

PLANIFICACIÓN DE LA LUCHA CONTRA EL FUEGO USANDO INFORMACIÓN ESPACIAL

Por: CHAVES, CINTIA NOELIA NOEMÍ

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía y Física
y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich
como parte de los requerimientos para la obtención del grado de
MAGISTER EN APLICACIONES ESPACIALES DE ALERTA Y RESPUESTA
TEMPRANA A EMERGENCIAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Julio, 2015

IG - CONAE/UNC 2015

FAMAF - UNC 2015

Director: Dr. Marcelo Oglietti

Co-Director: Dr. Camilo Rotela



El estudio de Planificación de la lucha contra el fuego usando información espacial, por Chaves Cintia Noelia Noemí se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 2.5 Argentina](#)

*Dedicado a
mi familia*

Con el objetivo de contribuir al desarrollo de aplicaciones de soporte para la lucha contra el fuego, se ha diseñado una arquitectura conceptual de un sistema para la planificación de dichas actividades. Además se ha mostrado la factibilidad de este sistema mediante resultados experimentales, conseguidos utilizando una implementación de un prototipo del mismo.

El diseño de este sistema se ha basado en las principales características de las actividades de la lucha contra el fuego y de su planificación, en el contexto de los bomberos en la provincia de Córdoba.

La implementación preliminar de este sistema se realizó mayoritariamente en base a la reutilización e integración de programas y librerías. El código desarrollado tiene la funcionalidad de adaptar los formatos de entrada y salida de éstos programas y librerías.

Para este análisis de factibilidad se desarrollaron ejemplos con áreas de alrededor de 1000 km^2 (tamaño similar a áreas que tienen algunos cuarteles de bomberos bajo su responsabilidad). El análisis realizado permite concluir que el prototipo de sistema implementado cumple con los requerimientos para la distribución de recursos dentro de regiones de este tamaño.

Palabras claves: planificación, SIG, incendios, algoritmo de búsqueda A*.

In order to contribute to the development of support applications in the firefighting, a conceptual architecture of a system for activities planning has been designed. Besides, the feasibility of this system has been proven through experimental results achieved by using an implementation of a prototype.

The design of this system is based on the main features of the activities of firefighting and its planning in the context of firefighters in the province of Córdoba. The preliminar implementation of this system was mainly done on the basis of reutilization and integration of software and packages. It was necessary to develop a code to adapt the input and output formats of theses software and packages.

Examples with areas of around 1000 km^2 , similar sizes to the ones charge of some fire stations were developed (for feasibility analysis). This analysis allows us to conclude that the prototype of the implemented system meets the requirements for resources distribution within regions of this size.

Key words: planning, GIS, fire, A* search algorithm.

Agradecimientos

Quiero agradecer principalmente a mi tutor, quien fue quien me guió y me enseñó no sólo temas relacionados a planning si no también como esta herramienta es usada para resolver temas relacionados a la realidad.

A mi codirector, quien me guió en las soluciones relacionadas al área de sistemas de información geográfica.

La capa de cuarteles con sus respectivas regiones fue amablemente provista por el Plan Provincial de Manejo del Fuego (PPMF), quiero aprovechar este espacio para agradecerles.

Al cuartel de Alta Gracia, y al bombero Fabricio Brizuela por los conocimientos relacionados a cómo atacan los incendios.

A Laura Zalazar por brindarme el manual de Farsite, realizado por ella. A Marcelo Cabido y Marcelo Zack por la capa de vegetación. A Gustavo Leonhard por haber realizado la asignación de las clases de Zack y Cabido, a las de Scott and Burgar.

A mis compañeros de la maestría, que crecí junto a ellos no sólo en lo profesional sino también en lo personal.

A Ascentio por haberme esperado los dos años que duró la maestría, mas un mes más para terminar la tesis. A Javier Proyector por entenderme y ayudarme. A Franco Rodriguez, con sus respuestas técnicas sobre el lenguaje de programación.

A Pablo Brizuela, que no sólo me incentivó si no también me brindo su colaboración en la generación de tests automáticos.

A mi familia, que los quiero, gracias por ayudarme y apoyarme en todo momento.

Índice

1	Introducción	2
1.1	Motivación	2
1.2	Actividades de la lucha contra el fuego y su planificación	3
1.3	Organización de la tesis	5
2	Características de la lucha contra el fuego	6
2.1	Características de la actividades de la lucha contra el fuego	6
2.1.1	Características de los incendios según las regiones que afecten	6
2.1.2	Metodología de extinción de los incendios rurales en Córdoba	7
2.1.3	Elementos usados en Córdoba para el ataque a los incendios rurales	9
2.1.4	Recursos pertenecientes al cuartel de Alta Gracia	9
2.1.5	Recursos provistos por el Plan Provincial de Manejo del Fuego (PPMF)	10
2.1.6	Administración de parques nacionales (APN)	10
2.1.7	Tiempo de intervención	11
2.2	Planificación de la lucha contra el fuego	12
2.2.1	Distribución de los cuarteles en la provincia	12
2.2.2	Detalle de las operaciones ante un incendio declarado	13
2.2.3	El ataque al fuego y su planificación	17

3	Sistema de soporte a la planificación de la lucha contra el fuego	20
3.1	Modelado del problema de planificación de la lucha contra el fuego	20
3.2	Arquitectura conceptual de sistema de soporte para la lucha contra el fuego	24
3.2.1	PPSolver	26
3.2.2	Fire propagation simulation (FPS)	30
3.2.3	Planning problem generator (PPGenerator)	33
3.2.4	Ejemplos	35
3.2.5	Clipper 1, ejemplo VD, problema AA	38
3.2.6	Closest point search (Detección del punto más cercano de camino para el problema AA)	42
3.2.7	Closest point search (Detección del punto más cercano de camino para el problema GC)	46
3.2.8	Closest point search (Detección del punto más cercano de las fuentes de agua, problema 2 GC)	46
4	Solución del problema de planificación modelizado	48
4.1	Algoritmo seleccionado para el problema AA	48
4.1.1	Librerías disponibles	50
4.1.2	Pseudo código del sistema	51
4.2	Algoritmos relacionados al problema GC	52
4.3	Resultados obtenidos en problemas AA y GC	52
4.3.1	PPSolver: costos según tipos de caminos	52
4.3.2	PPSolver: prioridad	57
4.3.3	PPSolver: Iteraciones para asignación de recursos	59
4.4	Margen brindado por algoritmos alternativos	70
4.5	Performance	70
5	Conclusiones	75
A	Ejemplo AG	77
A.1	Clipper 1, ejemplo AG	77
A.2	Closest point search (Detección del punto más cercano de camino para el problema AA)	78
A.3	Closest point search (Detección del punto más cercano de camino para el problema GC)	78
A.4	Closest point search (Detección del punto más cercano de las fuentes de agua, problema GC)	78

A.5	Resultados obtenidos	81
A.5.1	PPSolver: iteración	81
B	Conceptos	97
B.1	Preprocesamiento del DEM	97
B.2	Reducción de área de interés en dem y capa de vegetación	98
C	Conceptos	99
C.1	Definiciones	99
C.2	Algoritmos de búsqueda en grafos	99
	Referencias	102

1.1 Motivación

En Argentina ocurren incendios forestales, que afectan áreas significativas de territorio. Por ejemplo, el informe del diario de la voz del interior del 19/09/2013 (ver [19]), mostró que en Córdoba se quemaron 121.000 hectáreas solo en el año 2013. La figura 1.1 extraída de este informe muestra la cantidad de hectáreas quemadas por año en esta provincia desde 1983 al 2013. Las provincias de San Luis, Tucumán y Neuquén también se ven periódicamente afectadas por varios focos de incendios forestales. En la provincia de La Pampa durante el año 2014, los incendios forestales causaron la destrucción de más de 330 mil hectáreas y la muerte de animales por el intenso fuego (ver [6]).

A pesar del paso del tiempo los incendios siguen siendo un gran problema para las fuerzas que se encargan de prevenirlos y combatirlos. Éstos son un verdadero flagelo para el patrimonio forestal y natural, siendo uno de los más preocupantes y traumáticos causales de la degradación, el empobrecimiento ambiental paulatino y responsable de una profunda alteración y modificación de los ecosistemas.

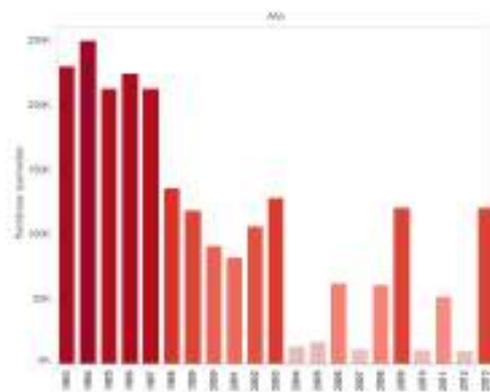


Figure 1.1: Hectáreas quemadas por año en Córdoba, desde el año 1993 hasta el 2013. Información extraída de la referencia [19]

El territorio afectado presenta una diversidad de ambientes que son proveedores de un sin número de bienes y servicios ambientales, los que aportan en forma directa o indirecta al desarrollo social y económico (ver por ejemplo para el caso de Córdoba [12]).

Actualmente, la sociedad ha llegado a valorar a este fenómeno como algo nocivo para el ambiente y toda la comunidad. Los incendios no son sólo preocupación de quien debe extinguirlos, sino también del resto de la población.

Contribuir a la lucha contra este flagelo es la motivación principal de esta tesis, siendo en lo específico mostrar que es factible desarrollar herramientas que den soporte a la planificación de la lucha contra el fuego.

El proceso de planificación elige y organiza acciones de la lucha contra el fuego considerando los recursos disponibles, anticipando y maximizando los resultados esperados. La inteligencia artificial (IA) (ver [14]) tiene entre sus objetivos a largo plazo, el desarrollo de máquinas (robótica, sistemas expertos, por ejemplo) que puedan soportar la planificación de actividades. La planificación automática (Automated Planning) es el área de la IA que se ocupa de este objetivo.

La tecnología de los Sistemas de Información Geográfica puede ser utilizada para dar soporte a la lucha contra el fuego al permitir visualizar y gestionar los recursos necesarios, el estado de caminos y accesos. Un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS en inglés) es un conjunto de herramientas que integra y relaciona diversos componentes (usuarios, hardware, software, procesos) que permiten la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización de grandes cantidades de datos procedentes del mundo real que están vinculados a una referencia espacial, facilitando la incorporación de aspectos sociales-culturales, económicos y ambientales que conducen a la toma de decisiones de una manera eficaz. También es usual que se utilice SIG con el sentido más limitado de cualquier sistema de información capaz de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada. Los SIG son herramientas que permiten a los usuarios crear consultas interactivas, analizar la información espacial, editar datos, mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones.

El desarrollo de esta tesis se basa en una combinación de técnicas de Planning y SIG.

1.2 Actividades de la lucha contra el fuego y su planificación

En las actividades de la lucha contra el fuego, una de las más importantes es la planificación de la distribución de recursos. Nos referiremos por recursos a los recursos que se usan en la lucha contra el fuego, i.e. autobombas, cisternas, bomberos, helicópteros, aviones.

En la actualidad, no se cuenta con un software libre que asista y potencie la actividad de la planificación de la lucha contra el fuego, a la hora de generar un plan operativo para la distribución de recursos. Existe SIADEX (ver [2]) pero el mismo es privado (ver sección 1.2).

Sistema de Soporte a la Planificación de la lucha contra el fuego

Objetivo El objetivo de éste trabajo es presentar un diseño conceptual de un sistema de soporte en la planificación de recursos de las fuerzas de la lucha contra incendios y mostrar la factibilidad del mismo.

Si bien los conceptos vertidos y los resultados conseguidos son válidos para cualquier otra región, los ejemplos que se presentan se han desarrollado sólo para las siguientes dos regiones de la provincia de Córdoba: alrededores de la ciudad de Villa del Dique y de la ciudad Alta Gracia, ambas localidades ubicadas en Argentina.

En caso de querer utilizar el software es recomendable mejorar la eficiencia del mismo (como veremos en la sección 4.1.2) y el algoritmo que determina cómo distribuir los recursos que se presenta en la sección 4.5.

Considerando las características reales de la actividad de la lucha contra el fuego que se presenta en el capítulo 2, se consideró apropiado dividir esta actividad en cinco problemas principales: Priorización de incendios, Distribución de autobombas, Reaprovisionamiento de agua, Relevamiento de bomberos y Abastecimiento de vehículos. Considerando las similitudes existentes en estos problemas se optó por tratar y presentar solo los tres primeros dejando el cuarto y quinto como trabajo a futuro.

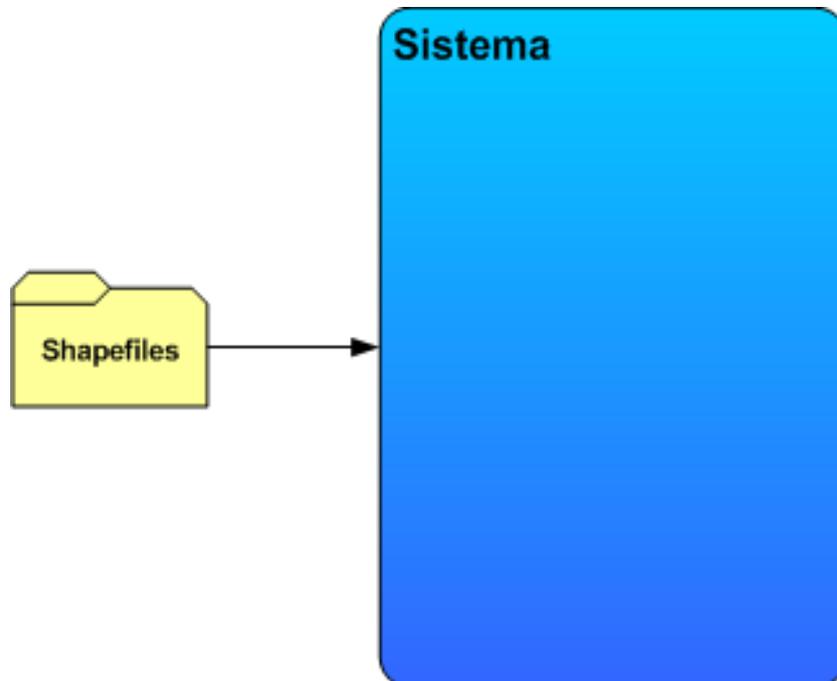


Figure 1.2: Sistema inicial

El sistema consiste de una unidad que a partir de varias capas de información geográficas de caminos, bifurcaciones, cuarteles, incendios, y área de expansión (como muestra la figura 1.2) construye un modelo del problema que el usuario quiere resolver (ver sección 3.2).

