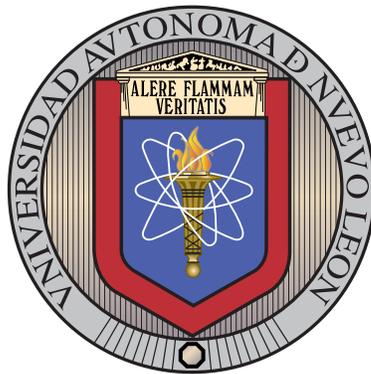


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



UN ESQUEMA INTEGRADO PARA LA
ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS DE CONTENCIÓN
DE INCENDIOS FORESTALES DESDE UN ENFOQUE
ESTOCÁSTICO

POR

BEATRIZ ADRIANA RIVERA AGUILAR

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

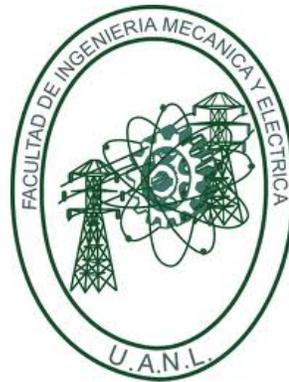
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

MARZO 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



UN ESQUEMA INTEGRADO PARA LA
ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS DE CONTENCIÓN
DE INCENDIOS FORESTALES DESDE UN ENFOQUE
ESTOCÁSTICO

POR

BEATRIZ ADRIANA RIVERA AGUILAR

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

MARZO 2012

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis « Un esquema integrado para la administración de recursos de contención de incendios forestales desde un enfoque estocástico, » realizada por la alumna Beatriz Adriana Rivera Aguilar, con número de matrícula 1541913, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

El Comité de Tesis

Dr. Roger Z. Ríos Mercado

Asesor

Dr. Marco A. González Tagle

Revisor

Dra. Ada M. Álvarez Socarrás

Revisor

Vo. Bo.

Dr. Moisés Hinojosa Rivera

Subdirector

División de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, marzo 2012

*A mi hija Adry
que es el motor de mi vida.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi hija por su comprensión, apoyo y amor para que yo pudiera realizar la maestría.

Gracias a Manuel por todo su apoyo.

Gracias a mis padres Guillermo y Hermila por su siempre apoyo incondicional y a mis hermanos Carlos, Janeth, Laura, Lucia, Ángeles y Guillermo porque aún que lejos me han enseñado que la distancia no es impedimento para estar cerca, y por todas sus palabras de ánimo para seguir adelante.

Gracias a mis amigos Andrés, Quintero, Rodas, Julio, Hugo, Beltrán y Brenda por estar ahí en los momentos felices pero sobre todo por su apoyo en los momentos difíciles.

Gracias al Dr. Roger Z. Ríos, mi asesor de tesis, por haber compartido conmigo sus conocimientos, por la dedicación para la dirección de este trabajo, por su paciencia y por haberme guiado para finalizar con éxito esta faceta de mis estudios.

Gracias al Dr. Marco A. González y a la Dra. Ada Álvarez, miembros del comité, por su tiempo en la revisión y corrección de la tesis.

Gracias a la Dra. Irma Hernández, por su valiosa colaboración en el desarrollo de este trabajo.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme otorgado una beca de manutención para realizar mis estudios de maestría. A la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ingeniería Mecánica y

Eléctrica de la UANL por haberme otorgado una beca de inscripción y colegiatura, respectivamente, durante los cuatro semestres cursados en la maestría.

RESUMEN

Beatriz Adriana Rivera Aguilar.

Candidata al grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio:

UN ESQUEMA INTEGRADO PARA LA
ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS DE CONTENCIÓN
DE INCENDIOS FORESTALES DESDE UN ENFOQUE
ESTOCÁSTICO

Número de páginas: 116.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: Este trabajo de tesis está orientado a la gestión y ataque de incendios forestales en México, abordando un problema de asignación de recursos. El objetivo de esta tesis es desarrollar una metodología de solución para encontrar una distribución óptima de los recursos disponibles (brigadas) para atender y minimizar el valor esperado de aquellos incendios que no tienen una respuesta estándar. El problema se plantea desde un enfoque de optimización estocástica. El modelo matemático es tomado de la literatura y adecuado a dicho problema.

La metodología está compuesta de dos etapas: preprocesamiento y procesamiento. La primera etapa consiste en calcular las probabilidades de ocurrencia de incendio y así poder emplear una técnica de solución por escenarios, donde cada escenario representa una cierta configuración de incendios en una región de estudio dada, ponderada por su probabilidad de ocurrencia. La etapa de procesamiento resuelve el modelo matemático de asignación de recursos mediante el método de ramificación y acotamiento y genera la solución de asignación de los recursos.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: La contribución de este trabajo es el diseño y desarrollo de una aplicación computacional para calcular las probabilidades de ocurrencia de incendio en una región dada, con base en datos históricos de incendios ocurridos en la misma. Se muestra el funcionamiento de la aplicación en un caso de estudio en el Estado de Nuevo León.

Esta aplicación permite el cálculo de diferentes probabilidades de ocurrencia de incendio para diferentes épocas de un año dado o de todos los años de la base de datos con la que se cuente. Se ha dado solución al modelo matemático para la asignación de recursos (brigadas) a un caso de estudio del Estado de Nuevo León.

Esta tesis pretende brindarle a aquellas entidades relacionadas con la gestión de recursos forestales un entorno integral, basado en datos históricos y con fundamento matemático, como apoyo para la toma de decisiones que ayuden a reducir el impacto de los incendios forestales que ocurran en sus respectivas jurisdicciones. A diferencia de otras aplicaciones existentes, esta aplicación aborda el problema de gestión de recursos desde un punto de vista estocástico.

Firma del asesor: _____

Dr. Roger Z. Ríos Mercado

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	v
Resumen	vii
1 Introducción	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Objetivo	3
1.3 Relevancia del problema	4
1.4 Estructura de la tesis	9
2 Antecedentes	11
2.1 Conceptos fundamentales	11
2.1.1 Ataque inicial	11
2.1.2 Modelos de simulación estocástica que integran el despliegue y envío de recursos	12
2.2 Sistemas de información geográfica	13
2.2.1 Esquemas de georreferenciación	14
2.3 Estimación de ocurrencia de incendios forestales	16
2.3.1 Modelos lineales generalizados	17
2.3.2 Regresión logística	19
2.4 Problema de localización de máxima cobertura para el despliegue de servicios de emergencia	22
2.5 Optimización estocástica	24

2.6	Literatura de I.O. aplicada a los problemas de recursos forestales . . .	27
2.6.1	Modelos de optimización en la gestión forestal	27
2.6.2	Modelos de optimización en el ataque o prevención de incendios forestales	30
3	Planteamiento y formulación del problema	36
3.1	Descripción del problema	36
3.1.1	Notación	37
3.1.2	Formulación del modelo matemático	39
4	Metodología de solución	42
4.1	Preprocesamiento	43
4.1.1	Cálculo de la probabilidad de ocurrencia de incendios	44
4.1.2	Generación de escenarios de incendios forestales	47
4.2	Procesamiento	55
5	Resultados computacionales	58
5.1	Objetivos de la experimentación	58
5.2	Caso de estudio	59
5.3	Ambiente de desarrollo	60
5.4	Generación de experimentos de prueba	62
5.5	Diseño de los experimentos	69
5.6	Análisis de resultados obtenidos	70
6	Conclusiones y consideraciones finales	80
6.1	Conclusiones	80
6.2	Contribuciones	82
6.3	Trabajo a futuro	83
A	Ilustración del pre- y procesamiento de la metodología	93
B	Manual de usuario	102
B.1	Aplicación SIG: Simulación de Incendios Forestales	102

B.2 Ejecución de la aplicación 103

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Formas de representar objetos espaciales: (a) modelo ráster y (b) modelo vectorial.	15
2.2	Representación en modelos ráster y vectorial de una imagen del mundo real.	16
2.3	Función logística $f(z)$	20
2.4	Proceso iterativo que sigue el método de mínimos cuadrados para calcular los parámetros de la regresión logística.	21
3.1	Un ejemplo. Escenarios mostrando diferentes situaciones del sistema. (a) Un incendio grande en la zona 1, un incendio pequeño en la zona 4 y un incendio mediano en la zona 5; (b) un incendio pequeño en la zona 1, un incendio mediano en la zona 4 y un incendio pequeño en la zona 5; (c) un incendio grande en la zona 1, un incendio pequeño en las zonas 3, 4 y 5.	38
4.1	Diagrama de flujo de la metodología desarrollada.	43
4.2	Imagen del área de estudio: (a) sin georreferencia, y (b) georreferenciada.	44
4.3	Ejemplo del procedimiento para la generación de escenarios: polígono que delimita el área de interés.	48
4.4	Ejemplo del procedimiento para la generación de escenarios: (a) incendios históricos; (b) rectángulo delimitante de los incendios históricos.	49

4.5	Ejemplo del procedimiento para la generación de escenarios: (a) ubicaciones de prueba generadas (para $N = 50$); (b) ubicaciones de prueba situadas dentro de los límites del área de interés.	50
4.6	Ejemplo del procedimiento para la generación de escenarios: (a) evaluación de la probabilidad de ocurrencia de incendios en las ubicaciones de prueba; (b) probabilidad aleatoria generada para cada ubicación de prueba.	51
4.7	Ejemplo del procedimiento para la generación de escenarios: (a) eventos exitosos, donde $P \geq R$; (b) escenario compuesto de los eventos exitosos por zona potencial.	52
4.8	División de la zona de interés en zonas potenciales.	54
4.9	Distancia entre dos puntos de una esfera representada por el segmento de un gran círculo.	55
5.1	Ubicación del Parque Nacional Cumbres de Monterrey y municipios que abarca.	59
5.2	Promedio de incendios generados y porcentaje de incendios sin respuesta estándar, por escenario.	72
5.3	Experimento 3: asignación de recursos en las estaciones para la primera etapa del modelo de optimización y su área de cobertura para un tiempo de respuesta estándar de 30 min.	76
5.4	Experimento 3: asignación de recursos en las estaciones para la primera etapa del modelo de optimización y su área de cobertura para un tiempo de respuesta estándar de 50 min.	77
5.5	Experimento 3: asignación para la segunda etapa del despliegue de recursos de las estaciones E5–E8 a la zona potencial 4, para un tiempo de respuesta estándar de 30 min., con una cantidad requerida de 20 recursos en esta zona.	78
A.1	Área de estudio, para el ejemplo de la aplicación de la metodología: zonas potenciales de incendio.	94

A.2	Escenarios generados para el ejemplo de la aplicación de la metodología. (a) Primer escenario, y (b) segundo escenario.	96
A.3	Asignación de recursos a cada estación de brigadistas para el ejemplo de la aplicación de la metodología.	99
A.4	Asignación de recursos desde cada estación de brigadistas hacia cada zona potencial, para el ejemplo de la aplicación de la metodología. (a) Primer escenario, y (b) segundo escenario.	101
B.1	Interfaz gráfica de la aplicación.	103
B.2	Mapa satelital de la zona de estudio.	104
B.3	Calibración de la imagen satelital.	104
B.4	Calibración de la imagen satelital: (a) primer punto de referencia, y (b) segundo punto de referencia.	105
B.5	Imagen satelital correctamente calibrada.	105
B.6	Selección del período de estudio.	106
B.7	Incendios históricos del período seleccionado.	107
B.8	Cálculo de la variable binaria.	107
B.9	Ajuste de los coeficientes de la regresión logística.	108
B.10	Evaluación de la probabilidad de incendios a partir de los coeficientes de regresión del modelo logístico.	109
B.11	Menú de herramientas de la interfaz gráfica.	109
B.12	Selección del archivo de curvas del caso de estudio.	110
B.13	Caso de estudio y zonas potenciales.	110
B.14	Selección del número de escenarios a generar.	111
B.15	Archivo donde se genera el reporte de escenarios de incendios.	111
B.16	Progreso de la generación de escenarios.	111
B.17	Interfaz gráfica con los posibles incendios generados.	112
B.18	Distribución de posibles incendios generados por municipio.	112
B.19	Reporte: Lista de la ubicación de los posibles incendios con su probabilidad de ocurrencia.	113

B.20	Reporte: Tabla de los escenarios generados.	113
B.21	Reporte: Incendios generados por municipio y tabla de tiempos entre zonas potenciales y estaciones.	114

ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Incendios ocurridos y hectáreas afectadas por año en el período 1998–2011.	6
1.2	Duración de los incendios en el año 2011.	7
1.3	Hectáreas afectadas en el año 2011.	7
2.1	Literatura relacionada con modelos de optimización en la gestión forestal.	34
2.2	Literatura relacionada con modelos de optimización en el ataque o prevención de incendios forestales.	35
4.1	Caso de ejemplo. Incidencia de incendios por temporada en cada zona potencial.	46
4.2	Caso de ejemplo. Desglose de los eventos de ocurrencia o no ocurrencia de incendios.	46
4.3	Brigadistas asignados en función a la intensidad en los incendios. Fuente: Administración del Parque Nacional Cumbres de Monterrey.	53
4.4	Ejemplo de asignación de recursos para un escenario.	53
5.1	Municipios donde se ubican las estaciones que dan servicio al PNCM, las cuales se localizan en las cabeceras municipales.	60
5.2	Límite máximo de brigadistas que puede albergar cada estación.	61
5.3	Tiempos estimados (min.) de recorrido de cada estación de brigadistas a cada zona potencial de incendio.	63

5.4	Escenarios de incendios forestales, generados aleatoriamente, donde se plasma el número de brigadistas requeridos en las zonas potenciales para cada escenario generado, del 1-25.	65
5.5	Escenarios de incendios forestales, donde se plasma el número de brigadistas requeridos en las zonas potenciales para cada escenario generado, del 26-50.	67
5.6	Valor esperado y porcentaje de los incendios que no tienen respuesta en tiempo estándar. Experimento 1.	73
5.7	Desarrollo del Experimento 2 con diferente número de recursos (brigadistas).	74
5.8	Experimento 3: Distribución de recursos (brigadistas) en las diferentes estaciones para diferentes tiempos máximos de respuesta estándar. . .	75
5.9	Experimento 4: Distribución de recursos (brigadistas) en las diferentes estaciones cuando una estación no dispone de recursos.	78
5.10	Desempeño del Experimento 5, comportamiento en cada trimestre. . .	79
5.11	Desempeño del Experimento 6, evaluación actual para cada trimestre.	79
A.1	Escenarios generados como ejemplo de la aplicación de la metodología.	95
A.2	Tiempos estimados (min.) de recorrido de cada estación de brigadistas a cada zona potencial de incendio, para el ejemplo de la aplicación de la metodología.	97
A.3	Capacidad máxima de brigadistas que puede albergar cada estación para el ejemplo de la aplicación de la metodología.	99
A.4	Asignación de recursos desde cada estación de brigadistas hacia cada zona potencial, para el ejemplo de la aplicación de la metodología. . .	100
B.1	Formato de los datos de entrada de la base de datos de incendios. . .	106

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales se caracterizan por producirse y desarrollarse, principalmente, en zonas naturales con vegetación abundante. La mayoría de los incendios forestales se deben a descuidos humanos o son provocados. Son muy pocos los incendios que se originan por causas naturales, como descargas atmosféricas. Las condiciones climatológicas influyen considerablemente en la susceptibilidad al fuego de un área determinada; factores como la temperatura y la humedad determinan la velocidad de propagación y el grado de secado del material inflamable, y por lo tanto la combustibilidad del bosque. El viento es otro factor importante que acelera la desecación y aumenta la gravedad de los incendios, estimulando la combustión.

Los incendios forestales impactan de manera negativa al medio ambiente por la deforestación, la erosión, la generación de dióxido de carbono (CO_2) y la pérdida de la biodiversidad, afectan al paisaje y al habitat de la fauna silvestre.

El ataque de los incendios forestales no sólo presenta problemas de tipo operativo —inversión y despliegue de recursos tanto materiales (aviones, helicópteros, vehículos) como humanos (brigadas), tiempos, etc.— sino que también presenta problemas de incertidumbre para conocer el lugar y tiempo de incidencia, lo cual hace necesaria una planificación para el combate de éstos y designar aquellos recursos disponibles que deberán utilizarse [44].

Un factor importante en la planeación del combate de incendios forestales es el conocimiento de la demanda esperada de recursos necesarios para un “ataque inicial”

exitoso y el despliegue de éstos [43]. Un ataque inicial se define como la atención inmediata que se le debe dar a un incendio luego de ser detectado, enviar recursos para la contención y no propagación del mismo, marcar un perímetro y combatirlo antes de que sobrepase la línea marcada. Si el incendio sobrepasara el perímetro designado, éste se saldría de control, lo cual llevaría a pérdidas desmedidas.

Cabe señalar que el concepto de “respuesta estándar” está sumamente ligado al ataque inicial. Esto debe entenderse como el número deseado de recursos que pueden llegar a un incendio dentro de un tiempo de respuesta especificado, lo cual no sólo indica que se tienen que enviar recursos a los incendios en un tiempo límite, sino que complica aún más la toma de decisiones por lo que todo ello conlleva. Es por ello que no es para nada extraño que muchos especialistas en investigación de operaciones hayan estudiado problemas enfocados a la planificación estratégica del manejo de incendios forestales, dado que es un problema de enorme importancia.

Se han creado diferentes y muy diversas metodologías de análisis basadas en técnicas de investigación de operaciones que funcionan como principales herramientas para la toma de decisiones. Éstas se han ido incrementando y han sido ampliamente discutidas por expertos en el área [46].

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Para contener fácilmente un incendio forestal y evitar que se salga de control, éste debe ser atendido de forma inmediata (ataque inicial exitoso). Se deben asignar recursos y desplegarlos de forma tal que se minimize el valor esperado del número de incendios que no tienen una respuesta estándar, tomando en cuenta que se dispone de un número limitado de recursos y que los incendios forestales son fenómenos estocásticos, ya que no se conoce *a priori* la ubicación y tiempo de incidencia de los mismos.

Se propone una metodología donde se aborde un problema de asignación de

recursos para la extinción de incendios forestales y éste sea planteado como un problema de optimización estocástica, el cual integra una técnica de solución por escenarios, donde cada escenario representa una cierta configuración de incendios en una región de estudio dada, ponderada por su probabilidad de ocurrencia.

El modelo de optimización que se utiliza es un modelo de programación entera estocástica que determina la asignación y distribución de los recursos disponibles para atender y minimizar un cierto número esperado de incendios que no tienen una respuesta estándar. Este enfoque fue abordado con anterioridad por Haight y Fried [26], quienes lo implementaron usando el simulador estocástico *The California Fire Economics Simulator* (CFES2) [21], el cual técnicamente es infactible utilizarlo en nuestro país debido a que este software requiere de información no disponible por las agencias de gestión de incendios forestales.

La idea detrás de esta tesis es adaptar y aplicar el modelo antes mencionado para un caso de estudio en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey, Nuevo León, y evaluar el desempeño del método desarrollado con base en un diseño experimental adecuado.

Lo anterior con el fin de facilitar una buena planeación y distribución de recursos de extinción de incendios y reducir todas las pérdidas que se tendrían si los incendios no pudieran ser atendidos.

1.2 OBJETIVO

El objetivo de esta tesis es crear un sistema de información geográfica basado en datos históricos, que contempla el cálculo de las probabilidades de ocurrencia de incendios forestales en una región dada y la generación de diferentes configuraciones de incendios, para encontrar una distribución óptima de los recursos disponibles (brigadas), y así ayudar a la toma de decisiones en un problema estocástico de incendios forestales.

1.3 RELEVANCIA DEL PROBLEMA

Una de las causas más frecuentes de afectación a nuestros recursos naturales forestales y animales, son los incendios forestales. Estos contribuyen además a la contaminación del aire, cambios climáticos, erosión de los suelos, propagación de plagas y enfermedades, alteración del régimen hidrológico y de la belleza escénica, entre otros muchos lamentables e irreversibles daños.

Las actividades de protección contra incendios forestales representan un reto en todos los países, en especial en temporadas de sequía, dada la imperativa necesidad de conservar los recursos naturales y con ello contribuir en la preservación del entorno ecológico. De dicho entorno, el más importante para México, está representado por las zonas forestales, las cuales tienen una superficie estimada de 139 millones de hectáreas, equivalente al 73 % de la superficie nacional. Asimismo, los incendios forestales son uno de los principales problemas ambientales que afectan a nuestro país [20].

En México, de acuerdo con las condiciones climáticas y meteorológicas, cada año se presentan incendios forestales de diversas magnitudes. Es por ello que las dependencias gubernamentales correspondientes crearon el Programa Nacional de Protección contra Incendios Forestales (PNPCIF), perteneciente a la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), el cual tiene como principal misión proteger los recursos forestales para que los incendios no los destruyan.

Las principales responsabilidades del PNPCIF son:

- Detectar con oportunidad la presencia de los incendios,
- disminuir la superficie afectada por el fuego,
- combatir y controlar los incendios,
- mantener una previsión climática constante y de los factores que desencadenan su presencia,

- asegurar la restauración de áreas afectadas, y
- aplicar planes y programas preventivos.

Los incendios forestales se han ido incrementando con el paso del tiempo en todo el mundo, pues en los últimos 200 años, seis millones de kilómetros cuadrados se han degenerado. Se tiene calculada una afectación anual de más de 1043.6 millones de hectáreas en promedio [18].

En el año de 1998, México sufrió la peor temporada de incendios forestales de la historia, pues fue una temporada de sequía extrema. Se lograron registrar 14,445 incendios forestales en ese año, y un total de 849,632 hectáreas afectadas [7].

La gran cantidad de incendios suscitados en 1998 resaltó la necesidad de planificar aún más el combate de incendios en el país; aunque muy poco se ha podido hacer en esta cuestión, ya que en México no se cuenta con un sistema de detección de incendios puesto en práctica que pueda ayudar a prevenir la cantidad de incendios o dar un ataque inicial exitoso. Sin embargo, esto ha servido de guía a la comunidad científica para incursionar en este campo, aunque en otros países desde hace tiempo se comenzó a atacar esta problemática.

La Comisión Nacional Forestal, tan sólo en el periodo enero–diciembre de 2011, logró registrar un total de 12,113 incendios forestales en 32 entidades federativas, que afectaron una superficie de 956,404.80 hectáreas. Las entidades federativas con mayor número de incendios durante el 2011 fueron México, Chihuahua, Distrito Federal, Michoacán, Jalisco, Puebla, Veracruz, Tlaxcala, Hidalgo y Oaxaca, las cuales representan el 78.25 % del total nacional. Las entidades federativas con mayor superficie afectada durante el 2011 fueron Coahuila, Chihuahua, Quintana Roo, Sonora, Zacatecas, Durango, Jalisco, Baja California, Oaxaca y Nuevo León, que representan el 86.09 % del total nacional [8]. Cabe señalar que se ha tomado como caso de estudio al Parque Nacional Cumbres de Monterrey, el cual es una zona protegida del Estado de Nuevo León, ya que, como lo indican las estadísticas, es uno de los estados en donde los incendios afectan gran parte de la superficie donde inciden.

Tabla 1.1: Incendios ocurridos y hectáreas afectadas por año en el período 1998–2011 [8].

Año	Número de incendios	Hectáreas afectadas
1998	14,445	849,633
1999	7,979	231,062
2000	8,557	235,915
2001	6,340	136,879
2002	8,256	208,297
2003	8,211	322,448
2004	6,300	81,322
2005	9,682	275,955
2006	8,745	243,882
2007	5,882	141,644
2008	9,735	231,645
2009	9,569	296,344
2010	6,125	114,723
2011	12,113	956,405

La Tabla 1.1 muestra el número de incendios ocurridos y las hectáreas afectadas en el país de 1998 a 2011 [8]. Se puede visualizar lo antes mencionado; el año de 1998 sigue siendo el peor en la historia del país, y a pesar de los esfuerzos que a partir de ahí se hicieron para disminuir esta cifra significativa, puede observarse que en el año 2011 volvió a subir la cantidad de incendios. A pesar de que la cantidad de incendios forestales ocurridos en el año 2011 fue menor que la cantidad de incendios del año 1998, el número de hectáreas afectadas fue mayor en 2011. Esto es aún más alarmante, pues nos indica que el ataque inicial aún sigue siendo un problema que no se tiene bajo control, pues entre más rápido lleguen los recursos a combatir el incendio forestal más pequeño sería éste en superficie afectada.

Los tiempos promedio de detección, despliegue y combate de incendios fores-

Tabla 1.2: Duración de los incendios en el año 2011 [8].

Duración (días)	Número de incendios
1	10,271
2 a 3	1,278
4 a 7	341
mayor a 7	223

Tabla 1.3: Hectáreas afectadas en el año 2011 [8].

Hectáreas	Número de incendios
menor ó igual a 5	7,776
6 a 10	1,438
11 a 20	911
21 a 50	886
mayor a 51	1,102

tales en los años de 1998 a 2011 [8] son 51 minutos, 1 hora 39 minutos y 13 horas 15 minutos, respectivamente. Estos tiempos reflejan la importancia de una buena planificación estratégica, necesaria en nuestro país, pues no sólo basta con dar solución a los problemas a partir de la detección, sino que es necesario anticiparse a ellos.

Los tiempos de duración de los incendios forestales en el año de 2011 [8] se muestran en la Tabla 1.2. Aquí podemos ver que la mayoría de los incendios tuvieron una duración máxima de un día. Sin embargo, aunque fueron en cantidad menor los incendios que duraron varios días, estos aumentaron considerablemente las hectáreas afectadas, pues en este año se tuvo una cifra récord de superficie afectada.

La cantidad de hectáreas consumidas por los incendios forestales en el año de 2011 [8] se muestra en la Tabla 1.3. A partir de estos datos se puede corroborar que, aunque la mayoría de los incendios ocurridos consumieron un máximo de 5 hectáreas, los incendios restantes suman más hectáreas afectadas.

La importancia del fuego en los ecosistemas es un asunto complejo. Si bien como sociedad fuimos educados a asociarlo, en muchas ocasiones, a destrucción y daño, lo cierto es que el fuego y los ecosistemas han establecido relaciones, donde incluso, algunos ecosistemas han desarrollado adaptaciones para depender de sus efectos, como la reducción de competencia por malezas, el saneamiento y/o control de enfermedades entre las plantas, la liberación e incorporación de nutrientes, y en algunos casos, la germinación de algunas semillas. Sin embargo, cabe señalar que esta tesis se enfoca sólo en los incendios dañinos.

El hecho de modificar irresponsablemente los regímenes naturales del fuego (ciclos preestablecidos), trae consecuencias de dimensiones imprevisibles, no sólo en la esfera local, sino también a escala regional y global, con daños a la naturaleza que repercuten en la salud y en la seguridad de las personas [7].

El fuego dañino se integra a un círculo en el que diversos fenómenos influyen como causa-efecto, unos de otros. Entre ellos se pueden mencionar los siguientes:

- Desaparece el habitat de la fauna silvestre,
- los suelos son expuestos y quedan susceptibles a la erosión,
- se desequilibran las cadenas alimenticias y muchos procesos de la vida se ven truncados,
- el clima se ve alterado al haber menos plantas que generen oxígeno,
- la destrucción de volúmenes de madera tiene el consecuente impacto en la economía de los propietarios,
- el humo, producto de la combustión, contiene carbono y otros elementos que, en grandes cantidades, son nocivos al medio ambiente,
- al no haber plantas que retengan el agua para que se filtre al subsuelo, no se recuperan los mantos freáticos.

Los incendios afectan de diversas maneras a los diferentes ecosistemas forestales, dependiendo de la intensidad y duración del fuego y de las mismas condiciones bajo las cuales se presentan, tanto atmosféricas como de suelo, topográficas o de la propia vegetación [66].

Es necesario, para lograr un desarrollo sustentable, aplicar medidas eficientes y oportunas que lleven a la protección efectiva de los recursos naturales, a través de acciones específicas tendientes a una mejor prevención y detección para la atención oportuna de estos siniestros cuando se presenten.

1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta tesis se estructura de la siguiente manera:

- En el Capítulo 2 se presenta el marco teórico y la revisión de la literatura relacionada con el problema.
- En el Capítulo 3 se describe detalladamente el problema, así como la formulación matemática, basada en el modelo de Haight y Fried modificado.
- En el Capítulo 4 se muestra la metodología utilizada. Se propone un modelo para el cálculo de ocurrencia de incendio basado en datos históricos, se genera un conjunto de escenarios (configuraciones diferentes de incendios) necesarios en el modelo matemático para la óptima asignación de recursos, de tal forma que se minimice el valor esperado de los incendios que no tienen una respuesta estándar.
- En el Capítulo 5 se expone la experimentación computacional y los resultados obtenidos.
- En el Capítulo 6 se enuncian las conclusiones, así como las aportaciones y trabajo futuro.

-
- En el Apéndice A se muestra un ejemplo de la aplicación de la metodología desarrollada.
 - En el Apéndice B se presenta de manera concisa un manual de usuario de la aplicación computacional desarrollada para la obtención de las probabilidades de ocurrencia de incendio y la generación de escenarios de incendios forestales.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

En este capítulo se introducen los conceptos teóricos fundamentales para la comprensión del tema, así como la revisión de la literatura relacionada con el problema abordado.

2.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2.1.1 ATAQUE INICIAL

Un ataque inicial se define como la atención inmediata que debe recibir un incendio luego de ser detectado [21], englobando las siguientes acciones:

- Enviar recursos para la contención de la propagación del fuego;
- marcar un perímetro con una línea que despeje todo material fácilmente inflamable ó humedecer el área para que la combustión sea improbable; y
- combatir el incendio antes de que sobrepase la línea marcada.

Si los pasos anteriores no fueran cumplidos con éxito, entonces el incendio se saldría de control, y esto llevaría a pérdidas desmedidas.

Conocer la demanda esperada y desplegar recursos para un ataque inicial para combatir un incendio es una parte importante en la planeación de incendios forestales [43].

En algunos países, los recursos para el ataque inicial incluyen camiones de bomberos y aviones que marcan un perímetro de contención de fuego mojando la vegetación o excavadoras y herramientas de mano, que en vez de mojar, cortan el material combustible para delimitar dicho perímetro.

Desde hace tiempo, se ha reconocido que un ataque inicial fuerte y rápido podrá contener un incendio con éxito dentro de una ventana de tiempo previamente establecida, evitando incurrir en daños y costos sustanciales [54].

La mayoría de los gestores de incendios forestales saben que cuentan con recursos limitados para el ataque inicial, por ello deben implementar el envío eficiente de los recursos para reducir al mínimo los incendios fuera de control. Existen modelos de simulación y optimización que han sido utilizados para ayudar a la planificación del ataque inicial [46].

