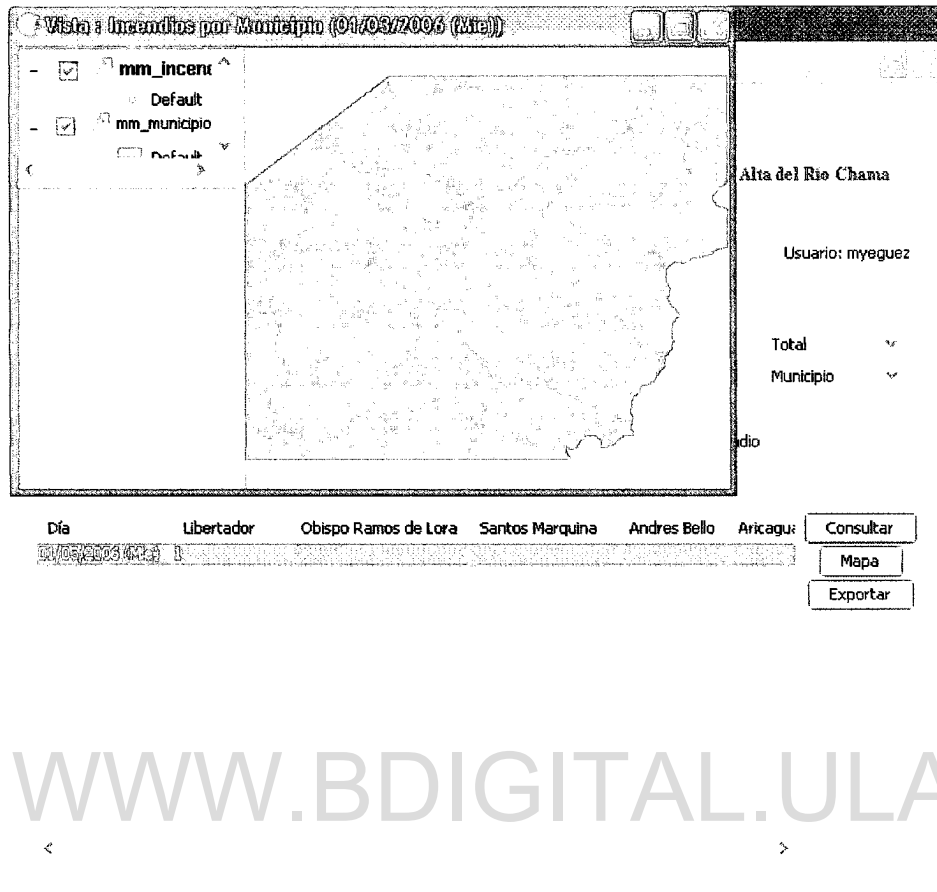


Figura 53. Vista de estadística

4.7.4 Módulo Índice de Riesgo de Incendios Estático

Para construir el módulo Índice de Riesgo Estático, se crea una nueva clase de extensión y se agrega la entrada Índice de Riesgo Estático al menú Incendios. El módulo Índice de Riesgo Estático hace uso de una estructura de árbol de criterios, al mismo estilo del módulo SMCE del software ILWIS. Esta estructura de árbol de criterios considera todos los criterios relevantes, permitiendo también agruparlos. Este módulo automatiza el cálculo del índice de riesgo de incendio estático usando la Técnica de Evaluación Multicriterio Punto Ideal y como insumo la estructura de árbol de criterios.

El módulo Índice de Riesgo Estático facilita el modelado de un índice de riesgo de incendio estático para el año 2004. La Figura 54 muestra la interfaz del módulo Índice de

Riesgo Estático. Se requiere especificar un nombre o descripción para el índice, el año del índice (en función de los datos a usar), la fecha de creación y el tamaño de la celda en metros. Todos estos datos se almacenan en la base de datos al hacer clic sobre el botón Guardar.

Índice de Riesgo Estático

Sistema de Estimación de Riesgo de Incendio Forestal para la Cuenca Alta del Rio Chama

Usuario: myeguez

Grupo Factor Restricción Editar Eliminar Comparación Evaluación

Descripción: Índice Estático Año: 2010 Fecha: 10/11/2009 Celda(mts.): 35.0

I: Índice

Padre:

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Figura 54. Interfaz gráfica del módulo Índice de Riesgo Estático

Se diseñó una barra de botones cuyas funcionalidades permiten construir la estructura de árbol de criterios, realizar la comparación por pares de los grupos/criterios y comenzar el proceso de evaluación. A continuación se describen la funcionalidad de cada uno de los botones:

En botón Grupo crea un nodo hijo al nodo en ese momento seleccionado, este nodo hijo lucirá como una carpeta y estará destinada a contener otros grupos, factores o una combinación de ellos. Para crear un Grupo solo se requiere darle un nombre, ver Figura 55.

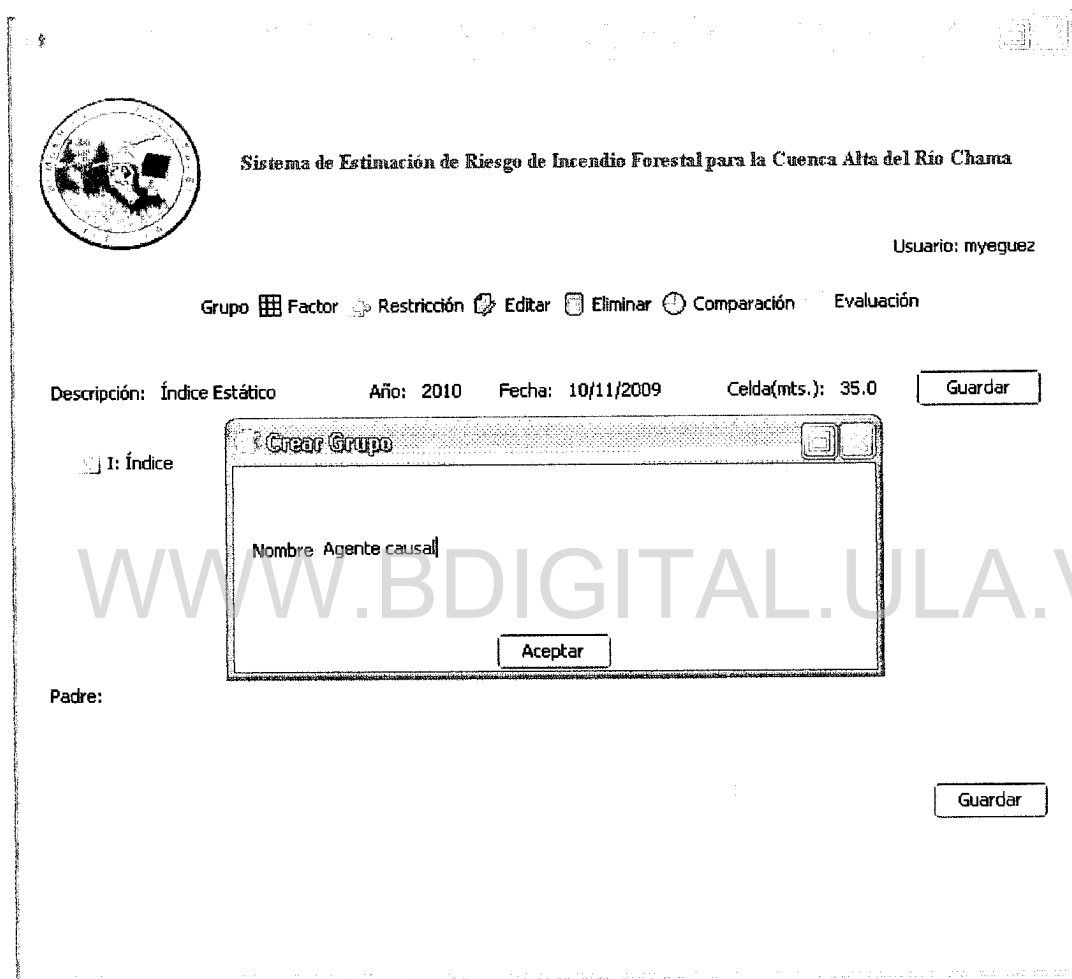


Figura 55. Interfaz gráfica Crear Grupo

El botón Factor crea un nodo hijo al nodo en ese momento seleccionado, este nodo hijo lucirá como una capa raster y ha de ser nodo hoja. Los factores son criterios que pueden compensarse con otros. Para crear un factor se requiere un nombre para el factor, el nombre de una capa raster, definir las categorías del raster y realizar la correspondiente comparación por pares, a fin de poder calcular los pesos asociados a cada una de las categorías, ver Figura 56.

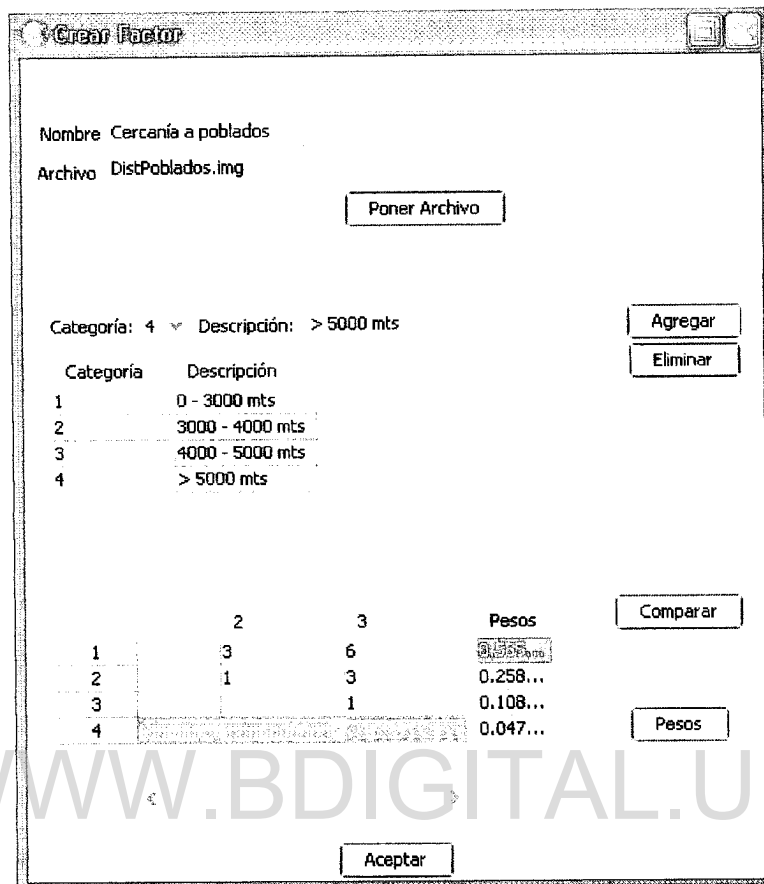


Figura 56. Interfaz gráfica Crear Factor

Mientras que el botón Restricción se usa para crear un nodo hijo al nodo raíz, luce como una pieza de un rompecabezas, y representa un criterio que no permite compensación. Para su definición se requiere de un nombre para la restricción y el nombre de una capa raster, ver Figura 57.