El sistema utiliza un simulador de propagación de incendios para estimar la prioridad que se le asigna a los distintos incendios.

Usando el algoritmo A* (descrito en 4.1), con un coste dado por el camino (sección 3.2.1), se logró calcular cuál es la estación más cercana a cada incendio y asignar una autobomba por incendio en cada iteración. Iterando de esta manera permite lograr la distribución de recursos en los incendios.

Esta tesis muestra que combinando técnicas multidisciplinarias es posible construir un sistema de soporte a la planificación de las actividades de la lucha contra el fuego para el experto en extinción.

Se obtuvieron los resultados esperados, gracias a la técnicas de planning y GIS (ver sección 3.2.4).

Fuera del alcance No son objetivos de esta tesis, desarrollar el sistema, dar la arquitectura detallada del mismo, o tener la performance óptima, sino mostrar que con la adecuada combinación de técnicas multidisciplinarias se puede realizar un sistema de utilidad para soporte de la planificación real de las actividades de los bomberos.

Trabajos relacionados en el área

En esta sección mostraremos algunos sistemas relacionados en el área:

PHOENIX [11](1989-1993): es un sistema multiagente jerárquico que incorpora un planificador adaptativo, distribuido y de tiempo real; diseñado para controlar los incendios forestales simulados.

Se basa en un paradigma de planes esqueléticos lo que implica ninguna capacidad generativa, en cambio los planes se extraen de una biblioteca de planes esqueléticos y refinados para el episodio actual. El objetivo de PHOENIX no está en resolver los problemas de extinción de fuegos en dominios reales, ni en asistir a un experto en tales tareas; sino en el uso de simulaciones de dominios para hacer demostraciones. Tiene debilidades como poca interacción con el usuario y en técnicas de monitoreo y replanificación.

Este trabajo demuestra mediante la división de fases la negociación que existe entre los actores en la planificación; que no se contempló en esta tesis pero queda como trabajo a futuro (Ver capítulo 5).

CHARADE [5](1992-1995): es un sistema de planificación basado en casos interactivos. Su objetivo es ayudar a un experto en la evaluación de la situación y el primer ataque en incendios forestales. Las debilidades de este sistema son la falta de un proceso de deliberación para modificar y refinar el plan, y la ausencia de técnicas de monitoreo y replanificación, de modo que la única capacidad regenerativa está restringida a los usuarios.

CARICA [4](1995-1997): este proyecto trató de adaptar el sistema CHARADE a las necesidades de los expertos, que querían una herramienta para aprender a planificar ataques contra los incendios forestales. Por lo que la solicitud inicial fue reorientada para finalmente convertirse en un medio para probar y aprender a extinguir incendios forestales.

SIADDEX [2]: es un marco complejo que integra varias técnicas de inteligencia artificial capaces de diseñar planes de lucha contra los incendios forestales, pero el mismo es privado.

1.3 Organización de la tesis

Esta tesis contiene cinco capítulos y dos apéndices.

En el primer capítulo se describieron la motivación y las características del sistema. En el segundo se describen las características de la lucha contra el fuego y la planificación involucrada. En el tercero se presenta el sistema de soporte a la planificación de la lucha contra el fuego. En el cuarto se muestran los resultados obtenidos. En el quinto se presenta el trabajo a futuro y las conclusiones. En el primer anexo se presenta un segundo ejemplo descrito en el capítulo 3. Y en el segundo anexo se incluyen conceptos que son usados en la tesis.

Características de la lucha contra el fuego

Las siguientes secciones presentan una síntesis sobre las principales características del funcionamiento del organismo de bomberos en lo relativo a la lucha contra el fuego y su planificación, esto es necesario para el diseño del sistema conocer cómo se realizan dichas actividades con detalle. Lo descripto incluye lo relevado directamente en una entrevista con los bomberos de Alta Gracia, con el responsable de logística el señor Elvio Vissani.

2.1 Características de la actividades de la lucha contra el fuego

2.1.1 Características de los incendios según las regiones que afecten

Dada la variedad de comunidades vegetales (que implica una distribución particular de los materiales combustibles) y topografía de un sector tan vasto como el de Córdoba, sumado a las condiciones cambiantes del clima, existen particularidades en los incendios que puedan ocurrir. Una caracterización de ellos según ([12]) es:

Incendios de bosques nativos: se caracterizan por afectar una formación de leñosa. A la hora de ser extinguidos presentan dificultades como una posibilidad limitada de ingreso de vehículos y bomberos; mayor intensidad de llama, humo y calor; escasas zonas de seguridad para el personal de extinción; y guardia de cenizas más prolongada.



Incendios de palmares: tienen mayores probabilidades de generar focos secundarios, dado que por un efecto particular, se produce una combustión de tipo explosiva que arroja restos incandescentes de las palmas a gran distancia.

Incendios de pastizales: son los de mayor velocidad de propagación, debido a su condición de material combustible fino que absorbe los cambios climáticos y a su rápida combustión.

Incendios en laderas abruptas: sus efectos son significativos y muy peligrosos para las vidas humanas. Esto se debe a que producen un efecto chimenea, en el que el humo se canaliza en columnas que siguen la red de drenaje en sentido contrario al de las aguas (en sentido ascendente) por arroyos, ríos, etc. Esto deseca el material combustible por radiación y convección, lo que facilita su ignición y aumenta el dinamismo de los incendios.

Incendios en banquinas: son muy frecuentes y casi siempre intencionales. El riesgo que entrañan es acostumbrarse a ellos y no extinguirlos, con lo que pueden extenderse luego a los campos colindantes.

Incendios en condiciones de vientos cambiantes: el viento es un elemento decisivo en el comportamiento de los incendios, siendo muchas veces responsable de que se manifiesten de forma virulenta y cambiante por factores locales y afecten a la seguridad de los combatientes y, por consecuencia a la extinción.

Los principales causantes de incendios en la provincia de Córdoba son basurales a cielo abierto y cables de alta tensión. Esto se conoce por la existencia de testigos en el inicio de varios incendios.

2.1.2 Metodología de extinción de los incendios rurales en Córdoba

Cuando se tiene el conocimiento de la presencia de un incendio forestal, una dotación se desplaza al lugar para realizar una **evaluación inicial *in situ***, de la cantidad de recursos necesarios para el combate del evento reportado. Seguido cuando corresponde el **combate inicial** o primer ataque, cuyo objetivo es la disminución o detención de la velocidad de propagación del incendio, y si fuera posible su extinción.

Los Bomberos Voluntarios son quienes deben brindar la primera respuesta ante la emergencia dentro de su jurisdicción, generalmente con medios propios y sin recurrir a instancias de mayor envergadura.

Si el jefe de la dotación estima que el fuego escapará a su control sobrepasando los esfuerzos del ataque inicial, lo comunica de inmediato a la central de comunicaciones pasando al **ataque ampliado**. Al que concurrirán otros Cuarteles de Bomberos Voluntarios e incluso la División Bomberos de la Policía, distintos organismos de Gobierno Provincial, Voluntarios, etc (ver [12]), según se considere necesario.

Durante las etapas de ataque inicial y ampliado se realizan actividades permanentes de reconocimiento de la ubicación del incendio, tipo del incendio, sus dimensiones y velocidad de propagación; como también la evaluación de las condiciones presentes del incendio y de las que podrían sobrevenir. Con toda esta información se realiza la **planificación**, que es el proceso de elaborar una secuencia ordenada de eventos, para desarrollarlos en un tiempo determinado.

El combate al fuego podrá realizarse de dos modos generales, dependiendo de la distancia de la línea de control al borde del incendio: con un ataque directo o con un ataque indirecto.

El **ataque directo** consiste en trabajar en el borde del incendio, actuando directamente sobre los combustibles y sobre las llamas que son menores a 1,50 metros de altura.



Figure 2.1: Ataque directo



Figure 2.2: Ataque indirecto

El **ataque indirecto** se aplica construyendo una brecha cortafuego a cierta distancia del borde del incendio y usa al fuego para eliminar el combustible intermedio. Así se aplica una quema de ensanche o un contrafuego, en donde se elimina el combustible entre el fuego principal y la brecha construida. Este método se emplea cuando las llamas superan la altura de 1,50 metros, las cuales poseen alta intensidad calórica y humo, lo que no permite que el personal aplique ataque directo.

Inmediatamente después de haber circunscripto el avance del incendio comienza la etapa llamada de **supresión**, que consiste en la total extinción de las llamas y brasas en la línea de avance.

Posteriormente se realiza la llamada **guardia de cenizas** que es la acción mediante la cual se controla durante un lapso prolongado que el fuego de un incendio forestal no se reavive, aún cuando queden algunos combustibles ardiendo dentro de la zona quemada.

En resumen, podemos mencionar las siguientes etapas de un incendio:

- evaluación inicial *in situ*
- combate inicial, cuando corresponde
- ataque ampliado, si fuese necesario
- reconocimiento
- evaluación de las condiciones
- planificación
- supresión
- guardia de cenizas

2.1.3 Elementos usados en Córdoba para el ataque a los incendios rurales

Recursos	Descripción
Herramientas manuales	Hachas, machetes, rastrillos, motosierras, palas, motobomba, mangueras, mochilas de agua, y antorchas
Motobombas y vehículos contra incendios	Para facilitar el empleo del agua en la extinción de los incendios por medios terrestres, se utilizan grupos motobomba o vehículos contra incendios que sirven para llevar el agua hasta las proximidades del fuego y lanzarla a presión a través de mangueras sobre el mismo o en zonas cercanas, bien sola o combinada con productos retardantes. Los grupos motobomba son máquinas transportables con un armazón que aloja un motor de explosión de dos tiempos y los elementos de aspiración e impulsión de agua. La motobomba debe instalarse próxima a algún depósito, algibe, pantaneta, acequia, etc., desde donde se tomará el agua. Su utilización queda restringida por la escasez del líquido elemento en los lugares de siniestro. Pueden ser montadas sobre un vehículo o transportadas manualmente, tomando agua de cualquier reservorio, como cisternas, tanques, piletas, arroyos, lagunas, etc.
Medios aéreos	Los aviones participan con sus vuelos en las etapas de observación, evaluación, seguimiento de las actividades de planificación, coordinación de la extinción y dirección de las acciones a realizar. Para el ataque directo participan los aviones hidrantes, descargando agua sobre el fuego. Los helicópteros realizan operaciones de transporte de personal a zonas poco accesibles. Para el ataque directo pueden transportar agua que arrojan sobre la línea de fuego, mediante el uso de una bolsa de transporte de agua

Tabla 2.1: Se resumen los elementos utilizados para el ataque a incendios, en la Provincia de Córdoba

Los elementos utilizados para el ataque a incendios en la Provincia de Córdoba (de acuerdo a [12]), se resumen en la tabla (ver 2.1).

2.1.4 Recursos pertenecientes al cuartel de Alta Gracia

Para el caso particular del cuartel de Alta Gracia, éste cuenta con los recursos listados en la tabla 2.2.

Cantidad	Tipo de recurso	Descripción
3	Autobombas	Cada autobomba tiene una motobomba, y cuentan con una motobomba más.
2	Cisternas	La cisterna sólo transita por caminos principales (asfaltados o de tierra), por el peso que la misma tiene. Las cisternas tienen una mayor capacidad para transportar agua que las autobombas.
30 y 50	Mochilas de agua	Cuentan entre 30 y 50 mochilas.
3	Camionetas	Cuentan con 3 camionetas, para el movimiento de los bomberos. El PPMF provee una camioneta para reponer combustible a los recursos que están trabajando en el incendio.
	Bomberos	Cada cuartel de la zona de mayor riesgo tiene 5 bomberos becados por el PPMF, éstos cumplen un horario de 11am a 7pm (el horario de mayor riesgo de que se produzca un incendio) que tienen que estar en el cuartel. Esto surge de la necesidad que en promedio el bombero voluntario desde el aviso hasta la llegada al cuartel transcurre media hora, y si se tiene en cuenta que la primer hora del incendio es la más crítica y fundamental para poder extinguir el mismo antes de que tome mayores dimensiones, es necesario que estén en el cuartel para disminuir el tiempo de llegada al incendio.

Tabla 2.2: Se resume los recursos que pertenecen al cuartel de Alta Gracia

2.1.5 Recursos provistos por el Plan Provincial de Manejo del Fuego (PPMF)

El PPMF provee comedores (escuelas dónde los bomberos se alimentan), alimentos, combustible, helicópteros y aviones. Si el incendio es grande es posible acceder a un motorhome. El jefe de región es el encargado de comunicarse con el PPMF para la solicitud de éstos recursos.

Aviones:

El PPMF cuenta con 3 aviones y el Plan Nacional de Manejo del Fuego (PNMF) cuenta con 2 aviones. Se determina cuanto se llenan dependiendo de la ubicación del incendio (por ejemplo si esta dentro de un valle), las condiciones de despegue y la magnitud del siniestro.

Éstos aviones realizan hasta 4 descargas. El lugar dónde se debe realizar la descarga, es indicada por el bombero en tierra al piloto. Casi siempre el frente de la llama se combate con descargas de aviones, y los francos con ataque directo por bomberos en tierra.

Se cuenta con pistas predeterminadas, para el cuartel de Alta Gracia y el cuartel de Carlos Paz se usa el aeroclub de Alta Gracia.

El aeroclub de Alta Gracia cuenta con una pileta de agua, la misma es usada para cargar el avión hidrante mediante el uso de una autobomba.

Helicópteros

El PPMF envía helicópteros en algunos casos. A pesar de tener una capacidad inferior en litros en comparación a un avión, tienen la ventaja de contar con una mejor puntería y la caída del agua se realiza en un mismo lugar.

2.1.6 Administración de parques nacionales (APN)

En lo que respecta a un parque nacional (por ej: el Parque Nacional de Quebrada del Condorito), los bomberos no tienen acceso si no es con permiso de los guardaparques.

El parque cuenta con una brigada para el combate del incendio, el cual tiene una autobomba. Los guardaparques pueden solicitar ayuda a los bomberos.

Localización de la zona de descarga

Los dispositivos de Posicionamiento Global (GPS) son utilizados para indicar a los aviones, la localización para realizar la descarga de agua. En la actualidad se indica al piloto mediante referencias visuales, dónde se deben realizar las descargas.

El piloto provee la siguiente información:

- 1) Dirección del viento
- 2) Rutas de escape
- 3) Ubicación de los bomberos

La dirección del viento, el piloto la calcula mediante la columna de humo (pluma) del incendio.