2.1.2 MODELOS DE SIMULACIÓN ESTOCÁSTICA QUE INTEGRAN EL DESPLIEGUE Y ENVÍO DE RECURSOS

Las decisiones de despliegue y envío de recursos a los incendios forestales pueden ser vistas en el contexto de un sistema espacial de colas con ocurrencia y crecimiento de incendios de forma estocástica, utilizando reglas para el envío de recursos a los incendios tomando en cuenta la velocidad de expansión del fuego [46].

Representaciones detalladas de estos procesos se incluyen en modelos de simulación estocástica, como por ejemplo Islam, Kazi y Martell [34], Fried, Jeremy y Gilles [22], y Fried, Jeremy y Fried [21]. En éstos se utilizan reglas de despliegue para evaluar los cambios en el número y la ubicación de los recursos.

Sin embargo, debido a su requerimiento computacional, los modelos de simulación de ataque inicial no se han incorporado directamente en algoritmos de optimización.

Se han formulado modelos de optimización para hacer frente a la implementa-

ción y el envío de los medios de extinción como problemas por separado sin tener en cuenta el comportamiento estocástico de la ocurrencia de incendios.

Algunos de estos modelos asignan los recursos de extinción de incendios a las estaciones para minimizar los costos operativos y al mismo tiempo tienen que cumplir con requerimientos predefinidos de recursos necesarios en áreas circundantes. Entre estos se citan los trabajos de Hodgson y Newstead [31], MacLellan y Martell [41], y Greulich y O'Regan [25].

Otro tipo de modelos de despliegue de recursos se construyen típicamente de un solo incendio y tratan de determinar el número y tipo de recursos de extinción necesarios para minimizar el costo de supresión, sujeto a la restricción de recursos disponibles. Ejemplos de este tipo de trabajos son los de Kourtz [36], Donovan y Rideout [17], y Mees, Strauss y Chase [48].

2.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas computacionales capaces de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada.

La función principal de este tipo de software es contar con cartografía y bases de datos asociadas, con la misión de resolver problemas espaciales o territoriales de forma conjunta.

La importancia de los SIG radica en que las soluciones para muchos problemas frecuentemente requieren acceso a varios tipos de información que sólo pueden ser relacionadas por geografía o distribución espacial. Sólo la tecnología SIG permite almacenar y manipular información usando geografía para analizar patrones, relaciones y tendencias en la información, todo con el fin de contribuir a tomar mejores decisiones.

El tipo de información que se almacena en un SIG se divide en dos grupos:

1. Datos geométricos, a dibujarse en un mapa, que ofrecen una representación de la localización (posición en coordenadas (x, y)) y naturaleza del elemento registrado.
2. Atributos temáticos asociados con el grupo anterior (como datos alfanuméricos).

Los datos pueden ser de cualquier disciplina (ambientales, sociológicos, económicos, biológicos, etc.), pero lo que diferencia a los SIG de otros sistemas de tratamiento de imágenes, diseño cartográfico, atlas digitales, etc., son las operaciones de análisis de datos [40]. El mapa resultante almacena de un modo económico grandes cantidades de datos, y lo hace de tal modo que permite y facilita ciertos tipos de análisis [53].

2.2.1 ESQUEMAS DE GEORREFERENCIACIÓN

La información geográfica son todos aquellos datos espaciales georreferenciados (una referencia territorial explícita como latitud y longitud), los cuales suelen llevar información alfanumérica asociada. La georreferenciación es el posicionamiento que define la localización de un objeto espacial en un sistema de coordenadas y dato determinado [40].

El SIG funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos y viceversa, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

Una fuente importante de información son las coordenadas tomadas desde el sistema de posicionamiento global, (GPS por sus siglas en inglés), y otra fuente importante muy distinta en su estructura a la anterior son las fotos aéreas e imágenes de satélite. Lo que realmente hace a un SIG interesante es la posibilidad de generar nueva cartografía a partir de los mapas iniciales.

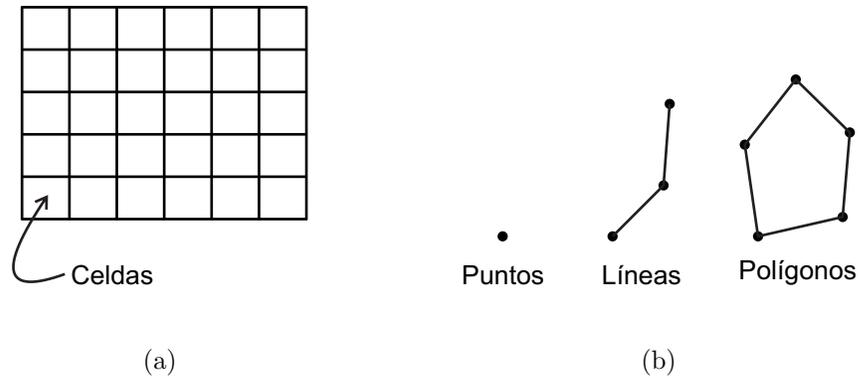


Figura 2.1: Formas de representar objetos espaciales: (a) modelo ráster y (b) modelo vectorial.

MODELOS RÁSTER Y VECTORIAL

Los SIG funcionan con dos tipos diferentes de información geográfica: el modelo ráster y el modelo vectorial. En la Figura 2.1 se muestran los dos modelos explícitamente.

En el modelo ráster, el espacio está representado por un conjunto de celdas adyacentes llamadas píxeles, que representan a las unidades de información espacial. Éstas establecen su localización por un sistema de referencia en filas y columnas, acompañado por la extensión del mapa y el tamaño de la celda. Los píxeles en realidad no mantienen una relación mutua entre sí. En la cobertura de tipo ráster, cada celda tiene un valor o código asignado, correspondiente al tipo de información temática que representa la celda [40].

En el modelo vectorial, la información sobre puntos, líneas y polígonos se almacena como una colección de coordenadas (x, y) . La ubicación de una característica puntual puede describirse con un solo punto (x_0, y_0) . Las características lineales, pueden almacenarse como un conjunto de puntos de coordenadas (x_i, y_i) . Las características poligonales, pueden almacenarse como un circuito cerrado de coordenadas.

La Figura 2.2 ilustra una imagen generalizada del mundo real tratada en los dos diferentes modelos.

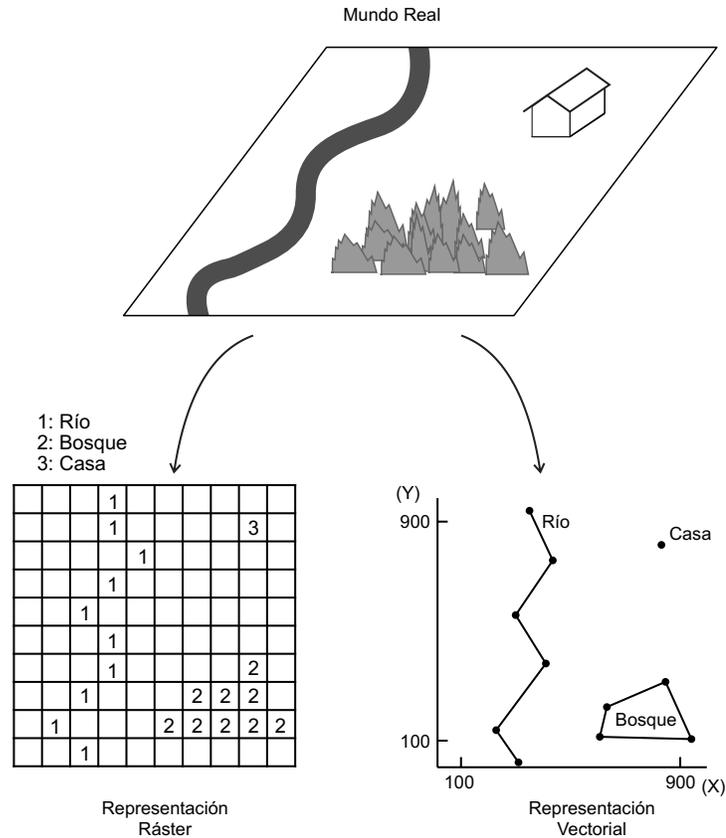


Figura 2.2: Representación en modelos ráster y vectorial de una imagen del mundo real.

2.3 ESTIMACIÓN DE OCURRENCIA DE INCENDIOS

FORESTALES

La simulación y modelado de fenómenos geospaciales permite entender un fenómeno observado, comprobar hipótesis y teorías, predecir su comportamiento en el espacio y tiempo bajo distintas condiciones y escenarios así como descubrir nuevos funcionamientos y comportamientos.

Los incendios forestales, a menudo, se localizan cerca de núcleos habitados y tienden a seguir patrones estacionales, semanales, e incluso diarios [47, 65]. Los expertos en gestión forestal enfocados en la lucha contra incendios son capaces gene-

ralmente de evaluar futuras tendencias y localizaciones en la ocurrencia de incendios.

Los modelos son representaciones abstractas y simplificadas de la realidad, a menudo utilizados tanto en ciencia y tecnología. Los modelos pueden ser deterministas o probabilísticos. En el primer caso, los resultados se definen con precisión, mientras que en el segundo se implica la variabilidad debida a factores aleatorios desconocidos. Los modelos con un componente probabilístico se llaman modelos estadísticos [37]. La clase más importante, respecto al trabajo en esta tesis, esta contenida en los modelos lineales generalizados.

Un modelo capaz de predecir incendios haría la distribución de recursos de extinción más eficiente y reduciría costos, daños y pérdidas. Sin embargo, el desarrollo de un modelo de predicción de incendios siempre presenta una gran dificultad, aunada a la incertidumbre del comportamiento humano en relación al fuego.

2.3.1 MODELOS LINEALES GENERALIZADOS

En 1972, Nelder y Wedderburn [51] publicaron un artículo sobre los modelos lineales generalizados (GLM, por sus siglas en inglés), donde unificaron la teoría de modelado estadístico y, en particular de los “modelos de regresión”, donde mostraban que:

- Los modelos de regresión lineal más comunes eran miembros de una misma familia y podrían ser tratados de la misma manera,
- las estimaciones de máxima probabilidad para todos esos modelos se obtuvieron usando el mismo algoritmo el cual era el método de mínimos cuadrados reponderados.

Algunos de los modelos de regresión son regresión lineal, regresión logística, regresión de Poisson, etc.

Existen varias opciones para estimar un modelo de regresión, entre los que destacan por su facilidad de aplicación e interpretación el modelo de regresión lineal y el modelo de regresión logística.

Teniendo en cuenta el tipo de variable que se desea estimar (variable dependiente o respuesta) se aplica un determinado modelo. Simplificando, cuando la variable dependiente es una variable continua, el modelo de regresión más frecuentemente utilizado es la regresión lineal, mientras que cuando la variable de interés es dicotómica (es decir, toma dos valores como sí/no) se utiliza la regresión logística.

La regresión lineal es un método que modela la relación entre una variable dependiente Y_t , las variables independientes X_i y un término aleatorio ϵ . Este modelo puede ser expresado como:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \epsilon \quad (2.1)$$

donde:

Y_t = Variable dependiente.

X_1, X_2, \dots, X_p = Variables explicativas.

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ = Coeficientes de regresión.

β_0 = Intersección o término constante.

$\beta_i (i > 0)$ = Coeficientes de regresión relativos a cada variable independiente.

p = Número de términos independientes.

Los parámetros, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$, miden la influencia que las variables explicativas tienen sobre la variable dependiente.

Las distribuciones que pueden utilizarse en los modelos de regresión son:

- binomial
- gamma
- Gaussiana inversa
- normal

- Poisson

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, dependiendo del tipo de variable que se desea estimar es el tipo de regresión a utilizar. En este trabajo se utiliza la regresión logística, ya que la variable a emplear es una variable dicotómica: (sí hubo incendio o no hubo incendio).

2.3.2 REGRESIÓN LOGÍSTICA

El modelo de regresión logística (logit) ha sido utilizado previamente, con buenos resultados, para predecir la probabilidad de ocurrencia de incendios y examinar los factores más críticos de incidencia tanto a escala local [5, 39, 55, 23], como regional y global [47, 45, 4, 69].

La regresión logística es un modelo de regresión para variables dependientes o de respuesta binomialmente distribuidas. Es útil para modelar la probabilidad de ocurrencia de un evento ajustando un conjunto de datos a una curva logística.

Esta técnica de regresión, muy flexible y fácil de usar, es la más conocida y utilizada para estimar la probabilidad de ocurrencia de la variable dependiente dicotómica, a partir de las variables independientes. Se basa en la siguiente función:

$$f(z) = \frac{e^z}{e^z + 1} \quad (2.2)$$

La función $f(z)$ mapea los valores de la variable z en una función continua cuyo rango oscila entre 0 y 1. Ver Figura 2.3.

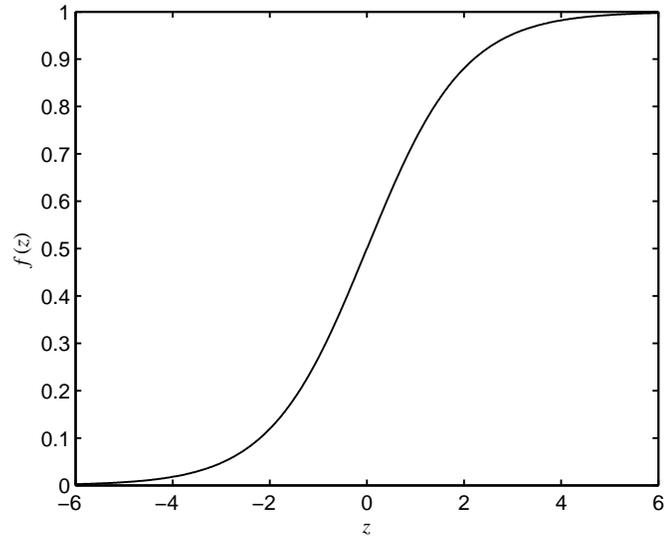
El modelo de regresión logística se expresa como

$$z = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k \quad (2.3)$$

donde:

z = Probabilidad de ocurrencia del fenómeno.

β_0 = Constante de intersección.

Figura 2.3: Función logística $f(z)$

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_k =$ Coeficientes de regresión.

$X_1, X_2, X_3, \dots, X_k =$ Variables explicativas.

$k =$ Número de coeficientes en la regresión.

La variable z se obtiene por una combinación lineal estimada de las variables independientes mediante un ajuste de máxima verosimilitud. Un coeficiente β_i de regresión positivo significa que la i -ésima variable explicativa incrementa la probabilidad del resultado, mientras que un coeficiente β_i negativo significa que la i -ésima variable disminuye la probabilidad del resultado.

La regresión logística calcula sus parámetros, como se mencionó anteriormente, por el método de mínimos cuadrados ponderados, para lo cual ingresa su función logística característica $f(z)$ al mismo. La idea detrás de esta metodología es minimizar, iterativamente, la suma de los residuos ponderados, S [68], dada por

$$\text{mín } S = \sum_{i=1}^n w_i R_i^2 = \sum_{i=1}^n w_i (Y_i - f(z_i))^2 \quad (2.4)$$

donde $f(z)$ se define como en (2.2).

En la Figura 2.4 se muestra el proceso iterativo que sigue el método:

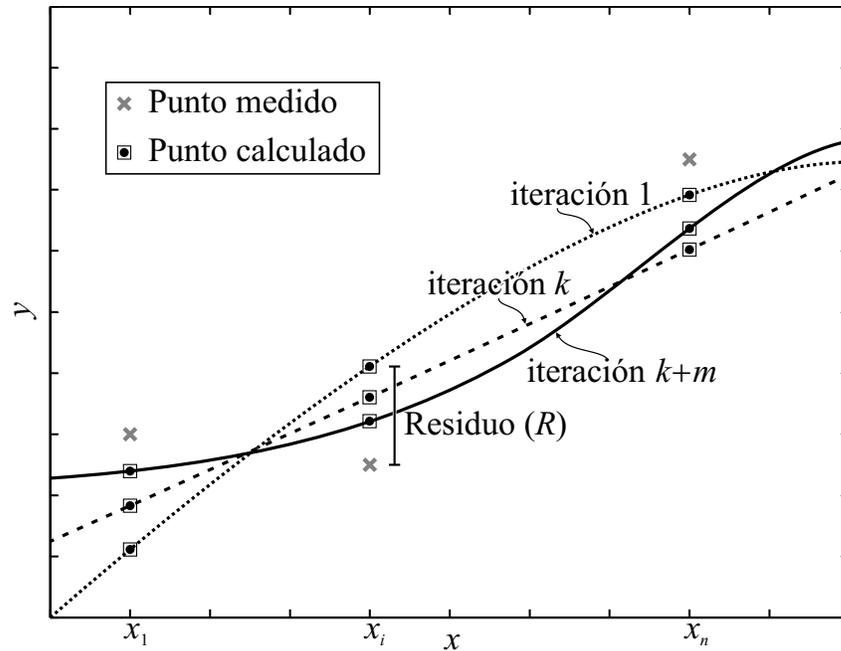


Figura 2.4: Proceso iterativo que sigue el método de mínimos cuadrados para calcular los parámetros de la regresión logística.

1. Se inicia con una estimación inicial para los parámetros β_i .
2. Se evalúan los parámetros para las variables explicativas x_i .
3. El resultado es restado de la salida medida, esto se conoce como residuo, R_i .
4. La suma ponderada de los residuos se compara con una tolerancia preestablecida, si esta suma es mayor que la tolerancia, los parámetros, β_i , se ajustan y se repite este proceso a partir del paso 2. Si no es así, los parámetros se consideran los mejores, y el proceso termina.

2.4 PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE MÁXIMA COBERTURA PARA EL DESPLIEGUE DE SERVICIOS DE EMERGENCIA

La respuesta estándar se define como el número de recursos que pueden llegar a la ubicación de un incendio dentro de un tiempo fijo máximo [26].

En los modelos de cobertura, el objetivo es proporcionar cobertura a las zonas de demanda, donde un área de demanda es cubierta si hay vehículos disponibles que puedan ser enviados para atender esta zona dentro de una distancia dada en un tiempo de respuesta estándar. Una explicación más profunda puede encontrarse en [59].

Ahora, si el número de recursos disponibles que se tienen para el despliegue no es suficiente para cubrir todas las áreas de demanda, el problema de localización de máxima cobertura desplegará una cantidad fija de recursos para maximizar el número de áreas cubiertas por la demanda [6]. Un ejemplo de ello es mencionado en [31], donde se determina la ubicación de un número fijo de bases para aviones de contención de incendios, de forma que se maximice el número de sitios potenciales de fuego que están dentro de una distancia máxima para un servicio eficaz.

El problema de ubicación de máxima cobertura se ha ampliado para poder integrar y manejar los requerimientos de lo que es la respuesta estándar. Los encargados de planificar, definen una respuesta estándar para el servicio de protección contra incendios basado en el tamaño del incendio esperado, y una respuesta estándar puede incluir varios tipos de medios de extinción y las distancias máximas de respuesta.

En este contexto, el problema es desplegar los recursos de extinción de incendios a las estaciones para maximizar el número de áreas de demanda que son cubiertas con la respuesta estándar [42].

En esta tesis, el modelo que se ha tomado para adecuarlo a nuestro problema en

cuestión, se encuentra en el trabajo desarrollado por Haight y Fried [26]. Este modelo es el primer ejemplo de optimización con escenarios en un problema de ubicación de máxima cobertura para el despliegue de servicios de emergencia.

Generalmente, los modelos de cobertura para el despliegue de los servicios de emergencia asumen que los parámetros del modelo se conocen con certeza. Sin embargo, en este trabajo se pretende construir un modelo de respuesta estándar con incertidumbre en el número, la ubicación y la intensidad de los incendios forestales.

Un enfoque flexible para tratar la incertidumbre es crear escenarios de ocurrencia de incendios posibles e incluir los escenarios en un problema de ubicación de máxima cobertura.

La optimización por escenarios se utiliza habitualmente para modelar la incertidumbre de los parámetros en los modelos de localización [11].

Además, en la optimización por escenarios se especifica un conjunto de escenarios que representan una posible realización de los parámetros desconocidos y se determina una solución que funcione bien en todos los escenarios [50].

Los objetivos típicos en un modelo de optimización por escenarios incluyen la optimización del rendimiento esperado y la optimización en el peor caso.

Aunque los problemas de optimización con escenarios pueden ser difíciles de resolver cuando el número de escenarios es grande, a menudo son más manejables que los problemas con variables aleatorias continuas.

Además, una formulación de escenarios con estructura en dos etapas, para elegir primero las ubicaciones de despliegue y luego enviar los recursos, todo bajo incertidumbre, es atractiva para su utilización en problemas de planeación del combate de incendios forestales.

2.5 OPTIMIZACIÓN ESTOCÁSTICA

La incertidumbre está presente en casi todos los sistemas, aunque tradicionalmente no es posible incluir en forma explícita ésta por la complejidad resultante en muchos de los problemas a resolver. La incertidumbre puede deberse a carencia de datos fiables, errores de medida o de parámetros que representan información sobre el futuro. Por ejemplo, algunas áreas en las cuales la incertidumbre desempeña un rol importante son la planificación de inversiones, planificación de cadena de suministros, políticas públicas, etc.

En la optimización determinista tradicional, ya sea “Programación Lineal, Programación No Lineal, Programación Entera, Programación Lineal Entera Mixta o Programación No Lineal Entera Mixta”, se supone que los parámetros del problema son conocidos con certeza. En optimización estocástica se relaja esta condición. No se conocen sus valores, pero se tiene sus distribuciones de probabilidad o se supone que éstas son discretas, con un número finito de estados posibles. Usando este último supuesto, al enfrentar un problema de optimización que evoluciona en el tiempo, puede modelarse la incertidumbre mediante un árbol de escenarios, el cual representa las posibles realizaciones de los parámetros estocásticos.

Fundamentalmente existen dos tipos de modelos en Programación Estocástica:

- Modelos “ver y esperar”, o modelos de programación estocástica pasiva, basados en la suposición de que el decisor es capaz de esperar a que se produzca la realización de las variables aleatorias y hacer su decisión con información completa de dicha realización, con lo que el problema se convierte en determinístico y es posible encontrar el valor óptimo de las variables de decisión con las técnicas habituales de programación matemática determinística. En ocasiones podría ser de interés conocer la distribución de probabilidad del valor objetivo óptimo o algunos de sus momentos (valor esperado o varianza) antes de conocer la realización de sus variables aleatorias, a esto se le conoce como

un problema de distribución [56, 63].

- Modelos “aquí y ahora”, o modelos de programación estocástica activa. En estos modelos el decisor toma la decisión sin el conocimiento de la realización de las variables aleatorias, sin que por ello queden afectadas las distribuciones de probabilidad de las mismas.

Dependiendo del problema que se aborde, existen diferentes métodos que pueden brindar soluciones a éstos. Estos métodos se clasifican de la siguiente manera [2]:

- Métodos de resolución para problemas de programación lineal
 - Descomposición de Benders
 - Descomposición de Dantzin-Wolfe
 - Relajación Lagrangiana
 - Descomposición primal-dual
 - Descomposición anidada
 - Descomposición Lagrangiana aumentada
- Métodos de resolución para problemas de programación entera mixta
 - Ramificación y acotamiento
 - Ramificación y fijado coordinado
 - Métodos heurísticos.

Con respecto a la forma de abordar el proceso estocástico, los métodos utilizados pueden clasificarse en:

- Métodos basados en escenarios que utilizan una muestra fija, parcial o total, de realizaciones del proceso estocástico (escenarios).

- Métodos Montecarlo basados en muestras aleatorias en los que iterativamente se muestrean realizaciones del proceso estocástico a medida que progresa el algoritmo de solución.

Los métodos basados en escenarios, normalmente aproximan un problema estocástico con base en un número manejable de escenarios que permiten resolver el problema por medio de un modelo determinístico equivalente de gran tamaño, en los que el método de solución se concentra en encontrar el punto que cumple con las condiciones de optimalidad del problema equivalente. Cabe señalar que para el problema abordado en esta tesis se utilizó este método.

Los métodos basados en muestras dinámicas Monte-Carlo representan explícitamente el espacio muestral completo (que para propósitos prácticos puede ser de tamaño infinito) y utilizan muestras sucesivas para desarrollar algoritmos que convergen con algún sentido probabilístico a la solución óptima cuando el número de iteraciones tiende a infinito. En la práctica se requieren de pruebas estadísticas para determinar el criterio de convergencia y las propiedades de la solución obtenida después de un número finito de iteraciones.

Utilizando una metodología de análisis de escenarios puede tenerse el riesgo de tomar una mala decisión en el propio modelo. En forma opuesta a la programación estocástica, está el uso inadecuado de una programación determinística, reemplazando los parámetros estocásticos por sus valores promedio y optimizando el modelo resultante. La solución resultante sólo será la solución óptima del escenario promedio que, incluso, puede no existir como tal. La implantación de dicha solución en los diversos escenarios puede dar un resultado muy pobre en la función objetivo e, incluso, la solución puede ser infactible en algunos de ellos. En cambio, la programación estocástica contempla todos los escenarios, sin subordinarse a ninguno, adoptando políticas más consistentes y que satisfacen factibilidad en todos los escenarios.

2.6 LITERATURA DE I.O. APLICADA A LOS PROBLEMAS DE RECURSOS FORESTALES

En las últimas décadas la planificación forestal ha venido apoyándose en modelos cuantitativos para facilitar los procesos de toma de decisiones. Estos modelos proporcionan información pertinente para seleccionar las alternativas de manejo más adecuadas y permiten lograr una mejor comprensión de los efectos que puede generar cualquier decisión. Se han utilizado diferentes enfoques de modelado, destacándose entre ellos los modelos matemáticos, cuyo principio es la optimización (maximización o minimización) de una función (llamada función objetivo) que puede estar sujeta a un conjunto de restricciones. Los modelos matemáticos se pueden solucionar empleando técnicas tales como la programación lineal, programación entera, programación por metas, programación estocástica, programación cuadrática, programación dinámica y programación no lineal.

2.6.1 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN EN LA GESTIÓN FORESTAL

Algunos de los trabajos más destacados se discuten a continuación.

Weintraub, *et al.* [67] abordan diferentes problemas de administración forestal y los algoritmos de solución para cada uno de ellos, los cuales incluyen heurísticas de búsqueda aleatoria y búsqueda local. Se discuten los enfoques propuestos que han sido utilizados con éxito, sus ventajas y deficiencias de cada uno de ellos.

Quintero, Jerez y Ablan [58] presentan un problema de planificación forestal utilizando métodos heurísticos. Se desea obtener un plan de tala para una unidad de producción forestal, tal que permita abastecer de madera en forma continua a una planta de producción de pulpa y minimice los costos totales de aprovechamiento. Para instancias grandes de este problema no se puede encontrar una solución con un método exacto, por ello se desarrollaron dos algoritmos heurísticos: recocido simulado y búsqueda tabú. El comportamiento de estos fue evaluado en términos del valor

objetivo obtenido, el error relativo, la rapidez para encontrar una solución y el tiempo de ejecución de los algoritmos.

Pournomo y Vanclay [57] examinan la aplicación de técnicas de simulación para explorar escenarios de gestión sostenible de los bosques frente a sus limitaciones. Varios escenarios se desarrollaron utilizando multi-agentes los cuales examinaban aspectos sociales y biofísicos.

Barrett y Gilles [3] tratan un problema de tala de árboles con restricciones de adyacencia. Esto consiste en hacer la planificación en base a la vista del paisaje. La función objetivo del modelo tratado consiste en maximizar la ganancia neta, limitándose a la tala en rodales adyacentes. Como las restricciones de adyacencia crecen exponencialmente, en instancias grandes no fue posible encontrar soluciones con método exacto, por ello se hizo necesario desarrollar una heurística para encontrar soluciones factibles.

Zhang, Constantino y Falcao [72] presentan un modelo de programación entera para ayudar a la planificación de bosques. El modelo está diseñado para maximizar el beneficio económico de los bosques y garantizar un área mínima de bosque viejo en el interior para el hábitat de la fauna silvestre. La zona central esta restringida con ciertos requisitos mínimos de edad madura. Las limitaciones principales de la zona, hasta cierto punto, pueden ayudar a mitigar el impacto negativo de las actividades forestales.

Liu [38] presenta un modelo de planificación de cosecha sustentable. El trabajo aborda un modelo determinista que es resuelto por una heurística, y se compara su desempeño con el método exacto.

Legues, *et al.* [13] tratan dos problemas principales en la explotación forestal. El primero es el de seleccionar las ubicaciones para la maquinaria que transporta los troncos desde los puntos donde se cortan a la carretera. El segundo consiste en diseñar el acceso hacia la red carretera para conectar los puntos donde la maquinaria está instalada con ésta. Su combinación induce un problema muy importante y difícil

de resolver en la explotación forestal. Se puede formular como una combinación de dos problemas de optimización difíciles: un problema de ubicación de la planta y un problema de carga de red fija de flujo. Resuelven el problema mediante un enfoque de solución basada en la búsqueda tabú.

Zeng, Pukkala y Peltola [71] muestran un enfoque de integrar la administración del riesgo de los daños por el viento dentro del nivel de optimización en un bosque, e ilustran el efecto de las consideraciones del riesgo en una configuración óptima del paisaje. El estudio consiste en optimizar regímenes de corte de clareo en un bosque forestal tomando en cuenta el riesgo del daño causado por el viento y cosechar madera en una simulación de un periodo de planeación por 30 años. Esto lo aplican en un bosque localizado en el centro de Finlandia. Tres técnicas heurísticas fueron desarrolladas para este problema: recocido simulado, búsqueda tabú y algoritmos genéticos. La heurística que arrojó mejores resultados fue la de búsqueda tabú.

Daugherty y Fried [12] desarrollaron un modelo de optimización entera mixta, que a la vez selecciona el mejor tratamiento de combustible para poner en práctica en cada hectárea y las mejores ubicaciones y capacidades en las instalaciones para la producción de bioenergía forestal. La función objetivo maximiza una red de ingresos, calcula los ingresos de la entrega comercial de madera y biomasa menos los costos de tratamiento y recorrido, agregados sobre todas las hectáreas que reciben tratamiento en la región de análisis. El modelo utiliza una formulación de cosecha de un solo período de selección, donde cada variable de decisión representa la asignación de hectáreas a una combinación de parcelas.

En la Tabla 2.1 se muestra un resumen de la literatura citada en relación a problemas de optimización en la gestión forestal. En la primera columna se denotan los autores y el año de publicación, en la segunda columna se indica una descripción del problema, y en las dos últimas columnas se señala el tipo de modelo (Mo) empleado para la resolución del problema, el cual puede ser determinista (MD) ó estocástico (ME) y la metodología de solución (Me), la cual puede ser métodos heurísticos (H) ó métodos exactos (E) respectivamente.

2.6.2 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN EN EL ATAQUE O PREVENCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES

Los sistemas de manejo de incendios forestales tienen mucho en común con los incendios urbanos, pero la variabilidad espacial y temporal de los procesos de la ocurrencia de incendios forestales y las grandes distancias sobre el cual la gestión de los incendios forestales se lleva a cabo, plantean desafíos especiales a la investigación de operaciones.