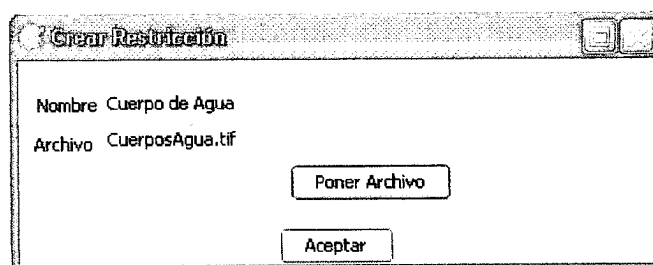


Figura 57. Interfaz gráfica Crear Restricción

De forma similar se agregan todos los grupos, factores y restricciones necesarias. De ser necesario, se usan los botones Editar y Eliminar que permiten modificar el nodo seleccionado (grupo, factor o restricción) o eliminarlo respectivamente.

Para poder calcular el índice de riesgo de incendio, es imprescindible realizar la comparación por pares de los grupos y los criterios del árbol de criterios. Se comienza la comparación al hacer clic sobre el botón Comparación, de la barra de botones, esto habilita el panel inferior de la interfaz. En el panel inferior se encuentra el componente Padre, allí se listan todos los nodos padres cuyos nodos hijos necesitan compararse. Al seleccionar cada nodo padre y hacer clic en el botón Comparar del panel inferior se configura la matriz de comparación respectiva. Usando los botones Pesos y Guardar se podrán calcular los pesos de los grupos/criterios para luego guardarlos en la base de datos, ver Figura 58.

Índice de Riesgo Estático

Sistema de Estimación de Riesgo de Incendio Forestal para la Cuenca Alta del Río Chama

Usuario: myeguez

Grupo Factor Restricción Editar Eliminar Comparación Evaluación

Descripción: Índice Estático Año: 2010 Fecha: 10/11/2009 Celda(mts.): 35.0 Guardar

Índice

- G1: Agente causal
 - F1: Cercanía a poblados (DistPoblados.img)
 - F2: Cercanía a vialidad (DistVialidad.img)
 - R1: Cuerpo de Agua (CuerposAgua.tif)

Padre: G1: Agente causal

	Cercanía a poblados	Cercanía a vialidad	Pesos
Cercanía a ... 1	3		0.75
Cercanía a ...		1	0.25

Comparar Pesos Guardar

Figura 58. Comparación por pares de los grupos y los criterios del árbol de criterios

Finalmente, para calcular el índice de riesgo de incendio estático se hace clic sobre el botón Evaluación. A continuación se presenta el algoritmo recursivo que se implementó para el cálculo del índice de riesgo estático.

```
calcularIndice(nodo raiz)
```

```
calcularIndice(nodo) {
```

```
    SI nodo tiene por lo menos un hijo ENTONCES{
```

```
        Para cada hijo de nodo{
```

```
            SI hijo es un Grupo ENTONCES calcularIndice(hijo)
```

```
            SI hijo es un Factor ENTONCES
```

```
estandarizarRaster(hijo)
```

```
        }
```

```
        calcularPuntoIdeal(nodo)
```

```
    }
```

```
}
```

La función estandarizarRaster es la implementación de la Ecuación 4 y la función calcularPuntoIdeal la implementación de la Ecuación 3, usando $p=2$ para obtener una compensación parcial entre criterios.

4.7.5 Módulo Índice de Riesgo de Incendios Dinámico

Se agrega al menú Incendios una entrada para acceder al módulo Índice de Riesgo Dinámico, que no es más que la implementación de la Ecuación 2, correspondiente al índice de stress de vegetación presentado por Illera (1995).

La Figura 59 presenta la interfaz del módulo Índice de Riesgo Dinámico. Este módulo requiere una descripción, el período para el cual se va a calcular el índice (fecha

inicial, fecha final), el tamaño de la celda, el nombre de la capa correspondiente al índice acumulado (si existe), los nombres de las composiciones Modis NDVI que se van a restar y la periodicidad de las composiciones.

Índice de Riesgo Dinámico

Sistema de Estimación de Riesgo de Incendio Forestal para la Cuenca Alta del Rio Chama

Usuario: myeguez

Descripción: AS1 (Temp. 2007-2008) Fecha inicial: 03-12-2007 Fecha final: 18-12-2007 Guardar

Capa acumulado: Celda(mts.): 250

Capa NDVI 1: gndv2007-305.tif

Capa NDVI 2: gndv2007-321.tif

Nº de días: 16

Figura 59. Interfaz gráfica del módulo Índice de Riesgo Dinámico

4.8 Modelado del Índice de Riesgo de Incendios Estático para el año 2004

A continuación, se explican los pasos que permitieron modelar un índice de riesgo de incendios estático, usando la Técnica de Punto Ideal.

4.8.1 Definición del problema

Se modela un índice de riesgo de incendio integrado para el año 2004, ya que los mapas (criterios) disponibles son del año 2003. Este índice de riesgo integrado considera la Ignición y la Propagación. La Ignición a su vez considera Agente causal y Combustible; mientras que por Propagación solo se toma en cuenta la Pendiente. Todo esto se traduce en objetivos complementarios.

4.8.2 Generación de alternativas

Para el cálculo del índice se usa la estructura de datos raster, donde cada una de las celdas se constituye en una alternativa. Gracias al cálculo de estadísticas básicas sobre la variable área de los incendios forestales (en hectáreas), registradas por el CEOCIF, se logró determinar la unidad mínima cartografiable y a su vez el tamaño de celda a usar.

Media aritmética:	11,07
Mediana:	2,00
Moda:	2,00
Mínimo:	0,50
Máximo:	1400,00
Primer cuartil:	1,00
Tercer cuartil:	4,00

Siendo 0,50 hectáreas (5000 m^2) el área mínima registrada y como no se cuenta con información referente al perímetro de los incendios, se asume que el área afectada tiene forma de un cuadrado, ver Figura 60. Siendo la unidad mínima cartografiable 70,71 m y el tamaño de la celda en consecuencia 35,35 m ($70,71 / 2$).

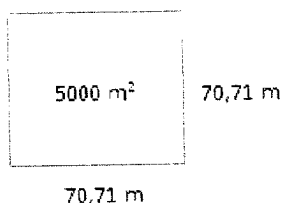


Figura 60. Mínima área afectada por incendios

4.8.3 Modelado de los criterios

La Figura 61 muestra los criterios asociados a cada objetivo, en función de los mapas disponibles. A continuación, se proporcionan detalles de cada criterio. La mayoría

son propuestas, algunos elementos son extraídos de otras investigaciones, pero todo aprobado por el usuario.

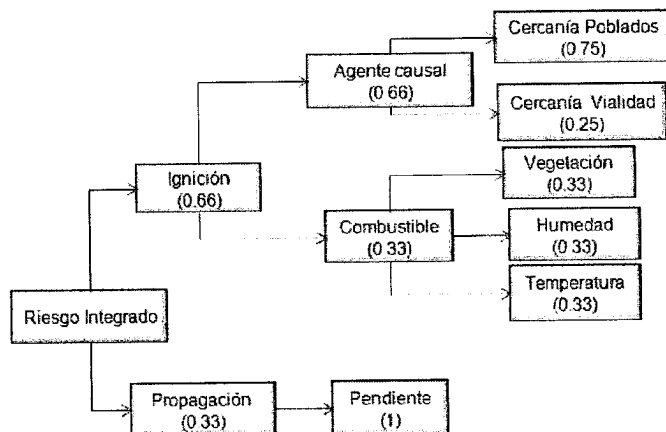


Figura 61. Riesgo Integrado

Al mapa Centros poblados, proveniente del Minamb, se le calcularon los buffers de la Tabla 9, al mapa resultante se le llamó Cercanía a Poblados.

Categoría	Descripción
1	0-3000 m
2	3000 – 4000 m
3	4000 – 5000 m
4	Más de 5000 m

Tabla 9 Buffers de Cercanía a Poblados

Las categorías del mapa Cercanía a Poblados se compararon, resultando consistente, tal como se muestra en la Tabla 10.

Categoría	1	2	3	4	Pesos
1	1	3	6	9	0.585
2		1	3	6	0.259
3			1	3	0.108
4				1	0.048

Tabla 10 Matriz de comparación de las categorías de Cercanía a Poblados

Al mapa Vialidad, proveniente también del Minamb, se le calcularon los buffers de la Tabla 11, al mapa resultante se le llamó Cercanía a Vialidad.

Categoría	Descripción
1	0-50 m
2	50 – 100 m
3	100 – 150 m
4	Más de 150 m

Tabla 11 Buffers de Cercanía a Vialidad

Una comparación consistente de categorías para el criterio Cercanía a Vialidad se muestra en la Tabla 12.

Categoría	1	2	3	4	Pesos
1	1	3	6	9	0.585
2		1	3	6	0.259
3			1	3	0.108
4				1	0.048

Tabla 12 Matriz de comparación de las categorías de Cercanía a Poblados

El criterio Vegetación es el mismo mapa de Vegetación, proveniente del Minamb, las categorías presentes en este mapa se muestran en la Tabla 13:

Categoría	Descripción
0	Área intervenida
1	Bosque fuertemente intervenido
2	Espinar
3	Bosque moderadamente intervenido
4	Nubes
5	Matorral
6	Bosque levemente intervenido
7	Bosque sin intervención aparente

8	Páramo
9	Urbano
10	Café de sombra
11	Mosaico

Tabla 13 Categorías del criterio Vegetación

Además de las categorías listadas, el mapa de vegetación presenta celdas sin datos. “Sin datos” y categorías como Nubes y Mosaico se obviaron al momento de hacer la comparación por pares, automáticamente se le asignó un peso de cero. La Tabla 14 muestra la comparación consistente de las categorías restantes del mapa Vegetación.