Información usada y disponible

Los bomberos realizan relevamientos *in situ* sobre el estado de accesos, tranqueras, etc. La mayor parte de la información se obtiene de conocer la zona dónde viven. Con respecto a los dispositivos GPS, los mismos utilizan información georeferenciada y mapas provistos por el Proyecto Mapear, desde el sitio web <http://www.proyectomapear.com.ar/>.

La Comisión Nacional de actividades Espaciales (CONAE) provee imágenes e información de utilidad al PPMF, para que este organismo informe a quien considere necesario la información relevante.

A su vez, desde los cuarteles, se obtiene información climatológica de las siguientes fuentes:

- del servicio meteorológico nacional (SMN, su dirección es <http://www.smn.gov.ar/>).
- de observatorios meteorológicos
- del PPMF (ej: pronóstico extendido)

para poder colaborar con el jefe del incendio.

Los aviones proveen también información sobre el área del incendio, como por ejemplo que se encuentra después de un valle.

Google Earth(<https://www.google.com/earth>), debido a la resolución espacio-temporal de las imágenes provistas, también es utilizado para el reconocimiento y usos del área del incendio, cómo por ejemplo la ubicación de piletas y recursos hídricos.

2.1.7 Tiempo de intervención

El tiempo de intervención está directamente relacionado con el tiempo de llegada de los equipos terrestres de extinción hasta la localización del incendio forestal. La utilización de medios aéreos modifica significativamente y sin duda positivamente esta hipótesis de trabajo, pero los cálculos para este trabajo fueron realizados considerando las peores condiciones, que para este criterio se vinculan a la ausencia de medios aéreos.

Tiempo de intervención de los bomberos

En la bibliografía ([16]) se considera como suma del tiempo de llegada de los vehículos por carretera y/o pista forestal y el tiempo de acceso a pie desde ésta hasta el frente del incendio. El tiempo de acceso a pie de

los bomberos depende de la distancia al frente del incendio desde la carretera y/o pista forestal más próxima a éste (ver [16]).

En esta tesis, el tiempo de llegada por carretera y/o pista forestal corresponde al tiempo que necesita el vehículo autobomba para llegar a la localización del incendio desde la estación de bomberos más cercana.

Tipo de vía	Cod	Velocidad media (km/h)
Carretera asfaltada	1	45,4
Pista forestal en buen estado	2	26,1
Pista forestal en estado medio	3	18,4
Pista forestal en mal estado	4	12

Tabla 2.3: Se resume la velocidad media que tarda un camión autobomba en llegar a un incendio

La tabla 2.3 resume la velocidad media que un camión autobomba tarda en llegar a un incendio en la bibliografía, dependiendo del tipo de camino por el que tiene que transitar. La información de la misma fue utilizada para inicializar los costos que son calculados en el capítulo 4. Estos fueron inicializados en:

- Asfalto: 100 km/h
- Consolidado : 60 km/h
- DeTierra: 20 km/h

Estos tipos de caminos se encuentran en la capa de caminos utilizada.

Esto es necesario en el momento que se busca la solución para las cisternas.

2.2 Planificación de la lucha contra el fuego

2.2.1 Distribución de los cuarteles en la provincia

Existen un total de 184 cuarteles de los cuáles 56 están en la zona de sierras y montañas, debido a que estas son las zonas de mayor riesgo de incendios forestales. Éstos 56 cuarteles son los cuarteles becados por el Plan Provincial de Manejo del Fuego (PPMF).

Estructura organizacional de los bomberos

Los cuarteles están agrupados por región (ver imagen 2.3) y luego por federación, la federación incluye todos los cuarteles. Existen 12 regiones, en la provincia de Córdoba. A veces pueden cambiar los cuarteles, de región a la cual pertenecen, no siempre es fijo. Los mismos son organismos no gubernamentales. La región cuenta con un jefe, elegido por los jefes de cuarteles. La federación cuenta con un coordinador. En lo relativo a la planificación de la lucha contra el fuego es quien tiene la decisión de enviar a las regiones cercanas, cuando una región declara que no puede extinguir el incendio.

Se cuenta con 2 entidades gubernamentales: el Plan Provincial de Manejo del Fuego (PPMF) y el Plan Nacional de Manejo del Fuego (PNMF). Defensa civil no brinda ayuda en el caso de los incendios forestales, sino en los demás desastres naturales como por ejemplo: inundaciones.

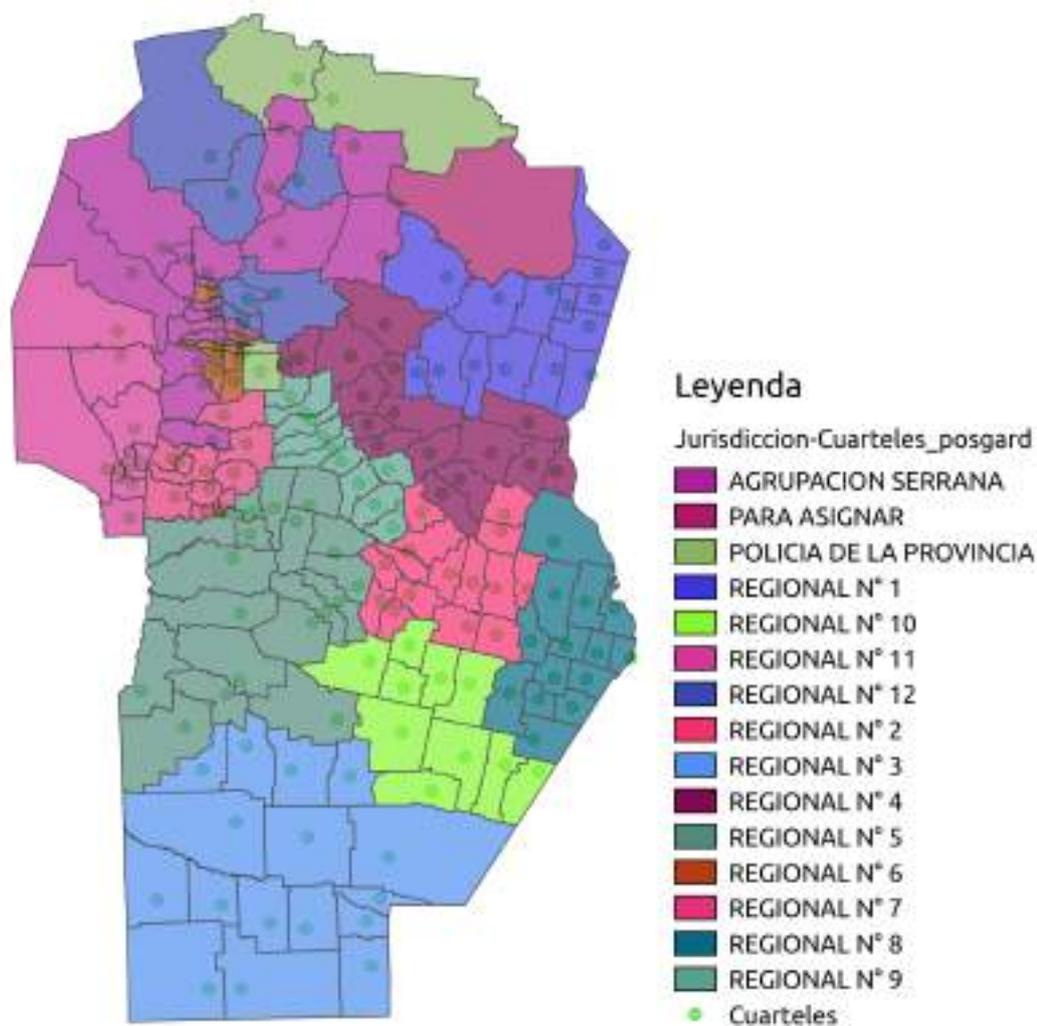


Figure 2.3: Mapa de regiones y cuarteles de la provincia de Córdoba

Por ejemplo; el cuartel de Alta Gracia depende de la región 7, la región 7 contiene 2 departamentos (ver figura 2.4) con las siguientes localidades:

- Calamuchita: Cumbrecita, Santa Rosa de Calamuchita, Villa del Dique, Villa Berna, Villa General Belgrano, San Agustín, Yacanto de Calamuchita, Villa Amancay, Villa Rumipal.
- Santa María: Alta Gracia, Despeñaderos.

2.2.2 Detalle de las operaciones ante un incendio declarado

Una vez que se realiza el llamado el cuartel envía una camioneta o autobomba con 4 bomberos para la evaluación *in situ* y el combate inicial, indistintamente de que sea un incendio o más.

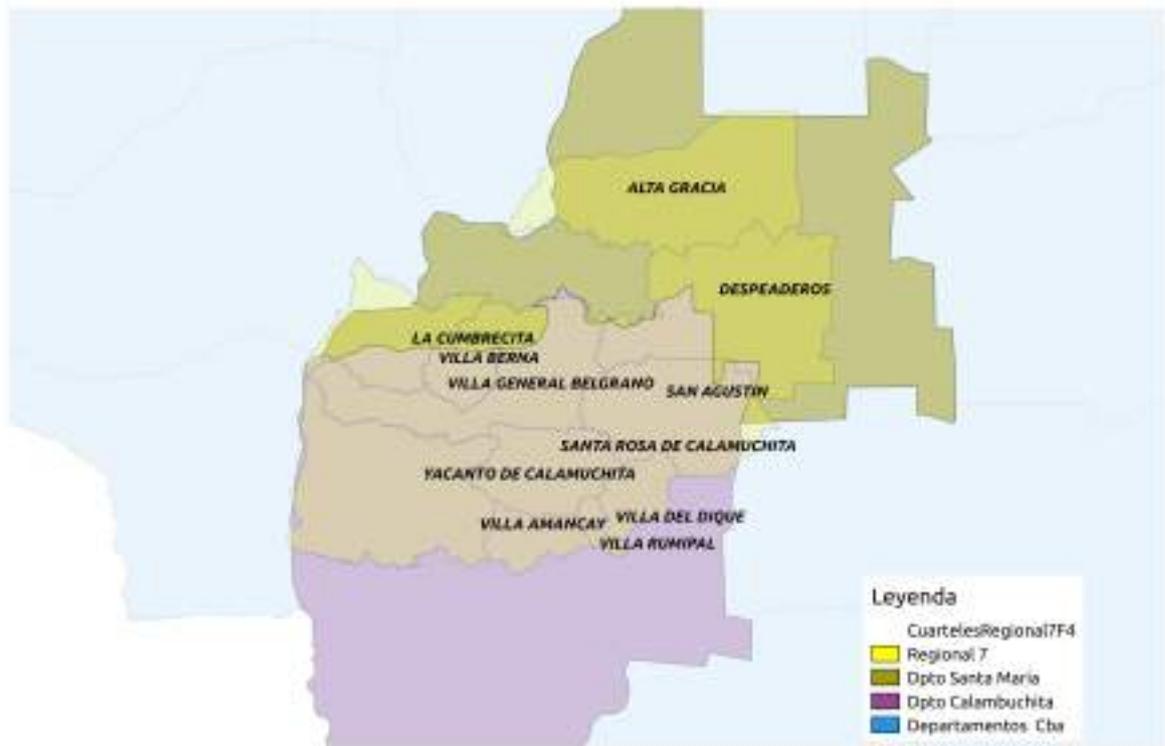


Figure 2.4: Regional 7

El jefe de bombero ó el que tiene rango mas alto de los 4, tras la observación del siniestro evalúa si es de gran magnitud, y calcula la cantidad de recursos que serán necesarios para extinguir el incendio dentro de la primer hora.

Sí el incendio no es de gran magnitud, evalúa si es posible que el cuartel pueda extinguirlo (por ej el incendio de un baldío). Si no es el caso, solicita ayuda a la región (es decir calcula que con los recursos de la región en la primer hora van a poder extinguirlo).

Si no solicita ayuda a la federación (otras regiones). También solicita el apoyo de aviones en caso de ser necesario. La comunicación se realiza con una persona (operador), que permanece en el cuartel.

También puede realizar un pedido más específico, porque el jefe del incendio si sabe que existen otros incendios (con recursos ocupados de su cuartel), puede solicitar como por ejemplo, una autobomba de un cuartel (no propio), una camioneta de otro cuartel (de la misma región), y 2 aviones. Con el cual previamente realizó cálculos que con esos recursos le alcanzan para extinguir el incendio.

Los cuarteles pueden negarse de enviar recursos, si el jefe del cuartel evalúa que existe una alta probabilidad de un posible incendio en su zona (si es que éste ya cuenta con pocos recursos por ejemplo, o evalúa que con los recursos que tiene va a poder extinguir en la primer hora un incendio en su zona).

En la primer hora se va a tratar de enviar todos los recursos disponibles calculados, ya que se considera que la primer hora es primordial a la hora de extinguir el incendio o la de mayor peso.

Si la ayuda es solicitada a la federación, el coordinador manda a los cuarteles que están mas cerca.

Dependiendo de la fecha o época (en relación a mayor riesgo de incendio), algunos recursos se reservan en relación a una alta probabilidad de otro incendio. Esto se aplica tanto para el cuartel, cómo para la federación.

Siempre realizan ataque directo, usan los caminos y ríos disponibles en el lugar y pocas veces realizan un contrafuego manual.

Dejan que el frente del incendio avance y se atacan los flancos, dependiendo de las condiciones.

Si evalúan que las condiciones no son aptas, evacúan y esperan a que estas mejoren para continuar con el trabajo. Por ejemplo: Si el viento es mayor a 60 km/h es un ejemplo seguro de evacuación de bomberos.

El frente no es atacado, por la probabilidad de que exista un cambio del viento y así provocar el aumento de probabilidad de accidentes de los combatientes. Y además es seguro que por las corrientes convectivas generadas por el incendio, se generen focos secundarios.

Los expertos para determinar las zonas con más riesgo de incendio y valorar la peligrosidad de un incendio usan la regla del 30 (ver [1], para mayor información). Significa que existe una temperatura superior a 30 grados, una humedad relativa inferior al 30% y una velocidad superior a 30km/h.

Cuando se da esta situación, hay un alto riesgo de que cualquier incendio se convierta en un gran incendio forestal. Caso contrario no hay un riesgo de incendio alto, si no medio o bajo.

Es decir las condiciones de un incendio forestal se pueden resumir en : que son usadas para su descripción, para valorar la peligrosidad, o para su posible propagación:

- viento
- humedad relativa del ambiente
- humedad del vegetal
- pendiente.