La investigación de operaciones se ha aplicado a diversas estrategias en incendios forestales tales como prevención de incendios forestales, la detección, el despliegue y envío de recursos, toma de decisiones para el ataque inicial, la planificación estratégica y gestión del combustible, donde este último plantea nuevos desafíos para la investigación de operaciones. Algunos trabajos relacionados con las áreas anteriores los podemos encontrar en

- predicción de ocurrencia de incendios forestales [65, 10, 70],
- prevención de incendios forestales [28, 52],
- detección de incendios forestales [60, 30],
- ataque inicial, despliegue de recursos [24, 34],
- planificación estratégica [22, 15].

Haight y Fried [26] desarrollaron un modelo de programación entera mixta estocástica que permite determinar el despliegue de recursos con el objetivo de minimizar, simultáneamente, el número de recursos enviados y el número de incendios que no reciben respuesta en un tiempo estándar, formando una función objetivo ponderada. Los parámetros del modelo son las estaciones de recursos y la distribución de probabilidad de ocurrencia de los incendios en el área de estudio. También se conoce el tiempo que tarda un recurso de las estaciones a los posibles lugares de

incendios. Se desea determinar dónde y que cantidad de recursos se debe ubicar en las estaciones al inicio del día y, una vez conocido el patrón de incendios, cómo y dónde enviar los recursos a apagarlos. El objetivo es minimizar el número esperado de incendios que no reciben una respuesta estándar, así como el número de recursos necesarios que puede llegar al fuego dentro de un tiempo límite de respuesta, sujeto a la disponibilidad de recursos. El modelo fue aplicado a un área de estudio de 3,642 km² en el centro de California. Se utiliza el California Fire Economics Simulator versión 2 (CFES2), para una simulación estocástica del número de incendios diarios en esa región. Los autores usaron un modelo para colocar hasta 22 camiones de entre 15 estaciones en la unidad de Amador-El Dorado del Departamento de Silvicultura y Protección contra Incendios en California central. Se utilizó un modelo de simulación estocástica de ataque inicial. En este trabajo de tesis se toma como base este modelo de Haight y Fried para desarrollar un procedimiento de asignación de recursos, con algunas variantes para adecuarlo al caso de estudio en cuestión.

Hay dos importantes modelos sobre extinción de incendios en zonas urbanas y zonas forestales encontrados en la literatura, muy similares al trabajo anteriormente descrito. En el primero, Serra y Marianov [61] formulan un modelo con escenarios basado en la ubicación de las estaciones de bomberos en la ciudad de Barcelona. Los escenarios se utilizan para la incertidumbre de la demanda de servicio y tiempos de viaje de los equipos. Los modelos ubican las instalaciones de servicios de emergencia para reducir al mínimo el tiempo máximo de viaje total alcanzado en todos los escenarios. En el segundo, Maclellan y Martell [41] formulan un modelo para ubicar bases de aviones de combate de incendios en la provincia de Ontario. A partir de sus bases, los aviones se despliegan para satisfacer la demanda diaria en las bases con el fin de dar un ataque inicial exitoso. La demanda diaria de aviones de combate está representada por un conjunto de escenarios. El problema es determinar las bases de aviones de combate y la implementación de todos los días, para minimizar los costos y cumplir con los requerimientos de la demanda en todos los escenarios.

Islam y Martell [34] desarrollaron un modelo de simulación diaria de tanques

aéreos y lo utilizan para investigar como el rendimiento del sistema varía como una función de rango de ataque inicial, las tasas de incendios de llegada, y la hora del día. Los resultados indican que el rango óptimo de ataque inicial disminuye a medida que aumenta la carga diaria de incendios. Los gestores de incendios pueden utilizar esta información para diseñar políticas sobre estos recursos que reduzcan al mínimo los tiempos de respuesta iniciales de ataque.

Dimopoulou y Giannikos [16] presentan un modelo de máxima cobertura tomando en cuenta la clasificación de las regiones de tal forma que se cubran la mayor cantidad de regiones de clases diferentes. La metodología que emplean para clasificar las regiones dentro de un área forestal es acorde a varios factores que afectan el desarrollo de un incendio forestal como son el clima, la vegetación, la pendiente y la velocidad del viento. De acuerdo a estos factores, la clasificación se basa en información proporcionada por un SIG. Esta información se transmite luego a un modelo de optimización que determina la ubicación óptima de los recursos de extinción de incendios. El método se ha aplicado a la zona de Parnitha, cerca de Atenas. En este modelo el número de vehículos disponibles de lucha contra incendios es dado y el principal objetivo es determinar su despliegue óptimo.

Mees, Strauss y Chase [48] describen un modelo que estima el costo total óptimo esperado de un incendio forestal dada la incertidumbre en la longitud de la llama y la anchura del perímetro de incendio. En el modelo, se especifica una secuencia de posibles líneas de perímetros de incendio, cada una con un control en tiempo previsto. El procedimiento de asignación de los recursos es con el fin de minimizar el costo total esperado.

Díaz [14] presenta una metodología de solución para el problema de ubicación de brigadas de ataque a incendios forestales con el fin de maximizar el área protegida. Propone un modelo determinista, el cual resuelve por medio del método de ramificación y acotamiento. En su metodología se incluye el cálculo de un índice de peligro potencial de incendios.

En la Tabla 2.2 se muestra un resumen de la literatura citada en relación a problemas de optimización en el ataque o prevención de incendios forestales.

Tabla 2.1: Literatura relacionada con modelos de optimización en la gestión forestal.

Autor	Tipo de problema	Mo	Me
Quintero, Jerez y Ablan (2010) [58].	Presenta un problema de planificación forestal utilizando métodos heurísticos.	MD	H
Pournomo y Vanclay (2003) [57].	Examina la aplicación de técnicas de simulación para explorar escenarios de gestión sostenible utilizando multi-agentes.	ME	H
Barrett y Gilles (2000) [3].	Aborda un problema de tala de árboles con restricciones de adyacencia.	MD	H
Zhang, Constantino y Falcao (2009) [72].	Presenta un modelo de programación entera para la planificación de bosques, maximizando el beneficio económico de estos.	MD	E
Liu (2001) [38].	Desarrolla un modelo de planificación de cosecha sustentable.	MD	H
Legues, <i>et al.</i> (2007) [13].	Trata dos problemas principales en la explotación forestal. Resuelven el problema mediante un enfoque de solución basada en la búsqueda tabú.	ME	H
Zeng, Pukkala y Peltola (2006) [71].	Optimiza regímenes de corte de clareo en un bosque forestal. Tres técnicas heurísticas fueron desarrolladas para este problema.	ME	H
Daugherty y Fried (2007) [12].	Presenta un modelo de optimización entera mixta que selecciona el mejor tratamiento de combustible para ponerlo en práctica en cada hectárea del bosque.	MD	E

Tabla 2.2: Literatura relacionada con modelos de optimización en el ataque o prevención de incendios forestales.

Autor	Tipo de problema	Mo	Me
Haight y Fried (2007) [26].	Presenta un modelo de programación entera mixta estocástica para el despliegue y envío de recursos minimizando el valor esperado de los incendios que no tienen una respuesta estándar.	ME	E
Serra y Marianov (1998) [61].	Formula un modelo con escenarios basado en la ubicación de las estaciones de bomberos en la ciudad de Barcelona.	ME	E
Maclellan y Martell (1996) [41].	Desarrolla un modelo para ubicar bases de aviones de combate de incendios en la provincia de Ontario.	ME	E
Islam y Martell (1998) [34].	Presenta un modelo de simulación diaria de tanques aéreos para minimizar los tiempos de respuesta iniciales de ataque.	ME	E
Dimopoulou y Giannikos (2001) [16].	Describe un modelo de máxima cobertura que determina la ubicación óptima de los recursos de extinción de incendios.	MD	E
Mees, Strauss y Chase (1994) [48].	Presenta un modelo que estima el costo total óptimo esperado de un incendio forestal dado la incertidumbre en la longitud de la llama y la anchura del perímetro de incendio.	ME	E
Díaz (2011) [14].	Presenta un problema de ubicación de brigadas de ataque a incendios forestales que incluye un índice de peligro potencial para maximizar el área protegida.	MD	E

CAPÍTULO 3

PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En este capítulo se describe a detalle el problema a tratar así como su modelado matemático.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Si los recursos de contención de incendios forestales (brigadas) no son distribuidos apropiadamente en un área de interés, si ocurriera un incendio no se le podría dar una respuesta estándar exitosa, lo cual llevaría a que éste se salga de control, lo cual conlleva pérdidas desmedidas de recursos naturales. Por lo tanto, es de suma interés contar con un modelo de optimización de la asignación y distribución de los recursos de contención.

El modelo de asignación de recursos presentado en esta tesis consta de dos etapas. En la primera etapa los brigadistas son distribuidos en estaciones, mientras que en la segunda etapa son enviados de las estaciones hacia las zonas potenciales de incendios, esto basado en la probabilidad de ocurrencia de incendios, con el fin de atacarlos dentro de un tiempo de respuesta estándar.

Las decisiones que se deben tomar son cuántos brigadistas serán asignados a cada estación, y cuántos serán enviados de cada estación a cada zona potencial de

incendios.

El objetivo del problema es minimizar el valor esperado de los incendios que no reciben respuesta en un tiempo estándar, cumpliendo con ciertas restricciones que posteriormente se enuncian. Se asume que se conocen las ubicaciones de las estaciones de los brigadistas y de las zonas potenciales de incendios, cada estación tiene una capacidad fija para albergar a los brigadistas, también se conocen los tiempos de arribo de cada estación a cada zona potencial de incendio, asimismo se tiene un tiempo máximo de despliegue para la respuesta estándar.

La incertidumbre sobre el número, ubicación e intensidad de los incendios está representada por un conjunto de escenarios. Un escenario puede ser definido como la representación de la posible evolución de un sistema hacia un estado futuro (ver por ejemplo la Figura 3.1), el escenario mostrará la situación hipotética de cada parámetro constitutivo de un sistema para un determinado período [19]. Cada escenario representa una cierta configuración de incendios y cada incendio se caracteriza por la localización, intensidad, y el tiempo máximo de respuesta para el ataque inicial. Se supondrá que la probabilidad de que ocurra cualquier escenario del conjunto de escenarios es igual para todos, *i. e.*, todos los escenarios tienen la misma probabilidad de ocurrencia.

Previo a la formulación del problema se definirá la notación usada, así como los parámetros y variables que intervienen en la misma.

3.1.1 NOTACIÓN

CONJUNTOS E ÍNDICES

J : Conjunto de estaciones de brigadistas; $j \in J$

K : Conjunto de zonas potenciales de incendios; $k \in K$

S : Conjunto de escenarios de incendios; $s \in S$

PARÁMETROS

- a : número de recursos disponibles
- b_j : número máximo de brigadistas que puede equipar la estación j ; $j \in J$
- $t_{j,k}$: tiempo de respuesta de la estación j a la ubicación de incendio k ; $j \in J, k \in K$
- T : tiempo máximo para determinar si un incendio recibe una respuesta estándar
- N_k : subconjunto de estaciones de la cual los recursos pueden llegar a la ubicación de incendio k sin sobrepasar el máximo tiempo de respuesta; $k \in K, N_k \in J$,
 $N_k = \{j | t_{j,k} < T\}$
- p_s : probabilidad de que ocurra el escenario s ; $s \in S$
- $r_{k,s}$: recursos requeridos en la ubicación k bajo el escenario s ; $k \in K, s \in S$.

VARIABLES DE DECISIÓN

- x_j : variable entera que representa el número de recursos asignados en la estación j ; $j \in J$
- y_{jks} : variable entera que representa el número de recursos en la estación j que son desplegados a la ubicación de incendio k bajo el escenario s ; $j \in J, k \in K$,

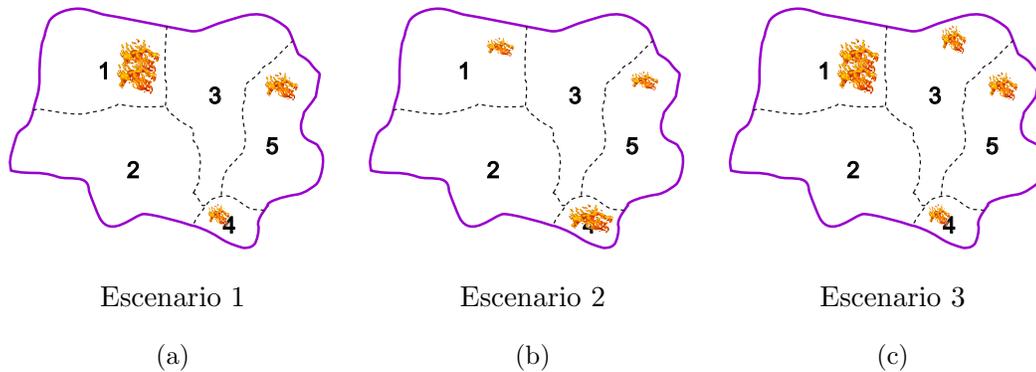


Figura 3.1: Un ejemplo. Escenarios mostrando diferentes situaciones del sistema. (a) Un incendio grande en la zona 1, un incendio pequeño en la zona 4 y un incendio mediano en la zona 5; (b) un incendio pequeño en la zona 1, un incendio mediano en la zona 4 y un incendio pequeño en la zona 5; (c) un incendio grande en la zona 1, un incendio pequeño en las zonas 3, 4 y 5.

$$z_{k,s}: \begin{cases} s \in S \\ 1 & \text{si la ubicación de incendio } k \text{ recibe una respuesta estándar durante el} \\ & \text{escenario } s \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

3.1.2 FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

A continuación se presenta la formulación matemática del problema, el objetivo que se persigue y las restricciones a las que está sujeto.

MODELO

Se tiene un problema de asignación de recursos en el que se quiere minimizar el valor esperado de la cantidad de incendios que no reciben respuesta en un tiempo estándar:

$$\text{Minimizar } f = \sum_{s \in S} \left(p_s \sum_{k \in K} (1 - z_{ks}) \right) \quad (3.1)$$

sujeto a:

$$\sum_{j \in J} x_j = a \quad (3.2)$$

$$x_j \leq b_j \quad j \in J \quad (3.3)$$

$$\sum_{k \in K} y_{jks} \leq x_j \quad j \in J, s \in S \quad (3.4)$$

$$z_{ks} r_{ks} \leq \sum_{j \in N_k} y_{jks} \quad k \in K, s \in S \quad (3.5)$$

$$z_{ks} \in \{0, 1\} \quad k \in K, s \in S \quad (3.6)$$

$$x_j; y_{jks} \in \mathcal{Z}^{-*} \quad j \in J, k \in K, s \in S \quad (3.7)$$

El valor esperado de los incendios se compone de la suma de la probabilidad de cada posible escenario multiplicado por la suma de los valores de ocurrencia de dicho escenario, esto dependiendo si se recibió o no respuesta en tiempo estándar.

Es decir

$$\sum_{s \in S} \sum_{k \in K} (1 - z_{ks})$$

contabiliza la cantidad de incendios que no recibieron respuesta estándar.

La restricción (3.2) garantiza que todos los recursos disponibles que se tienen sean asignados a las estaciones de combate de los incendios forestales. En la restricción (3.3) se define la capacidad de cada estación. La restricción (3.4) requiere que el número de recursos enviados de cada estación a cada ubicación de incendio en un escenario dado no exceda el número máximo de recursos que contiene la estación. La restricción (3.5) establece que si un incendio recibe respuesta estándar entonces la cantidad de recursos requeridos para su ataque no excede a la cantidad de recursos desplegados. La restricción (3.6) denota que la variable de decisión es binaria. Finalmente, la restricción (3.7) indica que los recursos asignados a las estaciones y enviados a las ubicaciones de incendios son enteros.

El modelo de optimización planteado es un modelo mono objetivo, donde la función que mide el número esperado de los incendios que no tienen respuesta estándar se representa por la suma ponderada del número de incendios que no recibieron respuesta en tiempo estándar. Haight y Fried mencionan que el problema de respuesta estándar basado en escenarios es una extensión del problema de localización de máxima cobertura para el despliegue de servicios de emergencia. En este contexto, el problema abordado es un problema de optimización estocástica.

Por otro lado, Megiddo, Zemel y Hakimi [49] demostraron que el problema de localización de máxima cobertura es un problema NP-duro. En promedio, en la literatura relacionada con el problema abordado se ha observado que a partir de 100 escenarios, la solución de los problemas de optimización con escenarios se complica. Sin embargo, para el modelo presentado en este trabajo se han resuelto instancias de un conjunto de hasta 200 escenarios de incendios forestales y 11,400 variables binarias en un tiempo promedio de 16 minutos, usando un criterio de parada de intervalo de optimalidad relativa de 1×10^{-4} . Debido a la naturaleza del proble-

ma, el tiempo de solución del modelo (aproximadamente 16 min.) es mucho menor al periodo entre cada ejecución para su implementación (más de un mes), lo que lo hace un problema relativamente tratable.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

Este capítulo describe la metodología utilizada en la solución del procedimiento de asignación de recursos para un problema estocástico de incendios forestales. El esquema de solución planteado consiste de dos pasos principales: el preprocesamiento y el procesamiento. El diagrama de la Figura 4.1 muestra los métodos que componen a estos.

- La etapa de preprocesamiento comprende la generación de escenarios (configuraciones diferentes de incendios), los cuales son parámetros necesarios para el modelo de optimización en cuestión. Esto implica el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de incendios. Esta etapa se implementó en una aplicación SIG (Sistema de Información Geográfica), la cual está fundamentada con información real. La herramienta es llamada Simulación de Incendios Forestales, y fue realizada en el entorno de programación MATLAB [64].
- La etapa de procesamiento incluye la construcción de la instancia del problema, la resolución del modelo matemático y la evaluación del modelo obtenido. La instancia del problema se construye a partir de datos requeridos, uno de los cuales es el conjunto de escenarios de ocurrencia de incendios. La solución del modelo matemático se obtiene empleando el método de ramificación y acotamiento [29].

Al finalizar se muestra con un ejemplo la aplicación de la herramienta.

4.1 PREPROCESAMIENTO

El objetivo de esta etapa es generar un conjunto de escenarios de incendios forestales basados en el número, ubicación e intensidad, ponderados por su probabilidad de ocurrencia. Para ello primero es necesario calcular la probabilidad de ocurrencia de incendios en una región dada.

En las siguientes secciones se expondrá el procedimiento empleado para calcular la probabilidad de incendio, posteriormente se describe como a partir de ésta se generan los escenarios, que servirán de entrada al modelo matemático.

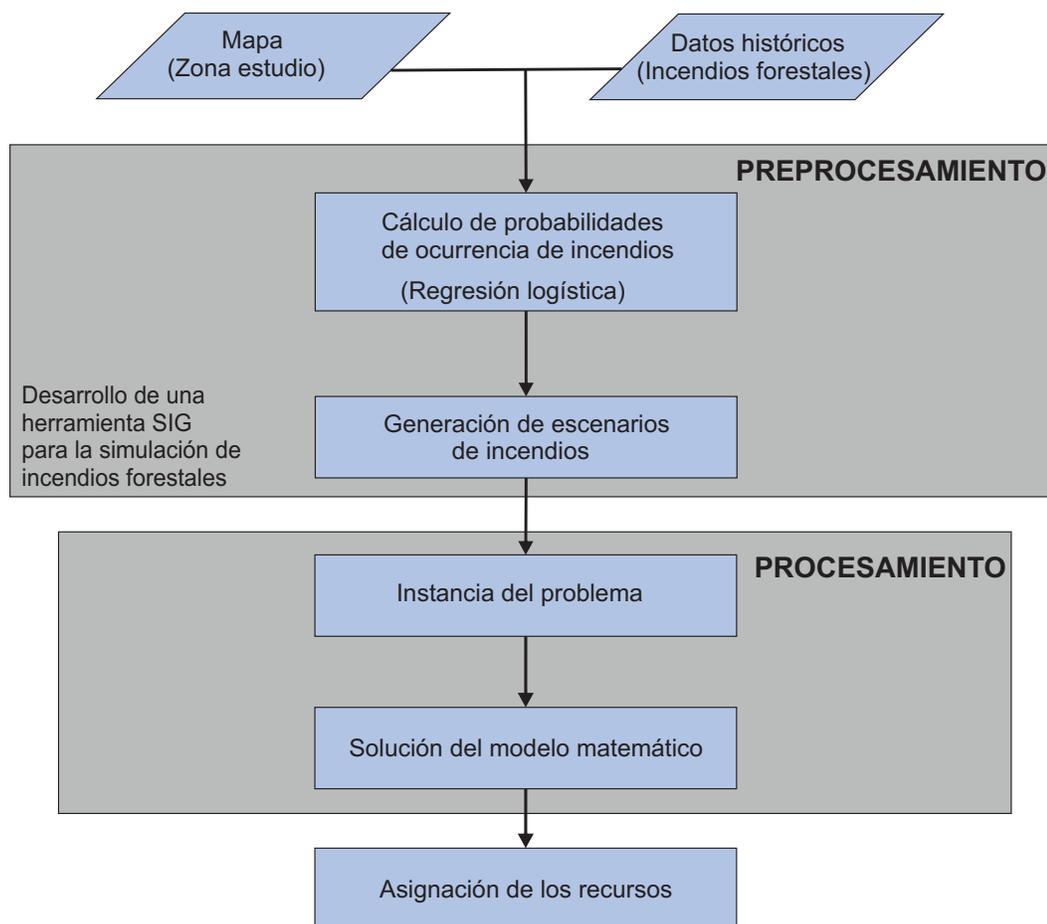


Figura 4.1: Diagrama de flujo de la metodología desarrollada.

4.1.1 CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE INCENDIOS

La aplicación SIG, Simulación de Incendios Forestales (SIFOR), analiza datos geoespaciales de una región de estudio. Se obtienen modelos digitales de superficie (MDS) en formato gráfico TIFF, desde una base de datos del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) [33], los cuales se georreferencian empleando un conjunto de coordenadas conocidas. La Figura 4.2 muestra el MDS antes y después de la etapa de georreferenciación.

Esta herramienta puede utilizarse en cualquier región, siempre y cuando se cuente con la información en el formato necesario, el cual se muestra en el Apéndice B. Los datos históricos de incendios de la región estudiada, se integran en el mapa geoespacial. Cabe señalar que, dado que la base de datos puede contener información muy diversa sobre los incendios ocurridos, se debe hacer un filtrado de los datos antes de generar el archivo definitivo en formato de texto que contenga: año en que ocurrió el incendio, coordenadas (latitud y longitud) y fecha (en formato dd/mm/aa).

Una vez cargada la base de datos y los mapas en cuestión, la información sobre los incendios se emplea para ajustar un modelo lineal generalizado empleando

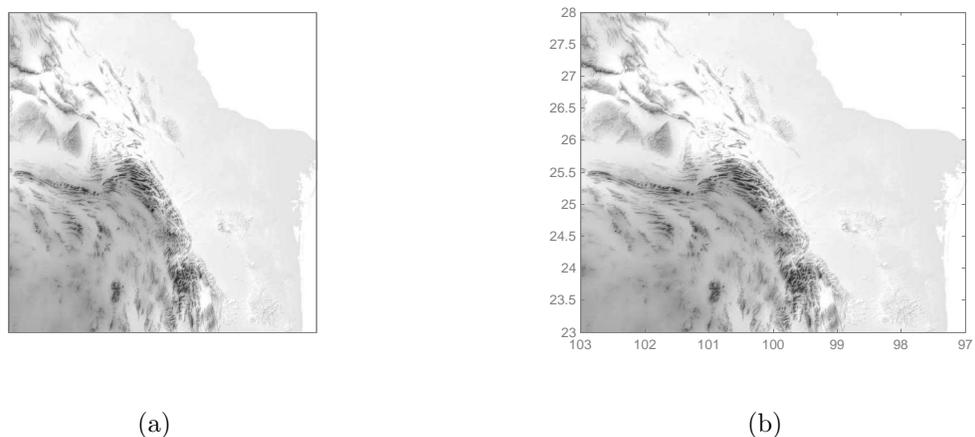


Figura 4.2: Imagen del área de estudio: (a) sin georreferencia, y (b) georreferenciada.

regresión logística mencionada en la Sección 2.3.1.

Se genera una malla que incluye todos los puntos donde ocurrió un incendio, según la base de datos, con una resolución ajustable en el rango de 5–30 km. Los datos leídos, no uniformemente espaciados, se interpolan hacia el nodo más cercano de la malla, para obtener un conjunto de datos uniformemente espaciado. Las coordenadas geográficas, latitud y longitud, se toman entonces como las variables explicativas, x_i , de la regresión logística.

Internamente, la aplicación SIFOR emplea variables categóricas a fin de representar las temporadas del año en las que hubo incendio en categorías mutuamente exclusivas, es decir, si un incendio ocurrió en una temporada, entonces no ocurrió en las temporadas restantes.

Considérese el caso de tres zonas potenciales, L_1 , L_2 , y L_3 , y tres temporadas del año, T_1 , T_2 , y T_3 , cuya incidencia de incendio se muestra en la Tabla 4.1. En la zona potencial L_1 ocurrieron incendios en las temporadas T_1 y T_2 , en la zona potencial L_2 ocurrieron incendios en las temporadas T_1 y T_3 , mientras que en la zona potencial L_3 ocurrió un incendio en la temporada T_3 . Esto se desglosa en la Tabla 4.2. A partir de la información mostrada en esta tabla se deriva un vector de ocurrencia $\mathbf{b} = [1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$, el cual indica de forma binaria cuáles incendios ocurrieron, y un vector categórico $\mathbf{d} = [1 \ 2 \ 3 \ 1 \ 3 \ 2 \ 3 \ 1 \ 2]$, el cual indica en qué temporadas ocurrieron (ó no ocurrieron) los incendios, para los 9 eventos mostrados.

La aplicación construye un vector de variables dependientes binarias \mathbf{b} , y una matriz de variables categóricas \mathbf{D} , donde cada columna de esta matriz representa una categoría (temporada). Así, en el ejemplo anterior la matriz de variables categóricas

Tabla 4.1: Caso de ejemplo. Incidencia de incendios por temporada en cada zona potencial.

Zonas Potenciales	Temporadas		
	T_1	T_2	T_3
L_1	✓	✓	
L_2	✓		✓
L_3			✓

Tabla 4.2: Caso de ejemplo. Desglose de los eventos de ocurrencia o no ocurrencia de incendios.

Zona Potencial	L_1			L_2			L_3		
	L_1	L_1	L_1	L_2	L_2	L_2	L_3	L_3	L_3
Temporada	T_1	T_2	T_3	T_1	T_3	T_2	T_3	T_1	T_2
Ocurrencia	1	1	0	1	1	0	1	0	0

que representa al vector categórico \mathbf{d} está dado por

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Al conjunto de la variable dependiente y las variables independientes se le ajusta un modelo lineal generalizado de tipo logístico, ver (2.1) y (2.2), presentado en la Sección 2.3.1. La precisión de los parámetros de regresión, β_i , del modelo obtenido se corroboran empleando validación cruzada de 10 particiones [27].

4.1.2 GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE INCENDIOS FORESTALES

Una vez que se obtuvieron los parámetros de regresión del modelo lineal generalizado, y conociendo el polígono que delimita el área de interés, un ejemplo de lo cual se muestra en la Figura 4.3, se procede a simular un conjunto de escenarios de incendios forestales que servirán de entrada a la etapa de procesamiento utilizando los siguientes pasos:

1. Tomando en cuenta los incendios históricos, ver ejemplo en Figura 4.4(a), se calcula un rectángulo que abarque las coordenadas extremas de éstos (latitudes y longitudes máximas y mínimas), véase la Figura 4.4(b).
2. Se genera un conjunto de N ubicaciones de prueba, es decir un conjunto de N coordenadas (latitud y longitud) contenidas en el rectángulo calculado en el paso 1, como se muestra en la Figura 4.5(a). En este trabajo se asumieron conjuntos de $N = 100$ ubicaciones de prueba.
3. Se descartan, de las ubicaciones de prueba generadas en el paso 2, aquellas que están fuera de los límites del área de interés. Las ubicaciones que no fueron descartadas se convierten en ubicaciones candidatas, lo cual se muestra en la Figura 4.5(b).
4. Tomando los parámetros, β , del modelo lineal generalizado, se evalúa la probabilidad de ocurrencia de incendio, P , en cada una de las ubicaciones candidatas del paso 3, ver Figura 4.6(a).
5. Para cada una de las ubicaciones candidatas, se genera una probabilidad aleatoria, R , con distribución uniforme, véase Figura 4.6(b).
6. Se evalúa en cada una de las ubicaciones candidatas si la probabilidad evaluada P es mayor, o igual, que la probabilidad R generada en el paso 5.
7. Aquellas ubicaciones para las que la evaluación es verdadera se convierten en un evento exitoso, véase la comparación en la Figura 4.7(a).

8. El conjunto de eventos exitosos del paso 7 para cada zona potencial se convierte en el escenario. Si no hubiese ningún evento exitoso, se debe repetir el procedimiento desde el paso 2, ver Figura 4.7(b).

El procedimiento anterior se repite, desde el paso 2, tantas veces como escenarios se deseen generar.

Dado que en el país no se tiene un modelo implementado de intensidad de incendios forestales, una vez obtenida la tabla de escenarios se genera una matriz de intensidad de incendio aleatoria, con una distribución uniforme, con valores representativos a intensidades alta, media y baja, y con ella se pondera la tabla de escenarios. Se asignan recursos (brigadistas) en función a la tabla de escenarios ponderada con las intensidades, de acuerdo al criterio establecido en la Tabla 4.3, el cual es un criterio actualmente usado en la región del Estado de Nuevo León por los administradores de recursos forestales en ataques a los incendios. Cabe señalar, que los recursos asignados son los necesarios para tener un ataque inicial exitoso con un tiempo de respuesta estándar. El escenario y la asignación de recursos para el

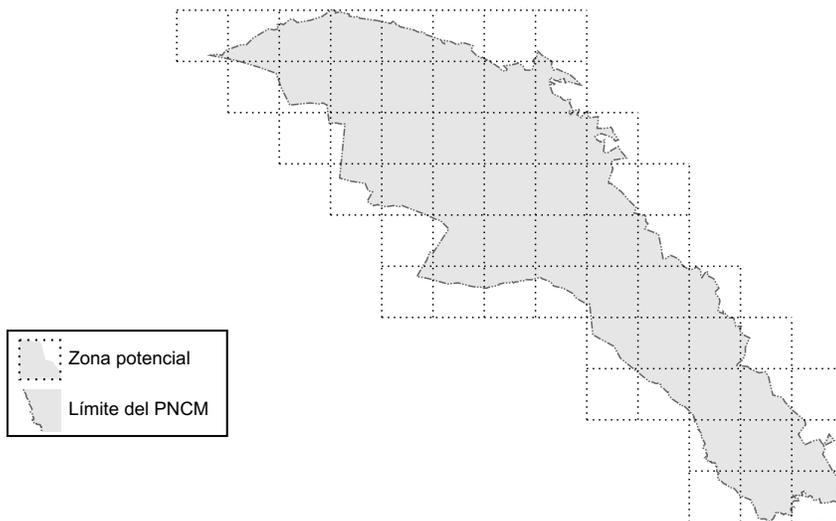


Figura 4.3: Ejemplo del procedimiento para la generación de escenarios: polígono que delimita el área de interés.