Categoría	0	1	2	3	5	6	7	8	9	10	Pesos
0	1	1	3	5	3	7	9	5	3	7	0.24
1		1	3	5	3	7	9	5	3	7	0.24
2			1	3	1	5	7	3	1	5	0.11
3				1	1/3	3	5	1	1/3	3	0.05
5					1	5	7	3	1	5	0.11
6						1	3	1/3	1/5	1	0.03
7							1	1/5	1/7	1/3	0.02
8								1	1/3	3	0.05
9									1	5	0.11
10										1	0.03

Tabla 14 Matriz de comparación de las categorías de Vegetación

El criterio Humedad es el mapa Régimen de humedad del Minamb, el cual presenta las categorías mostradas en la Tabla 15:

Categoría	Descripción
1	0-600 mm
2	600 – 1400 mm
3	Mas de 1400 mm

Tabla 15 Categorías del criterio Humedad

Una comparación consistente de las categorías del criterio Humedad, se muestra en la Tabla 16.

Categoría	1	2	3	Pesos
1	1	3	7	0.669
2		1	3	0.243
3			1	0.088

Tabla 16 Matriz de comparación de las categorías de Humedad

El criterio Temperatura es el mismo mapa Régimen de temperatura del Minamb, sus categorías se muestran en la Tabla 17. Este mapa también presenta celdas sin datos, las que tendrán un peso de cero en este criterio.

Categoría	Descripción
1	Más de 24°
2	24° - 18°
3	18° - 12°
4	12° - 9°
5	9° - 6°

Tabla 17 Categorías del criterio Temperatura

La comparación consistente de las categorías de Régimen de temperatura se muestra en la Tabla 18.

Categoría	1	2	3	4	5	Pesos
1	1	2	4	6	8	0.47
2		1	2	4	6	0.27
3			1	2	4	0.14
4				1	2	0.08
5					1	0.04

Tabla 18 Matriz de comparación de las categorías de Temperatura

El mapa del criterio Pendiente/Inclinación se calcula a partir del mapa Modelo digital del terreno proveniente del Minamb, las categorías en las que se reclasificó la pendiente se muestran en la Tabla 19.

Categoría	Descripción
1	45° - 90
2	30° - 44.999°
3	10° - 29.999°
4	0° - 9.999°

Tabla 19 Categorías del criterio Pendiente

En la Tabla 20 se observa la comparación de las categorías del criterio Pendiente, esta comparación también es consistente.

Categoría	1	2	3	4	Pesos
1	1	3	7	9	0.592
2		1	3	7	0.262
3			1	3	0.101
4				1	0.045

Tabla 20 Matriz de comparación de las categorías de Pendiente

Ahora se presenta la comparación de los objetivos o criterios de Riesgo integrado, Ignición, Agente causal y Combustible. Se verificó la consistencia de todas estas comparaciones, ver Tablas 21, 22, 23 y 24.

Objetivos	Ignición	Propagación	Pesos
Ignición	1	2	0.66
Propagación		1	0.33

Tabla 21 Matriz de comparación de los objetivos de Riesgo integrado

Objetivos	Agente causal	Combustible	Pesos
Agente causal	1	2	0.66
Combustible		1	0.33

Tabla 22 Matriz de comparación de los objetivos de Ignición

Criterios	Cercanía a Poblados	Cercanía a Vialidad	Pesos
Cercanía a Poblados	1	3	0.75
Cercanía a Vialidad		1	0.25

Tabla 23 Matriz de comparación de los criterios de Agente causal

Criterios	Vegetación	Humedad	Temperatura	Pesos
Vegetación	1	1	1	0.33
Humedad		1	1	0.33
Temperatura			1	0.33

Tabla 24 Matriz de comparación de los criterios de Combustible

4.8.4 Evaluación de las alternativas

Para llevar a cabo la evaluación se hace uso del módulo Índice de Riesgo Estático, ver Figura 62. La salida es una capa cuyos valores oscilan entre 0 y 100, representando 0 el menor riesgo, 100 el mayor riesgo y el resto valores intermedios, ver Figuras 63 y 64.

Índice de Riesgo Estático

Sistema de Estimación de Riesgo de Incendio Forestal para la Cuenca Alta del Río Chama

Usuario: myeguez

Grupo Factor Restricción Editar Eliminar Comparación Evaluación

Descripción: Índice Estático Año: 2004 Fecha: 05/11/2009 Celda(mts.): 35.0 **Guardar**

- **Índice**
 - **G1: Ignición**
 - **G2: Agente causal**
 - F1: Cercanía a poblados (DistPoblados.img)
 - F2: Cercanía a vialidad (DistVialidad.img)
 - **G3: Combustible**
 - F3: Vegetación (RecVeget.tif)
 - F4: Humedad (ReclassHum.img)

Padre: G1: Ignición

	Agente causal	Combustible	Pesos	
Agente causal	1	2	0.67	Comparar
Combustible		1	0.33	Pesos
				Guardar

Figura 62. Cálculo del Riesgo Integrado



Figura 63. Valores de riesgo del índice de riesgo estático

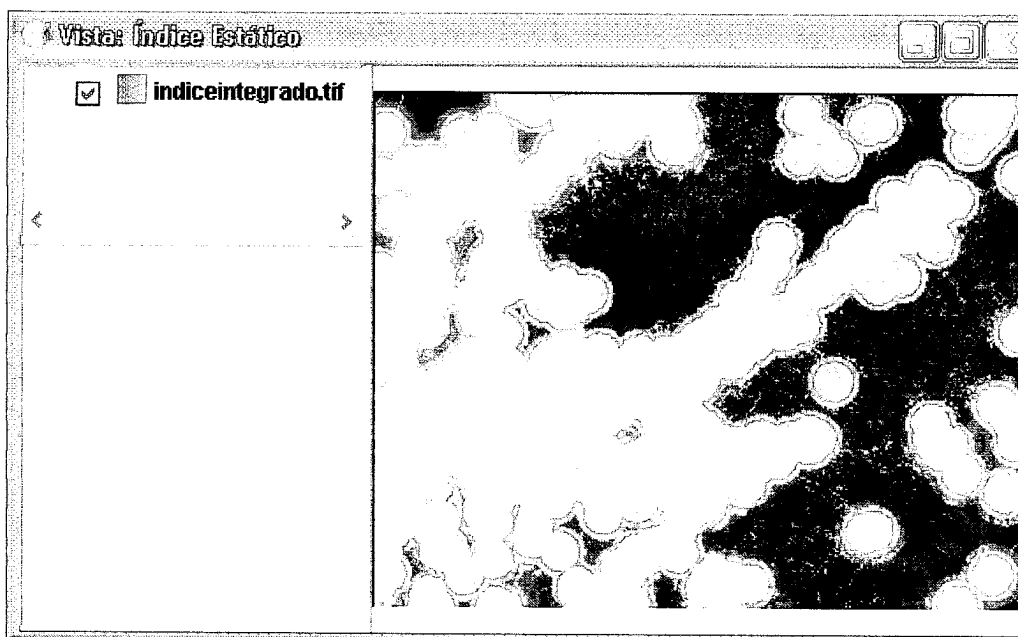


Figura 64. Salida del módulo Índice de Riesgo Estático

4.9 Índices de Riesgo de Incendios Dinámico

4.9.1 Esfuerzos por construir un índice de Riesgo de Incendios Dinámico Tradicional

En una primera instancia se pretendía construir un índice de riesgo de incendios dinámico tradicional. Se desistió de la idea al verificar que el Estado Mérida no cuenta con una red de estaciones meteorológicas funcionales; sin embargo es importante comentar los esfuerzos que se hicieron al respecto.

Se visitó el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, a fin de indagar sobre el Boletín climatológico nacional para la prevención de incendios forestales que ellos emiten mensualmente. El boletín incluye un análisis de tiempo meteorológico esperado para el mes siguiente, señalando las regiones del país con mayor riesgo climático para la propagación de los incendios (ver Figura 65), basado en el índice de riesgo de Anstrom. Para el cálculo de este índice se usan las variables humedad mínima y temperatura máxima. Al entrevistar al Geógrafo Carlos Urbina, responsable de la elaboración del boletín, comentó que dicho índice no es apropiado para estimar el riesgo climático en la región de los Andes.



Figura 65. Mapa de riesgo climático de incendios de vegetación

La experiencia de Dávila (2005) en la cuenca alta del río Caroní, alentó el cálculo del índice de Monte Alegre. Se usaron las variables humedad relativa del aire y número de días sin lluvia, de la estación San Juan, disponibles en la Red Bioclimática. Los valores obtenidos no eran absurdos para la zona; sin embargo se desistió al verificar el estado de la red de estaciones meteorológicas.

4.9.2 Índice de Stress de Vegetación temporada Noviembre 2007 - Abril 2008

Dejando a un lado los índices de riesgo de incendios dinámicos tradicionales, se decide probar el índice de stress de vegetación presentado por Illera (1995). Como se cuenta con las composiciones NDVI de los años 2007, 2008 y un poco del 2009, se resuelve trabajar con la temporada de incendios Noviembre 2007 - Abril 2008. La Tabla 25 lista las composiciones NDVI usadas (identificadas por el año y día juliano correspondiente al primer día del periodo), la fecha de inicio y la fecha fin.

Composición NDVI	Fecha de inicio	Fecha fin
2007-305	01-11-2007	16-11-2007
2007-321	17-11-2007	02-12-2007
2007-337	03-12-2007	18-12-2007
2007-353	19-12-2007	31-12-2007
2008-1	01-01-2008	16-01-2008
2008-17	17-01-2008	01-02-2008
2008-33	02-02-2008	17-02-2008
2008-49	18-02-2008	04-03-2008
2008-65	05-03-2008	20-03-2008
2008-81	21-03-2008	05-04-2008
2008-97	06-04-2008	21-04-2008

Tabla 25 Composiciones NDVI usadas para el índice de riesgo de incendios dinámico

Se calcula AS_1 hasta AS_{10} , usando el módulo Índice de Riesgo Dinámico. Por ejemplo, para calcular AS_1 el módulo desarrolla la Ecuación 5:

$$AS_1 = \sum_{i=1}^1 \frac{NDVI(321) - NDVI(305)}{321 - 305} \quad (5)$$

Las capas AS_n pueden tomar valores tanto positivos como negativos, ver Figura 66. Recuérdese que se esperan valores negativos para las zonas en peligro. La capa AS_1 se presenta en la Figura 67, a partir de esta capa se crea el índice de riesgo para el período de 16 días comprendido entre el 03-12-2007 y el 18-12-2007. La Figura 68 muestra el histograma de la capa AS_1 .