El riesgo de incendio puede ser:

- bajo (es bajo si alguna de las variables está en contra de los incendios, por ej la humedad)
- moderado
- extremo (en julio, agosto, por la baja humedad de los combustibles)

Dado que el contenido de humedad depende de la hora del día, su estimación para la asignación del riesgo de incendio es significativa en la franja horaria de 12pm a 5pm. Basado en que el rocío se forma en la noche, y en la mañana el combustible esta humedecido por éste, perdiendo el contenido de humedad adicional al llegar al mediodía.

Zonas de riesgo y cuarteles

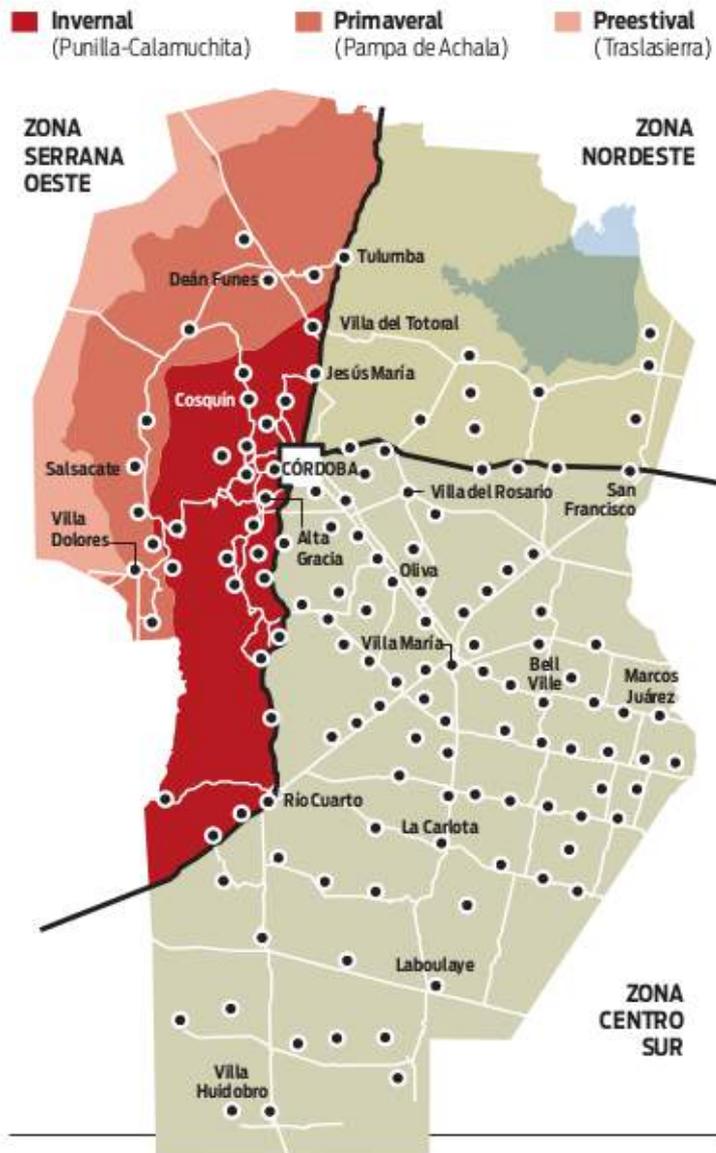


Figure 2.5: Mapa de zonas de riesgo provisto por el PPMF

Por la seguridad de los bomberos de noche no se combaten los incendios. Sólo en casos excepcionales siguen trabajando los bomberos de la zona de mayor riesgo (ver imagen 2.5), porque tienen más conocimientos en cómo combatir un incendio, pero con ayuda de los bomberos que conocen la zona que se está combatiendo.

Periódicamente se relevan los agentes, pero no así los recursos que quedan en el lugar del siniestro. Las camionetas son usadas con este fin para la movilidad de los bomberos.

En todo momento están reportando al jefe del incendio, tanto la lucha contra el fuego como temas logísticos como por ejemplo su nivel de cansancio. Pueden solicitar su relevo, aunque en la mayoría de los casos esto no sucede y es el jefe que está en el incendio quien decide el relevo de cada bombero.

La evacuación de las personas es llevada a cabo por la policía, la cual es notificada por los bomberos.

Generalmente trabajan por grupos (mínimo 2 bomberos) en el área del incendio, a veces depende de la topografía del lugar. La topografía es importante, porque dependiendo de la misma el jefe del incendio decide cómo dispone los agentes.

Y en algunos casos el jefe del incendio dará la orden de evacuación si lo considera necesario.

Ejemplo de trabajo que demuestra las habilidades de coordinación que debe tener el bombero a cargo del incendio:

En una época de alto riesgo de incendio ocurrió un incendio en la ruta 5, a la altura de la torre Miriam Stefford.

El cuartel de Alta Gracia fue informado sobre este suceso, dónde en el mismo se quemaron 1000 hectáreas. Fueron enviadas 2 autobombas al lugar por la época del año (según previsión realizada por el jefe del cuartel). Luego de media hora se notificó al cuartel de un incendio en La Bolsa, dónde se envió 1 autobomba. Unas horas después se reportó un tercer incendio, en traslasierras en el cual se envió una camioneta. Éste ejemplo muestra la habilidad o la previsión que tiene que realizar un jefe de cuartel, según sea una época de riesgo de incendio alta o no.

Prioridad:

Le dan mayor prioridad a la vida, y luego a los bienes. La mayoría de los animales huyen de un incendio, que no es el mismo caso para el caballo. Éste se queda, entonces es trabajo de los bomberos evacuar a éstos animales en caso que el dueño no lo haya realizado.

2.2.3 El ataque al fuego y su planificación

Planificación de las actividades de ataque al fuego:

Cómo se describió en la sección anterior, la planificación del ataque va a depender del tamaño del incendio. En una primera evaluación el jefe del incendio de acuerdo a la ubicación del mismo es decir la dotación que corresponde actuar, determinará la primer fase de su planificación.

Si el jefe del incendio considera que con los recursos de su dotación va a lograr extinguirlo, entonces la planificación sólo va a depender de su dotación.

El jefe del incendio tiene en cuenta la época del año para el caso de si es mas alta la probabilidad de otros incendios, reservando en el cuartel recursos por si llegara a suceder otro incendio. También tiene en cuenta la intensidad del mismo, tratando de usar la mayor cantidad de recursos del cuartel conociendo que las primeras horas son cruciales para que el mismo no se expanda. Por lo que tiene que buscar el número ideal para cumplir con ambos propósitos.

Durante el combate al incendio se tiene que conocer la ubicación de recursos hídricos más cercanos, para recargar las autobombas que estan combatiendo el fuego. Ésto se hace mediante el uso de cisternas o camionetas que deben ser desplazadas entre el incendio y el lugar de la localización de recursos hídricos tantas veces como sea necesario según la duración del combate a cada incendio.

También el jefe del incendio tiene en cuenta el cansancio de los bomberos, para ir revelándolos en la medida que sea necesario.

En el caso que se considere que se necesita más de una dotación para combatir, el jefe del incendio tiene que avisar al jefe de la región. En este caso el jefe de la región es quien se encargará de la planificación. El jefe del incendio tiene que especificarle los recursos faltantes, para que el jefe de la región pueda enviar los recursos de las dotaciones más cercanas. El jefe de la región tendrá que negociar con los jefes de las dotaciones, dado que los jefes de las dotaciones tienen en cuenta la época del año. Cada jefe de la dotación puede negarse o proveerle menos recursos de los que se le solicitan, llevando así al jefe de la región a buscar a otra dotación que le pueda proveer los recursos que faltan. Si no hay más dotaciones dentro de su región, solicita ayuda a la federación.

En éste caso el jefe de la federación es el que se encargará de la planificación, asignando los recursos faltantes teniendo en cuenta las dotaciones de las regiones que estén más cercanas al incendio.

El jefe del incendio, también tiene que solicitar la cantidad de helicópteros y aviones necesarios, solicitándoselos al jefe de la región. El jefe de la región se encarga de solicitarlos al PPMF y al PNMF, independiente de si está el jefe de la federación a cargo de la planificación.

Otro recurso a tener en cuenta es el combustible que requieren los móviles (autobombas, cisternas, camionetas) que están en el incendio, es decir se debe ubicar dónde se puede ir a buscar dicho combustible.

Problemas de Planificación de Actividades de la Lucha contra el Fuego

Dividimos la planificación de las actividades de ataque de fuego en los siguientes cinco problemas:

1. **priorización de incendios**
2. **planificación de asignación de autobombas**
3. **planificación de gestión de cisternas**
4. **planificación de gestión de bomberos**
5. **planificación de abastecimiento de vehículos**

En adelante nos referiremos a dichos problemas, a través de PI, AA, GC, GB y AV respectivamente.

1. PI: El problema de *priorización de incendios* se debe determinar que incendios son más prioritarios para atenderlos primero.

2. AA: El problema *asignación de autobombas* resuelve cómo será la distribución de autobombas, desde las estaciones de bomberos hasta los incendios. Su solución es el camino óptimo que tiene que hacer cada autobomba.

3. GC: El problema de *gestión de cisternas* resuelve cómo será la distribución de cisternas, desde las estaciones de bomberos hasta el punto en el camino más cercano al incendio. Y desde el punto más cercano del incendio hasta el punto más cercano dónde puede ir a recargar agua.

4. GB: Se debe determinar cuando se dan las condiciones para reemplazar a los bomberos o un grupo de ellos, que han estado combatiendo algún incendio. Se determina el número de personas que los reemplazará y se deberá calcular el camino óptimo para el movimiento del cuartel a los distintos incendios para realizar estos reemplazos.

5. AV: Se debe determinar para todos los vehículos (en especial para las autobombas, cisternas y camionetas) cuándo y dónde corresponde abastecerlos de combustible para que éstos continúen con las operaciones requeridas.

En esta tesis hemos trabajado solamente con los problemas 1, 2 y 3. Los problemas 4 y 5 son semejantes a los anteriores y se los ha dejado como trabajo a futuro.

Resumen de las especificaciones

El sistema deberá trabajar sobre una base de 24 horas para organizar todas las actividades de los bomberos. Para este propósito se computará la propagación del incendio para el siguiente día usando un simulador de incendios que se utilizará para la determinación de las prioridades de los mismos, i.e. para el problema PI.

La salida de la expansión del incendio, va a ser usada para definir los objetivos (las goals) para la planificación de los recursos para el día siguiente.

El sistema deberá seguir todos los días el mismo ciclo predecir la expansión del fuego, usando un simulador de incendios, y usar la predicción del día vigente para la organización de las actividades de la lucha contra el fuego correspondiente a ese día.

Luego procede a resolver los problemas AA y GC para organizar la actividad de las autobombas y cisternas.

En un sistema implementado en forma completa, luego de esto y considerando las soluciones de AA y GC se resuelven los problemas GB y AV con técnicas semejantes a las empleadas. Cómo se indicó esto no se trata en esta tesis, se dejó como trabajo a futuro.

Sistema de soporte a la planificación de la lucha contra el fuego

Este capítulo muestra cómo se modeló el problema de planificación de la lucha contra el fuego.

3.1 Modelado del problema de planificación de la lucha contra el fuego

Esta sección presenta la estrategia utilizada para resolver los problemas de planificación AA y GC.

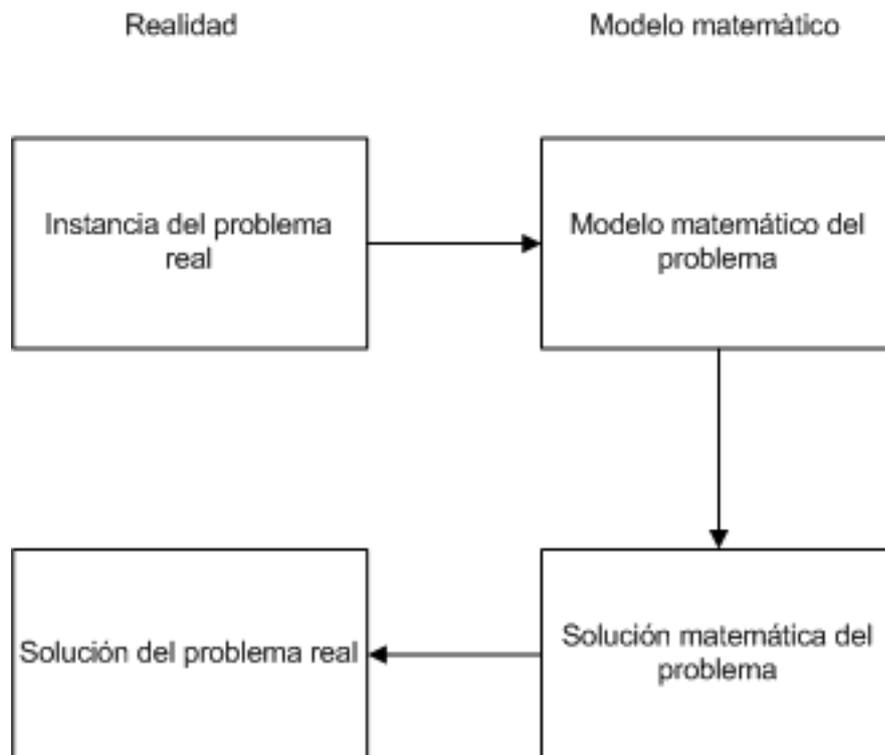


Figure 3.1: Estrategia utilizada

La figura 3.1 describe como a partir del problema real de la planificación de las actividades de la lucha contra el fuego, se pasa a un modelo matemático que representa a dicho problema a resolver. Finalmente la solución del problema real se satisface a partir de la solución matemática.

Si bien se analizaron varias alternativas de modelos matemáticos, por cuestiones de performace, escalabilidad y variabilidad, se ha decidido utilizar el problema shortest-path. En cuyo gráfico codificamos cada uno de éstos problemas AA y GC como se muestra en este capítulo.

Camino más corto (Shortest path): A continuación se muestra una breve descripción del problema 'Shortest path' (para más información ver Ausiello [3]).

INSTANCIA: Sea $G = (V,E)$ un grafo, $vs, vd \in V$.

SOLUCIÓN: Un path ($vs = vi1, vi2.....vik = vd$) desde vs a vd .

MEDIDA: El número k de nodos en el path.

Ver [3] para más información.

En la teoría de grafos el problema del camino más corto (o shortest path) consiste en encontrar un camino entre dos vértices (o nodos), de tal manera que la suma de los pesos de las aristas que lo constituyen es mínima. Un ejemplo es encontrar el camino más rápido para ir de una ciudad a otra en un mapa. En este caso los vértices representan las ciudades y las aristas las carreteras que las unen, cuya ponderación viene dada por el tiempo que se emplea en atravesarlas.