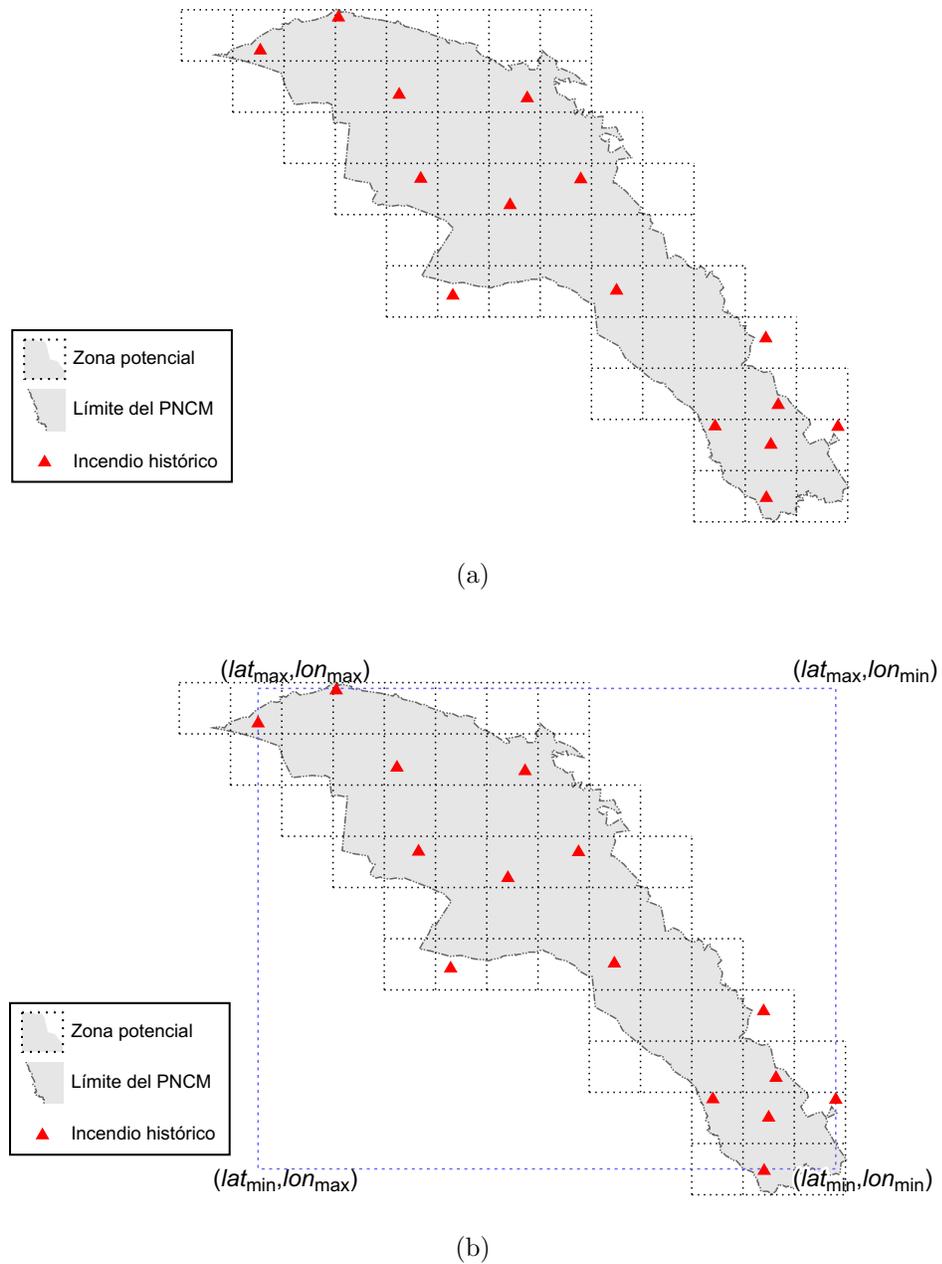
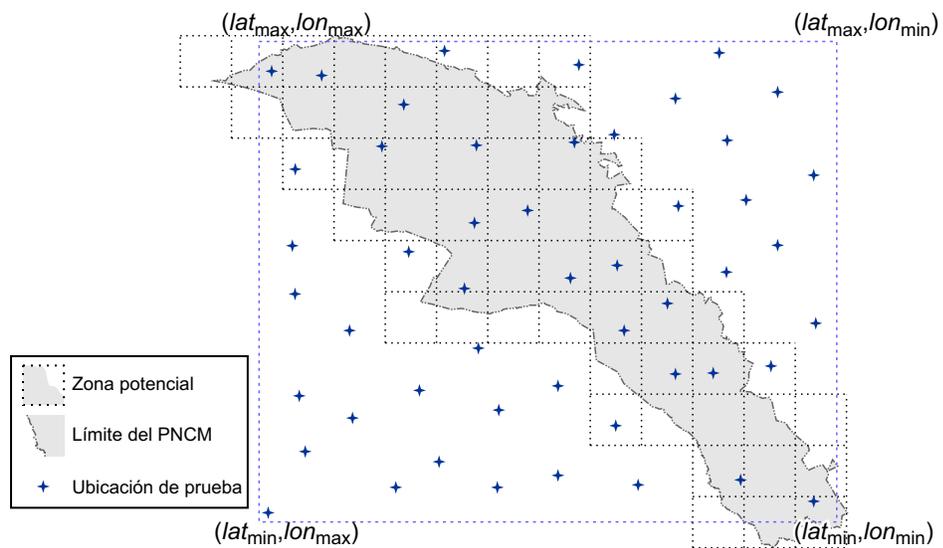
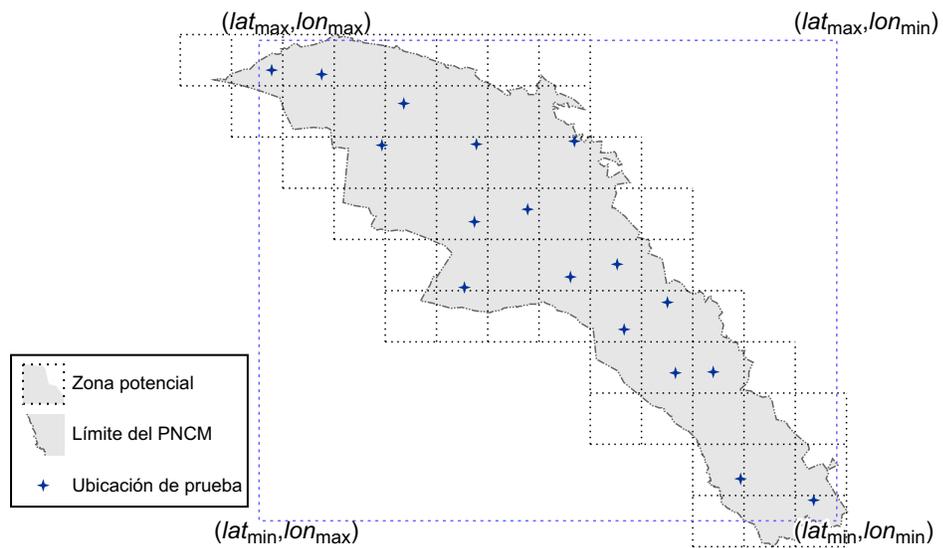


Figura 4.4: Ejemplo del procedimiento para la generación de escenarios: (a) incendios históricos; (b) rectángulo delimitante de los incendios históricos.

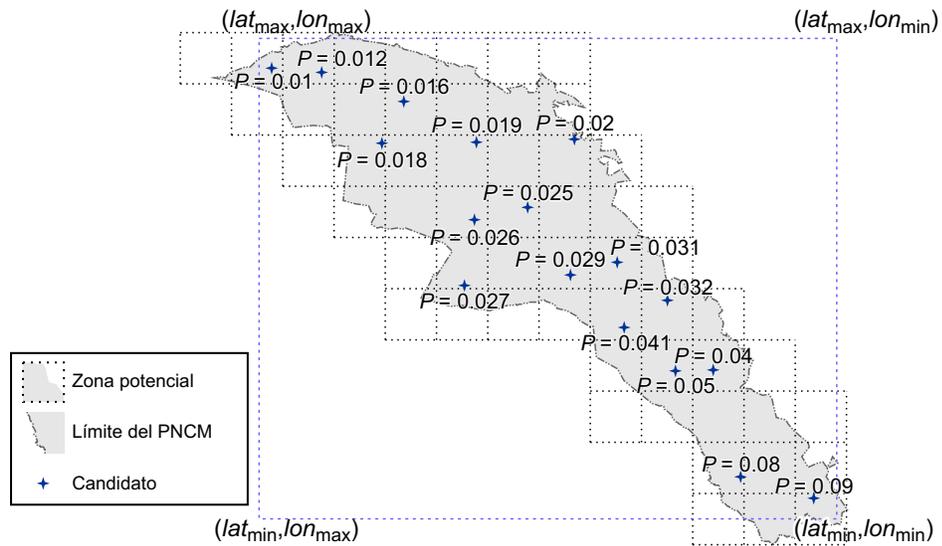


(a)

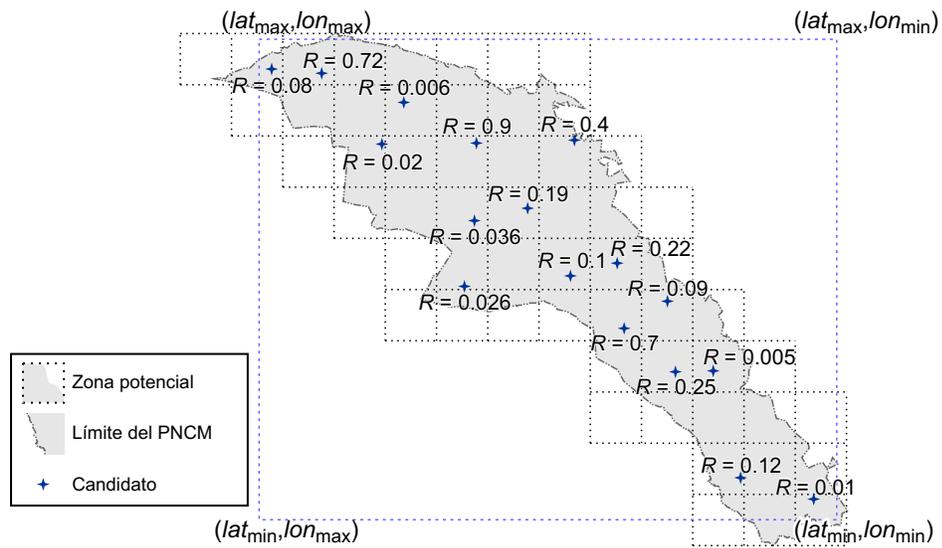


(b)

Figura 4.5: Ejemplo del procedimiento para la generación de escenarios: (a) ubicaciones de prueba generadas (para $N = 50$); (b) ubicaciones de prueba situadas dentro de los límites del área de interés.

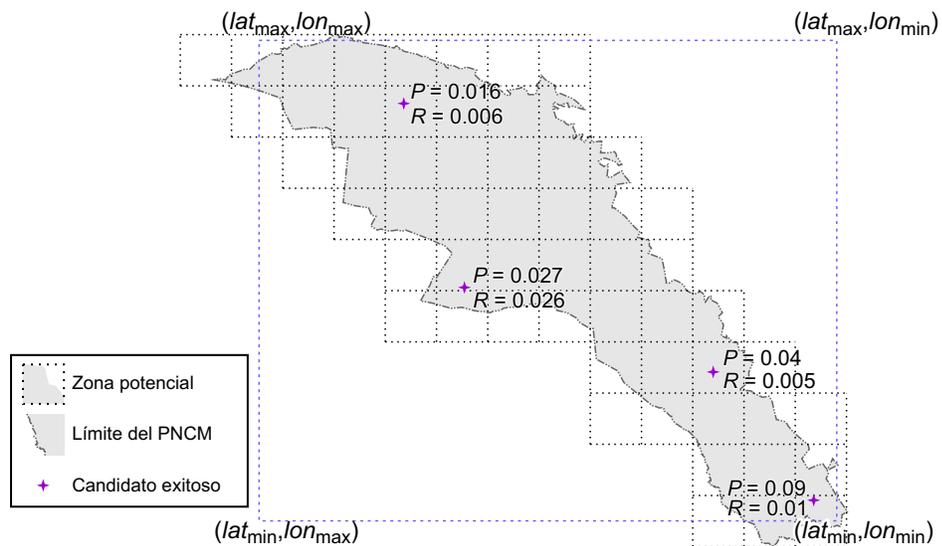


(a)

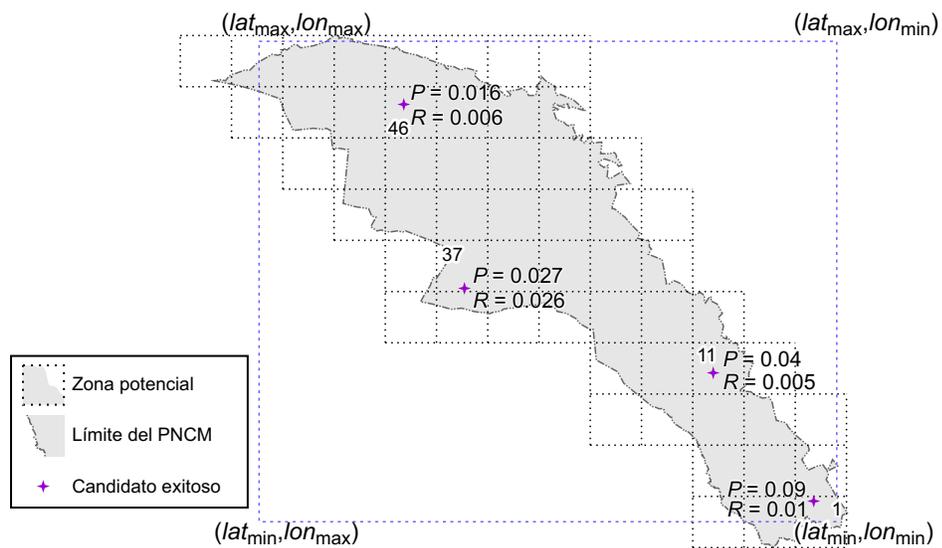


(b)

Figura 4.6: Ejemplo del procedimiento para la generación de escenarios: (a) evaluación de la probabilidad de ocurrencia de incendios en las ubicaciones de prueba; (b) probabilidad aleatoria generada para cada ubicación de prueba.



(a)



(b)

Figura 4.7: Ejemplo del procedimiento para la generación de escenarios: (a) eventos exitosos, donde $P \geq R$; (b) escenario compuesto de los eventos exitosos por zona potencial.

Tabla 4.3: Brigadistas asignados en función a la intensidad en los incendios. Fuente: Administración del Parque Nacional Cumbres de Monterrey.

Número de Brigadistas	Intensidad del Incendio
5	Baja
10	Media
20	Alta

Tabla 4.4: Ejemplo de asignación de recursos para un escenario.

Zona Potencial	Escenario (Incendios por Zona Potencial)	Intensidad / Brigadistas	Número Total de Brigadistas Requeridos
1	1	Media/10	10
11	1	Alta/20	20
37	1	Baja/5	5
46	1	Media/10	10

ejemplo anterior, mostrado en las Figuras 4.4–4.7, se muestra en la Tabla 4.4.

El área de la zona de interés se divide en una retícula de zonas potenciales, compuesta de celdas cuadradas de 7.5 km por lado (se asumió esta medida ya que es la mínima distancia que un vehículo puede recorrer de una estación de brigadistas a una zona potencial, según recomendación de la administración del PNCM), un ejemplo de lo cual se puede observar en la Figura 4.8. Cabe señalar que una zona potencial es únicamente la intersección de la zona del parque que abarque y la celda cuadrada. Tomando en cuenta que las estaciones de brigadistas se encuentran en las cabeceras municipales, la distancia entre las zonas potenciales y las estaciones de brigadistas está dada por la distancia del segmento del gran círculo que pasa entre las cabeceras municipales y las zonas potenciales [35], como se puede ver en la Figura 4.9. Si la i -ésima zona potencial tiene una latitud ϕ_i y longitud λ_i , y a su vez

la j -ésima cabecera municipal tiene una latitud ϕ_j y longitud λ_j , entonces el ángulo central entre estos dos puntos se obtiene empleando la fórmula de semiverseno [62]:

$$\Delta\hat{\sigma}_{ij} = 2 \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) + \cos \phi_i \cos \phi_j \sin^2 \left(\frac{\Delta\lambda}{2} \right)} \right) \quad (4.2)$$

donde:

ϕ_i = latitud de la zona potencia i .

λ_i = longitud de la zona potencial i .

ϕ_j = latitud de la cabecera municipal j .

λ_j = longitud de la cabecera municipal j .

$\Delta\phi = \phi_i - \phi_j$.

$\Delta\lambda = \lambda_i - \lambda_j$.

Siendo el radio medio de la Tierra 6,371 km, la distancia en kilómetros, d_{ij} , entre la zona potencial i y la estación de brigadistas j , en función de (4.2), es:

$$d_{ij} = 6371 \times \frac{\pi}{180} \Delta\hat{\sigma}_{ij} \quad (4.3)$$

donde:

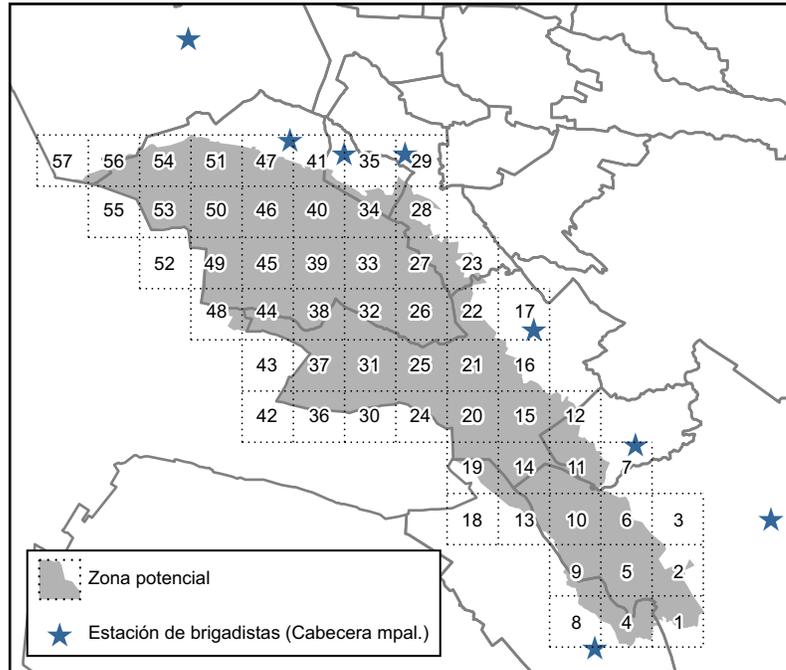


Figura 4.8: División de la zona de interés en zonas potenciales.

$\Delta\hat{\sigma}_{ij}$ = ángulo central del segmento de gran círculo entre la zona potencial i y la estación de brigadistas j .

Basándose en la distancia d_{ij} obtenida con (4.3), se calcula el tiempo de recorrido, t_{ij} , en minutos desde cada estación de brigadistas hacia cada una de las zonas potenciales de incendios, asumiendo una velocidad promedio, para todos los trayectos, de 80 km/hr:

$$t_{ij} = \frac{6}{8}d_{ij}. \quad (4.4)$$

donde:

d_{ij} = la distancia en kilómetros entre la zona potencial i y la estación de brigadistas j .

4.2 PROCESAMIENTO

El problema de optimización que se aborda en este trabajo es un problema de programación entera mixta lineal (PEML). Un PEML se define como un modelo en el que tanto las restricciones como la función objetivo son funciones lineales y las variables de decisión son algunas enteras y otras continuas.

El método empleado para la resolución del problema en cuestión es el de ra-

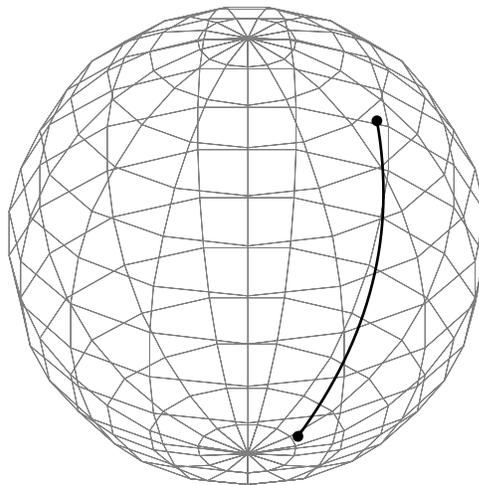


Figura 4.9: Distancia entre dos puntos de una esfera representada por el segmento de un gran círculo.

mificación y acotamiento (MRA) el cual es uno de los métodos más populares en la solución exacta de problemas de programación entera [29]. Su función consiste en ir acotando superior e inferiormente el valor de la función objetivo hasta que ambas cotas sean iguales, es decir, se haya llegado al valor óptimo. La filosofía del MRA es encontrar una solución al PEML mediante la solución iterativa de un conjunto de subproblemas de programación lineal (PL) que son versiones relajadas del PEML. Cada subproblema puede ser resuelto utilizando el método simplex. En general, el MRA consiste en efectuar una enumeración inteligente (implícita) de todas las combinaciones diferentes que pueden tomar las variables enteras. Durante su ejecución, el método va construyendo subproblemas, donde fijan algunas variables y resuelve la relajación lineal de cada subproblema ignorando la condición de integralidad de las variables.

El MRA empieza resolviendo la relajación lineal (RL) del problema (PEML). Si la solución de la relajación es entera, entonces constituye la solución óptima y el método habrá finalizado. Si la RL no proporciona una solución entera entonces el problema se divide en subproblemas fijando en cada uno de estos una de las variables fraccionarias. La solución óptima del problema de RL representa la cota superior del PEML, mientras que una solución factible del PEML representa una cota inferior.

No siempre el MRA es eficiente respecto al tiempo que tarda en encontrar una solución óptima, pues cuando se tienen problemas muy grandes, el algoritmo también genera una cantidad excesiva de ramificaciones y esto lleva a que el tiempo en obtener la solución óptima no sea razonable. Por lo cual, es necesario modificar el algoritmo con técnicas avanzadas, como ramificaciones específicas que explotan la estructura del problema o conceptos como cortes, los cuales reducen el espacio de solución. La forma de trabajar del método permite tener cierto control sobre algunos de sus parámetros, con el fin de ayudar al método a encontrar resultados que sean óptimos y obtenidos en tiempos razonables.

Cabe señalar que para las instancias que se generaron del problema tratado en esta tesis no se hizo ninguna alteración al método, pues los tiempos de solución

fueron razonables.

En la experimentación se hace uso de GAMS [9], el cual es un modelador algebraico para problemas de optimización con interfaz a varios métodos de solución de uso comercial. Las instancias generadas del problema en cuestión se resolvieron utilizando el método de ramificación y acotamiento del módulo GAMS/CPLEX, el cual es la interfaz usada por GAMS para llamar al algoritmo de ramificación y acotamiento de CPLEX [32].

CAPÍTULO 5

RESULTADOS COMPUTACIONALES

En este capítulo se describe la experimentación computacional que se realizó, con el propósito de evaluar el modelo presentado y la herramienta computacional desarrollada bajo diferentes condiciones. Lo anterior aplicado a un caso de estudio en la zona protegida Parque Nacional Cumbres de Monterrey (PNCM) perteneciente al Estado de Nuevo León, México.

Se describen los objetivos, el ambiente de desarrollo, los escenarios de prueba, los experimentos realizados y los resultados obtenidos.

5.1 OBJETIVOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

El alcance de la experimentación es mostrar la validez de la metodología desarrollada en este trabajo, sus principales objetivos son:

- Calcular las probabilidades de ocurrencia y generar los escenarios de incendios forestales con la información histórica que se tiene para el caso de estudio.
- Mostrar la eficiencia de la aplicación computacional en el caso de estudio.
- Hacer un análisis comparativo de las soluciones obtenidas para diferentes escenarios.

5.2 CASO DE ESTUDIO

El Parque Nacional Cumbres de Monterrey (PNCM) es una área natural protegida de 177,395 hectáreas, que se encuentra ubicada en la Sierra Madre Oriental, en la parte correspondiente al estado de Nuevo León y abarca, en su extensión, parte de los municipios de San Pedro Garza García, Monterrey, Montemorelos, García, Rayones, Santiago, Allende y Santa Catarina, como se muestra en la Figura 5.1. Geográficamente se localiza entre $25^{\circ} 37' 48''$ y $25^{\circ} 03' 36''$ latitud norte y $100^{\circ} 55' 12''$ y $100^{\circ} 06' 00''$ longitud oeste.

En este caso de estudio se tienen datos fijos ó parámetros que son necesarios ilustrar, ya que son parte de las entradas del modelo de optimización abordado, además porque posteriormente en algunas instancias que se generaron se modifican

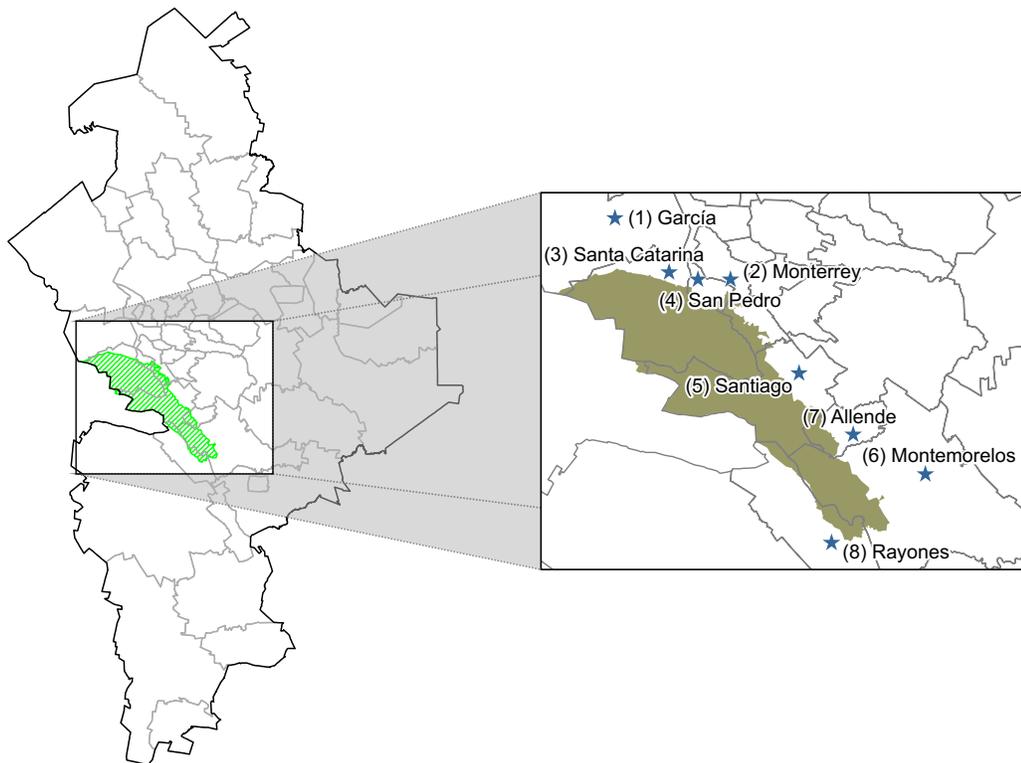


Figura 5.1: Ubicación del Parque Nacional Cumbres de Monterrey y municipios que abarca.

Tabla 5.1: Municipios donde se ubican las estaciones que dan servicio al PNCM, las cuales se localizan en las cabeceras municipales.

Estación	Municipio
1	García
2	Monterrey
3	Santa Catarina
4	San Pedro Garza García
5	Santiago
6	Montemorelos
7	Allende
8	Rayones

algunos de éstos para observar como respondía el modelo y analizar los resultados generados.

Información del Parque Nacional Cumbres de Monterrey:

- Cuenta con 8 estaciones donde residen los brigadistas, ver Tabla 5.1.
- Las capacidades que tienen las estaciones para albergar a los brigadistas se muestran en la Tabla 5.2.
- Cuentan con 123 brigadistas.

5.3 AMBIENTE DE DESARROLLO

A continuación se mencionan las herramientas de software que se utilizaron tanto para el desarrollo de la aplicación SIG creada para el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de incendios y generación de escenarios, como para resolver el modelo matemático.

Tabla 5.2: Límite máximo de brigadistas que puede albergar cada estación.

Estación	Capacidad máx.
1	20
2	20
3	60
4	30
5	54
6	20
7	22
8	20

La programación de la aplicación SIG “Simulación de Incendios Forestales” se desarrolló en la plataforma Mathworks MATLAB versión 12.0 [64], el cual es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para plataformas Unix, Microsoft Windows y Apple Mac OS.

Se eligió optar por este programa por sus diversas características, entre las que se encuentran: la manipulación de matrices de forma nativa, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

MATLAB es un programa de cálculo numérico orientado a matrices. Por tanto, fue más fácil y más eficiente diseñar los algoritmos necesarios para el desarrollo de la aplicación SIG en términos de matrices y vectores. Además, los cálculos de la regresión logística fueron más fáciles de realizarlos con la librería estadística integrada en el software.

El modelo de optimización abordado fue modelado como un problema de programación lineal entera mixta, el cual fue resuelto por el método de ramificación

y acotamiento de las bibliotecas del optimizador CPLEX 11.2[32], en un servidor Sun Fire V440, con 4 procesadores UltraSparc IIIi de 1.62 GHz y 1 MB de memoria cache, 8 GB de memoria RAM y 140 GB de disco duro, con sistema operativo Oracle Solaris. La herramienta fue desarrollada y ejecutada en una computadora Dell Studio 1555 con procesador Pentium de doble núcleo de 2.10 GHz, 3 GB de memoria RAM y 283 GB de disco duro, con sistema operativo Microsoft Windows 7.