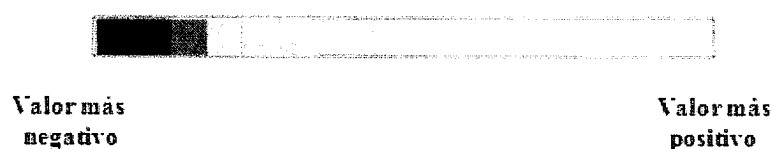


Figura 66. Valores de riesgo del índice de riesgo dinámico

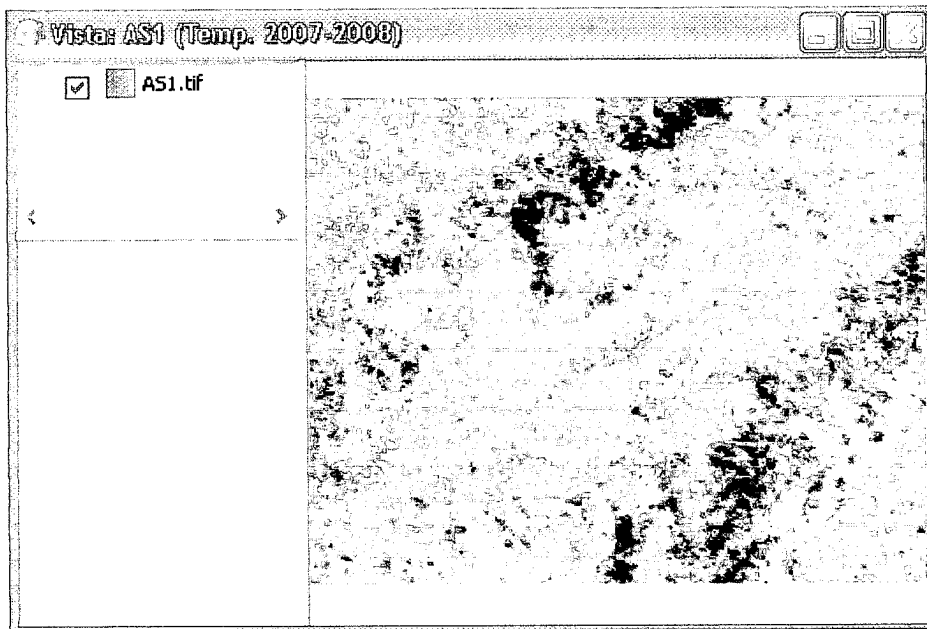


Figura 67. Capa AS₁

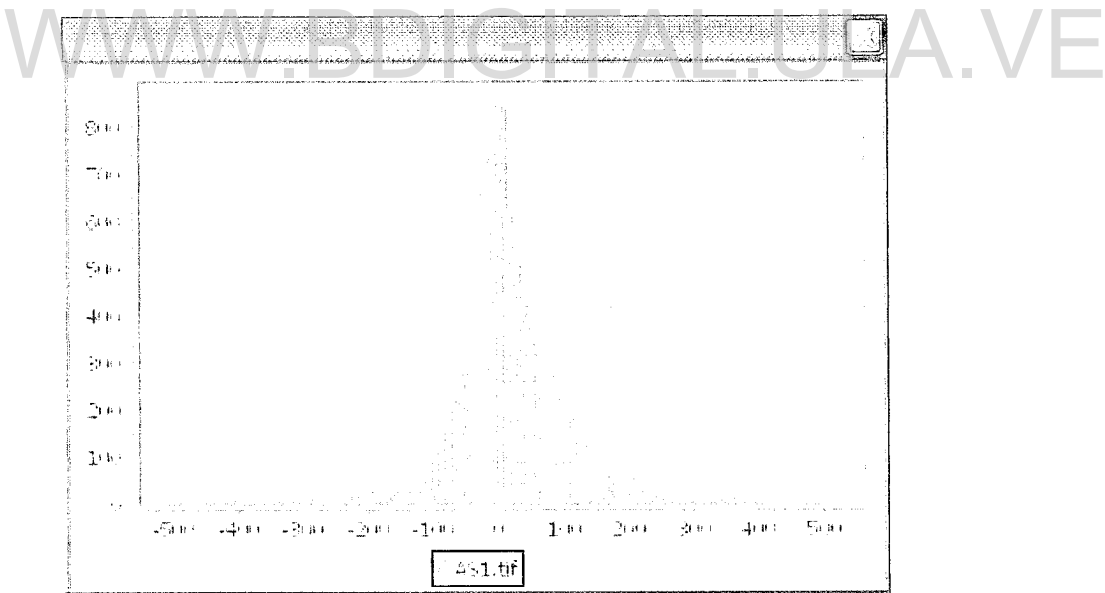


Figura 68. Histograma de la capa AS₁

Para calcula AS₂ se usa la Ecuación 6

$$AS_2 = AS_1 + \frac{NDVI(337) - NDVI(321)}{337 - 321} \quad (6)$$

Con la capa AS₂ se crea el índice de riesgo para el período comprendido entre el 19-12-2007 y el 31-12-2007. Las Figuras 69 y 70 muestran la capa resultante AS₂ y su histograma, respectivamente.

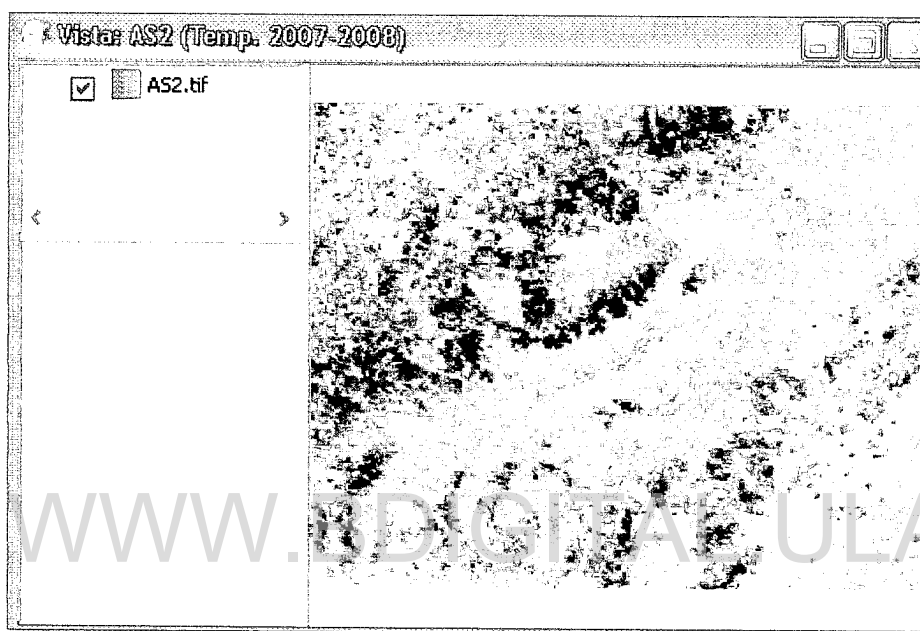


Figura 69. Capa AS₂

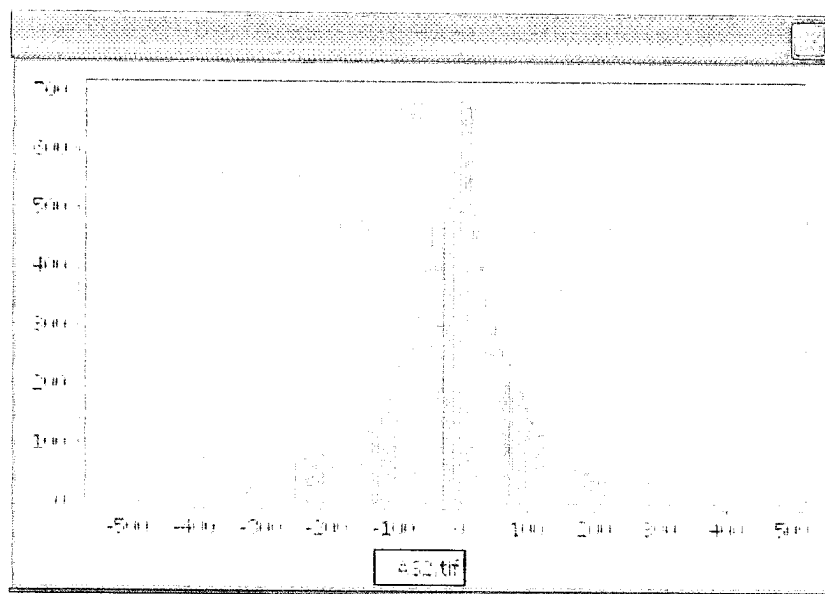


Figura 70. Histograma de la capa AS₂

La Ecuación 7 permite calcular AS_3 , capa que dará origen al índice de riesgo para el período comprendido entre el 01-01-2008 y el 16-01-2008. Las Figuras 71 y 72 muestran la capa y el histograma, respectivamente.