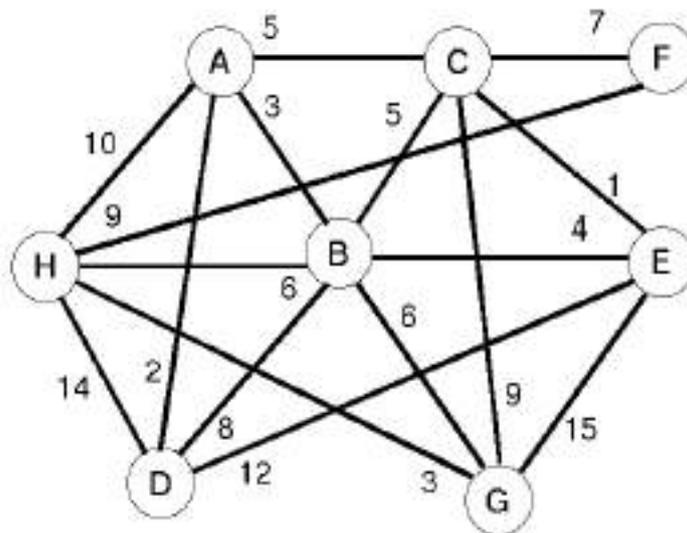


Figure 3.2: Ejemplo de grafo ponderado de un problema de camino más corto. Las letras representan los nodos (ciudades) y los números las aristas (carreteras que unen las ciudades)

Formalmente, un grafo ponderado es un conjunto V de vértices, un conjunto E de aristas y una función de variable real ponderada $f : E \rightarrow \mathbb{R}$, donde se encuentra un camino P de $v \in V$ a $v' \in V$, tal que:

$$\sum_{p \in P} f(p)$$

es el mínimo entre todos los caminos que conectan v y v' .

El problema es también conocido como el problema de los caminos más cortos entre dos nodos, para diferenciarlo de la siguiente generalización:

- El problema de los caminos más cortos desde un origen: se presenta al tener que encontrar los caminos más cortos de un vértice origen v a todos los demás vértices del grafo.
- El problema de los caminos más cortos con un destino: en el cual tenemos que encontrar los caminos más cortos desde todos los vértices del grafo a un único vértice destino, esto puede ser reducido al problema anterior invirtiendo el orden.
- El problema de los caminos más cortos entre todos los pares de vértices: el cual tenemos que encontrar los caminos más cortos entre cada par de vértices (v, v') en el grafo.

Modelados posibles, en base al problema Shortest path

Una vez elegido el problema Shortest path, existen posibles modelos que representan el problema algunos de los cuáles se muestran a continuación:

Es posible utilizar el problema shortest path de las siguientes maneras: Para cada autobomba se calcula la distancia desde la estación de bomberos en la que se encuentran hasta cada uno de los incendios, y luego se comparan estos valores dónde la menor distancia para cada autobomba será la solución. Y en caso de que hubiesen dos distancias mínimas es indistinto el incendio al cual será asignada la autobomba.

Vértices: Estaciones de bomberos, incendios, cruces de caminos, recursos hídricos (piletas, etc).

Aristas: Conexión mediante caminos entre estos puntos, excepto en el caso de los incendios que están fuera de un camino dónde se considera la conexión 'más corta (de menor costo)' entre el incendio y algún camino.

D: La distancia entre dos vértices se define calculando la distancia ponderando la calidad (tipo) del camino, congestión y/o tráfico, etc. Dónde cada uno de éstos términos puede tener un coeficiente de peso: $d = a_1*d_1 + \dots + a_m*d_n$, dónde d_1, \dots, d_n son los segmentos del camino, y a_1 puede ser un coeficiente por ejemplo para las calles asfaltadas, a_2 , coeficiente para las calles de tierra. Otro modelo podría ser a_1 es el coeficiente para segmentos del camino con alto grado de tráfico, .. hasta a_m con un grado m de tráfico.

Modelado intensidad de incendio: Por ejemplo los incendios se categorizaran de niveles del 0 al 5, cada uno de los mismos requieren distinta cantidad de autobombas: 0: requiere ninguna autobomba, 1: requiere una autobomba 2: requiere dos autobombas, 3: requiere tres autobombas, 4: requiere cuatro autobombas, 5: requiere cinco autobombas o se sabe a priori la cantidad de autobombas que requiere cada incendio.

Opción 1: La intensidad del incendio se modela como un factor negativo de la distancia, haciendo que los incendios de mayor intensidad tengan una mayor prioridad al estar con menor distancia $d = a_1 * d_1 + \dots + a_1 * d_n$,

a_1 va a modelar la intensidad del incendio con un valor negativo, para que sea más corta la distancia. Por ejemplo supongamos que tenemos dos incendios i_1 y i_2 , y un cuartel c_1 . Sea intensidad1 e intensidad2 (del incendio i_1 e i_2 respectivamente) con valores 1 y -1, si i_1 está mas cerca al cuartel la distancia va a ser $d = 2*1$, y para el incendio 2 va a ser $d = -1*4$. Por lo que si tuvieramos un modelo de esta forma primero iría una autobomba al incendio 2 y después al incendio 1.

Opción 2: La intensidad se modela agregando vértices según la intensidad del incendio, de manera que éste requiera más autobombas que sólo va a representar la prioridad de apagado de un incendio antes que otros. El grafo tiene un vértice por cada autobomba, que se necesita dada la intensidad del incendio.

En éste caso la distancia no tiene ningún término adicional para modelar la intensidad del incendio. En el caso de un incendio de nivel 3 habrá 3 vértices el algoritmo lo detecta y primero asigna recursos a uno, después el otro, y así sucesivamente.

Opción 3: Opción 2, pero se asigna una autobomba a cada incendio (en cada iteración). Y por cada iteración se borra un nodo, si se asignó una autobomba a dicho incendio.

Opción 4: no hay intensidad sino para la longitud del incendio se divide en nuevos vertices, que están conectados cercanos al camino de antes.

Opción 5: se conocen cuántos recursos por incendio son necesarios para lograr apagar al incendio, y los recursos por cada cuartel. Por cada iteración se asigna una autobomba (y/o cisterna) a todos incendios en base a la prioridad, con las estaciones que tienen recursos. Se decrementa por iteración la cantidad de recursos necesarios por incendio si se asignó una autobomba a dicho incendio, y se decrementa la cantidad de recursos del cuartel que asignó dicho recurso.

Modelo elegido:

Cómo mencionamos elegimos el problema de Shortest Path Problem teniendo en cuenta la prioridad de los incendios, la asignación de autobombas a los incendios por iteración y el tipo de camino.

La opción 5 es la elegida dónde los vértices quedan definidos cómo las bifurcaciones, los incendios, los cuarteles, y las intersecciones de agua con los caminos (en el caso del problema GC). Debido a lo comentado en el capítulo 2 en la sección 2.1.2 y en la sección 2.2.2 si hay n incendios lo primero que hacen es cubrirlos para evaluarlos, obtener información precisa y/o iniciar el ataque. Con lo cual siempre envían una autobomba a cada incendio antes de enviar una segunda a cualquier otro incendio es el porque el algoritmo que utilizamos considera distribuir de manera iterativa. Y también es el porque sería mejor opción distribuir de manera iterativa antes de enviar dos autobombas a un lugar y cero a otro, en el caso de qué se tuvieran dos incendios (con 2 autobombas necesarias por incendio) y se tuvieran dos autobombas en el cuartel.

Descripción formal del problema

A continuación describiremos el problema de manera formal: en términos de datos de entrada y salida, y en términos de la medida de calidad de las soluciones. Dónde la medida de calidad apunta a cómo distinguir que algunas soluciones son mejores que otras.

A nivel matemático, en términos de entrada y salida los datos de entrada son: el grafo que modeliza el problema, incluyendo los nodos que modelizan los incendios y cuarteles de bomberos, y la solución es la asignación de autobombas a los incendios y los shortest paths (caminos) encontrados para cada una de estas autobombas. Cualquier asignación de autobombas a incendios junto con los caminos para estas autobombas desde los cuarteles hasta los incendios que se les asignaron es una solución. Aún cuando haya incendios que no tienen ninguna autobomba asignada.

La calidad de una solución se mide por dos factores que componen la solución. La asignación de autobombas a incendios y la distancia total recorrida por el total de autobombas. La asignación es de mas prioridad que la distancia por lo que si una solución cubre mejor que otra los incendios, es considerada de mayor calidad. Ejemplo una solución deja una autobomba en la estación y un incendio sin asignación de autobombas es

de menor calidad que una que lo asigna a este incendio sin importar cuanto distancia se trate. Y a igual asignación de autobombas a incendios, la calidad viene determinada por la distancia total recorrida por todas las autobombas.

3.2 Arquitectura conceptual de sistema de soporte para la lucha contra el fuego

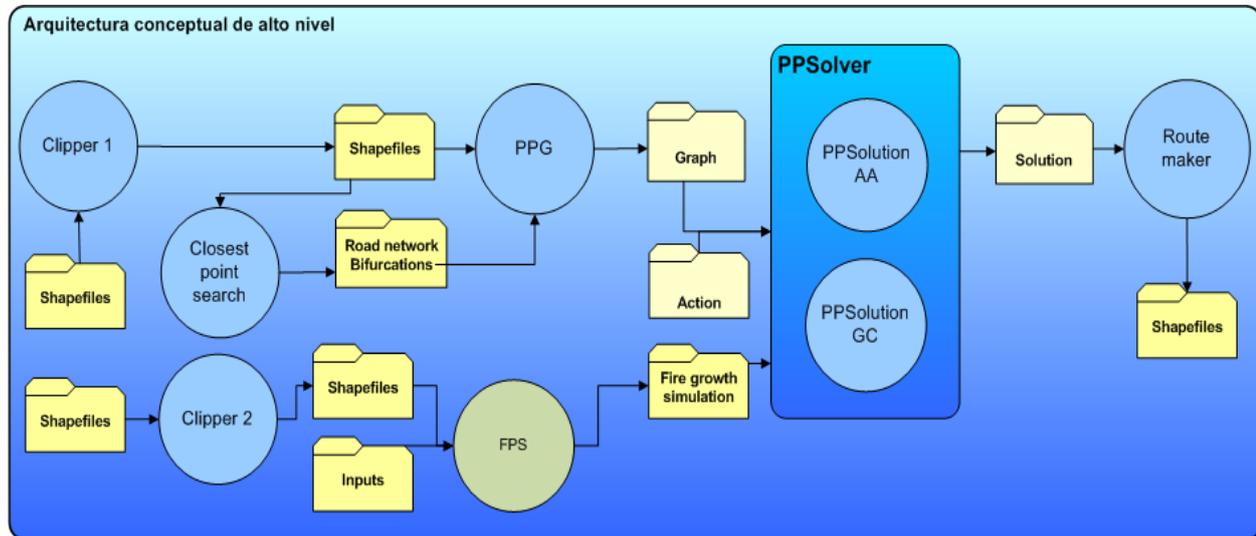


Figure 3.3: Arquitectura conceptual de las unidades que componen el sistema

En la figura 3.3 se muestra la arquitectura conceptual del sistema de soporte para la lucha contra el fuego.

La arquitectura comprende las siguientes unidades:

1. Clipper 1
2. Closest point search
3. Clipper 2
4. Fire propagation simulation (FPS)
5. Planning problem generator (PPG)
6. Planning problem solver (PPSolver)
7. Route maker

A continuación se describen brevemente la funcionalidad de estas unidades.

1. Clipper 1: En base a las capas geográficas listadas en 3.2.5, les realiza un preprocesamiento para que PPG pueda tomarlos como entrada con el área deseada por el usuario.

2. Closest point search: En base a la capa geográfica Red Vial esta unidad agregará paths faltantes en la capa, como por ejemplo el del incendio al resto de los caminos. Se mostrará con más detalle en la sección 3.2.6.

3. Clipper 2: En base a las capas geográficas; dem, modelo de combustible y puntos de ignición, les realiza un preprocesamiento para que la unidad FPS pueda tomarlos como entrada con el área deseada por el usuario (ver sección 3.2.2).

4. Fire propagation simulation (FPS): Esta unidad es un simulador de propagación de incendios, se utilizó Farsite v.4.1.055 ([20]) para este prototipo. La arquitectura muestra los inputs necesarios para ejecutar Farsite, listados abajo en resumen. Se mostrarán con más detalle en la sección 3.2.2. Farsite genera la salida para que PPSolver pueda ordenar los incendios de acuerdo a la prioridad. El PPSolver los ordena de acuerdo al área que es una columna de la capa geográfica de salida “Simulación de área de interés”.

- Dem
- Modelo de combustible
- Puntos de ignición
- Adjustment
- Moisture
- Conversions
- Weather files
- Wind files
- Time step
- Visible step
- Perimeter resolution
- Visible step
- Distance resolution
- Duration

5. PPG: El PPG toma las capas geográficas de salida de “Clipper 1”, y construye el grafo asociado a las capas geográficas ingresadas.

6. PPSolver: PPSolver encuentra la solución para la acción. Y dada la acción requerida por el usuario, éste deberá ingresar las capas geográficas definidas en la sección 3.2.1. Action es un parámetro de entrada que toma la unidad PPSolver, la acción 1 resuelve el problema AA, la acción 2 resuelve el problema GC, y la acción 4 resuelve AA y GC. La acción 3 está relacionada con la simulación de datos que fueron necesarios crear, para evaluar la performance del sistema (ver 4.5). PPSolver tiene dos unidades PPSolutionAA y PPSolutionGC. PPSolutionAA busca la solución para las autobombas y PPSolutionGC busca la solución para las cisternas. Cuando PPSolver busca la solución para la acción 4 primero ejecuta PPSolutionAA y luego PPSolutionGC.

7. RouteMaker RouteMaker creará las capas geográficas asociadas a la solución de acuerdo a la acción. Si la acción es 1 genera las capas geográficas asociadas a las autobombas, si la acción es 2 genera las capas geográficas asociadas a las cisternas, y si la acción es 4 genera las capas geográficas para las autobombas y cisternas.