5.4 GENERACIÓN DE EXPERIMENTOS DE PRUEBA

Para medir el desempeño de la metodología desarrollada se consideraron 6 diferentes experimentos, los cuales son construidos con los datos fijos ó parámetros descritos anteriormente y para los datos variables se utilizó la aplicación SIG “Simulación de Incendios Forestales”, utilizando una base de datos de incendios ocurridos en el PNCM de los años 2001–2008. La aplicación calculó 57 zonas potenciales (ver Figura 4.8) para cubrir el área del PNCM. Los tiempos calculados entre cada estación de brigadistas y estas zonas potenciales se muestran en la Tabla 5.3. Se generaron 50 escenarios de incendios forestales aleatoriamente, los cuales se muestran en las Tablas 5.4 y 5.5.

Tabla 5.3: Tiempos estimados (min.) de recorrido de cada estación de brigadistas a cada zona potencial de incendio.

Zonas Potenciales	Estaciones							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	80.00	57.92	65.10	61.10	34.91	14.37	19.74	8.78
2	75.59	53.00	60.64	56.47	29.88	10.75	14.32	11.94
3	71.35	48.25	56.39	52.03	25.11	9.38	9.15	16.47
4	77.04	55.72	62.24	58.49	33.11	18.11	19.24	4.36
5	72.45	50.60	57.56	53.63	27.77	15.39	13.62	9.19
6	68.01	45.60	53.06	48.93	22.56	14.46	8.01	14.60
7	63.77	40.75	48.80	44.45	17.60	15.64	2.44	20.13
8	74.30	53.92	59.68	56.20	32.04	22.39	20.06	3.58
9	69.53	48.61	54.78	51.13	26.48	20.25	14.76	8.85
10	64.90	43.38	50.04	46.18	20.95	19.55	9.82	14.39
11	60.44	38.26	45.50	41.41	15.49	20.44	6.18	19.98
12	56.18	33.30	41.22	36.88	10.21	22.73	6.58	25.58
13	62.05	41.66	47.36	43.86	20.51	24.64	13.43	15.90
14	57.36	36.30	42.54	38.80	14.89	25.35	11.05	21.09
15	52.87	31.03	37.93	33.92	9.27	27.22	11.28	26.46
16	48.60	25.92	33.64	29.31	3.69	30.05	13.98	31.92
17	44.64	21.07	29.80	25.12	2.14	33.59	18.09	37.42
18	59.49	40.51	45.10	42.02	21.30	29.73	17.78	18.72
19	54.59	34.98	40.01	36.71	15.97	30.32	16.06	23.29
20	49.85	29.48	35.07	31.51	10.92	31.90	16.21	28.24
21	45.30	24.04	30.38	26.49	6.85	34.34	18.20	33.41
22	41.02	18.70	26.06	21.76	6.16	37.47	21.51	38.70
23	37.11	13.60	22.33	17.57	9.60	41.14	25.64	44.08
24	47.18	28.75	32.76	29.78	14.29	36.69	21.22	30.77
25	42.35	23.14	27.68	24.40	11.49	38.82	22.77	35.57
26	37.74	17.53	22.85	19.16	11.08	41.62	25.49	40.58
27	33.45	11.94	18.49	14.23	13.30	44.95	29.06	45.74
28	29.60	6.42	14.99	10.06	17.16	48.70	33.20	50.99
29	26.40	1.75	13.07	7.93	21.80	52.79	37.73	56.32
30	44.93	28.90	31.10	28.84	18.47	41.54	26.25	33.88

Continúa...

... Continúa

Zonas Potenciales	Estaciones							
	1	2	3	4	5	6	7	8
31	39.83	23.33	25.70	23.25	16.39	43.44	27.52	38.29
32	34.89	17.78	20.42	17.68	16.10	45.95	29.81	42.99
33	30.20	12.31	15.38	12.16	17.70	48.99	32.91	47.88
34	25.87	7.08	10.92	6.82	20.76	52.45	36.62	52.92
35	22.15	3.47	8.10	2.90	24.73	56.26	40.77	58.07
36	43.16	29.93	30.22	28.79	23.01	46.45	31.31	37.43
37	37.82	24.59	24.62	23.18	21.37	48.15	32.37	41.46
38	32.58	19.41	19.05	17.59	21.15	50.43	34.34	45.83
39	27.50	14.56	13.51	12.03	22.39	53.20	37.06	50.45
40	22.67	10.52	8.09	6.59	24.87	56.41	40.39	55.26
41	18.30	8.51	3.41	2.30	28.27	59.96	44.18	60.21
42	41.93	31.75	30.18	29.62	27.74	51.39	36.37	41.30
43	36.42	26.77	24.57	24.20	26.39	52.93	37.29	44.99
44	30.94	22.11	18.98	18.92	26.21	55.01	39.00	49.04
45	25.54	18.00	13.41	13.90	27.22	57.56	41.42	53.38
46	20.25	14.91	7.93	9.58	29.29	60.53	44.42	57.94
47	15.20	13.57	3.01	7.32	32.23	63.86	47.89	62.68
48	30.08	25.54	20.23	21.39	31.28	59.67	43.76	52.55
49	24.48	22.08	15.13	17.12	32.13	62.03	45.92	56.62
50	18.90	19.64	10.57	13.84	33.90	64.79	48.64	60.94
51	13.35	18.64	7.61	12.38	36.46	67.91	51.83	65.46
52	24.45	26.50	18.14	21.08	37.08	66.59	50.54	60.11
53	18.86	24.51	14.56	18.51	38.62	69.16	53.02	64.20
54	13.30	23.71	12.58	17.45	40.89	72.09	55.96	68.50
55	20.15	29.44	19.07	23.35	43.42	73.63	57.51	67.68
56	15.07	28.78	17.60	22.51	45.45	76.38	60.23	71.77
57	18.12	33.85	22.65	27.58	50.11	80.76	64.62	75.24

Tabla 5.4: Escenarios de incendios forestales, generados aleatoriamente, donde se plasma el número de brigadistas requeridos en las zonas potenciales para cada escenario generado, del 1-25.

Zonas	Escenarios																								
Potenciales	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	5	-	10	-	-	-	-	-	-	60	-	20	-	5	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	20	-	10	-	-	20	-	-	20	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	20	-	5	-	-	5
5	-	-	-	-	-	-	5	-	5	10	5	-	-	-	20	20	40	5	5	-	-	20	10	-	-
6	-	10	10	-	20	-	-	-	5	-	-	20	-	-	-	-	-	20	-	5	-	-	-	10	-
7	-	10	-	5	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	10	20	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	10	-
9	-	5	-	20	-	-	-	-	-	-	10	10	20	20	10	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-
10	20	40	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	20	-	-	-	5	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	20	20	10	10	5	-	-	10	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	20
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	10	-	5	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	20	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	10	10	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	5	-	20	5	-	10	-	-	-	-
15	-	5	-	10	-	5	20	-	-	5	-	10	20	20	5	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-
16	-	-	-	-	5	40	-	20	-	-	20	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	20	10	-	5	20	-	-	5	-	5	20	-	-	5	-	10	-	-	20	-	20	-	-
20	-	-	-	-	-	-	5	-	-	10	-	20	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	5	10	-	-	-	-	-	-
23	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-	-	-	5	5	-	-	-	-	-	20	-	5	-	-	5	-	20	-	-	-
25	5	-	-	-	10	-	-	-	20	20	-	-	-	20	10	-	-	-	-	-	20	-	10	20	-
26	20	-	10	20	20	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	10	-	10	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	20	5	-	5	-	-	-	-	-	-	-
28	-	5	5	-	-	20	-	10	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	20	-	10	-
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	-	20	-	10	-	-	-	-	-	20	-	-	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Continúa...

... Continúa

Zonas Potenciales	Escenarios																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
31	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	5	20	-	-	-	-	20	-	-	5	-
32	5	10	-	-	-	20	-	-	20	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	20	10	-	40	-	-
33	40	-	-	-	5	-	-	10	-	-	-	5	-	5	-	-	-	20	-	5	-	-	-	-	10
34	-	-	-	40	5	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	10	-
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	10	-	-
37	-	-	5	-	20	10	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-
38	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	10	-	5	-	10	10	-	-	-	-	-	20	-
39	-	-	-	-	-	-	-	-	20	20	-	-	-	-	-	-	-	5	-	20	-	10	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20
41	-	-	-	10	5	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	10	20	-	-	20	-	-
42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	-	-	-	5	-	-	-	-	5	-	-	10	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	5
45	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	20	-	-	20	5	-	-	-	20	-	-	-
46	-	-	-	-	-	-	20	-	20	10	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	20	5	-	-
47	-	-	-	-	-	-	5	-	5	-	-	-	5	-	-	20	5	-	-	-	10	-	-	5	-
48	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	-	10	10	-	-	-	20	10	-	-	20	-	-	20	-	-	-	-	-	-	10	-	-	10	5
50	-	-	20	5	20	-	20	-	-	-	10	20	-	-	5	-	-	-	-	-	5	-	-	-	5
51	-	-	-	-	-	-	-	5	-	10	10	-	-	-	20	-	-	10	-	-	-	-	10	-	-
52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	-	20	-	10	-	-	5	10	20	-	20	-	10	-	-	-	-	-	-	-	10	20	20	-	-
54	-	-	-	20	-	-	-	5	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-
55	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	20	-	-	-	-
57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 5.5: Escenarios de incendios forestales, donde se plasma el número de brigadistas requeridos en las zonas potenciales para cada escenario generado, del 26-50.

Zonas Potenciales	Escenarios																											
	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50			
1	-	20	-	-	-	20	-	40	-	10	-	-	-	40	-	5	-	-	-	-	10	40	-	-	-	-		
2	-	-	10	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	10	-	-	-	-		
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
4	20	10	10	20	20	-	20	20	-	5	-	-	-	20	-	10	-	-	-	5	-	-	-	5	-	-		
5	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	20	20	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-		
6	5	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	5	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	10		
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	5	-	-	-	-		
8	20	-	-	-	-	-	-	-	-	20	10	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-		
9	-	-	10	10	-	-	-	-	40	-	-	-	20	-	-	-	10	-	-	10	5	-	-	-	20	-		
10	40	-	-	-	-	-	-	-	10	-	10	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	20	10	-	-	5	-	-	-	10	-	-		
12	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	40	-	-	10	-	20	-	-	10	-	20	-	-	-		
13	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-		
14	-	-	20	-	-	-	20	10	-	5	10	-	-	-	-	-	-	-	-	20	10	-	-	-	-	-		
15	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	20	10	-	-	5	10	5	-	-	-	-	5	-	-	-		
16	-	-	20	20	-	-	-	-	-	-	20	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
19	-	-	-	-	-	40	-	-	-	20	-	10	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
20	-	-	5	10	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	15	-	-	5	-	-		
21	20	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	10	-	-	-	-	-	20	-	-	-	60	-		
22	-	-	-	-	-	-	5	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
23	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	5	-	-	20	-	5	10	-	-	-	-	-	-	10	-	-		
24	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	10	-	-	-	-	-		
25	20	-	10	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	20	5	-	-	-	-	-	-	-	-		
26	-	-	-	-	-	-	-	20	40	-	20	-	5	-	-	20	-	40	10	-	-	-	-	-	-	-		
27	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	10	5	-	-		
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-		
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	

Continúa...

... Continúa

Zonas Potenciales	Escenarios																								
	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
31	20	-	-	-	-	20	-	-	-	-	10	5	-	10	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	10
32	-	-	10	-	-	-	10	-	-	-	10	-	5	-	-	20	-	5	5	-	5	-	-	-	-
33	20	-	-	-	10	-	-	-	-	10	-	-	10	-	-	10	-	-	-	-	-	5	-	-	10
34	-	-	-	10	-	-	-	-	10	10	-	5	-	5	-	-	10	-	-	20	-	-	10	20	-
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	-	-	-	-	-	-	-	20	10	-	-	20	20	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-
38	20	-	-	-	-	-	10	-	-	-	10	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-
39	-	-	-	-	-	5	-	20	10	-	-	-	5	10	-	40	-	10	10	-	-	-	-	-	-
40	-	20	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	5	-	5	20
41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-
42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
43	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	20	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	5	10	-	-	-	-	-	-	-	-
45	-	10	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	40	-	-	10
46	20	20	5	10	-	5	5	-	-	-	5	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	10	-	5	10
47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	40	-	-	-	10	-	-	-	-	-
48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	-
49	5	20	-	20	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	10	-	10	-	10	-	10	-
50	-	-	-	-	20	-	-	10	-	-	-	-	-	5	10	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-
51	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	10
52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	10	20	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	20	10	10	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-
54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	20	10	-	-	-	-	-	5	-	-	-	10	-	-	10	-	10	-	-	20	-	-	-	-	-
57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

5.5 DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS

A continuación se mencionan los objetivos principales de cada experimento y después se da una descripción breve sobre la forma en que se realizaron.

Los objetivos de cada uno de los seis diferentes experimentos que se consideraron son, respectivamente:

- Experimento 1: Analizar el valor de la función objetivo para diferente número de escenarios de incendios forestales generados.
- Experimento 2: Observar el comportamiento de la función objetivo a partir de diferente número de brigadistas disponibles.
- Experimento 3: Examinar la función objetivo dependiendo de un número diferente del tiempo máximo de respuesta.
- Experimento 4: Observar cuál es la estación más crítica en función de sus recursos.
- Experimento 5: Verificar cuál es la zona potencial más crítica y analizar en qué trimestre del año lo es.
- Experimento 6: Analizar el comportamiento de los incendios que no tienen respuesta estándar con los recursos y datos actuales del PNCM, para cada trimestre.

Para el Experimento 1, se generaron diferentes conjuntos de escenarios de incendios forestales para poder analizar a partir de cuántos escenarios se obtenía solución óptima y a partir de cuántos solamente se podían obtener soluciones factibles. Esta prueba se realizó para 10, 20, . . . , 100, 150, 200 y 300 escenarios de incendios forestales.

Para el Experimento 2, aunque como se menciona anteriormente la cantidad de brigadistas es fija, se hizo una prueba de ir incrementando esta cantidad con el fin

de observar con qué cantidad de brigadistas se podía obtener una función objetivo con éxito, esto es que el valor esperado de los incendios que no tienen respuesta en tiempo estándar sea mínimo. Esta prueba se realizó con una réplica en las instancias sobre la cantidad de 50 escenarios de incendios forestales, pero con la cantidad de brigadistas de 130–250, con incrementos de diez brigadistas.

Para el Experimento 3, de igual forma, aunque se sabe que el tiempo máximo para la respuesta estándar es fijo, se hizo la prueba de variar este dato con el fin de observar el comportamiento de la función objetivo para tiempos más pequeños y más grandes al ya fijado. Esta prueba se realizó con una réplica en las instancias sobre la cantidad de 50 escenarios de incendios forestales, pero con los tiempos máximos para la respuesta estándar de 30–100 min. con incrementos de 10 min.

Para el Experimento 4 se pretendió analizar cuál estación es la más crítica en cuanto a no poder dar servicio. Para ello se generó una prueba con una réplica en las instancias sobre la cantidad de 50 escenarios de incendios forestales, pero fijando en cada instancia una estación a la vez donde su capacidad de recursos sea cero.

En el Experimento 5 se generaron instancias con 50 escenarios de incendios forestales para cada trimestre del año, con el fin de visualizar cuál zona potencial es la más crítica por el número de incendios ocurridos en ella y en qué trimestre es más vulnerable.

Finalmente, en el Experimento 6 se evaluaron los escenarios generados en el Experimento 5, para observar la cantidad de incendios que no tienen respuesta en tiempo estándar.

5.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

El análisis de resultados se hace para cada uno de los seis experimentos descritos con anterioridad, se ilustran las tablas de comparación entre las diferentes instancias para cada experimento y se hace una descripción detallada de lo que se observó.

En la Tabla 5.6 se muestran los resultados obtenidos para el Experimento 1. La primera columna muestra el número de instancia. La segunda columna contiene la cantidad de escenarios generados con la aplicación SIG “Simulación de incendios forestales”. La tercera columna muestra la probabilidad de que ocurra cualquier escenario. La cuarta columna muestra el promedio de posibles incendios por escenario. La quinta columna muestra el valor objetivo de la función, la cual representa la cantidad ponderada de incendios que no pudieron tener respuesta en tiempo estándar. La sexta columna muestra el porcentaje de incendios sin respuesta estándar de cada una de las instancias resueltas, respectivamente. Puede verse que de los 10–40 escenarios no se han alcanzado resultados dentro de un rango aceptable, porque el método de solución requiere más entradas, y por lo tanto no se pueden tomar estos como valores confiables. En el rango de 50–90 escenarios, el número promedio de incendios por escenario va aumentando, al tiempo que el porcentaje de incendios sin respuesta estándar va disminuyendo; en los 90 escenarios la razón entre ambas cantidades es la menor, es decir con un número máximo promedio de incendios generados se obtuvo el menor número de incendios que recibieron respuesta estándar, como puede verse en la Figura 5.2. Después de 90 escenarios se observa un comportamiento recíproco: disminuye el número promedio de incendios generados a la vez que aumenta el porcentaje de incendios que no reciben respuesta estándar. Este fenómeno se debe al Principio de Parsimonia, el cual es descrito por Akaike [1]. Los valores reportados en la Figura 5.2 no siguen una tendencia lineal de crecimiento o decrecimiento, es decir existen fluctuaciones, esto se debe a la estocasticidad del problema.

Cabe señalar que para este experimento se obtuvo el óptimo en las tres primeras instancias en un tiempo computacional en el rango de segundos; y a partir de la cuarta instancia (40 escenarios) hasta la 12^a instancia (200 escenarios) el tiempo de cómputo fue de alrededor de 16 min. Para escenarios arriba de los 300 ya no fue posible encontrar solución dentro de un tiempo razonable, con un gap relativo de 11.60 %.

Es necesario resaltar que a partir del Experimento 2, se utilizó un conjunto

de 50 escenarios en cada instancia, ya que esta condición representa el caso para el cual la relación del porcentaje de incendios sin respuesta estándar con respecto al promedio de incendios generados por escenarios es la mayor de la ventana de estudio.

En la Tabla 5.7 se muestran los resultados obtenidos para el Experimento 2. Para observar el efecto que tuvo en la función objetivo el incrementar la cantidad de recursos (brigadistas), se varió esta cantidad en cada instancia. En la primera columna se muestra el número de instancia. En la segunda columna el número de brigadistas. En las columnas tres y cuatro se muestran la cantidad de incendios que no pudieron tener respuesta en tiempo estándar y el porcentaje asociado de cada una de las instancias resueltas, respectivamente. Finalmente en la última columna se muestra el valor obtenido en la función objetivo.

Como se puede observar en la función objetivo, a mayor cantidad de recursos (brigadistas), menor es el número de incendios que no tienen respuesta en tiempo estándar. Se fue variando esta cantidad hasta ver con cuantos brigadistas se podía

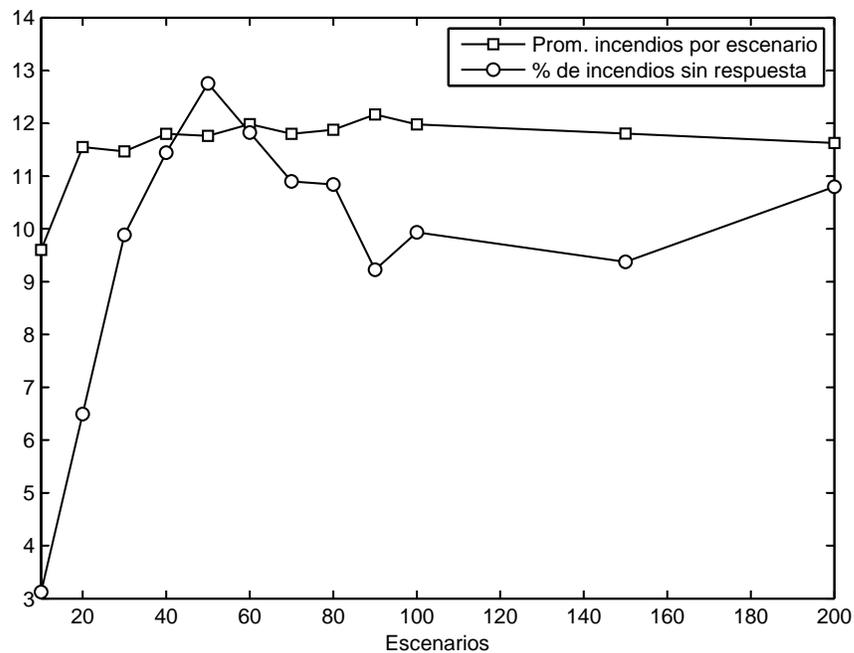


Figura 5.2: Promedio de incendios generados y porcentaje de incendios sin respuesta estándar, por escenario.

Tabla 5.6: Valor esperado y porcentaje de los incendios que no tienen respuesta en tiempo estándar. Experimento 1.

Instancia	Número de escenarios	Probabilidad de cada escenario	Promedio de incendios por escenario	Valor F. O.	% Incendios sin respuesta
1 ^a	10	0.1	9.6	0.30	3.13
2 ^a	20	0.05	11.55	0.75	6.49
3 ^a	30	0.033	11.47	1.023	9.88
4 ^b	40	0.025	11.8	1.35	11.44
5 ^b	50	0.02	11.76	1.48	12.76
6 ^b	60	0.017	11.98	1.36	11.82
7 ^b	70	0.014	11.8	1.26	10.90
8 ^b	80	0.013	11.88	1.287	10.84
9 ^b	90	0.011	12.17	1.111	9.22
10 ^b	100	0.01	11.98	1.19	9.93
11 ^b	150	0.007	11.81	1.098	9.37
12 ^b	200	0.005	11.63	1.255	10.80
13 ^c	300	0.003	11.70	0.77	6.58

^a Tiempo de ejecución en el rango de segundos.

^b Tiempo de ejecución en el rango de minutos.

^c Tiempo máximo de ejecución excedido.

ya tener un valor en la función objetivo de cero, los cuales son mostrados en la instancia 13.

Para el Experimento 3, a pesar que se corrieron instancias con diferente valor en el “tiempo máximo para la respuesta estándar,” de 30–100 min., la función objetivo no tuvo variación, se obtuvo el valor de 1.48 en todas las instancias, esto se debe a que aunque se tuviera un tiempo de despliegue menor ó mayor en realidad este parámetro es indispensable pero no tan fundamental como la cantidad de brigadistas requeridos para dar atención, pues en lo único que sí variaron los resultados fue en la

Tabla 5.7: Desarrollo del Experimento 2 con diferente número de recursos (brigadistas).

Instancia	Brigadistas	Incendios sin respuesta	% Incendios sin respuesta	Valor F. O.
1	130	53	9.01	1.06
2	140	43	7.31	0.86
3	150	31	5.27	0.62
4	160	25	4.25	0.5
5	170	17	2.89	0.34
6	180	14	2.38	0.28
7	190	7	1.19	0.14
8	200	5	0.85	0.10
9	210	4	0.68	0.08
10	220	3	0.5	0.06
11	230	1	0.17	0.02
12	240	1	0.17	0.02
13	250	0	0	0

distribución de éstos en las diferentes estaciones, como se muestra en la Tabla 5.8, ya que con un mayor tiempo de despliegue puede brindarse atención de otras estaciones de brigadistas un poco más alejadas de la zona de incidencia. Lo anterior puede observarse en las Figuras 5.3 y 5.4, donde se muestra la solución para la primera etapa del modelo de optimización, la cual plasma la cantidad de recursos asignados a cada estación del límite máximo de brigadistas que puede albergar y el radio de cobertura para 30 y 50 min., respectivamente.

La solución para el primer escenario del Experimento 3 con un tiempo de respuesta estándar de 30 min. en la segunda etapa del modelo de optimización se muestra en la Figura 5.5, la cual plasma la cantidad de recursos desplegados de las estaciones E5–E8 (ya que la zona en cuestión está dentro del área de cobertura

Tabla 5.8: Experimento 3: Distribución de recursos (brigadistas) en las diferentes estaciones para diferentes tiempos máximos de respuesta estándar.

Instancia	Tiempo	Recursos (brigadistas)							
	máximo (min.)	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8
1	30	0	20	20	10	35	11	22	5
2	40	8	20	23	12	26	14	20	0
3	50	10	20	12	27	13	4	22	15
4	60	14	10	20	23	15	20	11	10
5	70	20	20	17	3	23	20	0	20
6	80	20	20	11	9	21	20	11	11
7	90	20	1	20	10	20	20	22	10
8	100	20	1	20	10	20	20	22	10

de estas estaciones para un tiempo de 30 min.) a la zona potencial 4, el escenario generado requería 20 recursos en esta zona.

Para el Experimento 4 se tuvieron 8 instancias, en cada una poniendo una estación a la vez a cero en sus recursos disponibles, con el fin de observar cuál es la estación más crítica en cuanto a no poder brindar servicio. La función objetivo, al igual que en el Experimento 3, fue de 1.48 para todas las instancias, sin embargo se observa una variación en la distribución de los recursos en las diferentes estaciones, mostrada en la Tabla 5.9. Esto denota que aunque una estación no cuente con brigadistas, las demás estaciones que puedan brindar servicio en un tiempo estándar podrían atender las zonas de peligro cercanas a esta estación, lo cual, aunque parece contraintuitivo, es debido a que el número de brigadistas que se tienen asignados a la región es suficientemente alto para cubrir este tipo de eventualidades.

La Tabla 5.10 muestra los resultados obtenidos para el Experimento 5. Se generaron 50 escenarios para cada trimestre del año para poder ver los resultados y analizar en qué estación se generan más incendios. La primera columna muestra el número de instancia. La segunda columna muestra el trimestre de evaluación,

la tercera y cuarta columna muestran los incendios totales en cada estación y las estaciones con más incidencia de incendios forestales, respectivamente.

Se puede observar que los primeros dos trimestres son los más fuertes en cuanto a la incidencia de incendios forestales, sin embargo el segundo trimestre tiene un poco más incidencia que el primero, y los trimestres tercero y cuarto son más pasivos en cuanto al número de incendios. Finalmente se puede ver que los municipios más afectados en todos los trimestres aún que con mayor ó menor cantidad de posibles incendios son, según el número de estación mostrado en la Tabla 5.1, Santa Catarina (e_3), Santiago (e_5) y Montemorelos (e_6).

Y finalmente, en la Tabla 5.11 se muestran los resultados obtenidos para el Experimento 6. Se analiza la cantidad de incendios que no tienen respuesta estándar en cada trimestre. La primera columna muestra el número de instancia. La segunda

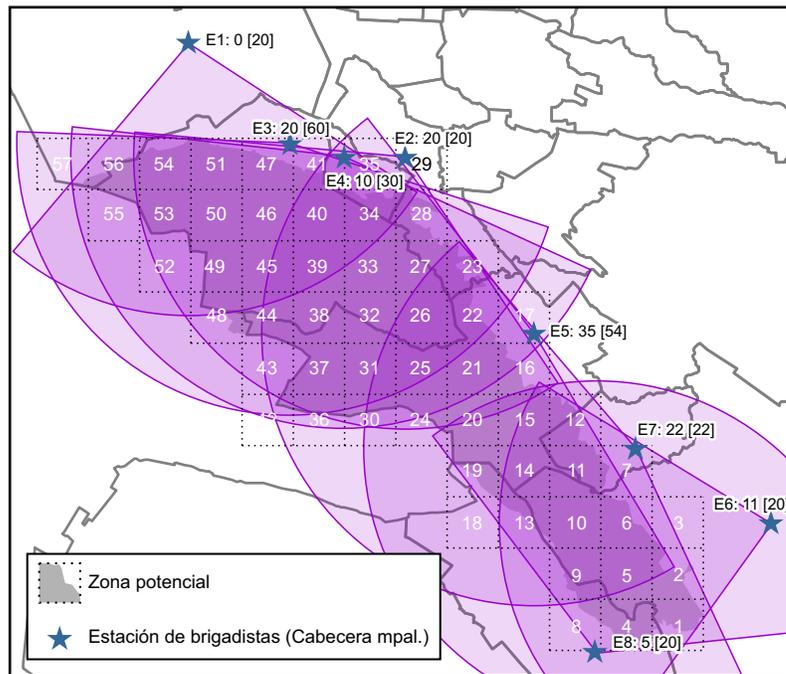


Figura 5.3: Experimento 3: asignación de recursos en las estaciones para la primera etapa del modelo de optimización y su área de cobertura para un tiempo de respuesta estándar de 30 min.

columna muestra el trimestre de evaluación. La tercera columna muestra la cantidad total de incendios en el trimestre. La cuarta y quinta columnas muestran la cantidad de incendios que no pudieron tener respuesta en tiempo estándar y el porcentaje asociado de cada una de las instancias resueltas, respectivamente. Y en la sexta columna, el valor de la función objetivo.

Se observa que con 123 brigadistas con los que se cuentan, para el primer trimestre no podrán dar atención a 62 de 601 incendios posibles, y para el segundo trimestre a 94 de 642, ya que como se mencionó anteriormente estos dos trimestres son los más fuertes en incidencia de incendios forestales. Sin embargo, para los trimestres tercero y cuarto con los 123 brigadistas es suficiente para poder dar un ataque inicial exitoso en todos los posibles incendios.

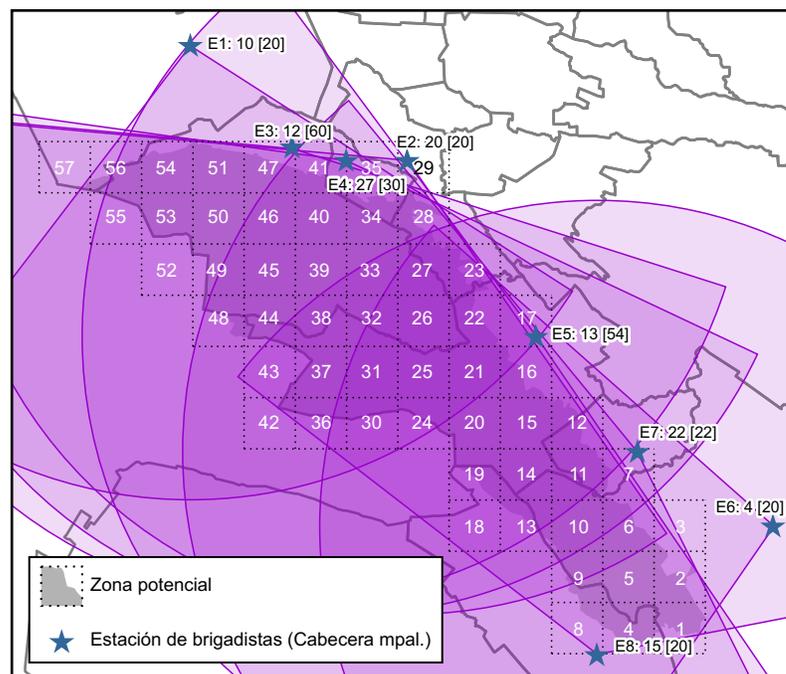


Figura 5.4: Experimento 3: asignación de recursos en las estaciones para la primera etapa del modelo de optimización y su área de cobertura para un tiempo de respuesta estándar de 50 min.