$$AS_3 = AS_1 + AS_2 + \frac{NDVI(353) - NDVI(337)}{353 - 337} \quad (7)$$

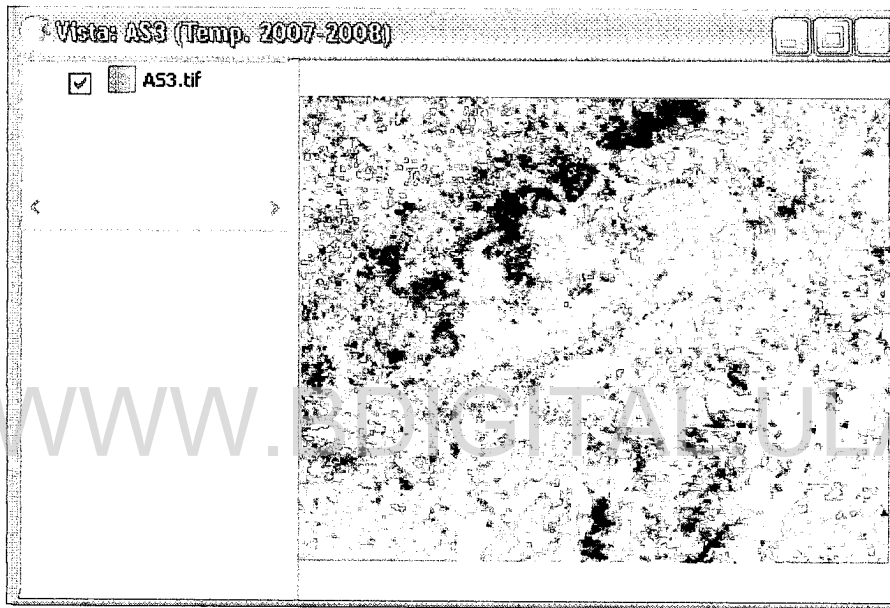


Figura 71. Capa AS_3

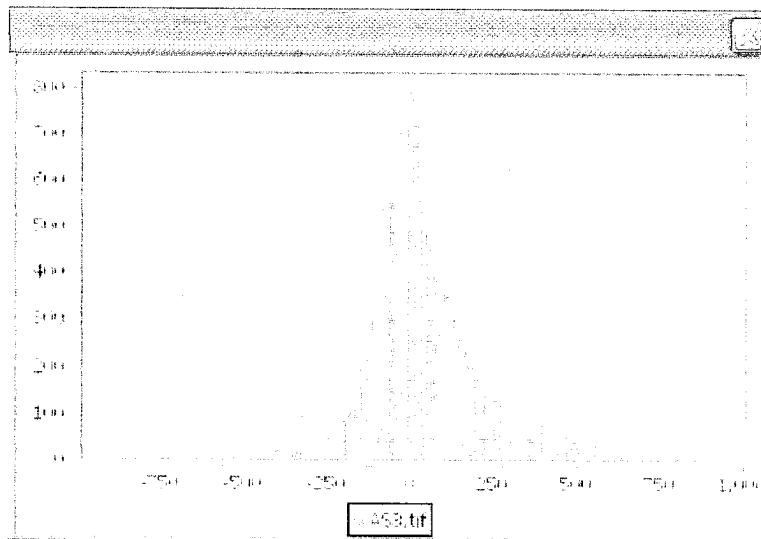


Figura 72. Histograma de la capa AS_3

El patrón se repite, para muestra la capa y el histograma de AS₉ (capa para el cálculo del índice de riesgo de incendios del período 06-04-2008 al 21-04-2008), ver Figuras 73 y 74.

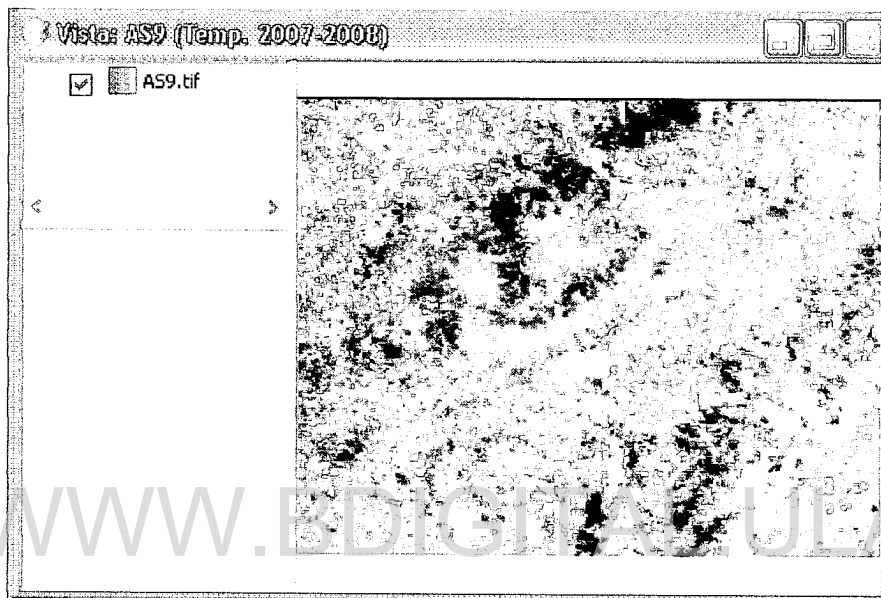


Figura 73. Capa AS₉

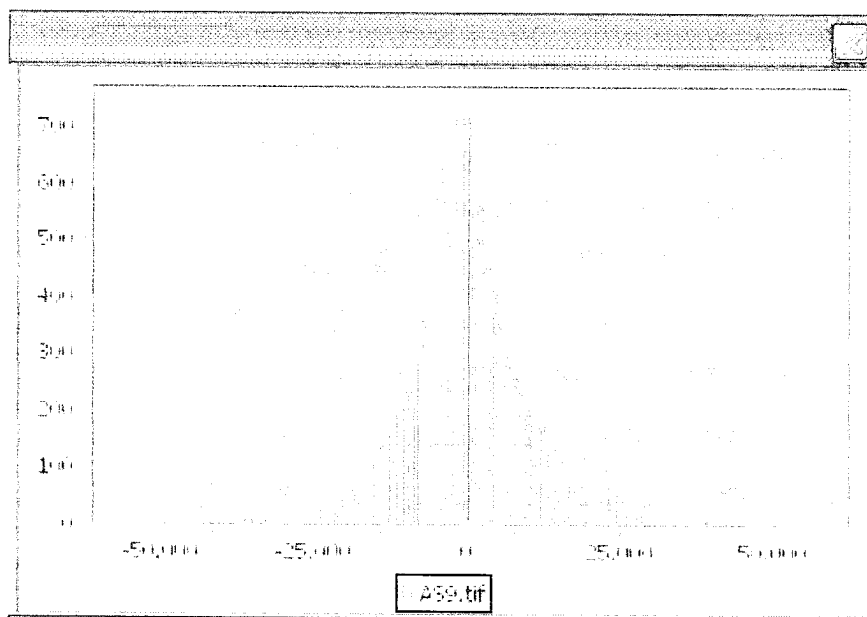


Figura 74. Histograma de la capa AS₉

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se definen los niveles de riesgo para cada uno de los índices y se validan estos últimos usando los datos de los incendios que ocurrieron en el período para el cual se calculó el índice. Estos resultados y su discusión se presentan a continuación.

5. 1 Validación del Índice de Riesgo de Incendios Estático para el año 2004

Se considera apropiado contar con solo tres niveles de riesgo para el índice estático (bajo, medio y alto). Para definir el rango de valores para estos niveles de riesgo, se consideró pertinente tomar en cuenta el histograma del raster (Figura 75). Obsérvese que el número de celdas con valores de riesgo superiores a 47 son pocas, condición que exigió probar diferentes rangos para los niveles, ya que la mayor parte de los incendios que serían usados para la validación se concentraban en el nivel de riesgo medio si el límite inferior del nivel alto era superior a 35. Finalmente se consideran los siguientes niveles de riesgo: bajo ($0 \leq \text{valor} \leq 17.5$), medio ($17.5 < \text{valor} \leq 35$) y alto ($35 < \text{valor} \leq 100$)

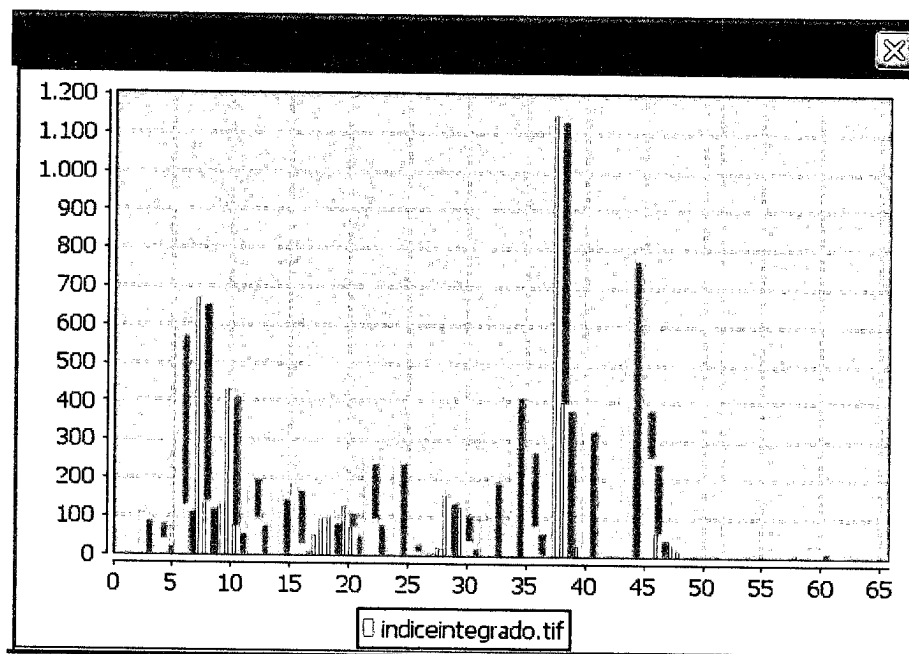


Figura 75. Histograma del raster con valores de riesgo

Se hizo la reclasificación del raster en función de los niveles y luego se vectorizó. Para validar el modelo, se usan los datos de los incendios ocurridos en el área de estudio durante el año 2004. En la Figura 76 se aprecia finalmente el índice de riesgo de incendios estático, superpuestos los incendios que se usan para la validación (tanto los registrados por los Bomberos Forestales de la ULA como los registrados por *MODIS active fire* con confianza mayor o igual a 50).