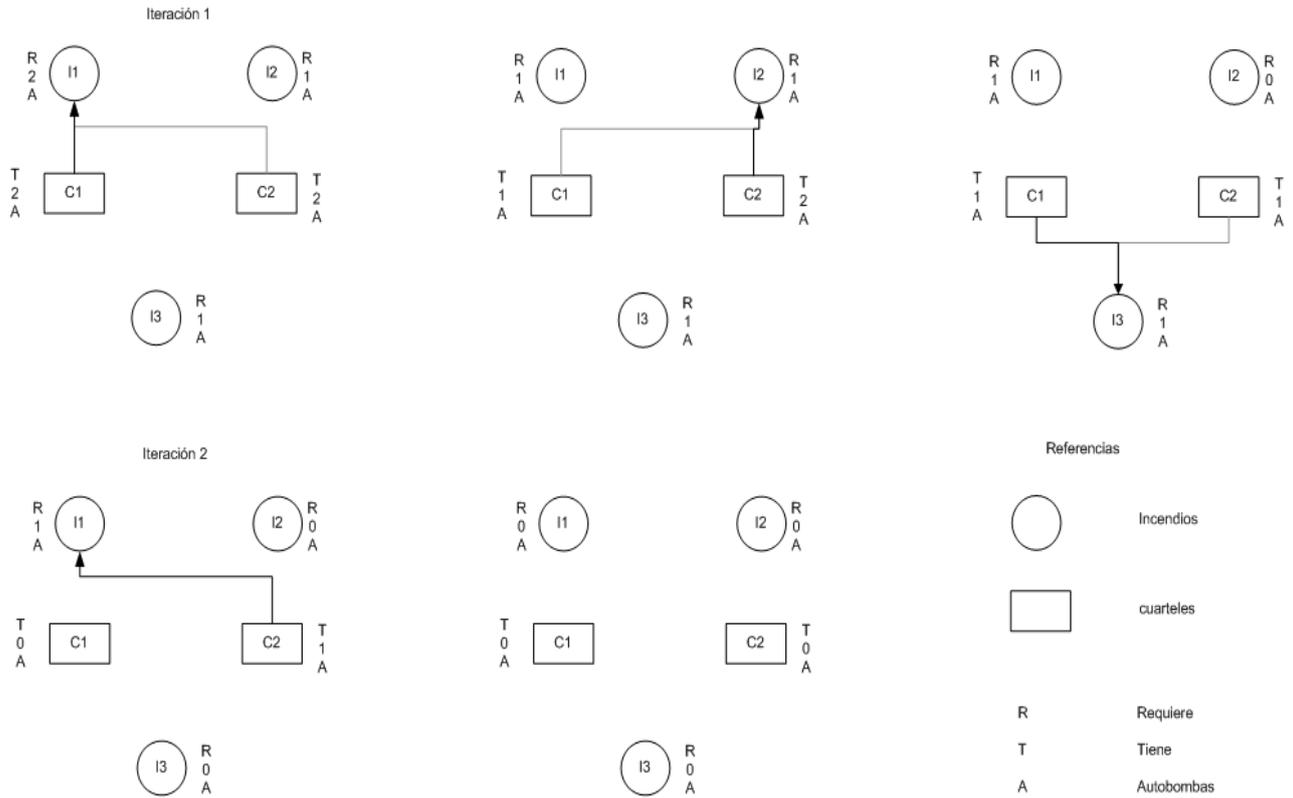


Figure 3.4: Ejemplo de iteración

La ejecución de las unidades Clipper 1, Clipper 2 y Closest point search hoy son procedimientos manuales que se pueden automatizar en un futuro.

A continuación veremos con más detalle algunas unidades: PPGenerator, PPSolver, Farsite y Clipper 1, porque son más interesantes y complejas que el resto de las unidades.

3.2.1 PPSolver

Cómo se mencionó PPSolver busca la solución, para ello tiene en cuenta el costo del camino que será mencionado a continuación. Y por cada iteración va asignando autobombas a todos los incendios que lo requieran por su prioridad. Se explica en la sección 3.2.1 la iteración.

Costos Para calcular el costo del camino la distancia del mismo se pondera por un costo que depende del tipo de camino. Los distintos tipos de caminos son:

- Asfaltado
- Consolidado
- DeTierra

Dichos tipos de caminos fueron seleccionados en base a lo tipos definidos en la capa de Red Vial. Veremos con mas detalle en la sección 4.3.1 los resultados obtenidos.

Iteración PPSolver por cada iteración va a ir asignando autobombas a los incendios, en base a la prioridad de éstos (ver imagen 3.4).

También podemos observar que dada una iteración e incendio a cual asignar, se calcula la distancia mínima teniendo en cuenta los costos de los segmentos que fueron mencionados en la sección anterior.

PPSolver va a terminar, cuando no tenga más incendios con solicitud de autobombas o cuando no tenga más cuarteles con autobombas. Luego va a buscar las soluciones para las cisternas, también va a terminar cuando no tenga más incendios con solicitud de cisternas o cuando no tenga más cuarteles con cisternas.

La unidad PPSolver tiene varias formas distintas de ejecución:

```
python planning.py 1 pathBifurcaciones pathCuarteles pathIncendios pathSimulacion pathRedVial
```

```
python planning.py 2 pathBifurcaciones pathCuarteles pathIncendios pathSimulacion pathInterseccion  
pathRedVial
```

y

```
python planning.py 4 pathIncendios, pathSimulacion, pathRedVial, pathCuarteles,  
pathBifurcacionesCisterna, pathIntersection
```

para casos genéricos. Pero ya tiene algunos ejemplos que vienen listos para ser ejecutados, de los cuáles se ejecutan mediante:

```
python planning.py 1 1
```

```
python planning.py 1 2
```

```
python planning.py 2 1
```

```
python planning.py 2 2
```

```
python planning.py 4 1
```

En todos los casos el segundo argumento hace mención a la acción que el usuario quiere ejecutar (i.e. 1.autobombas, 2.cisternas o 4.ambos), y en los últimos casos que ejemplo el usuario quiere correr. El ejemplo de VD corresponde con 1, y el ejemplo AG corresponde con 2. Entonces en los últimos cinco ejemplos, en el primero de ellos se estaría ejecutando el problema de las autobombas para el ejemplo de Alta Gracia, el segundo se estaría ejecutando las cisternas también para Alta Gracia. El tercero se estaría ejecutando las autobombas para Villa del Dique y el cuarto se estaría ejecutando las cisternas para Villa del Dique. Por último en el quinto ejemplo de corrida se estarían resolviendo el problema de autobombas y cisternas para Alta Gracia.

Y en los primeros tres ejemplos se estarían ejecutando el problema de las autobombas con las capas geográficas indicadas en el orden en que están explícitas arriba, y en donde pathBifurcaciones es el path a la capa de bifurcaciones, pathCuarteles es el path a la capa de cuarteles, pathIncendios es el path a la capa de incendios, pathSimulacion es el path a la capa de simulación, pathInterseccion es el path a la capa de intersección y pathRedVial es el path a la capa de red vial.

Las acciones tienen números en lugar de nombres por decisión de implementación, y el número 3 se usa para la ejecución de tests del sistema.

El sistema entregará las soluciones, por línea de comandos y en capas geográficas asociadas a cada autobomba y/o cisternas que se involucran en el problema seleccionado.

El PPSolver genera archivos diferentes de acuerdo a cómo fue ejecutado:

1) Para el caso 1 genera una capa geográfica por cada autobomba (ver imagen 4.2a e imagen 4.2b).

2) Para el caso 2 genera una capa geográfica por cisterna Agua (que será el lugar donde tenga que ir la cisterna a buscar agua para recargar la autobomba) y uno por cisterna (que será el trayecto del cuartel, hasta el punto más cercano al incendio i.e de tipo asfaltado o consolidado).

4) Para el caso 4, va a generar capas geográficas para autobombas y cisternas.

Las acciones tienen número en vez de nombres porque fue una decisión de implementación.

Para resolver la acción 1 genérica (i.e. que el área no es igual a los ejemplos previamente cargados), el usuario deberá ingresar las siguientes capas geográficas de entrada:

- Bifurcaciones (Cruces de caminos)
- Estaciones
- Incendios
- Simulación de área de expansión
- Red Vial

Para resolver la acción 2 genérica, el usuario deberá ingresar las siguientes capas geográficas de entrada:

- Bifurcaciones (Cruces de caminos e intersecciones de agua)
- Estaciones
- Incendios
- Simulación de área de expansión
- Red Vial
- Intersecciones de agua con caminos

Para resolver la acción 4 genérica, el usuario deberá ingresar las siguientes capas geográficas de entrada:

- Bifurcaciones (Cruces de caminos e intersecciones de agua)
- Estaciones
- Incendios
- Simulación de área de expansión
- Red Vial
- Intersecciones de agua con caminos

PPSolver no encuentra la solución óptima en cuanto al total de la distancia recorrida. A continuación se presenta un ejemplo que lo demuestra:

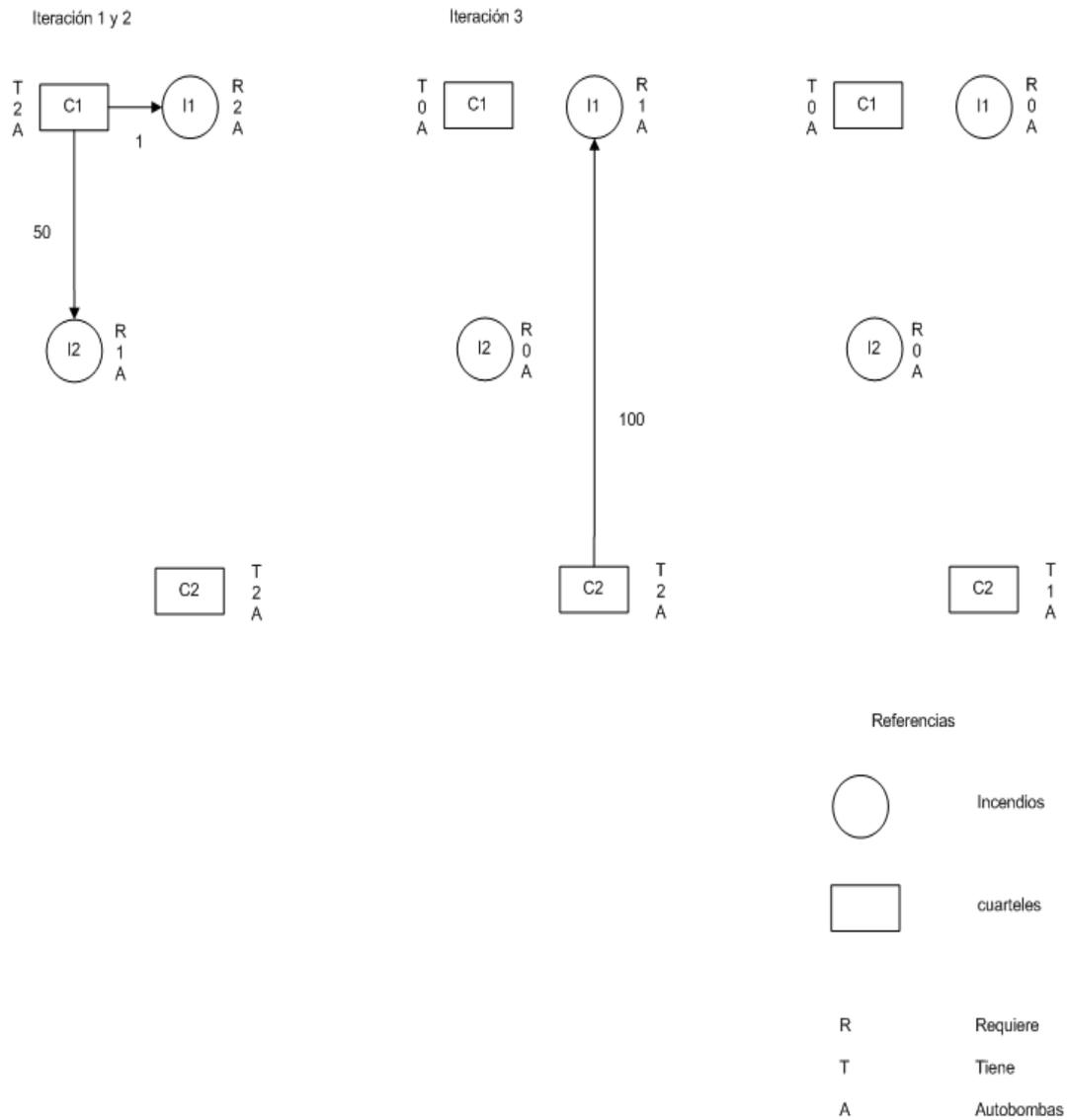


Figure 3.5: Ejemplo

Se tienen dos cuarteles de bomberos (c1, c2) y dos incendios (i1, i2) como lo muestra la figura 3.5.

	i1	i2
c1	1	50
c2	100	51

Tabla 3.1: Matriz de distancia

Supongamos que la matriz de distancias en kilómetros (luego de calcular los recorridos mínimos con el algoritmo A*) viene dada por la tabla 3.1.

Aquí i1 se encuentra muy cercano a c1 y muy lejano a c2, pero i2 se encuentra a mitad de camino de los cuarteles, pero ligeramente más cercano a c1. Supongamos que c1 cuenta con 2 autobombas y c2 cuenta con 1 autobomba. Supongamos que i1 requiere 2 autobombas e i2 requiere 1 autobomba. PPSolver asignará

primero de c1 un autobomba a cada incendio (pues es el que tiene distancia más corta a ambos incendios). Luego asignará el autobomba restante de c2 a i1. Esto suma un recorrido total de 151 km. La solución óptima (considerando el total de kilómetros recorridos como medida de calidad) es enviar 2 autobombas de c1 a i1, y el autobomba de c2 a i2, sumando un recorrido total de 53km.

Aclaremos que en la medida de calidad sólo se tuvo en cuenta el total de kilómetros recorridos y no se está teniendo en cuenta la posibilidad de variabilidad en los caminos (como por ejemplo la apertura de un camino por el dueño de un campo, como veremos en 4.4). Tampoco se tuvo en cuenta que los cuarteles pueden negarse a asignar recursos en cualquier momento, como se mencionó en la sección 2.2.2.

Pero el mismo nos sirve para demostrar que a pesar de ser un prototipo es importante mejorar la performance (que veremos en 4.4) y el algoritmo (que veremos en 4.3.3) que realiza la distribución de autobombas en caso de querer utilizar el sistema.

3.2.2 Fire propagation simulation (FPS)

A los fines de mostrar la factibilidad para implementar un simulador de incendios se utilizó el simulador de incendios Farsite, para obtener una expansión de los incendios en escena y poder asignarles una prioridad a éstos. Éste simulador utiliza los siguientes parámetros de entrada (ver [20] para mayor información):

Preprocesamiento del dem El modelo topográfico fue realizado por el IGN, el mismo tiene el tamaño de pixel de 45 m. Dicho modelo topográfico fue elegido porque muestra un corregistro con las imágenes de Google Earth y datos adquiridos con dispositivos GPS. En la sección B.1 del anexo C se explica técnicamente cómo el mismo fue obtenido.