Tabla 5.9: Experimento 4: Distribución de recursos (brigadistas) en las diferentes estaciones cuando una estación no dispone de recursos.

Instancia	Estación		Recursos (brigadistas)							
	sin brigadistas		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅	e ₆	e ₇	e ₈
1	1		–	20	10	30	20	20	13	10
2	2		16	–	15	20	20	20	22	10
3	3		20	13	–	13	23	20	22	12
4	4		20	20	21	–	0	20	22	20
5	5		20	20	20	10	–	11	22	20
6	6		20	20	0	25	23	–	15	20
7	7		20	5	25	20	20	20	–	13
8	8		20	15	18	15	15	20	20	–

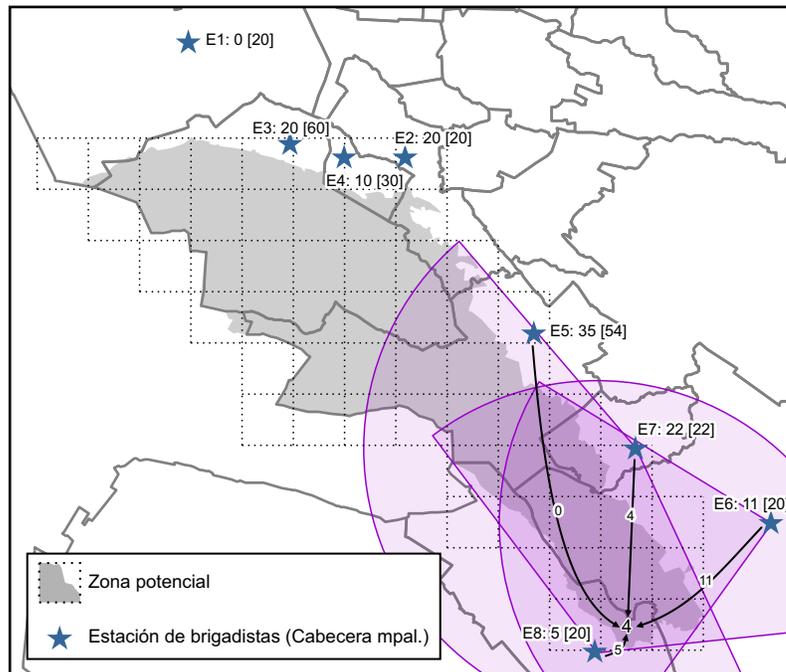


Figura 5.5: Experimento 3: asignación para la segunda etapa del despliegue de recursos de las estaciones E5–E8 a la zona potencial 4, para un tiempo de respuesta estándar de 30 min., con una cantidad requerida de 20 recursos en esta zona.

Tabla 5.10: Desempeño del Experimento 5, comportamiento en cada trimestre.

Instancia	Trimestre	Núm. total de incendios								Estaciones con más incendios
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e ₅	e ₆	e ₇	e ₈	
1	Enero-marzo	5	20	257	8	175	95	11	30	e ₃ , e ₅ y e ₆
2	Abril-junio	3	21	270	6	184	106	18	34	e ₃ , e ₅ y e ₆
3	Julio-sep.	1	2	31	1	16	7	3	7	e ₃ , e ₅ , e ₆ y e ₈
4	Oct.-dic.	0	6	44	1	30	13	2	4	e ₃ , e ₅ y e ₆

Tabla 5.11: Desempeño del Experimento 6, evaluación actual para cada trimestre.

Instancia	Trimestre	Incendios	Incendios	% Incendios
			sin respuesta	sin respuesta
1	1	601	62	10.31
2	2	642	94	14.64
3	3	68	0	0
4	4	100	0	0

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

En esta tesis se aborda un problema de asignación de recursos para el ataque a los incendios forestales con incertidumbre en la ubicación y extensión del fuego. Aunque en la literatura se reportan trabajos que presentan soluciones exactas al problema de asignación de recursos con un enfoque estocástico, estos se basan en simulaciones de escenarios para aplicaciones muy específicas que no pueden implementarse de forma directa en otras zonas de estudio. Algunos otros trabajos se basan en simulaciones de escenarios de ubicaciones de estaciones de brigadistas.

El esquema de solución aquí presentado puede aplicarse a cualquier zona de estudio de la que se dispongan datos históricos de incendios ocurridos, y emplea un enfoque estocástico que permite anticiparse a los posibles incendios que pudieran ocurrir en un área dada. El modelo matemático se basó en el ya propuesto por Haight y Fried [26] con adecuaciones en la asignación de recursos y se resolvió empleando el método de ramificación y acotamiento.

6.1 CONCLUSIONES

El modelo de optimización tuvo buenos resultados en general, para cantidades de escenarios superiores a 50 se obtuvieron soluciones factibles con tiempos de

cómputo en el rango de 10–16 min., el cual según los expertos en cuestiones forestales es un tiempo muy razonable, dado que la aplicación se corre aproximadamente cada tres meses.

Se pudo corroborar que a mayor cantidad de brigadistas asignados, menor fue el valor esperado de los incendios que no tienen respuesta en un tiempo estándar. El modelo de optimización pudo obtener la cantidad total de brigadistas necesarios con los cuales todos los posibles incendios en la zona de estudio podían tener respuesta en tiempo estándar.

Se encontró que variando el tiempo máximo requerido para una respuesta estándar no cambia el número de incendios que no obtienen respuesta, puesto que estos serán atendidos desde diferentes estaciones, esto es, sólo cambia la distribución de los recursos asignados a cada estación. Asimismo, se observó que ninguna estación influye críticamente, cuando a alguna de ellas no le es asignado ningún recurso, las demás estaciones proveen los recursos necesarios para suplir la demanda.

Cabe notar, que el estudio reveló áreas del parque que pertenecen a tres municipios en las cuales existe una mayor incidencia de incendios forestales, en cualquier trimestre del año, lo cual coincide con la base histórica de datos que se tiene. La implementación de la herramienta propuesta en esta tesis ayudaría a disminuir el tiempo de atención de tales incendios y por tanto disminuir los daños causados por los mismos.

Finalmente, se encontró que en el peor de los casos, en el segundo trimestre, de cada 642 posibles incendios, 14.64 % de ellos quedarían sin respuesta en tiempo estándar, seguido por un 10.31 % de incendios de un total de 601 posibles incendios durante el primer trimestre. En los últimos dos trimestres, con la cantidad de recursos que actualmente está asignada, es posible cubrir todos los posibles incendios en un tiempo de respuesta estándar.

6.2 CONTRIBUCIONES

La aplicación está basada en una regresión logística que utiliza una base de datos histórica de incendios forestales, y en la actualidad en México no existe, hasta donde se tiene conocimiento, ninguna herramienta similar a esta para el cálculo de probabilidades de incendios forestales en una región dada. Por otro lado la técnica de regresión logística ha sido implementada en otros países, sin embargo estos esquemas no pueden aplicarse directamente al problema de incendios forestales en nuestro país, ya que requieren de información muy específica.

Esta herramienta es de gran utilidad ya que no necesita de modelos de combustibles, ni características del terreno para evaluar la probabilidad de ocurrencia de incendios, sin embargo, la falta de estos parámetros conlleva una mayor incertidumbre en la estimación de la probabilidad de ocurrencia de incendios, además de que implica una mayor carga computacional debido a que con menos incertidumbre en la estimación de la probabilidad de ocurrencia de incendio se podrían incluir restricciones que mejoraran la respuesta computacional del modelo.

A diferencia de otras herramientas, la probabilidad de ocurrencia de incendios se calculó basándose en datos históricos empleando una regresión lineal generalizada basada en modelo logístico (logit). Este enfoque tiene como ventaja que conociendo la distribución temporal-espacial de los incendios en algunos puntos de una región se puede calcular la probabilidad de ocurrencia de incendios en toda la región, independientemente de las características del terreno o del material combustible que lo conforma, aunque estos parámetros se pueden incluir en el modelo logístico a fin de mejorar su precisión. Además la regresión lineal basada en modelos logísticos es idónea para el análisis de fenómenos cuya probabilidad de ocurrencia sea dicotómica, es decir, ocurre ó no ocurre, como es el caso del problema abordado en esta tesis.

Se implementó una aplicación SIG, en el entorno de programación MATLAB, que calcula la probabilidad de ocurrencia de los incendios de una región de interés

basándose en la ocurrencia histórica de los mismos y usando regresión lineal logística, cuya salida son los escenarios que a su vez servirán de entrada al modelo de optimización que minimiza el número esperado de los incendios que no tienen respuesta estándar, por medio del MRA.

El SIG genera un reporte con la ubicación (latitud y longitud) de los posibles incendios, los municipios más afectados en cuanto a la cantidad total de posibles incendios y los escenarios de requisición de recursos.

El SIG desarrollado se aplicó a un caso de estudio práctico del Estado de Nuevo León, específicamente el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. Sin embargo, este tiene la ventaja de que se puede implementar en cualquier área de estudio sin modificaciones, únicamente contando con información histórica de los incendios ocurridos en la región.

6.3 TRABAJO A FUTURO

En lo que refiere al modelado, una extensión del trabajo es el considerar o incluir otros parámetros, como el tipo de terreno y la combustibilidad de la vegetación, y con ello adaptar el modelo de optimización estocástica abordado, y así tener un modelo más completo, el cual pueda llevar a tener que utilizar otra técnica de solución diferente a la actual.

Para los experimentos probados en esta tesis, el MRA fue capaz de encontrar soluciones en los experimentos. En promedio, en la literatura se ha observado que a partir de 100 escenarios, la solución de los problemas de optimización con escenarios se complica. Sin embargo, para el modelo presentado en este trabajo se han resuelto instancias de un conjunto de hasta 200 escenarios de incendios forestales y 11,400 variables binarias en un tiempo promedio de 16 minutos con un intervalo de optimalidad relativa de 1×10^{-4} . Debido a la naturaleza del problema, una extensión a este trabajo sería el desarrollo de heurísticas para encontrar soluciones en tiempos

razonables para instancias de mayor tamaño.

Las imágenes empleadas en la herramienta desarrollada pueden ser obtenidas en tiempo real desde bancos de imágenes georreferenciadas disponibles en Internet, sin la necesidad de georreferenciar por separado cada imagen.

Se puede incluir en el cálculo de los parámetros del modelo logístico, variables extras como: características del terreno, temperaturas, velocidad del viento y humedad a fin de mejorar la exactitud de la estimación de la probabilidad de incendios forestales. Además, se pueden utilizar técnicas que tomen en cuenta el comportamiento dinámico de la ocurrencia de incendios, como por ejemplo modelos autorregresivos, modelos basados en lógica difusa, identificación recursiva, entre otras.

Generar una base de datos relacional de los incendios forestales ocurridos en el país que incluya los campos latitud, longitud y fecha de detección, a partir de información recabada de las instancias oficiales, basada en lenguaje de consulta estructurado SQL y disponible para su acceso en red.

En este trabajo se ejemplificó el uso de la metodología en un caso de estudio en particular. Una extensión es el de aplicar esta metodología en otras zonas del país, donde se cuente con bases de datos apropiadas. Esto dará un mayor soporte a los beneficios de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Akaike. A new look at statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6):716–723, 1974.
- [2] A. Alonso-Ayuso, E. Cerdá, L. F. Escudero, and R. Sala. *Optimización bajo incertidumbre*. Tirant Lo Blanch, Valencia, España, 2004.
- [3] T. M. Barret and J. K. Gillies. Even-aged restrictions with sub-graph adjacency. *Annals of Operations Research*, 95(1–4):159–175, 2000.
- [4] D. R. Brillinger, H. K. Preisler, and J. W. Benoit. Probabilistic risk assessment for wildfires. *Environmetrics*, 17(6):623–633, 2006.
- [5] Y. H. Chou. Management of wildfires with a geographical information system. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6(2):123–140, 1992.
- [6] R. Church and C. ReVelle. The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association*, 32(1):101–118, 1974.
- [7] Comisión Nacional Forestal. Incendios forestales: Guía práctica para comunicadores. Technical report, Comisión Nacional Forestal, Zapopan, México, 2005.
- [8] Comisión Nacional Forestal. Reporte semanal de resultados de incendios forestales 2011: Datos acumulados del 01 de enero al 31 de diciembre de 2011. Technical report, Comisión Nacional Forestal, Zapopan, México, Enero 2012.
- [9] GAMS Development Corporation. GAMS. The Solver Manuals. Technical report, GAMS Development Corporation, Washington, 2012.

-
- [10] A. A. Cunningham and D. L. Martell. A stochastic model for the occurrence of man-caused forest fires. *Canadian Journal of Forest Research*, 3(2):282–287, 1973.
- [11] M. S. Daskin. A maximum expected covering location model: Formulation, properties and heuristic solution. *Transportation Science*, 17(1):48–70, 1983.
- [12] P. J. Daugherty and J. S. Fried. Jointly optimizing selection of fuel treatments and siting of forest biomass-based energy production facilities for landscape-scale fire hazard reduction. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 45(1):17–30, 2007.
- [13] A. Diaz, J. A. Ferland, C. C. Ribeiro, J. R. Vera, and A. Weintraub. A tabu search approach for solving a difficult forest harvesting machine location problem. *European Journal of Operational Research*, 179(3):788–805, 2007.
- [14] M. A. Díaz. Un marco integrado para el control y gestión de incendios forestales. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, México, 2011.
- [15] A. P. Dimitrakopoulos and P. N. Omi. Evaluation of the fire simulation processes of the National Fire Management System’s Initial Attack Analysis processor. *Environmental management*, 31(1):147–56, 2003.
- [16] M. Dimopoulou and I. Giannikos. Spatial optimization of resources deployment for forest-fire management. *International Transactions in Operational Research*, 8(5):523–534, 2001.
- [17] G. H. Donovan and D. B. Rideout. An integer programming model to optimize resource allocation for wildfire containment. *Forest Science*, 49(2):331–335, 2003.
- [18] L. T. Egging and R. J. Barney. Fire management: A component of land management planning. *Environmental Management*, 3(1):15–20, 1979.
- [19] L. F. Escudero and P. V. Kamesam. On solving stochastic production planning problems via scenario modelling. *Top*, 3(1):69–95, 1995.

-
- [20] J. G. Flores. *Modeling the Spatial Variability of Forest Fuel Arrays*. Tesis doctoral, Colorado State University, EUA, 2001.
- [21] J. S. Fried and B. D. Fried. Simulating wildfire containment with realistic tactics. *Forest Science*, 42(3):267–281, 1996.
- [22] J. S. Fried, J. K. Gilless, and B. D. Fried. CFES 2 – A wildland fire protection planning model with a risk dimension. In *Proceedings of the 1991 Society of American Foresters National Convention*, pages 536–537, San Francisco, EUA, 1991.
- [23] C. V. Garcia, P. M. Woodard, S. J. Titus, W. L. Adamowicz, and B. S. Lee. A logit model for predicting the daily occurrence of human caused forest-fires. *International Journal of Wildland Fire*, 5(2):101, 1995.
- [24] L. V. Green and P. J. Kolesar. Improving emergency responsiveness with management science. *Management Science*, 50(8):1001–1014, 2004.
- [25] F. E. Greulich and W. G. O’Regan. Optimum use of air tankers in initial attack: selection, basing, and transfer rules. Technical report, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, Department of Agriculture, Berkeley, EUA, 1982.
- [26] R. G. Haight. Deploying wildland fire suppression resources with a scenario-based standard response model. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 45(1):31–39, 2007.
- [27] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman. Linear methods for regression. In *The Elements of Statistical Learning*, pages 43–100. Springer, New York, EUA, 2009.
- [28] J. M. Heineke and S. Weissenberger. An analysis of wildfire prevention. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 4(6):513–522, 1974.
- [29] F. Hillier and G. J. Liberman. *Introducción a la Investigación de Operaciones*. McGraw-Hill Interamericana, México, 9 edition, 2010.

-
- [30] M. J. Hodgson, G. Laporte, and F. Semet. A covering tour model for planning mobile health care facilities in Suhum district, Ghana. *Journal of Regional Science*, 38(4):621–638, 1998.
- [31] M. J. Hodgson and R. G. Newstead. Location-allocation models for one-strike initial attack of forest fires by airtankers. *Canadian Journal of Forest Research*, 8(2):145–154, 1978.
- [32] ILOG. ILOG CPLEX 11.2 User’s Manual. Technical report, ILOG, Mountain View, 2007.
- [33] Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. *Atlas: Situación Actual de la División Político-Administrativa Interestatal Estados Unidos Mexicanos*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes, México, 2006.
- [34] K. Islam and D. L. Martell. Performance of initial attack airtanker systems with interacting bases and variable initial attack ranges. *Canadian Journal of Forest Research*, 28(10):1448–1455, 1998.
- [35] W. F. Kern and J. R. Bland. *Solid Mensuration with Proofs*. Wiley, New York, EUA, 2 edition, 1948.
- [36] P. Kourtz. Two dynamic programming algorithms for forest fire resource dispatching. *Canadian Journal of Forest Research*, 19(1):106–112, 1989.
- [37] J. K. Lindsey. *Applying Generalized Linear Models*. Springer, New York, EUA, 1997.
- [38] C.-M. Liu. Primal-dual methods for sustainable harvest scheduling problems. *Computers & Operations Research*, 28(8):733–749, 2001.
- [39] D. O. Loftsgaarden and P. L. Andrews. Constructing and testing logistic regression models for binary data : applications to the National Fire Danger Rating System. Technical report, Dept. of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, Ogden, EUA, 1992.

-
- [40] F. Álvarez and J. R. Rodríguez. *Aplicaciones de los sistemas de información geográfica para la ingeniería forestal*. Carrera Marqués, León, España, 2003.
- [41] J. I. MacLellan and D. L. Martell. Basing airtankers for forest fire control in Ontario. *Operations Research*, 44(5):677–686, 1996.
- [42] V. Marianov and C. ReVelle. The capacitated standard response fire protection siting problem: Deterministic and probabilistic models. *Annals of Operations Research*, 40(1):303–322, 1992.
- [43] D. L. Martell. A review of operational research studies in forest fire management. *Canadian Journal of Forest Research*, 12(2):119–140, 1982.
- [44] D. L. Martell. Current practices and new challenges for operational researchers. In Andres Weintraub, Carlos Romero, Trond Bjørndal, Rafael Epstein, and Jaime Miranda, editors, *Handbook of Operations Research*, volume 99 of *International Series In Operations Research amp; Mana*, pages 489–509. Springer, Boston, EUA, 2007.
- [45] D. L. Martell, E. Bevilacqua, and B. J. Stocks. Modelling seasonal variation in daily people-caused forest fire occurrence. *Canadian Journal of Forest Research*, 19(12):1555–1563, 1989.
- [46] D. L. Martell, E. A. Gunn, and A. Weintraub. Forest management challenges for operational researchers. *European Journal of Operational Research*, 104(1):1–17, 1998.
- [47] D. L. Martell, S. Otukol, and B. J. Stocks. A logistic model for predicting daily people-caused forest fire occurrence in Ontario. *Canadian Journal of Forest Research*, 17(5):394–401, 1987.
- [48] R. Mees, D. Strauss, and R. Chase. Minimizing the cost of wildland fire suppression: a model with uncertainty in predicted flame length and fire-line width produced. *Canadian Journal of Forest Research*, 24(6):1253–1259, 1994.

-
- [49] N. Megiddo, E. Zemel, and S. L. Hakimi. The maximal coverage location problem. *SIAM Journal of Algebraic and Discrete Methods*, 4(2):253–261, 1983.
- [50] J. M. Mulvey, R. J. Vanderbei, and S. A. Zenios. Robust optimization of large-scale systems. *Operations Research*, 43(2):264–281, 1995.
- [51] J. A. Nelder and R. W. Wedderburn. Generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 135(3):370–384, 1972.
- [52] B. B. Nickey and C. B. Chapman. Evaluating fire prevention effectiveness through a probability model. *Fire Technology*, 15(4):291–306, 1979.
- [53] A. Otero. *Medio Ambiente y Educación: Capacitación Ambiental Para Docentes en Ciencias Naturales de Todos los Niveles*. Ediciones Novedades Educativas, Buenos Aires, Argentina, 2 edition, 2006.
- [54] G. M. Parks. Development and application of a model for suppression of forest fires. *Management Science*, 10(4):760–766, 1964.
- [55] M. J. Perestrello, S. Silva, M. Tomé, M. Alvim, and J. M. Cardoso. Spatial prediction of fire ignition probabilities: Comparing logistic regression and neural networks. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(1):73–81, 2001.
- [56] A. Prékopa. *Stochastic programming*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holanda; Boston, EUA, 1995.
- [57] H. Purnomo, Y. Yasmi, R. Prabhu, L. Yuliani, H. Priyadi, and J. K. Vanclay. Multi-agent simulation of alternative scenarios of collaborative forest management. *Small-scale Forest Economics, Management and Policy*, 2(2):277–292, 2003.
- [58] M. A. Quintero, M. Jeréz, and M. Ablan. Métodos heurísticos en la planificación del manejo forestal: un ejemplo de aplicación. *Revista Forestal Venezolana*, 54(2):183–194, 2011.

-
- [59] C. ReVelle. Review, extension and prediction in emergency service siting models. *European Journal of Operational Research*, 40(1):58–69, 1989.
- [60] J. San-Miguel-Ayanz and N. Ravail. Active fire detection for fire emergency management: Potential and limitations for the operational use of remote sensing. *Natural Hazards*, 35(3):361–376, 2005.
- [61] D. Serra. The p-median problem in a changing network: the case of Barcelona. *Location Science*, 6(1–4):383–394, 1998.
- [62] W. M. Smart. *Text-Book on Spherical Astronomy*. Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra, 6 edition, 1960.
- [63] I. M. Stancu-Minasian. *Stochastic programming with multiple objective functions*. Editura Academiei Republicii Populare Române, Budapest, Rumania, 1984.
- [64] The MathWorks, Inc. MATLAB® *Creating Graphical User Interfaces: R2012a*. The MathWorks, Inc., Natick, EUA, 2012.
- [65] J. B. Todd and P. H. Kourtz. Predicting the daily occurrence of people-caused forest fires. Technical report, Petawawa National Forestry Institute, Chalk River, Canadá, 1991.
- [66] R. Vélez. *La Defensa Contra Incendios Forestales: Fundamentos y Experiencias*. McGraw-Hill, Madrid, España, 2 edition, 2009.
- [67] A. Weintraub, R. Church, A. Murray, and M. Guignard. Forest management models and combinatorial algorithms: analysis of state of the art. *Annals of Operations Research*, 96(1–4):271–285, 2000.
- [68] J. R. Wolberg. *Data Analysis Using the Method of Least Squares: Extracting the Most Information From Experiments*. Springer, Berlin, Alemania; New York, EUA, 2006.

-
- [69] P. M. Woodard, B. S. Lee, C. Vega, W. L. Adamowicz, and S. J. Titus. Dos modelos para la predicción de incendios forestales en Whitecourt Forest, Canadá. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, 8(1):5–24, 1999.
- [70] B. M. Wotton and D. L. Martell. A lightning fire occurrence model for Ontario. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(6):1389–1401, 2005.
- [71] H. Zeng, T. Pukkala, and H. Peltola. The use of heuristic optimization in risk management of wind damage in forest planning. *Forest Ecology and Management*, 241(1–3):189–199, 2007.
- [72] H. Zhang, M. Constantino, and A. Falcão. Modeling forest core area with integer programming. *Annals of Operations Research*, 190(1):41–55, 2009.

APÉNDICE A

ILUSTRACIÓN DEL PRE- Y PROCESAMIENTO DE LA METODOLOGÍA

A continuación se describe un ejemplo de la aplicación de la metodología presentada en esta tesis. El área de estudio es el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. Para el ejemplo se asumió la siguiente información:

- 8 estaciones de brigadistas.
- 57 zonas potenciales de incendio, como se muestra en la Figura A.1.
- Se generaron 2 escenarios, los cuales se muestran en la Tabla A.1. La Figura A.2 muestran ambos escenarios.
- Los tiempos entre cada estación y cada zona potencial de incendio se calcularon asumiendo una velocidad promedio de 80 km/hr, estos datos se plasman en la Tabla A.2.
- La capacidad máxima de recursos de cada estación es la mostrada en la Tabla A.3.
- La probabilidad de que ocurra cualquier escenario es la misma.
- El tiempo máximo para la respuesta estándar es de 60 min.

- El número total de recursos que puede ser asignado es de 123 brigadistas.

Finalmente, con base en la información anterior, después de aplicar el modelo de optimización, se obtuvo la siguiente distribución de recursos para la etapa 1 (asignación de recursos en estaciones de brigadistas), la cual se muestra en la Figura A.3:

Estación 1: 0 recursos.

Estación 2: 0 recursos.

Estación 3: 60 recursos.

Estación 4: 0 recursos.

Estación 5: 43 recursos.

Estación 6: 20 recursos.

Estación 7: 0 recursos.

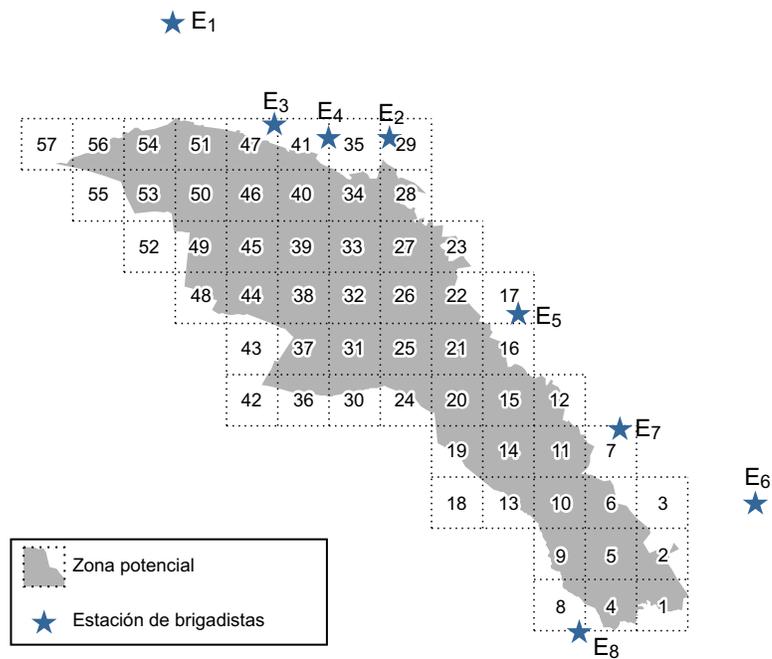
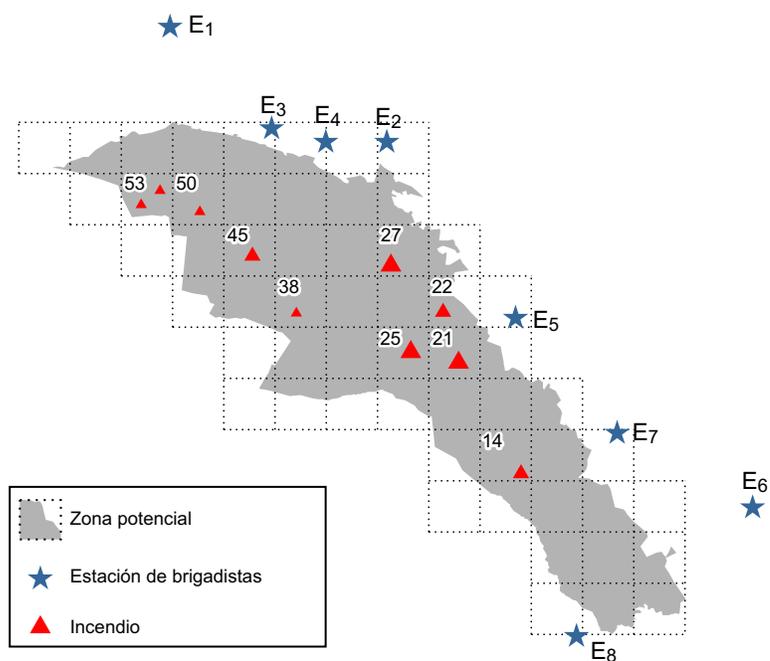


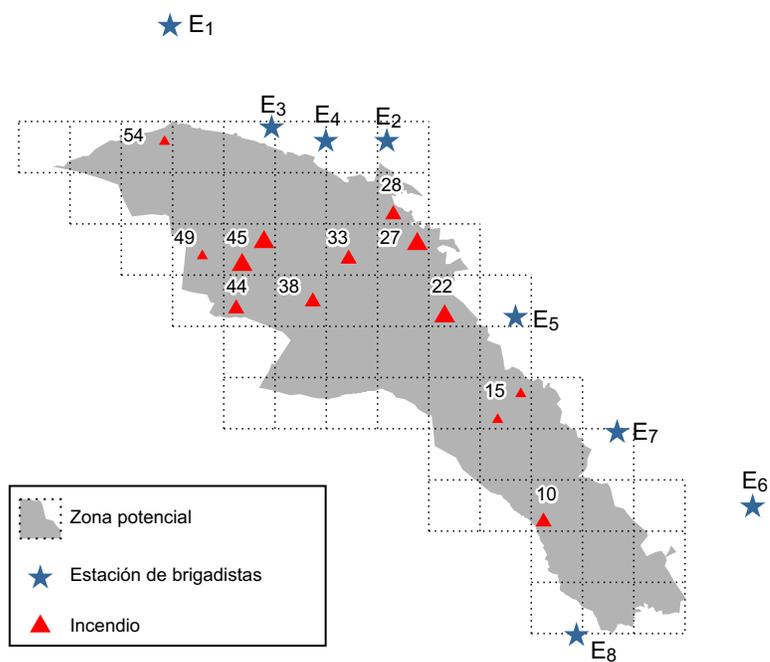
Figura A.1: Área de estudio, para el ejemplo de la aplicación de la metodología: zonas potenciales de incendio.

Tabla A.1: Escenarios generados como ejemplo de la aplicación de la metodología.

Escenarios			Escenarios			Escenarios		
Zona Potencial	1	2	Zona Potencial	1	2	Zona Potencial	1	2
1	0	0	25	20	0	49	0	5
2	0	0	26	0	0	50	5	0
3	0	0	27	20	20	51	0	0
4	0	0	28	0	10	52	0	0
5	0	0	29	0	0	53	10	0
6	0	0	30	0	0	54	0	5
7	0	0	31	0	0	55	0	0
8	0	0	32	0	0	56	0	0
9	0	0	33	0	10	57	0	0
10	0	10	34	0	0			
11	0	0	35	0	0			
12	0	0	36	0	0			
13	0	0	37	0	0			
14	10	0	38	5	10			
15	0	10	39	0	0			
16	0	0	40	0	0			
17	0	0	41	0	0			
18	0	0	42	0	0			
19	0	0	43	0	0			
20	0	0	44	0	10			
21	20	0	45	10	40			
22	10	20	46	0	0			
23	0	0	47	0	0			
24	0	0	48	0	0			



(a)



(b)

Figura A.2: Escenarios generados para el ejemplo de la aplicación de la metodología.