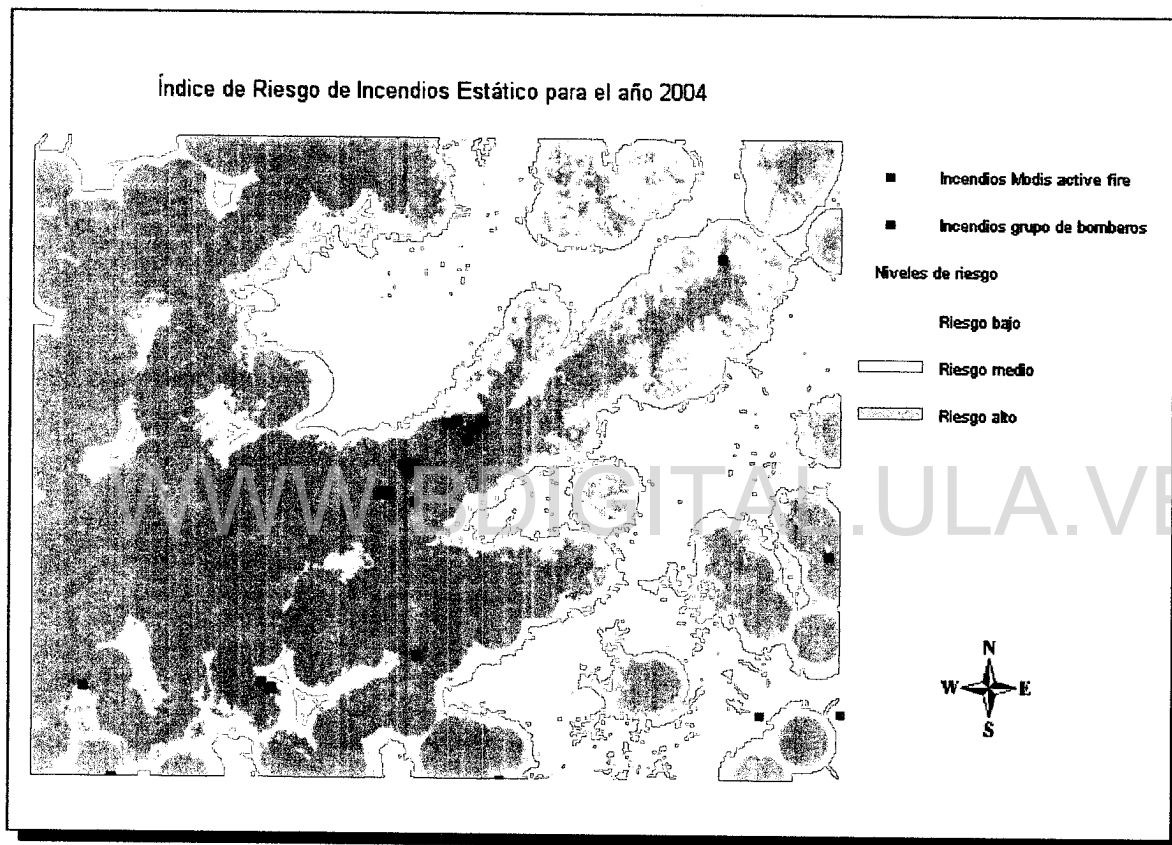


Figura 76. Niveles de riesgo de incendio forestal para el 2004

El Índice de Riesgo de Incendios Estático para el año 2004 se valida mediante un análisis de correlación de Spearman entre el número de incendios totales y los distintos niveles de riesgo (bajo=1, medio=2 y alto=3). La Tabla 26 muestra más detalles de los incendios usados en la validación.

Incendios	Riesgo bajo	Riesgo medio	Riesgo alto
Registrados por Bomberos Forestales ULA	0	1	6
Registrados por MODIS active fire	2	3	18
Total	2	4	24

Tabla 26 Incendios para validar el Índice de Riesgo de Incendios Estático para el año 2004

La correlación de Spearman, o por rangos, se basa en reemplazar los valores originales de ambas variables, por números enteros positivos (del 1 en adelante) que corresponden a su ordenamiento de menor a mayor magnitud. La Ecuación 9 permite el cálculo de la correlación (Salinas, 2007):

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum D^2}{N(N^2 - 1)} \quad (9)$$

donde:

r_s = coeficiente de correlación de Spearman

D^2 = Cuadrado de las diferencias entre X e Y

N = número de parejas

El valor de la correlación es de uno, indicando que la incidencia de incendios es mayor en áreas etiquetadas como de alto riesgo que en otras con riesgo más bajo. Esto significa, que el índice se ha validado satisfactoriamente.

Se considera fundamental el haber asignado un mayor peso a Agente Causal que a Combustible, en el modelado de los criterios. La motivación fue el hecho que un alto porcentaje de las causas de los incendios son de origen humano.

5.2 Análisis de Sensibilidad del Índice de Riesgo de Incendios Estático para el año 2004

Son muchas las preguntas del tipo “SI ENTONCES QUE” que podrían formularse entorno al modelo. Sin embargo, en esta investigación solo se evalúa qué pasaría con el

modelo si el peso del criterio Agente Causal se disminuye y el peso de Combustible se aumenta, manteniendo los niveles de riesgo de incendios establecidos; se emprende entonces un análisis de sensibilidad.

La Tabla 27 muestra el número total de incendios en cada nivel de riesgo, cuando se disminuye en un 20% el peso inicial del objetivo Agente Causal y se aumenta en consecuencia el peso inicial del objetivo Combustible, en la misma cantidad. Para la construcción de la Tabla se usa el módulo Índice de Riesgo Estático, que se ejecuta una vez más previa modificación de los pesos de los objetivos. La Figura 77 muestra el índice de riesgo de incendios resultante. Observe como la zona donde se concentran los incendios registrados por el grupo de bomberos se empieza a convertir en riesgo medio.

Procedencia de los incendios	Riesgo	Riesgo	Riesgo
	bajo	medio	alto
Bomberos Forestales ULA	0	1	6
MODIS active fire	2	14	7
Total	2	15	13

Tabla 27 Análisis de Sensibilidad de los pesos de los objetivos Agente Causal y Combustible

La correlación de Spearman para el caso que se está evaluando es de 0.5. Lo que significa, que efectivamente el factor humano juega un papel muy importante en estos modelos.

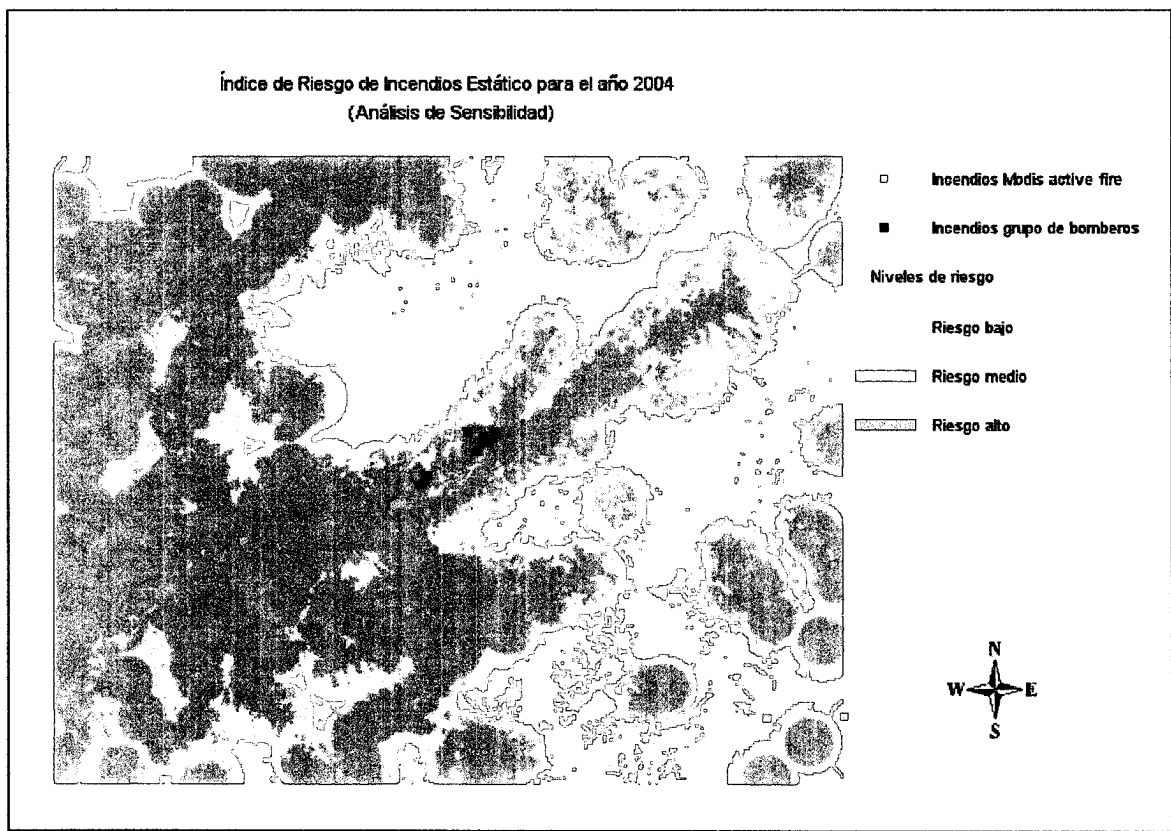


Figura 77. Niveles de riesgo cuando se aumenta en 20% el peso de Combustible

5.3 Validación del Índice de Stress de Vegetación temporada Noviembre 2007 - Abril 2008

Para validar este índice también se requieren datos de los incendios, específicamente, de los que ocurrieron durante la temporada de incendios Noviembre 2007 - Abril 2008. Estos datos se resumen en la Tabla 28, donde se presenta el número del índice al que corresponde; la confianza, si los incendios provienen del *Modis active fire*; el área, si los incendios fueron registrados por el grupo de bomberos; el valor del índice y el tipo de vegetación según el mapa de vegetación.

En su trabajo, Illera usa el índice para estimar la ocurrencia de incendios de gran tamaño, también recomienda calcular el índice solo en áreas forestales. Por estas razones, se incluye en la tabla el área afectada por el incendio y el tipo de vegetación donde ocurrió.

n	Confianza	Área	Valor AS _n	Tipo de Vegetación
1	28		-8.68	Urbano
1	29		-28.3125	Sin datos
2	26		-53	Sin datos
3		30	-19.875	Urbano
3	30		-85.8125	Sin datos
3	15		2.8125	Sin datos
4	24		-116.125	Sin datos
4		-	30	Área intervenida
4		0.25	22.875	Urbano
5	42		-364.875	Área intervenida
6	35		-509.4375	Urbano
7	28		-2517.5	Urbano
7	87		700,5625	Área intervenida
8	6		4974.3125	Área intervenida
8	79		-241.125	Páramo
8	54		-795.0	Páramo
8	42		-2679.9375	Sin datos
9	68		-2797.25	Área intervenida
9	48		-884.5625	Páramo
9	57		-2625.6875	Páramo
9	89		-4137.5	Páramo
9	91		-1141.875	Páramo
9	71		-1392.0	Área intervenida
10	21		-13505.0625	Urbano

Tabla 28 Incendios temporada Noviembre 2007 - Abril 2008

Como se puede apreciar, los valores de AS_n son negativos, como se esperaba, salvo cinco casos de un total de 24. También es evidente que la mayoría de los incendios provienen del *MODIS active fire*, para los que se desconoce el área afectada. Para ser consistente, con el resto de la investigación, se deja a un lado aquellos puntos de calor/fuegos activos cuya confianza es menor a 50, quedando la Tabla 29.

N	Confianza	Área	Valor en AS _n	Tipo de Vegetación
3		30	-19.875	Urbano
4		-	30	Área intervenida
4		0.25	22.875	Urbano
7	87		700,5625	Área intervenida
8	79		-241.125	Páramo
8	54		-795.0	Páramo
9	68		-2797.25	Área intervenida
9	57		-2625.6875	Páramo
9	89		-4137.5	Páramo
9	91		-1141.875	Páramo
9	71		-1392.0	Área intervenida

Tabla 29 Incendios temporada Noviembre 2007 - Abril 2008 con confianza > 50

Eliminando los puntos de calor/fuegos activos con confianza menor a 50, el número de valores AS_n positivos se reduce a tres de un total de once. Dos de estos valores corresponden a incendios registrados por el grupo de bomberos y el otro proviene del producto *Modis active fire*. Dos ocurrieron en áreas intervenidas y uno en una zona urbana.