Generación de la capa de vegetación de entrada Existían tres opciones:

- 1) Un árbol de decisión, con rangos para los número digital (ND) como el de Mendoza (ver [8]).
- 2) El mapa de clasificación de Zack y Cabido, construido en el 2008 con imágenes del Landsat 5.
- 3) Actualizar el mapa de Zack y Cabido al Landsat 8.

Elegimos la opción 2, aunque a futuro podría implementarse cualquiera de las otras dos.

Construcción de LCP (landscape) Para crear un landscape, es necesario lo siguiente:

1. Elevación (Elevation)
2. Pendiente (Slope)
3. Orientación (Aspect)
4. Modelos de combustibles (Fuel models)

Para la reducción del área de interés se hicieron pre-procesos para el dem como para la capa de vegetación, estos se encuentra en el anexo C en la sección B.2.

Y del resultado se extrajeron el dem y la capa de vegetación para guardarlos como ascii., mediante la herramienta de Envi Save file as -> ASCII -> ESRI ASCII GRID. Se los guarda con la extensión .txt, pero se les cambia la extensión manualmente a .asc dado que Farsite sólo busca archivos con ésta extension.

Las unidades fueron seteadas en metros, dado que todas las capas estaban proyectadas en coordenadas planas. El combustible fue seteado con convert, para posteriormente indicarle que tiene que convertir los valores de entrada a los combustibles de Farsite.

Para canopy cover (cubierta de las copas) ascii se seleccionó la casilla constante, que permite seleccionar el porcentaje, el cuál fue elegido 0%.

Las otras variables no se setearon, dado que éstas no son obligatorias.

Adjustment (Ajuste) Esta variable sirve cómo factor de modificación para la velocidad de propagación, para cada clase de combustible. Si la misma es 0,5 entonces para la clase indicada la velocidad de propagación será la mitad, si es 1 entonces no se modifica el valor. Dado que en la capa de vegetación tenemos 20 clases, para cada clase se seteó en 1.0 el adjustment. Es decir, el archivo quedó:

1	1.0
..	..
20	1.0

Tabla 3.2: Adjustment de la velocidad de propagación

Humedad (Moisture) Cuando el usuario crea un archivo nuevo, Farsite carga por defecto los 256 clases de combustible con las respectivas humedades: La primer columna (de izquierda a derecha) se corresponde con el número de modelo de combustible, de la segunda a cuarta columna se corresponde con la humedad del combustible muerto para 1h, 10 h y 100 timelag, la quinta columna representa la humedad del combustible herbáceo vivo (LH) y la última columna la humedad del combustible leñoso vivo (LW). La humedad de los combustibles vivos permanece constante a lo largo de la simulación (a menos que se ingresen los datos manualmente) mientras que no es así para los combustibles muertos.

Para los modelos de combustible de Scott and Burgan éstos valores ya están definidos .

Conversión (Conversions) En este archivo se indica la correspondencia entre los valores de 1 capa de combustible de Zac y Cabido y los valores utilizados internamente por Farsite.

Dicha correspondencia fue realizada por el Biólogo Gustavo Leonhard.

Weather Files (Archivos de clima) Los datos de clima son usados para modelar la variación en la humedad del combustible muerto debido a la topografía y a las sombras. De izquierda a derecha, la primer columna corresponde al mes (MO), y le siguen el día (DY), las precipitaciones diarias (RN), la hora en que se registró la mínima temperatura (AM), la hora en que se registró la máxima temperatura (PM), la temperatura mínima (TLo), la temperatura máxima (THi), la humedad máxima (HHi), la humedad mínima (HLo) y la elevación (ELV). La temperatura y la humedad por hora son interpoladas a partir de las mínimas y máximas diarias, generando un patrón de clima diario. Opcionalmente se pueden agregar dos columnas más, las rt1 y rt2, empleadas para ingresar la hora de inicio y finalización de la lluvia (0000-2400 hs), si estos datos no son ingresados la precipitación será distribuida en el período de 24 hs.

Para nuestra corrida el archivo fue definido para 1 día:

Wind Files (Archivos de viento) En este archivo se definen los datos del viento, por período de tiempo. Tanto este archivo cómo el archivo de clima, tienen que tener la misma cantidad de días definidos. Éste archivo tiene varias columnas. De izquierda a derecha, la primera representa el mes, la segunda el día, la tercera la hora (de 0000hs a 2359hs), la cuarta la intensidad del viento, la quinta la dirección de procedencia

Zack	Scott	Farsite
0	No data	
1	SH8	148
2	TU2	162
3	TU1	161
4	SH7	147
5	SH7	147
6	GR5	105
7	SH1	141
8	GR5	105
9	GR3	103
10	NB1	91
11	NB9	99
12	NB8	98
13	NB8	98
14	SH8	148
15	SH8	148
16	SH7	147
17	SH7	147
18	GR7	107
19	TU5	165
20	SH1	141

Tabla 3.3: Correspondencia entre la capa de combustible de Zack y Cabido con Scott and Burgan

Mo	DY	AM	PM	RN	TLo	THi	HHi	HLo	ELV
10	10	0	500	1500	40	80	60	20	0

Tabla 3.4: Archivo de clima

del viento y la última la cobertura de nube (de 0 a 100%). La intensidad de viento es considerada a 10m de altura y varía entre 0 a 300km/h. La dirección de procedencia del viento está definida en sentido horario desde el norte, va de 0-360° azimuth. Por ejemplo si la dirección es 0° el viento será norte, con 180° será sur y con 45° será noreste.

Para nuestra corrida el archivo fue definido con valores para 1 día. Igual para la hora 0000, para la hora 0400, 0800, 1200, 1600 y 2000.

M	D	H	I	P	C
10	2	0	2	180	0
10	2	400	2	180	0
10	2	800	2	180	0
10	2	1200	2	180	0
10	2	1600	2	180	0
10	2	2000	2	180	0

Tabla 3.5: Archivo de viento

Parámetros del modelo Para esta corrida se usaron valores:

Time step: 17 minutos

Visible step: 1 día (Esto es para que escriba la salida al último)

Perimeter resolution: 60 metros
Distance resolution: 30 m

Duration Para esta corrida un día fue usado, desde el día 2 al 3.

Puntos de ignición Se importaron los puntos de ignición de la capa geográfica de incendios.

Output Farsite tiene varias opciones para guardar el resultado, para nuestra corrida se eligió guardar el perímetro como Polilínea, para poder así obtener el área y asignarle una respectiva prioridad al incendio.

3.2.3 Planning problem generator (PPGenerator)

En esta sección mostraremos cómo PPG genera el grafo a partir de los shapefiles de entrada. Se mostrará como se construye un ejemplo genérico de un grafo pequeño, con la finalidad de mostrar cómo PPG genera los grafos. También se explicará el algoritmo para la generación del grafo, y se mostrará un ejemplo de corrida.

Construcción del grafo:

Como mencionamos todo desarrollo realizado en esta tesis, fue desarrollado en python. A continuación se muestra un ejemplo genérico de un grafo pequeño, dónde los valores de los nodos están en coordenadas planas (x,y) y las aristas son la distancia que existe entre los nodos.

```
1 cordoba = UndirectedGraph(Dict(  
2     Cero = Dict(Seis=4075.27639378, Diez=3006.70854693),  
3     Dos = Dict(Diez=2537.43293104, Veinticuatro=2656.50083412),  
4     Seis = Dict(Cero=4075.27639378, Diez=4504.57003096),  
5     Diez = Dict(Veinticuatro=821.126672236)  
6 ))  
7  
8 cordoba.locations = Dict(  
9 Cero=(4355408.809594, 6444301.178168),  
10 Dos=(4359191.201685, 6442255.874446),  
11 Seis=(4352236.33349, 6441743.195945),  
12 Diez=(4356738.771066, 6441604.606498),  
13 Veinticuatro=(4356960.136394, 6440813.881259)  
14 )
```

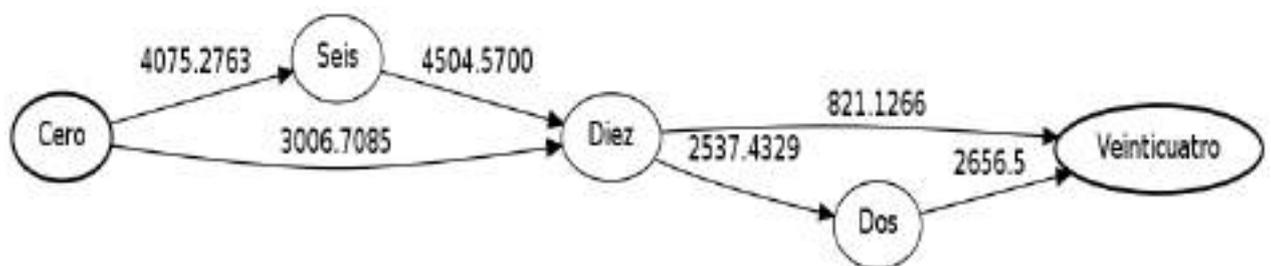


Figure 3.6: Ejemplo de grafo ponderado

El pseudocódigo de la construcción del grafo es mostrado a continuación:

```

1 //s: en el ej, es el nodo inicial
2
3 prox_nodos = listBif
4
5 Mientras no prox_nodos == [] Hacer
6     p = prox_nodos[0]
7     listLineas = encontrarLineas(p,listLineasRed)
8     li = restarFeature(listBif,p)
9
10     Para cada l en listLineas Hacer
11         bifurcaciones = encontrarBifurcaciones(li,l)
12         Para cada b en bifurcaciones:
13             construirDiccionario(p)
14             agregados.append(p)
15         Fin Para cada
16     Fin Para cada
17
18     prox_nodos.desencolar(p)
19 Fin Hacer

```

El código de python se encuentra adjuntado a la tesis.

Explicación del algoritmo

Se crean dos listas agregados y prox_nodos. La lista agregados almacenará los nodos que ya han sido expandidos, mientras que la lista prox_nodos almacenará los próximos nodos a expandir.

En esta instancia se crea un bucle que terminará cuando la lista prox_nodos sea vacía.

Se selecciona el primer nodo de la lista prox_nodos, se buscan los vecinos para este nodo. Y para cada vecino si no está en la lista agregados y prox_nodos, se encola en prox_nodos. El primer nodo se desencola de prox_nodos.

El algoritmo terminará creando todo el árbol, el cuál a posterior será usado para encontrar el path entre un incendio y una estación o una bifurcación a un punto de agua.

Ejemplo de corrida:

Se muestra la corrida para el ejemplo, que se encuentra en la figura 3.6:

```

prox_nodos = {Cero}
agregados = {}

```

```

prox_nodos = {Seis,Diez}
agregados = {Cero}

```

```

prox_nodos = {Diez}
agregados = {Cero, Seis}

```

```

prox_nodos = {Veinticuatro, Dos}
agregados = {Cero, Seis, Diez}

```

prox_nodos = {Dos}
agregados = {Cero, Seis, Diez, Veinticuatro}

prox_nodos = {}
agregados = {Cero, Seis, Diez, Veinticuatro, Dos}

3.2.4 Ejemplos

Identificador	Ubicación del ejemplo	ubicación en la tesis
VD	Ejemplo 1 - Villa del Dique	3.2.4
AG	Ejemplo 2 - Alta Gracia	A

Tabla 3.6: Resumen de los ejemplos desarrollados

En esta tesis, se presentaran dos ejemplos de aplicación. Éstos son identificados como se muestran en la tabla 3.6.

Situación - Capas de información geográfica

Los datos SIG representan los objetos del mundo real (carreteras, el uso del suelo, altitudes). Los objetos del mundo real se pueden dividir en dos abstracciones: objetos discretos (una casa) y continuos (cantidad de lluvia caída, una elevación). Existen dos formas de almacenar los datos en un SIG: raster y vectorial.

Los SIG que se centran en el manejo de datos en formato vectorial son más populares en el mercado. No obstante, los SIG raster son muy utilizados en estudios que requieran la generación de capas continuas, necesarias en fenómenos no discretos; también en estudios medioambientales donde no se requiere una excesiva precisión espacial (contaminación atmosférica, distribución de temperaturas, localización de especies marinas, análisis geológicos, etc.).

Raster: Un tipo de datos raster es, en esencia, cualquier tipo de imagen digital representada en mallas. El modelo de SIG raster o de retícula se centra en las propiedades del espacio más que en la precisión de la localización. Divide el espacio en celdas regulares donde cada una de ellas representa un único valor. Se trata de un modelo de datos muy adecuado para la representación de variables continuas en el espacio.

Cualquiera que esté familiarizado con la fotografía digital reconoce el píxel como la unidad menor de información de una imagen. Una combinación de estos píxeles creará una imagen. Si bien una imagen digital se refiere a la salida como una representación de la realidad, en una fotografía o el arte transferidos a la computadora, el tipo de datos raster reflejará una abstracción de la realidad. Las fotografías aéreas son una forma de datos raster utilizada comúnmente con un sólo propósito: mostrar una imagen detallada de un mapa base sobre la que se realizarán labores de digitalización. Otros conjuntos de datos raster podrán contener información referente a las elevaciones del terreno (un Modelo Digital del Terreno), o de la reflexión de la luz de una particular longitud de onda (por ejemplo las obtenidas por el satélite LandSat), entre otros.

Los datos raster se compone de filas y columnas de celdas, cada celda almacena un valor único. Los datos raster pueden ser imágenes (imágenes raster), con un valor de color en cada celda (o píxel). Otros valores registrados para cada celda puede ser un valor discreto, como el uso del suelo, valores continuos, como temperaturas, o un valor nulo si no se dispone de datos. Si bien una trama de celdas almacena un valor único, estas pueden ampliarse mediante el uso de las bandas del raster para representar los colores RGB (rojo, verde, azul), o una tabla extendida de atributos con una fila para cada valor único de células. La resolución del conjunto de datos raster es el ancho de la celda en unidades sobre el terreno.

Los datos raster se almacenan en diferentes formatos, desde un archivo estándar basado en la estructura de TIFF, JPEG, etc. a grandes objetos binarios (BLOB), los datos son almacenados directamente en Sistema de gestión de base de datos.

En un modelo raster cuanto mayores sean las dimensiones de las celdas menor es la precisión o detalle (resolución) de la representación del espacio geográfico.

Vectorial: En un SIG, las características geográficas se expresan con frecuencia como vectores, manteniendo las características geométricas de las figuras.