(a) Primer escenario, y (b) segundo escenario.

Tabla A.2: Tiempos estimados (min.) de recorrido de cada estación de brigadistas a cada zona potencial de incendio, para el ejemplo de la aplicación de la metodología.

Zonas		Estaciones							
Potenciales	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	80.00	57.92	65.10	61.10	34.91	14.37	19.74	8.78	
2	75.59	53.00	60.64	56.47	29.88	10.75	14.32	11.94	
3	71.35	48.25	56.39	52.03	25.11	9.38	9.15	16.47	
4	77.04	55.72	62.24	58.49	33.11	18.11	19.24	4.36	
5	72.45	50.60	57.56	53.63	27.77	15.39	13.62	9.19	
6	68.01	45.60	53.06	48.93	22.56	14.46	8.01	14.60	
7	63.77	40.75	48.80	44.45	17.60	15.64	2.44	20.13	
8	74.30	53.92	59.68	56.20	32.04	22.39	20.06	3.58	
9	69.53	48.61	54.78	51.13	26.48	20.25	14.76	8.85	
10	64.90	43.38	50.04	46.18	20.95	19.55	9.82	14.39	
11	60.44	38.26	45.50	41.41	15.49	20.44	6.18	19.98	
12	56.18	33.30	41.22	36.88	10.21	22.73	6.58	25.58	
13	62.05	41.66	47.36	43.86	20.51	24.64	13.43	15.90	
14	57.36	36.30	42.54	38.80	14.89	25.35	11.05	21.09	
15	52.87	31.03	37.93	33.92	9.27	27.22	11.28	26.46	
16	48.60	25.92	33.64	29.31	3.69	30.05	13.98	31.92	
17	44.64	21.07	29.80	25.12	2.14	33.59	18.09	37.42	
18	59.49	40.51	45.10	42.02	21.30	29.73	17.78	18.72	
19	54.59	34.98	40.01	36.71	15.97	30.32	16.06	23.29	
20	49.85	29.48	35.07	31.51	10.92	31.90	16.21	28.24	
21	45.30	24.04	30.38	26.49	6.85	34.34	18.20	33.41	
22	41.02	18.70	26.06	21.76	6.16	37.47	21.51	38.70	
23	37.11	13.60	22.33	17.57	9.60	41.14	25.64	44.08	
24	47.18	28.75	32.76	29.78	14.29	36.69	21.22	30.77	
25	42.35	23.14	27.68	24.40	11.49	38.82	22.77	35.57	
26	37.74	17.53	22.85	19.16	11.08	41.62	25.49	40.58	
27	33.45	11.94	18.49	14.23	13.30	44.95	29.06	45.74	
28	29.60	6.42	14.99	10.06	17.16	48.70	33.20	50.99	
29	26.40	1.75	13.07	7.93	21.80	52.79	37.73	56.32	
30	44.93	28.90	31.10	28.84	18.47	41.54	26.25	33.88	

Continúa...

... Continúa

Zonas Potenciales	Estaciones							
	1	2	3	4	5	6	7	8
31	39.83	23.33	25.70	23.25	16.39	43.44	27.52	38.29
32	34.89	17.78	20.42	17.68	16.10	45.95	29.81	42.99
33	30.20	12.31	15.38	12.16	17.70	48.99	32.91	47.88
34	25.87	7.08	10.92	6.82	20.76	52.45	36.62	52.92
35	22.15	3.47	8.10	2.90	24.73	56.26	40.77	58.07
36	43.16	29.93	30.22	28.79	23.01	46.45	31.31	37.43
37	37.82	24.59	24.62	23.18	21.37	48.15	32.37	41.46
38	32.58	19.41	19.05	17.59	21.15	50.43	34.34	45.83
39	27.50	14.56	13.51	12.03	22.39	53.20	37.06	50.45
40	22.67	10.52	8.09	6.59	24.87	56.41	40.39	55.26
41	18.30	8.51	3.41	2.30	28.27	59.96	44.18	60.21
42	41.93	31.75	30.18	29.62	27.74	51.39	36.37	41.30
43	36.42	26.77	24.57	24.20	26.39	52.93	37.29	44.99
44	30.94	22.11	18.98	18.92	26.21	55.01	39.00	49.04
45	25.54	18.00	13.41	13.90	27.22	57.56	41.42	53.38
46	20.25	14.91	7.93	9.58	29.29	60.53	44.42	57.94
47	15.20	13.57	3.01	7.32	32.23	63.86	47.89	62.68
48	30.08	25.54	20.23	21.39	31.28	59.67	43.76	52.55
49	24.48	22.08	15.13	17.12	32.13	62.03	45.92	56.62
50	18.90	19.64	10.57	13.84	33.90	64.79	48.64	60.94
51	13.35	18.64	7.61	12.38	36.46	67.91	51.83	65.46
52	24.45	26.50	18.14	21.08	37.08	66.59	50.54	60.11
53	18.86	24.51	14.56	18.51	38.62	69.16	53.02	64.20
54	13.30	23.71	12.58	17.45	40.89	72.09	55.96	68.50
55	20.15	29.44	19.07	23.35	43.42	73.63	57.51	67.68
56	15.07	28.78	17.60	22.51	45.45	76.38	60.23	71.77
57	18.12	33.85	22.65	27.58	50.11	80.76	64.62	75.24

Tabla A.3: Capacidad máxima de brigadistas que puede albergar cada estación para el ejemplo de la aplicación de la metodología.

Estación	Brigadistas
1	20
2	20
3	60
4	30
5	54
6	20
7	22
8	20

Estación 8: 0 recursos.

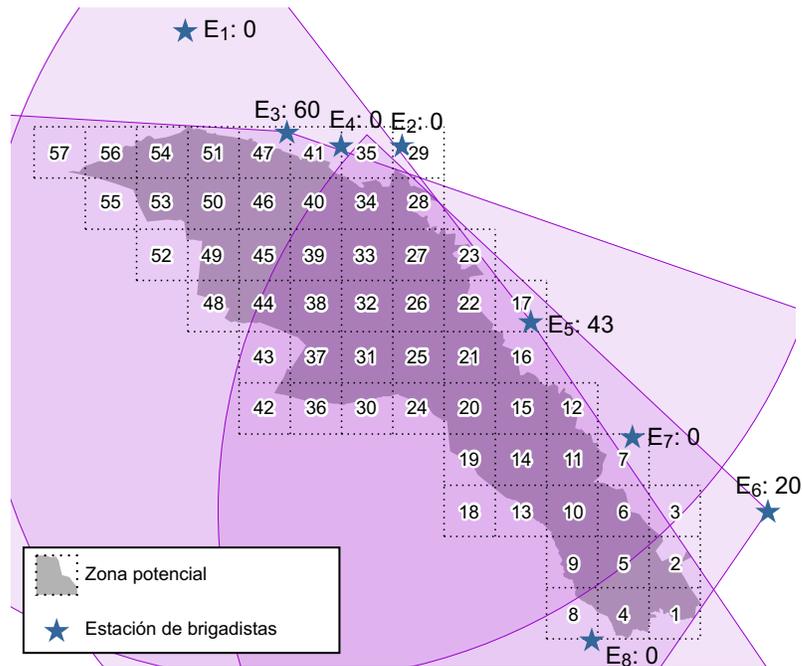
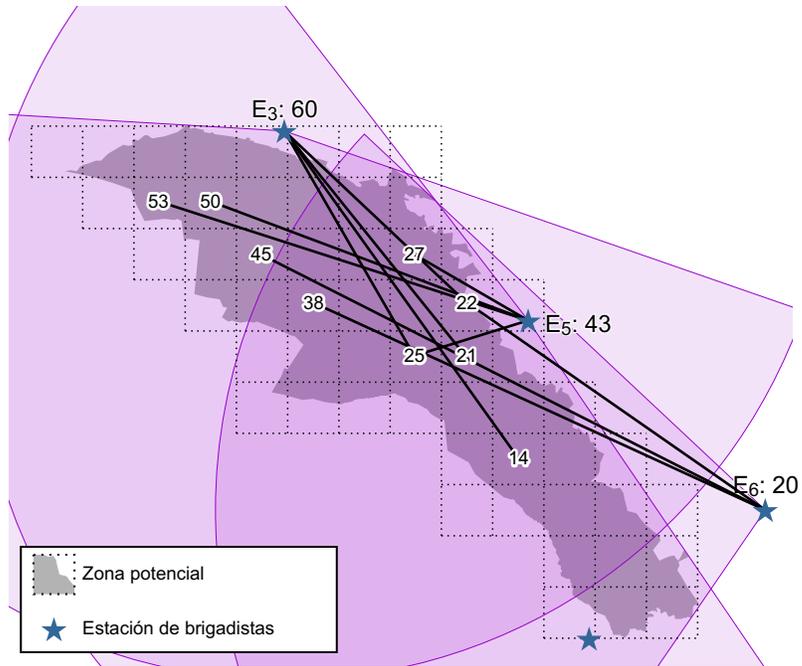


Figura A.3: Asignación de recursos a cada estación de brigadistas para el ejemplo de la aplicación de la metodología.

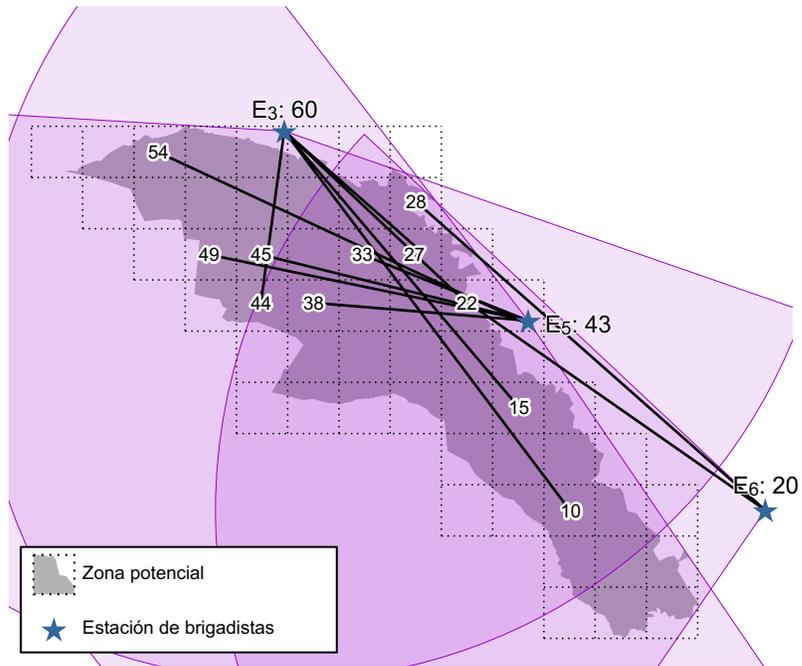
Tabla A.4: Asignación de recursos desde cada estación de brigadistas hacia cada zona potencial, para el ejemplo de la aplicación de la metodología.

Escenario 1			Escenario 2		
Estación de Brigadistas	Zonas Potenciales	Recursos	Estación de Brigadistas	Zonas Potenciales	Recursos
3	14	23	3	10	10
	21	20		15	10
	22	5		22	10
	25	12		27	20
5	25	8	5	44	10
	27	20		33	10
	50	5		38	10
	53	10		45	13
6	22	5	6	49	5
	38	5		54	5
	45	10		22	10
				28	10

En la segunda etapa de la distribución de recursos se asignaron, desde las estaciones de brigadistas a las zonas potenciales de incendio, los recursos mostrados en la Tabla A.4. Esta asignación se muestra en la Figura A.4.



(a)



(b)

Figura A.4: Asignación de recursos desde cada estación de brigadistas hacia cada zona potencial, para el ejemplo de la aplicación de la metodología. (a) Primer escenario, y (b) segundo escenario.

APÉNDICE B

MANUAL DE USUARIO

La aplicación “Simulación de Incendios Forestales” SIFOR es una aplicación SIG, desarrollada para calcular la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en una región dada, y generar un conjunto de escenarios de posibles incendios.

B.1 APLICACIÓN SIG: SIMULACIÓN DE INCENDIOS FORESTALES

Esta aplicación genera un reporte muy detallado sobre la simulación en cuestión, en él se muestra cada ubicación de posible incendio: municipio, latitud y longitud y la probabilidad de ocurrencia. Se incluye en este reporte la tabla donde se generaron los escenarios, la cual contiene: en qué zona potencial se localiza el posible incendio y la cantidad de recursos necesarios para el mismo. Después, se despliega la cantidad total de posibles incendios por municipio y con ella la distribución porcentual de los incendios en cada uno. Posteriormente, se muestra el tiempo en que se generaron los escenarios. Finalmente, se muestra la tabla de tiempos de despliegue (min.) entre cada una de las estaciones hacia cada una de las zonas potenciales. En las siguientes secciones se describe el uso y ejecución de la aplicación.

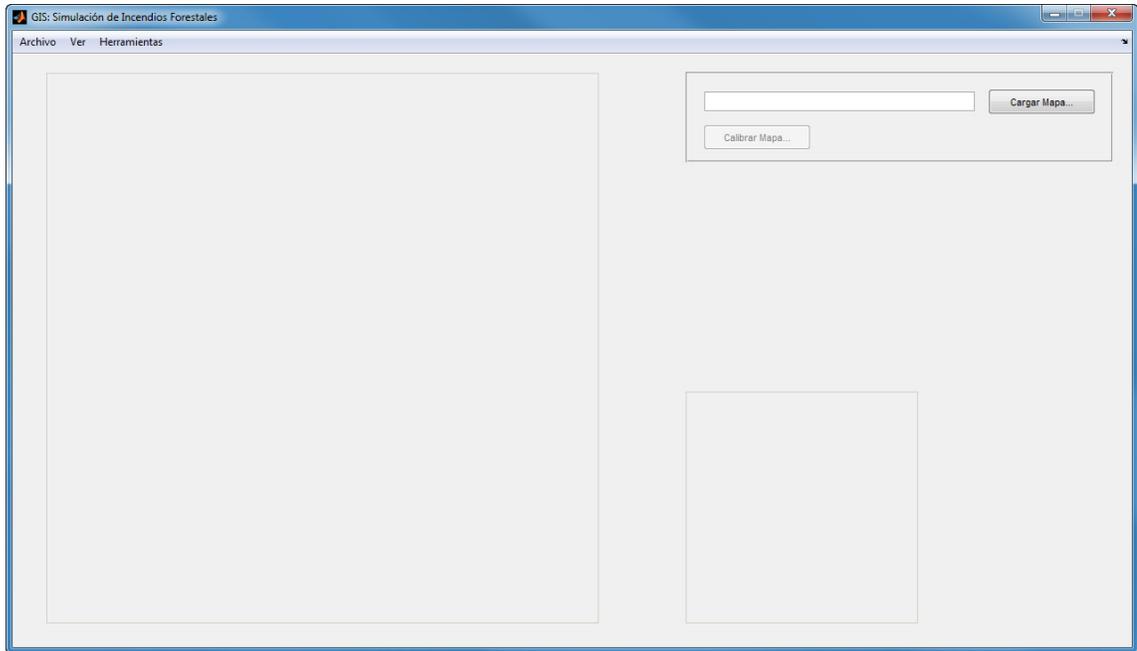


Figura B.1: Interfaz gráfica de la aplicación.

B.2 EJECUCIÓN DE LA APLICACIÓN

En plataformas Windows[®] de 32 y 64 bits, la aplicación se ejecuta corriendo el archivo `sim_if.exe` desde el Explorador de Windows[®]. La Figura B.1 muestra la interfaz gráfica del programa al iniciarse.

Con el botón *<Cargar Mapa...>* se lee el archivo de la imagen satelital de la zona de estudio, en formato gráfico TIFF, desde el directorio de Windows donde se tienen almacenadas las imágenes de estudio. En el estudio presentado en este trabajo se utilizó la imagen satelital del Estado de Nuevo León, como puede verse en la Figura B.2.

La imagen se georreferencia con el botón *<Calibrar Mapa...>*, véase Figura B.3. Se requieren dos coordenadas de referencia para la georreferenciación, estos se introducen a través de los cuadros de diálogo que despliega la aplicación para tal fin, como se muestra en la Figura B.4

En la Figura B.5 se muestra la imagen una vez calibrada y georreferenciada.

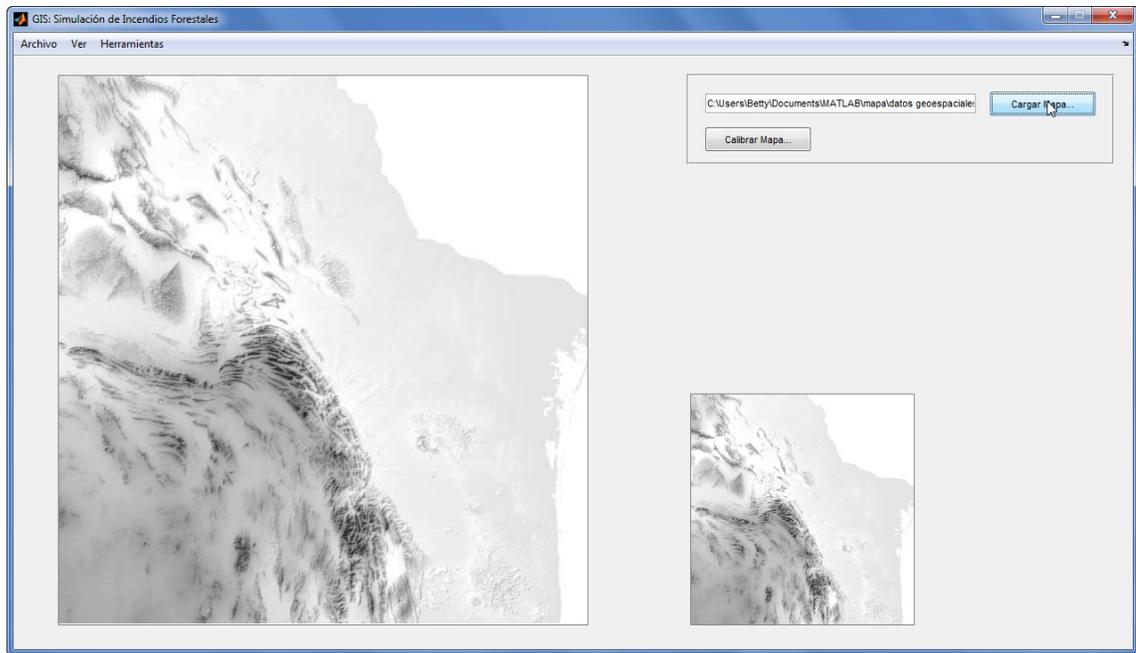


Figura B.2: Mapa satelital de la zona de estudio.

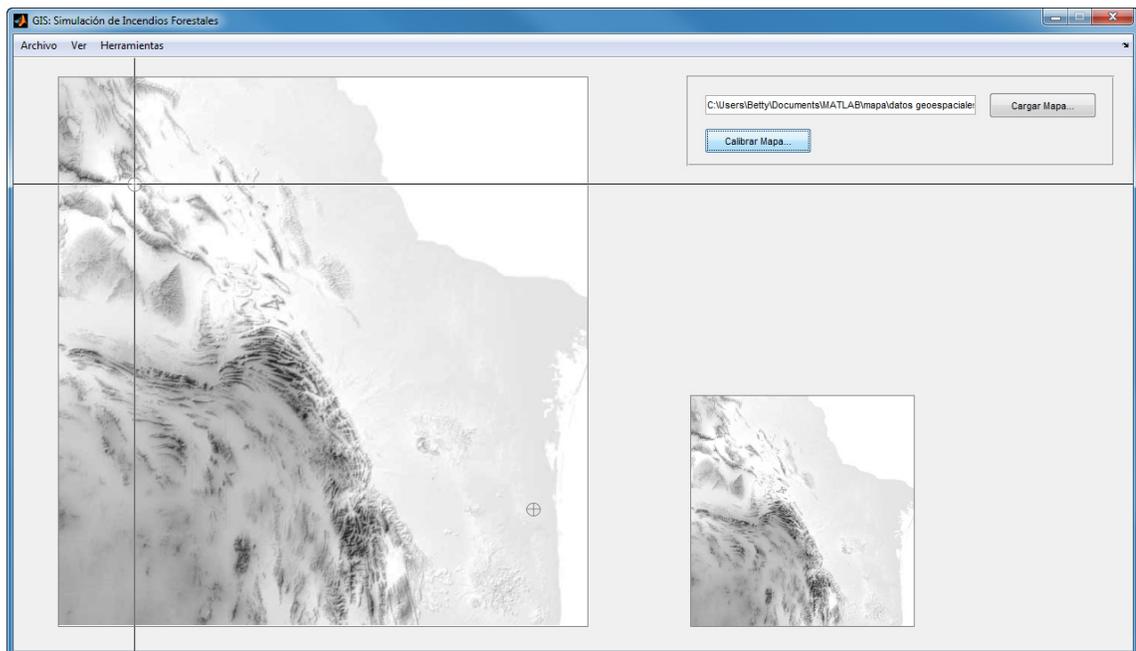


Figura B.3: Calibración de la imagen satelital.

Una vez completados los pasos anteriores, se procede a importar la base de datos de los incendios ocurridos en el área de estudio, desde un directorio de Windows donde se tienen almacenadas las bases de datos de estudio, con el botón *<Importar*

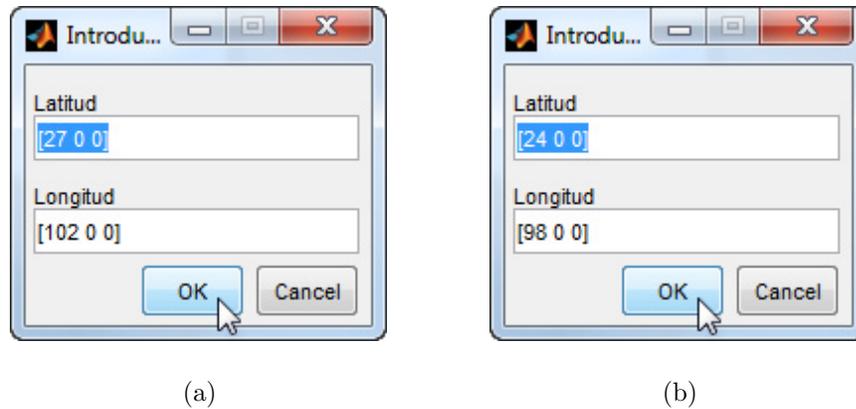


Figura B.4: Calibración de la imagen satelital: (a) primer punto de referencia, y (b) segundo punto de referencia.

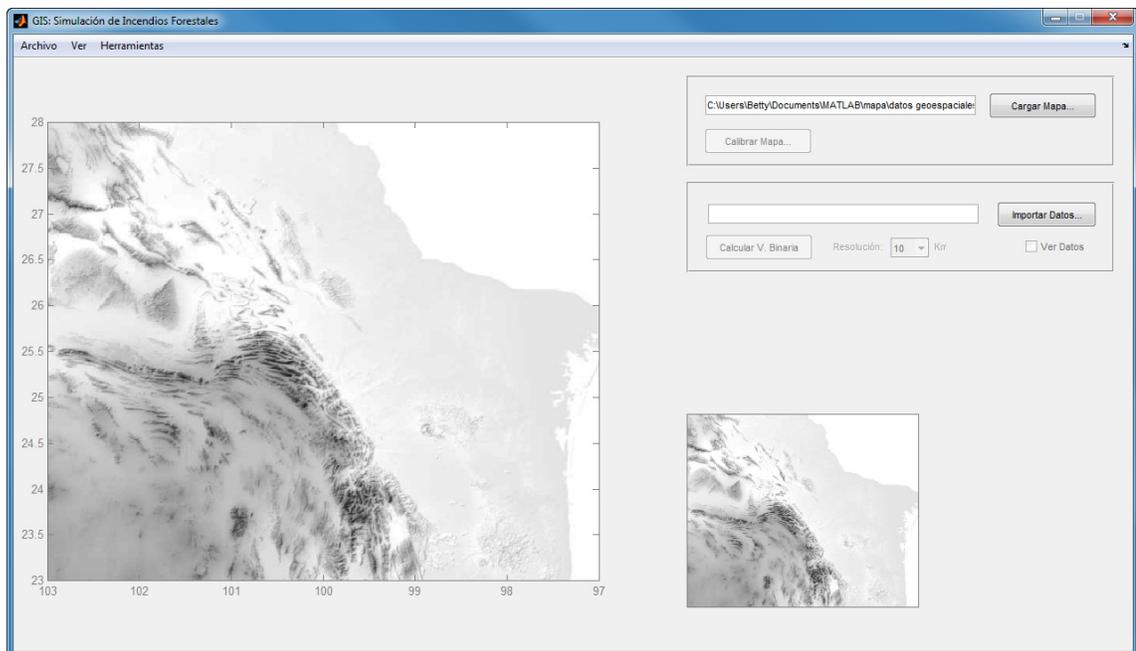


Figura B.5: Imagen satelital correctamente calibrada.

Datos... >. La base de datos en formato *.txt*, que contiene los datos mostrados en la Tabla B.1, es filtrada especificando el año y el tipo de período (mensual, bimestral, trimestral, tetramestral, o semestral) de interés a través del cuadro de diálogo mostrado en la Figura B.6. Los datos leídos se cargan en el mapa de la interfaz gráfica de la aplicación, como se ve en la Figura B.7.

Con el botón *<Calcular V. Binaria>* se genera una malla discreta que incluye

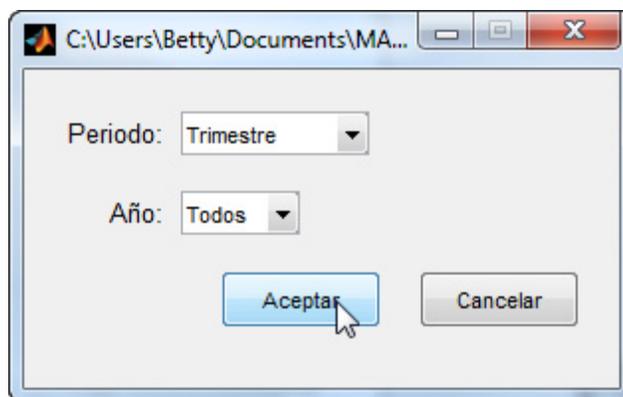


Figura B.6: Selección del período de estudio.

los puntos de incendio cargados. Estos puntos se interpolan hacia los nodos de la malla generando una variable binaria de ocurrencia de incendios, la cual se muestra en la Figura B.8

Empleando el botón <Ajustar Modelo> se calculan los coeficientes de regresión del modelo logístico empleado por esta herramienta para calcular la probabilidad de ocurrencia de incendios. En la Figura B.9 se muestra el resultado de la regresión,

Tabla B.1: Formato de los datos de entrada de la base de datos de incendios.

Número de columna	Contenido	Formato	Descripción	Ejemplo
1	Año	AAAA	Año de ocurrencia del incendio, con cuatro dígitos.	2002
2	Latitud	GG° MM' SS''	Latitud de la localización gráfica donde ocurrió el incendio, con grados, minutos y segundos.	25°05'00''
3	Longitud	GG° MM' SS''	Longitud de la localización gráfica donde ocurrió el incendio, con grados, minutos y segundos.	100°07'00''
4	Fecha	DD/MM/AAAA	Fecha, en formato corto, en que ocurrió el incendio.	22/02/2002

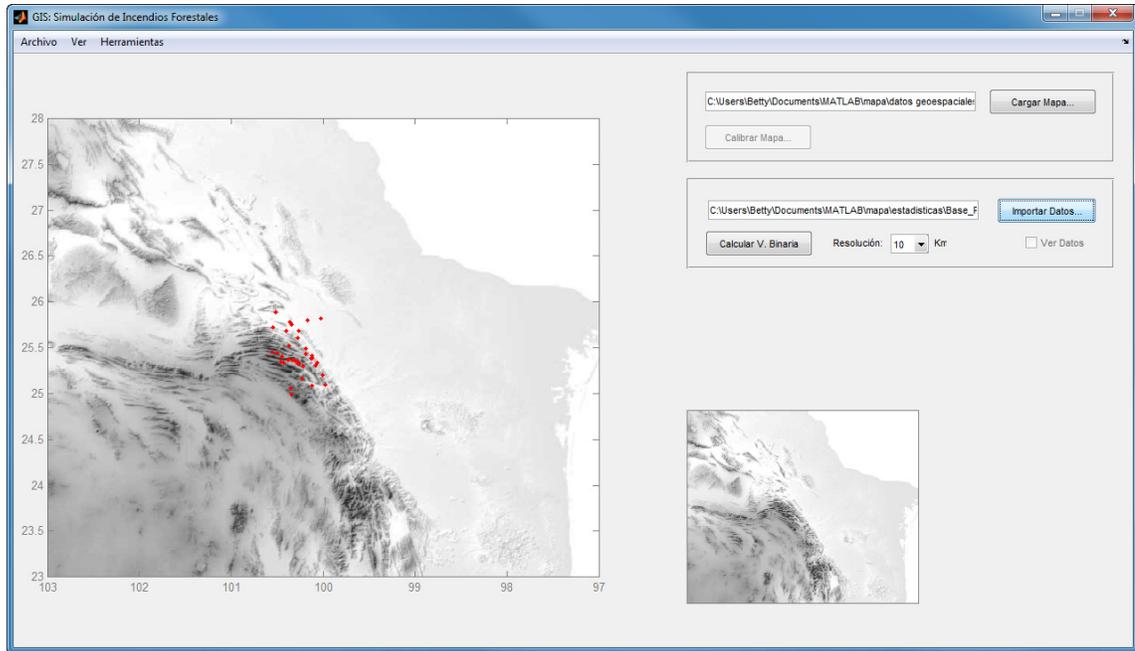


Figura B.7: Incendios históricos del período seleccionado.