Se considera prudente, por los pocos datos con que se cuenta, reclasificar los AS_n en dos categorías Con Riesgo (valores del índice menores a cero) y Sin Riesgo (valores mayores iguales a cero). El índice de stress de vegetación resultante es aceptable pues estima el 73% de los incendios de la temporada, a pesar de no tomarse en cuenta el área afectada por estos. Ya que por su naturaleza, este índice no considera el factor humano, se esperaba que estimara un buen número de incendios pero no la totalidad, tal como ha ocurrido.

La Figura 78 muestra uno de los índices de stress de vegetación de la temporada de incendios, específicamente el que corresponde al período del 06-04-2008 al 21-04-2008.

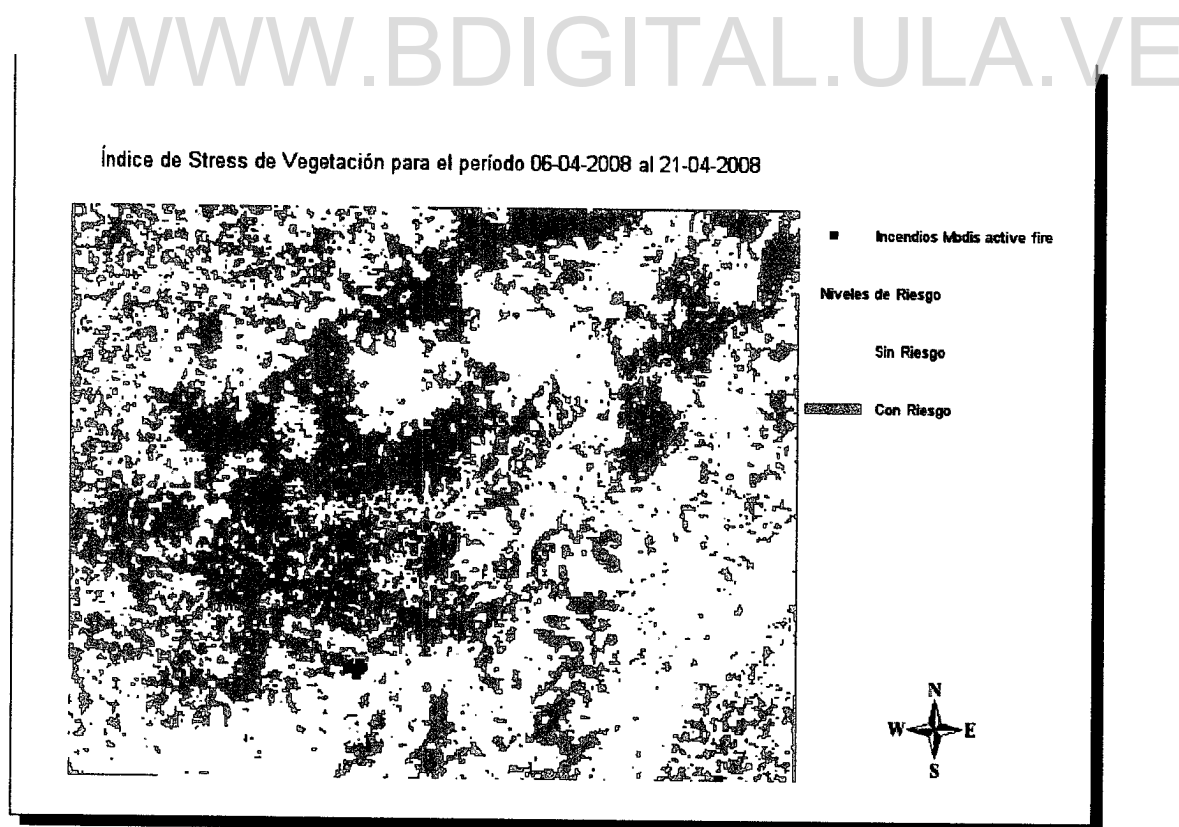


Figura 78. Índice de stress de vegetación para el período del 06-04-2008 al 21-04-2008

CONCLUSIONES

Las fuentes de datos son escasas, lo que dificulta la construcción y validación de índices de riesgo de incendios. Las imágenes *Modis active fire* fueron de gran ayuda para la validación de los índices, complementaron los datos de incendios registrados por el Grupo de Bomberos Forestales de la ULA.

Los módulos Parámetros, Registro de Incendios y Gestión de Incendios son la base del sistema, ya que permiten gestionar (insertar, modificar y eliminar) los datos de los incendios que ocurren en el área de estudio. Estos módulos están diseñados, al igual que el resto, para los SIG gvSIG y SEXTANTE, pero estos especialmente están conectados con la base de datos geográfica del sistema, PostGIS. Gvsig 1.1.1 + Sextante + PostGIS 1.3.6 cuentan con las funcionales necesarias para la implementación de una aplicación como esta. Todas estas herramientas funcionan muy bien en conjunto. Se da fe de la extensibilidad de gvSIG.

Aun cuando no se pudo modelar un índice de riesgo de incendios estático para un año más reciente, por falta de datos, si se pudo modelar un índice para el año 2004 que fue validado satisfactoriamente con datos históricos. Este índice se considera un primer modelo que puede ser mejorado con conocimiento experto y de forma sencilla, gracias al módulo desarrollado para tal fin.

El Módulo Índice de Riesgo de Incendios Estático automatiza el cálculo del índice de riesgo de incendio estático, a partir una estructura de árbol de criterios que crea el usuario. Para el cálculo del índice se seleccionó la Técnica de Evaluación Multicriterio Punto Ideal, que resultó sencilla de implementar gracias a los geoalgoritmos del SIG SEXTANTE. Este módulo automatiza un gran número de operaciones entre mapas/capas, facilitando la construcción de índices de riesgo de incendios estático y la realización del respectivo análisis de sensibilidad.

El método seleccionado para la construcción del índice de riesgo de incendios dinámico, estuvo muy condicionado a los datos disponibles, las composiciones Modis NDVI 16 días. A pesar de esto, los índices de stress de vegetación logrados para el área de estudio, se validan satisfactoriamente. Con estos índices se superan las expectativas, pues se esperaba estimar el riesgo de incendios solo para las inmediaciones de las estaciones meteorológicas. El módulo implementado para la generación de estos índices es menos elaborado que el correspondiente al índice estático; sin embargo también hace uso de los geoalgoritmos del SIG SEXTANTE.

Para el desarrollo del sistema fue de suma importancia el Ciclo de Desarrollo de los SIG, por ser una guía muy completa que incorpora el modelado de datos con relaciones espaciales, aun cuando no está orientado al uso de bases de datos geográficas.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

RECOMENDACIONES

Procurar el almacenamiento de los datos de los incendios en la base de datos, especialmente sus coordenadas UTM. Ya que sin estos datos es imposible obtener estadísticas de incendios y construir índices de riesgo de incendios forestales.

Realizar un estudio exhaustivo del atributo confianza del producto *Modis active fire*, en la zona de estudio, para estimar el umbral que permita descartar las falsas alarmas. También es fundamental contar con o formar recurso humano que domine aspectos como la descarga y procesamiento de imágenes Modis, que son fundamentales para dar continuidad al sistema de estimación de riesgo de incendios desarrollado.

Automatizar la realización del análisis de sensibilidad para el índice de riesgo estático, dando la oportunidad al usuario de prefijar los incrementos y decrementos en los pesos de los criterios que desean evaluar.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abarca, Oscar I. y Quiroz, José G. (2005) Modelado cartográfico de riesgo de incendio en el Parque Nacional Henri Pittier. Estudio de caso: vertiente sur, área colindante con la ciudad de Maracay. *Agronomía Tropical*, 55(1), 35-62.
- Aguado, Inmaculada y Camia, Andrea (1998). Fundamentos y utilización de índices meteorológicos de peligro de incendio. *Serie Geográfica*, 7, 49-58.
- Aguado, I., Chuvieco, E., Camarada A., Martín P., y Camia A., (1998). Estimation of meteorological fire danger indices from multitemporal series of noaa-avhrr data. *III International Conference on Forest Fire Reserach - 14th Conference on Fire and Forest Meteorology*, Coimbra, ADAI: 1131-1147.
- Anguix, Alvaro y Díaz, Laura (2008). gvSIG: A gis desktop solution for an open sdi. *Journal of Geography and Regional Planning*, 1(3), 041-048.
- Barona E., Giron E., Feistner K., Dwyer J., y Hyman G., (n.d.). Método de procesamiento de imágenes modis para Colombia. Recuperado el 10 de Abril de 2009, de <http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos/Ciat/BaronaMODISprocessing.pdf>
- Becker, P., Calkins, H., Côté, C., Finneran, C., Hayes, G. y Murdoch, T (n.d.). gis development guide. Recuperado el 10 de Junio de 2008, de <http://www.ncgia.buffalo.edu/sara/>
- Bosque, J., y García, R. (2000) El uso de los sistemas de información geográfica en la planificación territorial. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 20, 49-67
- Chen, Y., Yu, J., Shahbaz, K. y Xevi, E. (2009). A gis-based sensitivity analysis of multi-criteria eeights. *18th World IMACS / MODSIM Congress*, Cairns, Australia.
- Chuvieco, E., Salas, F. J., Aguado, I., Cocero, D. y Riaño, D. (2001). Estimación del estado hídrico de la vegetación a partir de sensores de alta y baja resolución, *GeoFocus*, 1, 1-16
- Chuvieco, E., Salas, F. J. y Vega, C. (1997). Remote sensing and gis for long-term fire risk mapping, en *A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires* (editado por E. Chuvieco). Alcalá de Henares, Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá: 91-107.
- Davila, Marianela (2005). Índices predictivos del riesgo de incendios para la cuenca alta del río caroní. Tesis de Maestría, Postgrado en Modelado y Simulación de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

Fire Information for Resource Management System, Internet site:
<http://maps.geog.umd.edu/firms/>, 2009

Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O., y Kaufman, Y. J. (2003). An enhanced contextual fire detection algorithm for modis. *Remote Sensing of Environment*, 87, 273–282

Gobierno en Línea, Internet site:
http://www.gobiernoenlinea.ve/venezuela/perfil_merida.html, 2009

Gómez, Montserrat y Barredo, José. (2004). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio* (3a. ed.). Ra-Ma.

gvSIG, Internet site: www.gvsig.gva.es/inicio-gvsig/, 2009

Hartmut Guting, Ralf (1994). An introduction to spatial database systems. *The VLDB Journal*, 3(4), 357-399.