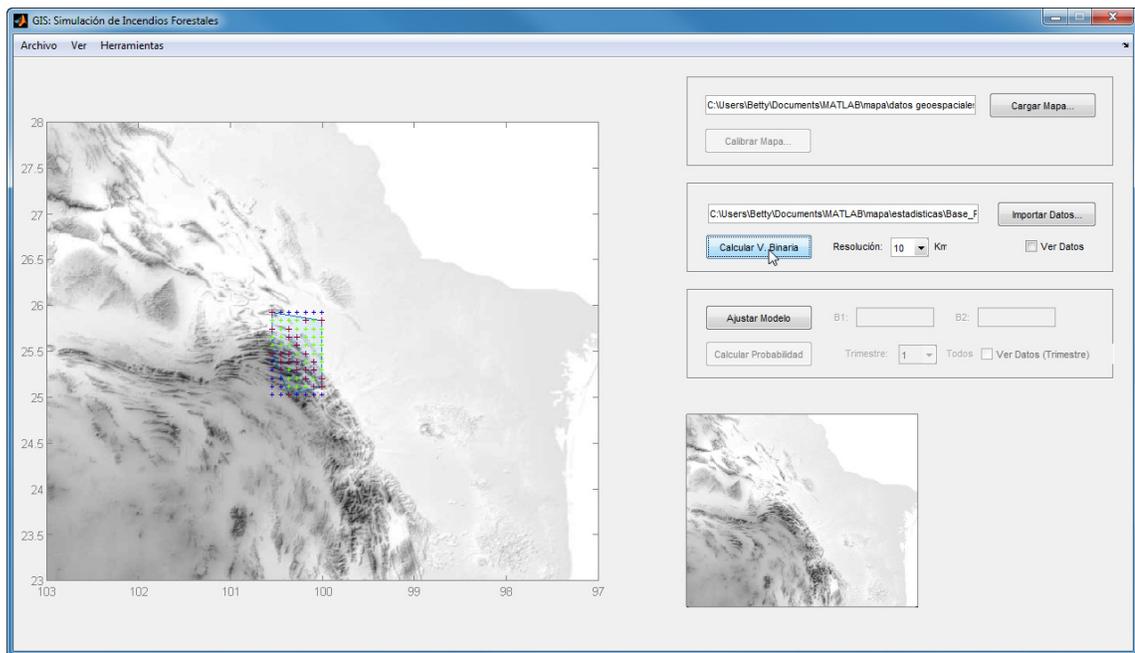


Figura B.8: Cálculo de la variable binaria.

cabe notar que la interfaz gráfica sólo muestra los coeficientes relacionados a las variables latitud y longitud, los coeficientes relacionados a las variables categóricas se presentan en los reportes generados por la aplicación sin mostrarse en la interfaz

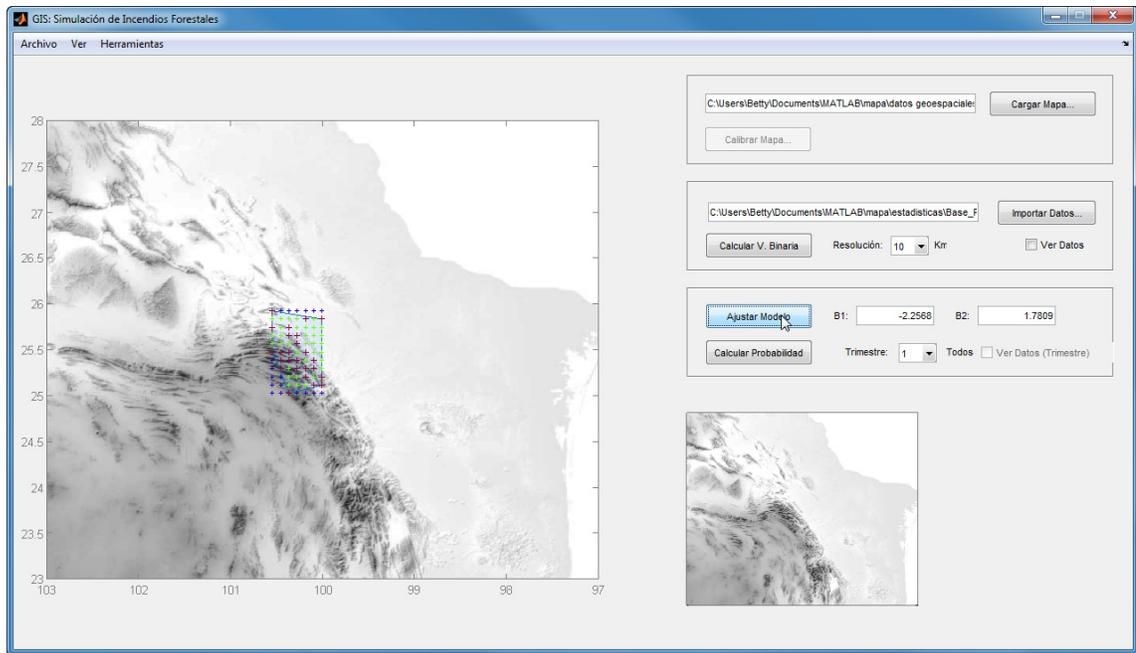


Figura B.9: Ajuste de los coeficientes de la regresión logística.

gráfica.

Utilizando el botón *<Calcular Probabilidad>* se evalúan los coeficientes de la regresión logística para calcular la probabilidad de incendios en cada nodo de la malla discreta generada en el paso anterior. La Figura B.10 muestra la visualización gráfica de las probabilidades de ocurrencia de incendios para un período de interés.

En el menú *Herramientas > Cargar caso de estudio*, ver Figura B.11, se importa el archivo de curvas en formato .dbf de la región de estudio. La Figura B.12 muestra el diálogo de selección del archivo. El área de estudio se carga y se genera una malla de áreas potenciales de incendios, como puede verse en la Figura B.13, que servirá para generar los escenarios.

Los escenarios se generan utilizando el menú *Herramientas > Generar escenarios*, estableciendo el número de escenarios deseado mediante el cuadro de diálogo mostrado en la Figura B.14. En la Figura B.15 se muestra el cuadro de diálogo de selección del archivo donde se escribirá el reporte con los escenarios generados. Una barra muestra el progreso de la generación de los escenarios, como se muestra en la

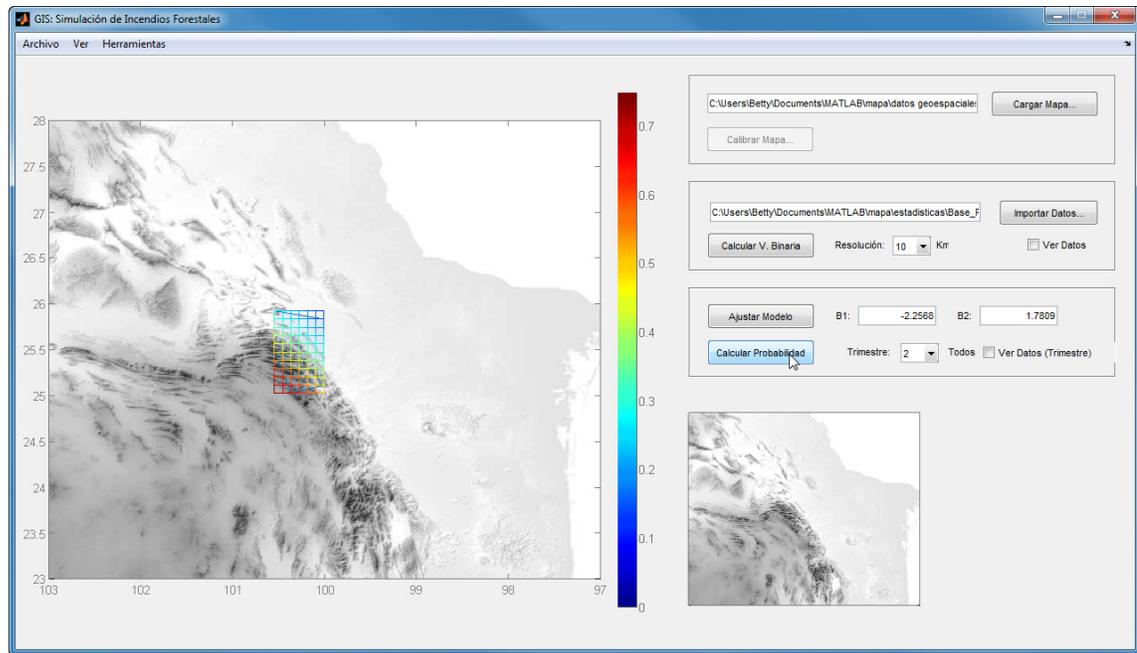


Figura B.10: Evaluación de la probabilidad de incendios a partir de los coeficientes de regresión del modelo logístico.

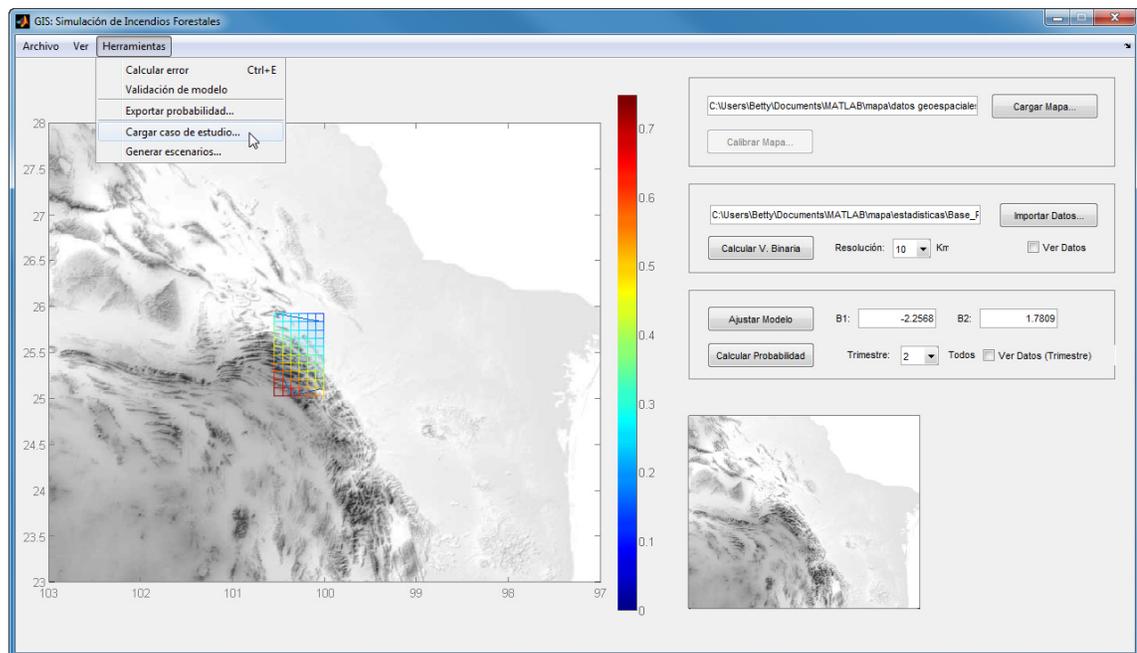


Figura B.11: Menú de herramientas de la interfaz gráfica.

Figura B.16, y a su vez los posibles incendios se despliegan en la interfaz gráfica, ver Figura B.17. Finalmente, la distribución geográfica de los posibles incendios se

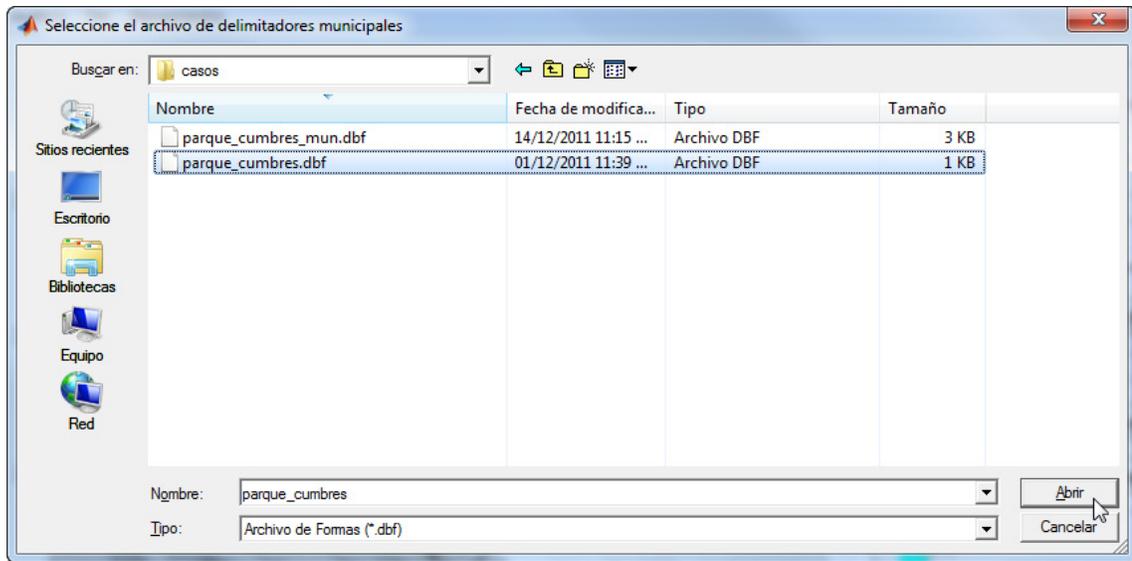


Figura B.12: Selección del archivo de curvas del caso de estudio.

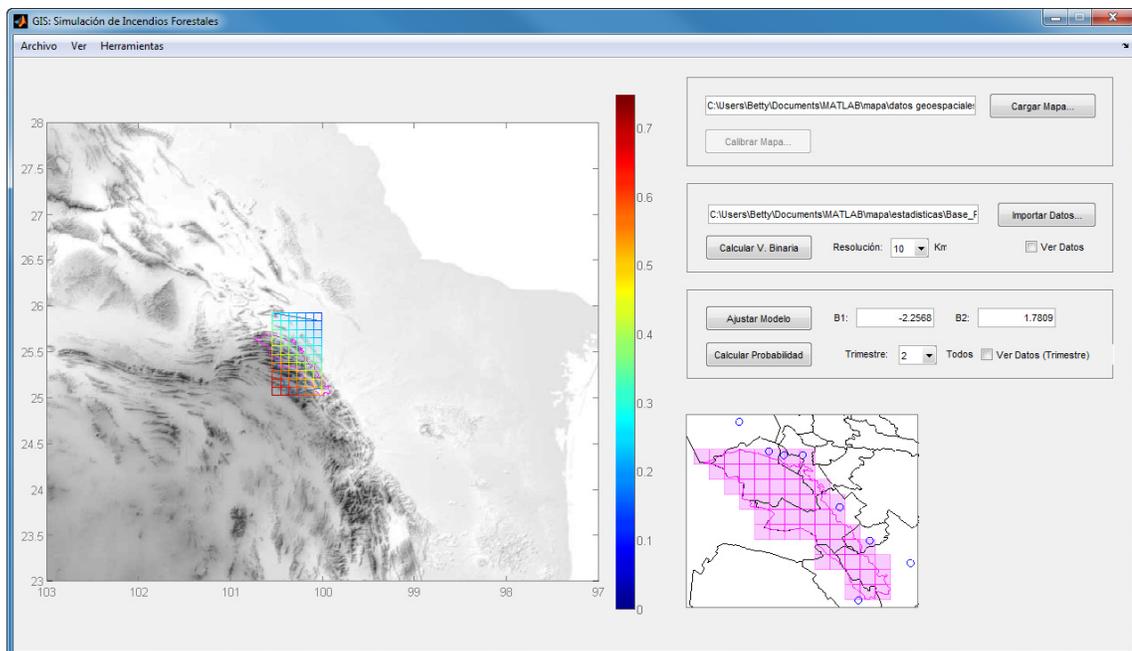


Figura B.13: Caso de estudio y zonas potenciales.

observa en una gráfica, la cual se muestra en la Figura B.18.

El reporte de escenarios contiene una lista con los posibles incendios que conforman los escenarios, ver Figura B.19, una tabla con dichos escenarios, ver Figura B.20, el resumen de incendios ocurridos por municipio, así como la tabla de tiempos entre

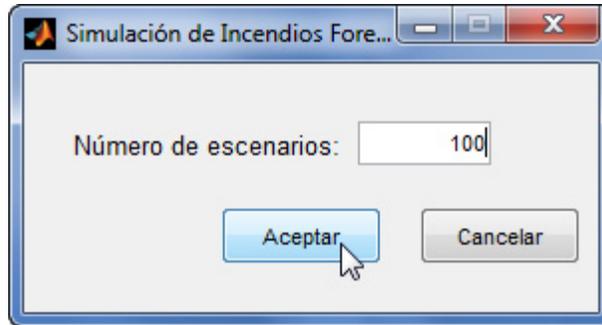


Figura B.14: Selección del número de escenarios a generar.

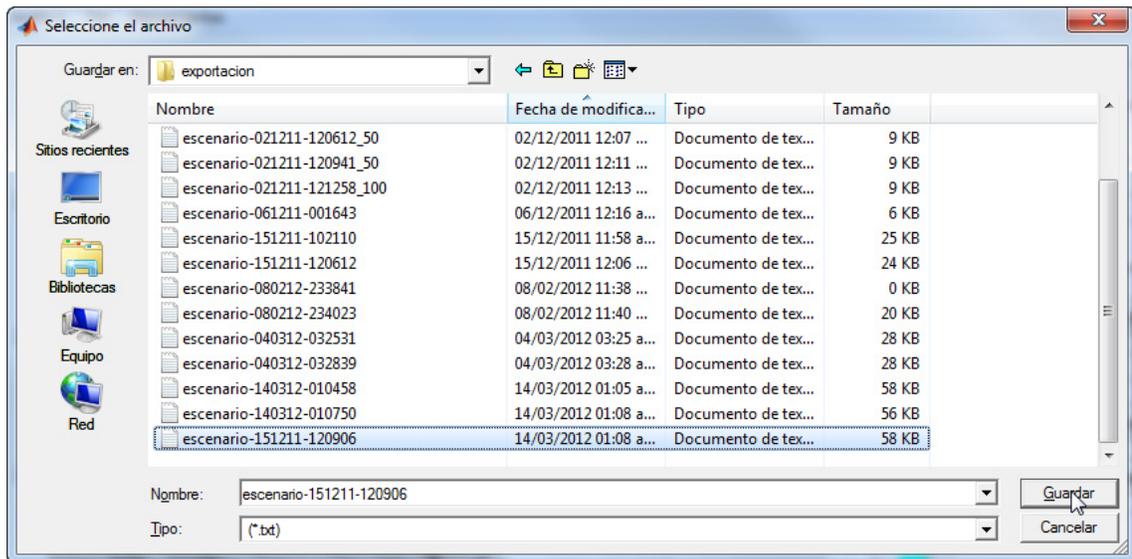


Figura B.15: Archivo donde se genera el reporte de escenarios de incendios.

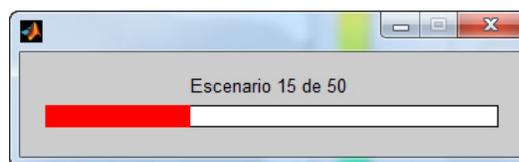


Figura B.16: Progreso de la generación de escenarios.

zonas potenciales y estaciones, ver Figura B.21.

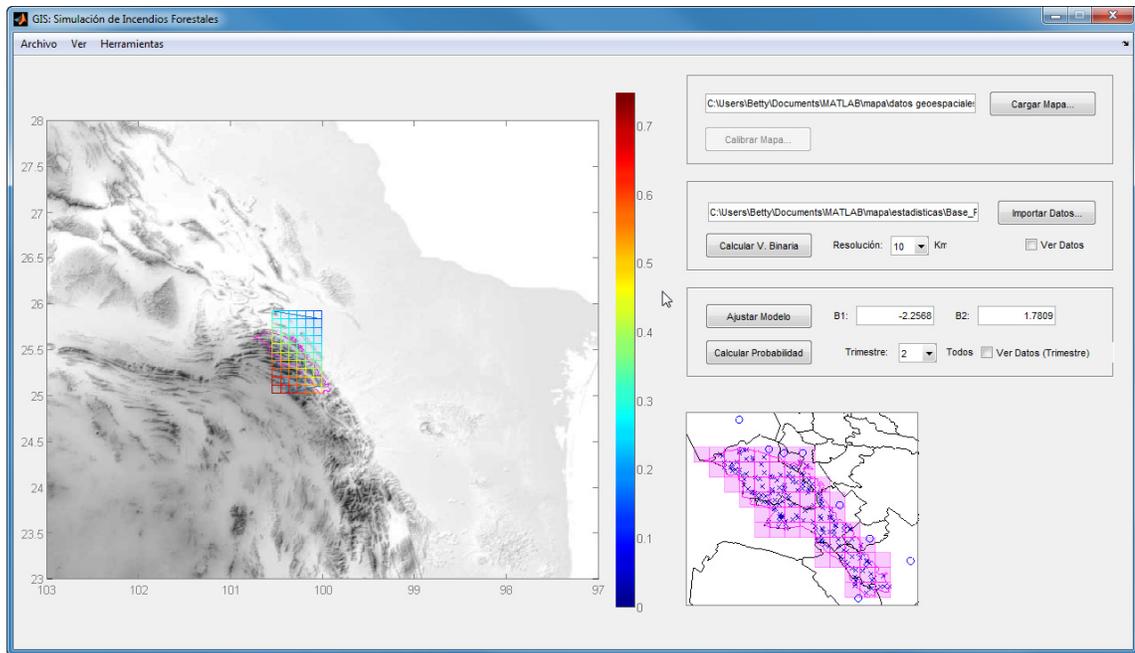


Figura B.17: Interfaz gráfica con los posibles incendios generados.

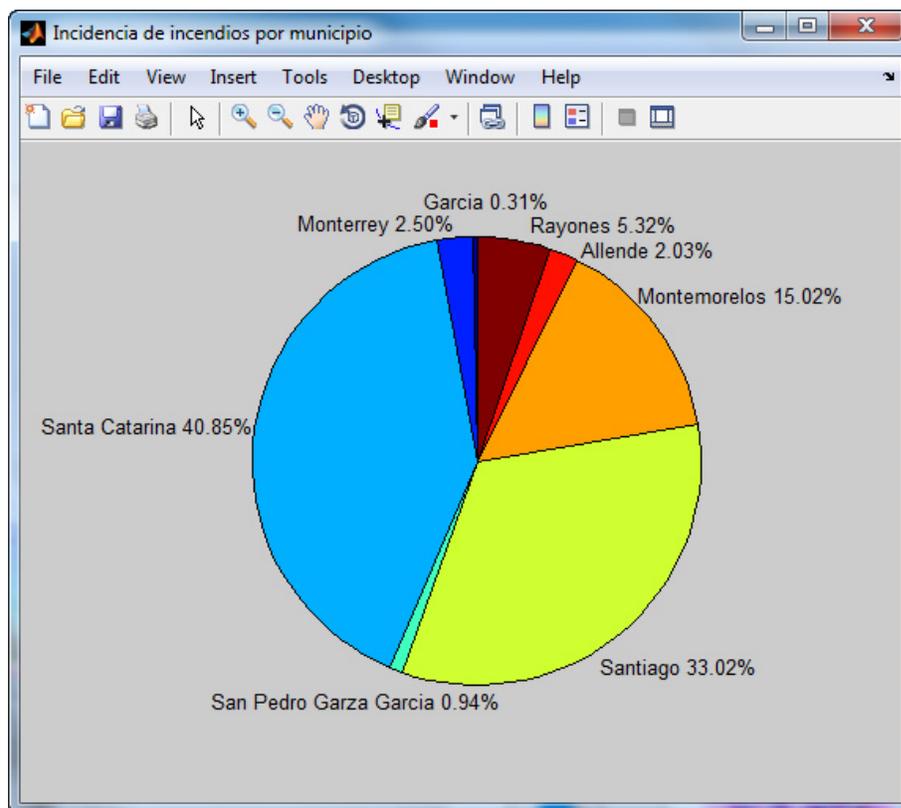


Figura B.18: Distribución de posibles incendios generados por municipio.

* Escenario	Municipio	Latitud	Longitud	Probabilidad
* s1	Santa Catarina	25.64166	100.56842	0.42458
* s1	Santa Catarina	25.43149	100.26453	0.40833
* s1	Santa Catarina	25.58989	100.59827	0.46655
* s1	San Pedro Garza García	25.60605	100.36266	0.35662
* s1	Santiago	25.41735	100.43769	0.49236
* s1	Santiago	25.29594	100.23662	0.47136
* s1	Montemorelos	25.19053	100.13941	0.48752
* s1	Montemorelos	25.19623	100.05808	0.44828
* s1	Montemorelos	25.17019	100.11607	0.48861
* s1	Montemorelos	25.10571	99.99654	0.47180
* s1	Allende	25.25246	100.05680	0.41659
* s1	Rayones	25.08033	100.07788	0.52229
* s1	Rayones	25.08288	100.05289	0.50974
* s2	Monterrey	25.57770	100.31976	0.35378
* s2	Monterrey	25.54641	100.28791	0.35696
* s2	Santa Catarina	25.56941	100.41405	0.39751
* s2	Santa Catarina	25.57883	100.48776	0.42413
* s2	Santa Catarina	25.55956	100.45087	0.41872
* s2	Santa Catarina	25.57432	100.56846	0.46209
* s2	Santa Catarina	25.48319	100.42379	0.44920
* s2	Santa Catarina	25.63611	100.53719	0.41409
* s2	Santa Catarina	25.56167	100.38195	0.38805
* s2	Santiago	25.31327	100.19553	0.44350
* s2	Santiago	25.38170	100.41813	0.50376
* s2	Santiago	25.27225	100.22474	0.47942
* s2	Santiago	25.47546	100.23829	0.37359
* s2	Santiago	25.27407	100.25417	0.49149
* s2	Santiago	25.44569	100.47732	0.49401
* s2	Montemorelos	25.14351	100.07851	0.48694
* s2	Montemorelos	25.12564	100.00986	0.46651
* s3	Santa Catarina	25.51219	100.41917	0.43105
* s3	Santa Catarina	25.49344	100.44988	0.45497
* s3	Santa Catarina	25.47507	100.38096	0.43491

Figura B.19: Reporte: Lista de la ubicación de los posibles incendios con su probabilidad de ocurrencia.

	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10	s11
k1	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0
k2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
k3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
k4	20	0	0	0	20	5	5	0	0	0	0
k5	20	10	0	0	10	0	0	0	20	0	0
k6	20	0	0	10	0	40	0	0	0	5	0
k7	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
k8	20	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0
k9	0	20	10	0	0	0	0	10	0	5	0
k10	10	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0
k11	0	0	0	0	10	0	20	0	0	0	10
k12	0	0	20	0	0	0	0	0	0	10	0
k13	20	0	0	0	0	0	0	10	10	0	0
k14	0	0	0	0	0	5	0	0	5	0	0
k15	0	0	0	20	0	0	10	0	0	20	20
k16	0	0	0	0	0	0	10	20	0	20	0
k17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
k18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
k19	0	10	10	0	5	0	0	0	0	0	10
k20	20	20	5	0	10	0	0	0	0	0	0
k21	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0
k22	0	20	5	20	0	10	10	0	0	0	0
k23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
k24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
k25	0	0	5	0	0	0	0	10	0	0	10
k26	10	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0
k27	0	5	0	0	0	5	5	5	0	20	20
k28	0	5	0	0	0	0	0	10	0	5	0
k29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
k30	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0
k31	0	0	20	10	0	0	5	0	0	0	0
k32	0	0	10	0	20	0	0	0	0	0	0
k33	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0

Figura B.20: Reporte: Tabla de los escenarios generados.

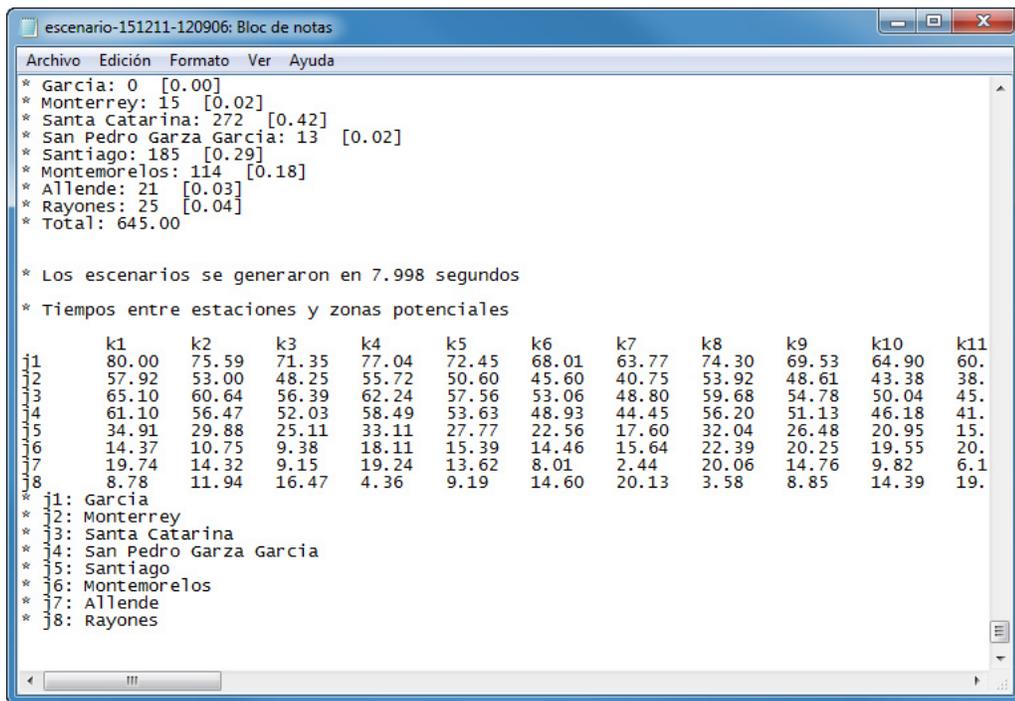


Figura B.21: Reporte: Incendios generados por municipio y tabla de tiempos entre zonas potenciales y estaciones.

FICHA AUTOBIOGRÁFICA

Beatriz Adriana Rivera Aguilar

Candidata al grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas
por la Universidad Autónoma de Nuevo León

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

UN ESQUEMA INTEGRADO PARA LA
ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS DE CONTENCIÓN
DE INCENDIOS FORESTALES DESDE UN ENFOQUE
ESTOCÁSTICO

Beatriz Adriana Rivera Aguilar nació el 9 de junio de 1983, tercera hija del Sr. Guillermo Rivera Alcantar y la Sra. Hermila Aguilar Ortiz. Egresada de la Universidad del Valle de Atemajac, UNIVA, Campus Guadalajara, de 2001–2004, obtuvo el grado de Licenciada en Ingeniería en Computación con distinción por haber obtenido el mejor promedio de la generación. Posteriormente, realizó un diplomado en Diseño de Tecnología de Semiconductores, en 2005, en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, CINVESTAV, Unidad Guadalajara. Además, realizó un diplomado en Redes y Tecnología, en 2006, en la UNIVA, Campus Guadalajara. Cursó el Posgrado en Ingeniería de Sistemas, en la Facultad de Ingeniería Mecáni-

ca y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, en donde desarrolló el presente trabajo de tesis bajo la supervisión del Dr. Roger Z. Ríos Mercado.