Hernández, E. y Valbuena, J. (2001) Las amenazas naturales, los riesgos y la vulnerabilidad ambiental del doblamiento en el eje chama - mocoties. In *IV SIMPOSIO INTERNACIONAL DE DESARROLLO SUSTENTABLE*.

Hurtado, J (2000). Metodología de la Investigación Holística (3a. ed.). Caracas: Fundación SYPAL.

Illera, P., Fernández, A., Calle, A., Casanova, J.L., (1995). Evaluation of forest fire danger in Spain by means of NOAA-AVHR images. Proceedings of International Workshop on Remote Sensing and GIS applications to Forest Fire Management, Alcalá de Henares, Universidad de Alcalá de Henares, 101 – 103, INTERNATIONAL CHARTER: Interna

Jáuregui, R. M. (2005). Causas que inciden en la ocurrencia de incendios forestales en el estado mérida. *Revista Forestal Venezolana*, 1(49).

Knight, J.F., Lunetta, R.L., Ediriwickrema, J. y Khorram, S. (2006). Regional Scale Land-Cover Characterization using MODIS-NDVI 250 m Multi-Temporal Imagery: A Phenology Based Approach. *GIScience and Remote Sensing*, 43(1), 1-23.

Kodikara, Prashanthi Nirmala (2008). *Multi-Objective Optimal Operation of Urban Water Supply Systems*. PhD thesis, Victoria University.

León González, José de Jesús (2005). Los incendios forestales en la legislación venezolana. *Revista Forestal Venezolana*, 49(2), 223-236.

Malczewski, Jacek (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York: John Wiley and Sons.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Manual PostGIS, <http://postgis.refractory.net/documentation/postgis-spanish.pdf>

Martínez, J., Chuvieco, E., y Martín, P. (2000). Estimación de factores de riesgo humano de ignición en España mediante regresión logística. *USDA Forest Service General Technical Report*. PSW-GTR-xxx

Mascaraque, A., Rodríguez, F. y Hernández, E. (2007). Optimización de la ubicación de puestos de vigilancia de incendios forestales. In *4th International Wildland Fire Conference*.

McCombs II, John W. (1997). Geographic information system topographic factor maps for wildlife management. Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.

MIRA-Team, Internet site: <http://www-imk.fzk.de/asf/mira/Merida/>, 2009

Musso, Enrico y Taboada, José (2005) *Sistema de información medioambiental*. La Coruña: Netbiblo.

Neteler, M. (2004). Modis time series remote sensing for epidemiological modeling. In *Proc. GeoInformatics for Spatial-Infrastructure Development in Earth y Allied Sciences: GIS-IDEAS. Hanoi, Vietnam*.

Nieto H., Chuvieco E., Aguado I., Yebra M., García M., Salas J., Martín M., Vilar Lara, Martínez J., Padrón D., Martín S. (2008) Propuesta de un sistema espacialmente explícito para evaluar el peligro de incendios. *Serie Geográfica*, 14, 109 - 130

Olaya, Víctor (2009). SEXTANTE Programming Guide (1a ed.)

Peñarrubia, Francisco (2009). Manual para desarrolladores gvSIG v1.1. <https://gvSIG.org/web/docdev/manual-para-desarrolladores-gvsig>

Peterson, Roberts, Dennison (2008). Mapping live fuel moisture with MODIS data: A multiple regression approach. *Remote Sensing of Environment*.

Pressman, Roger (1998). *Ingeniería del Software: Un Enfoque práctico* (4a. ed.). McGraw-Hill.

Proyecto FAO TCP/GUA/2903 (2005). *Manual de Efectos del Fuego y Evaluación de Daños*.

PostGIS, Internet site: <http://postgis.refractory.net/>, 2009

Sabino, Carlos (1992). *El Proceso de Investigación*. Caracas: Editorial Panapo.

Salinas, M. (2007). Modelos de regresión y correlación IV. Correlación de Spearman. *Ciencia y Trabajo*, 9(25), 143-145.

San Miguel, Jesús (2002). Methodologies for the evaluation of forest fire risk: from long-term (static) to dynamic indices. In *II fuoco in foresta: ecologia e controllo*, 117-132.

Santé Riveira, I. y Crecente Maseda, R. (2005). Evaluación de métodos para la obtención de mapas continuos de aptitud para usos agroforestales, *GeoFocus*, 5, 40-68.

Sharifi, M.A. y Retsios, V. (2004). Site selection for waste disposal through spatial multiple criteria decision analysis. In: *Journal of telecommunications and information technology*, 3, 11.

Silva León, Gustavo (1999). Análisis hidrográfico e hipsométrico de la cuenca alta y media del río Chama, estado Mérida, Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 40(1).

Steiniger, Stefan y Bocher, Erwan (2009). An Overview on Current Free and Open Source Desktop GIS Developments. *International Journal of Geographical Information Science*, 23, 1345 – 1370.

The Global Geospatial Magazine. (Vol. 11 Issue 8)

The Land Processes Distributed Active Archive Center, Internet site:

https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table/vegetation_indices/16_day_13_global_250m/v5/terra, 2009

Vega, C., Woodard, P., Titus, S., Adamowicz, W. y Lee, B. (1999) Dos modelos para la predicción de incendios forestales en Whitcourt forest. *Investigación Agraria*, 8(1), 5- 24

Vélez, Ricardo (2000). *La Defensa Contra Incendios Forestales. Fundamentos y Experiencias*. McGraw-Hill/Interamericana de España.

Weather Underground, Internet site:
<http://www.wunderground.com/global/stations/80438.html>, 2009.

Yegres, Luis E. (1977). Índice de peligro de incendios forestales Mérida y sus alrededores, 1972-1976. Ciencias Forestales ULA

Zerpa P. Francisco J. (2000). *Sistema de Información Espacio-Temporal para la Caracterización de Áreas de Riesgo de Incendios de la Vegetación. Caso de Estudio: Cuenca Alta del Río Caroní*. Tesis de Maestría, Postgrado de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

ANEXOS

Anexo 1 – Planilla “Informe del Incendio o Conato”



INFORME DEL INCENDIO O CONATO

FECHA: ____/____/____ No.: ____
DÍA MES AÑO

INCENDIO: ____ CONATO: ____

1.- DATOS DEL INFORMANTE B.F. (RESPONSABLE DEL COMBATE)

Nombre y Apellido: ____ B.F.: ____

2.- UBICACIÓN DEL I.F. O C.

A) Estado: ____ B) Municipio: ____
C) Sector: ____ D) Localidad: ____

3.- TIPO DE PROPIEDAD

A) Nación: ____ B) Privadas: ____ C) Ejidos: ____ D) Baldío: ____

4.- COMBATE (día, mes, hora)

A) Aviso del I.F.: ____/____/____
B) Aviso del I.F.: ____/____/____
C) Movilización al I.F.: ____/____/____
D) Inicio del Combate del I.F.: ____/____/____
E) Finalización del Combate del I.F.: ____/____/____
F) Retorno del I.F.: ____/____/____
G) Horas totales del Combate: ____ Horas.

H) Medio de Transporte: A pie: ____ Vehículo: ____
Avión: ____ Helicóptero: ____

* Organismo facilitador: ____ Unidad No.: ____

f) Personal

B.F.	B.F.	B.F.	B.F.	B.F.	B.F.

Organización Voluntaria	No	Organización Voluntaria	No	Organización Voluntaria	No

Organismo	No	Organismo	No	Organismo	No
MARN		INPARQUES		INPRADEM	
Bomberos Municipales		Bomberos Universitarios			

* ORGANIZACIÓN DE PERSONAL

Cargo	Nombre y Apellido	Organismo

No. De Combatientes: _____

J) Herramientas y Equipos B.F.

Herramienta	No	Herramienta	No	Equipo	No
Batidor		Zapa		Bomba de Espalda	
Machete		Escardilla		Motobomba	
Hacha		McLeod		Motosierra	
Pulaski		Rastrillo Forestal		Antorcha	
Pico		Palin Forestal			

Otros: _____

* en caso de salir equipo de U.M. * anexar lista de accesorios.

K) Accidentes: Si: ____ No: ____

* Anotar en observaciones o anexar Informe

5.- CARACTERÍSTICAS DEL INCENDIO

A) Combustible:

* Medio donde se encuentra: Coba: ____ Superficial: ____ Subterráneo: ____

* Condición Vegetativa. Arbóreo: ____ Arbustivo: ____ Herbáceo: ____ Otros: ____

* Estado: Vivo: ____ Muerto: ____

* Tipo: Finos y Ligeros: ____.
Regulares y Medianos: ____.
Gruesos y Pesados: ____.

B) Topografía:

* Inclinação: Plano: ____ . Pendiente: ____ .
* Configuración: Llano: ____ . Ondulado: ____ . Escarpado: ____ .
* Altitud (opcional): ____ . m.s.n.m.

C) Condiciones Atmosféricas:

Temperatura: ____ °C. Humedad Relativa: ____ %
Dirección del Viento: ____ . Velocidad: ____ Km/h.

D) Datos Generales:

* Tipo de incendio: Copa: ____ . Terrestre: ____ . Subterráneo: ____ .

* Vegetación Afectada:

Herbazal		Matorral		Bosque	
Páramo		Plantación		Cultivos	

* Tipo de Combate: Directo: ____ . Indirecto: ____ .

* Área Afectada: ____ Ha

* Información del I.F o C. Dado por:

* Nombre: _____
* Organización u. Organización: _____
* Vía: Radio: ____ . Telefónica: ____ .
* Hora de recepción: _____.

6.- POSIBLE CAUSA DEL INCENDIO FORESTAL:

A) Naturales: _____.

B) Antropicas:

* Accidentales:

Quemas: Agrícolas: ____ . Pecuarias: ____ . Forestales: ____
Basura: ____ . Vías y Caminos: ____ .
Otras: Hogueras o Fogatas: ____ . Fumadores: ____ .
Líneas Eléctricas: ____ . Fuegos Artificiales: ____ .
Otras: _____.

* Intencionales:

Venganza: ____ . Pirómano: ____ . Incendiario o Vandalismo: ____ .
Niños Irresponsables: ____ . Otras: _____.

* Desconocida: ____ .

OBSERVACIONES: _____

7.- CROQUIS DEL INCENDIO:



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

**Firma del Responsable
del combate B.F.-U.L.A.**

**Jefe de Operaciones
B.F. - U.L.A.**