En los datos vectoriales, el interés de las representaciones se centra en la precisión de la localización de los elementos geográficos sobre el espacio y donde los fenómenos a representar son discretos, es decir, de límites definidos. Cada una de estas geometrías está vinculada a una fila en una base de datos que describe sus atributos. Por ejemplo, una base de datos que describe los lagos puede contener datos sobre la batimetría (equivalente submarino de la altimetría) de estos, la calidad del agua o el nivel de contaminación. Esta información puede ser utilizada para crear un mapa que describa un atributo particular contenido en la base de datos. Los lagos pueden tener un rango de colores en función del nivel de contaminación. Además, las diferentes geometrías de los elementos también pueden ser comparadas. Así por ejemplo, el SIG puede ser usado para identificar aquellos pozos (geometría de puntos) que están en torno a 2 kilómetros de un lago (geometría de polígonos) y que tienen un alto nivel de contaminación.

Los elementos vectoriales pueden crearse respetando una integridad territorial a través de la aplicación de unas normas topológicas tales como que "los polígonos no deben superponerse". Los datos vectoriales se pueden utilizar para representar variaciones continuas de fenómenos.

Para modelar digitalmente las entidades del mundo real se utilizan tres elementos geométricos: el punto, la línea y el polígono.

Puntos: Los puntos se utilizan para las entidades geográficas que mejor pueden ser expresadas por un único punto de referencia. En otras palabras: la simple ubicación. Por ejemplo, las localizaciones de los pozos, picos de elevaciones o puntos de interés. Los puntos transmiten la menor cantidad de información de estos tipos de archivo y no son posibles las mediciones. También se pueden utilizar para representar zonas a una escala pequeña. Por ejemplo, las ciudades en un mapa del mundo estarán representadas por puntos en lugar de polígonos.

Líneas: Las líneas unidimensionales o polilíneas son usadas para rasgos lineales como ríos, caminos, ferrocarriles, rastros, líneas topográficas o curvas de nivel. De igual forma que en las entidades puntuales, en pequeñas escalas pueden ser utilizados para representar polígonos. En los elementos lineales puede medirse la distancia.

Polígonos: Los polígonos bidimensionales se utilizan para representar elementos geográficos que cubren un área particular de la superficie de la tierra. Estas entidades pueden representar lagos, límites de parques naturales, edificios, provincias, o los usos del suelo, por ejemplo. Los polígonos transmiten la mayor cantidad de información en archivos con datos vectoriales y en ellos se pueden medir el perímetro y el área.

En esta sección haremos mención de las capas utilizadas, para los 2 ejemplos.

Primero mencionaremos las capas en común y luego las listaremos de acuerdo al problema.

Dichas capas fueron realizadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) de la República Argentina ([10]), y el Proyecto Mapear ([13]). El IGN es el organismo oficial que rige la cartografía y datos espaciales para la Argentina.

Capas en común Las capas en común se pueden ver en la tabla: 3.7.

Nombre de capa	Descripción	Origen
008_límites_provinciales	provincias de toda la república Argentina	IGN
departamentoCba	provincia de Córdoba	IGN
Red Vial	camino pavimentados, consolidados y de tierra para Argentina	IGN
departamentoSantaMaria	departamento de Santa María	IGN
cursodeAgua	ríos de Argentina	IGN
cuerposdeAgua	lagos de Argentina	IGN
departamentoCba	sólo incluye la provincia de Córdoba	Proyecto Mapear
PoligonoIncendiosEstaciones	polígono construido con la unión de los incendios y estaciones	
CentroidePoligono	centroide del polígono de la región de interés	
Buffer	buffer construido a partir del centroide de Polígono con la dist máx	
Cuarteles	cuarteles de la provincia de Córdoba	PPMF
Jurisdicciones	jurisdicciones de la provincia de Córdoba	PPMF

Tabla 3.7: Detalle de cartografía utilizada, todas las capas son de tipo vectorial

Nombre de capa	Descripción	Origen
CuartelesRegional7	cuarteles de la region 7	PPMF
RedVialIGN_F4_R7	red vial de la region 7	IGN
Incendios	construida a partir de un csv	
Bifurcaciones	Construida a partir de la unión de las bif, estaciones e incendios	
cursodeAgua	Cursos de agua de la región del ej 1	Proyecto Mapear
hidrografía	Hidrografía de la región del ej 1	Proyecto Mapear
aguaPermanente	Union de cursos de Agua e hidrografía (convertida a líneas)	
intersecciónAguaConRedVial	Intersección del agua permanente con Red Vial	
zackYCabidoR	Región de interés del ej 1 del mapa de Zack y Cabido	
simulacionR	Simulación de área de expansión, obtenida a partir de Farsite	

Tabla 3.8: Detalle de cartografía utilizada, para el ejemplo 1

Capas para el ejemplo VD Y las capas disponibles para el ejemplo VD, se pueden ver en la tabla 3.8. Las mismas fueron obtenidas mediante las capas originales (para toda Argentina), pero recortadas para la zona de la región 7.

Todas fueron utilizadas para el problema AA, a excepción de:

- cursodeAgua
- hidrografía
- aguaPermanente

que fueron utilizadas para el problema 2 (cisternas).

Nota: todas las capas son de tipo vectorial, a excepción de zackYCabidoR que es de tipo ráster.

3.2.5 Clipper 1, ejemplo VD, problema AA

En esta sección explicaremos cómo se hizo la reducción del área de interés; de Argentina a la deseada, para el problema VD. Este preprocesamiento sería llevado a cabo por la unidad Clipper 1, fueron desarrollados manualmente pero en un futuro se podrían automatizar.

Los **incendios** fueron generados al azar mediante la herramienta de QGIS, obtención de coordenadas, y luego insertados en un csv con ids (**Id**) distintos. Se construyó un polígono con los incendios (mediante ArcGis), para obtener los cuarteles cercanos en la zona (Ver imagen 3.8a).

Del polígono con los incendios se obtuvo el centro (mediante QGIS) y se midieron las distancias de los incendios hacia el centro, la mayor distancia fue obtenida de 6km. Entonces se contruyó un buffer de radio de 6km.

Para calcular el centroide de un polígono, utilizamos un algoritmo llamado polygon centroids en QGIS.

La capa de los cuarteles fue obtenida mediante el corte de la capa de los cuarteles para todo Córdoba, con el buffer de radio de 6km (Ver imagen 3.8a).

En base a tres puntos de incendios (elegidos al azar) más los cuarteles de la región (previamente obtenida), se construyó un nuevo polígono (ver imagen 3.8b) para incluir dichos incendios y cuarteles.

De éste nuevo polígono se obtuvo el centro, para posteriormente construir un buffer a partir de ese centro, de 6km de radio. El radio es de 6km, porque es la máxima longitud de un punto de la capa de puntos hacia el centro (redondeando la distancia 5,2km previamente calculada).

Éste último buffer circular será nuestra nueva área de estudio (Ver imagen 3.8b). Él área queda de 400 píxeles por 400 píxeles, dónde cada píxel mide 30m i.e. el área resulta de 12km por 12km.

La zona del ejemplo VD queda ubicada en la región 7 (ver imagen 3.9a).

La región7 es una de las divisiones de los bomberos de la provincia, cómo se muestra en la figura 3.7.

Por lo tanto en base al buffer circular, la capa de Red Vial fue recortada para posterior obtener las bifurcaciones (ver imagen 3.9b).

Para obtener las bifurcaciones se usó la herramienta de QGIS (Line intersection).

Luego se unieron (mediante la herramienta de merge de ArgGis) algunos caminos, para corregir algunas bifurcaciones en casos que las líneas tenían un corte.

Dichos caminos fueron unidos pero con la cautela que fueran el mismo camino, i.e. mismo tipo (ruta, camino) y misma clase (asfaltado, de tierra).

A las bifurcaciones fue necesario unir la capa de cuarteles cómo la de los incendios, para que se tuviera en cuenta los puntos (de tipo cuartel o incendio) en el caso que éstos estuvieran en el medio de un camino. Esto fue realizado mediante la herramienta de QGis 'Union', para la capa de incendios fue necesario renombrar ID por Id para que se realizara con éxito la unión (Finalmente fue actualizado a Id).

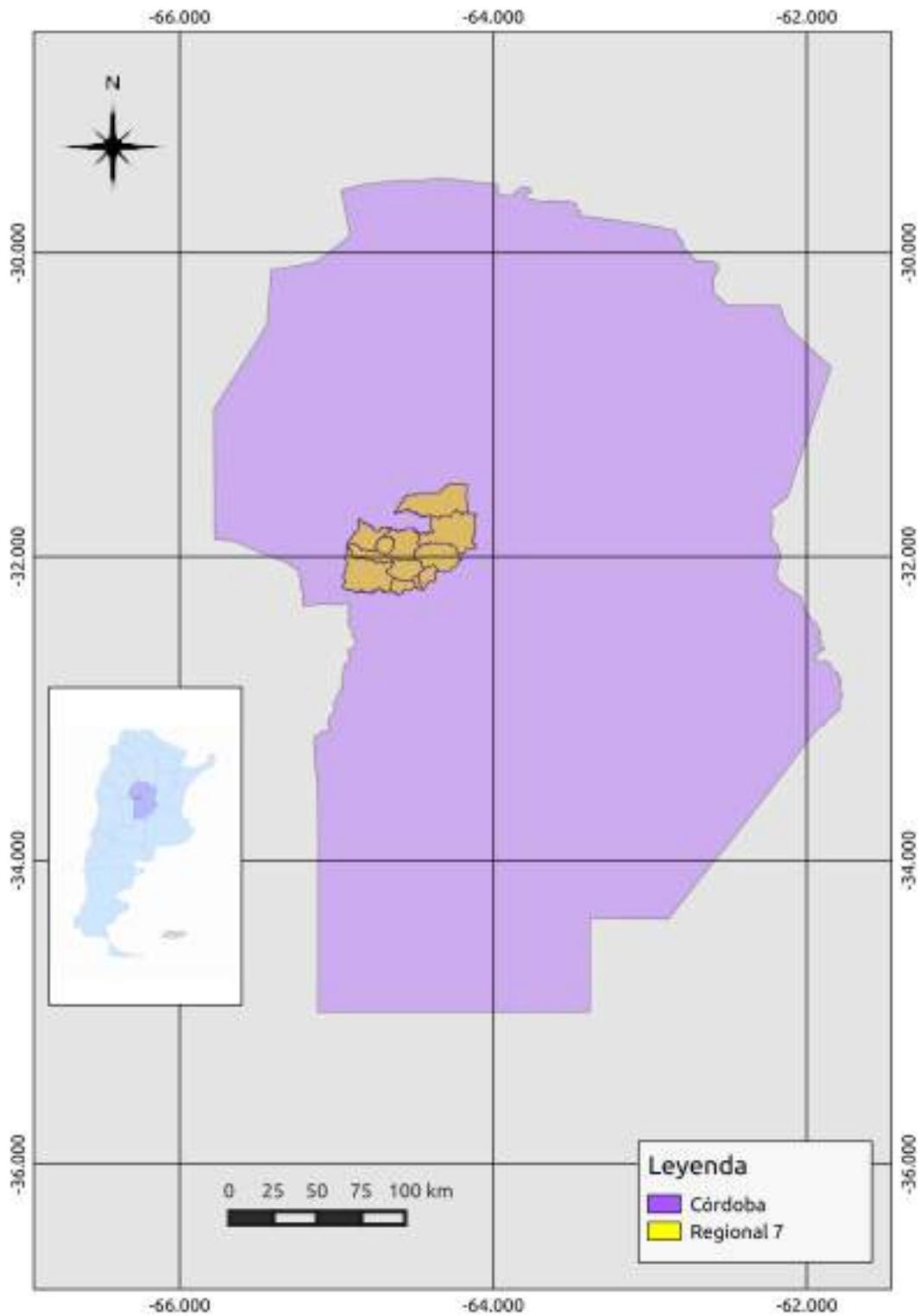
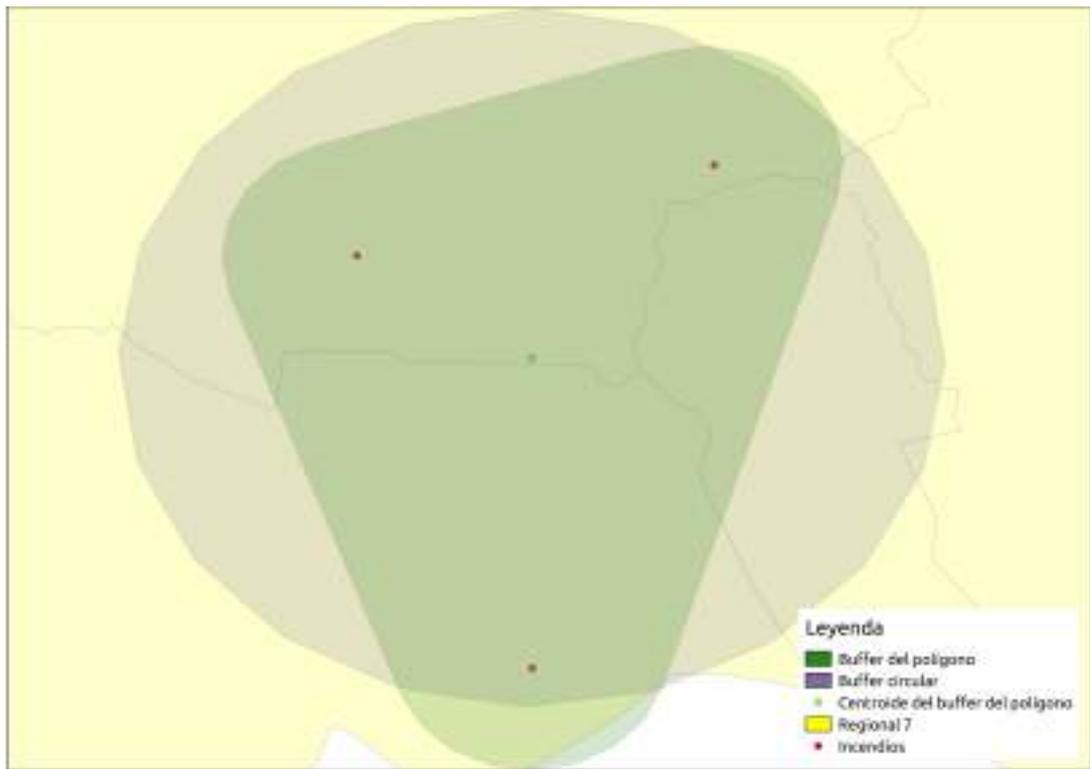
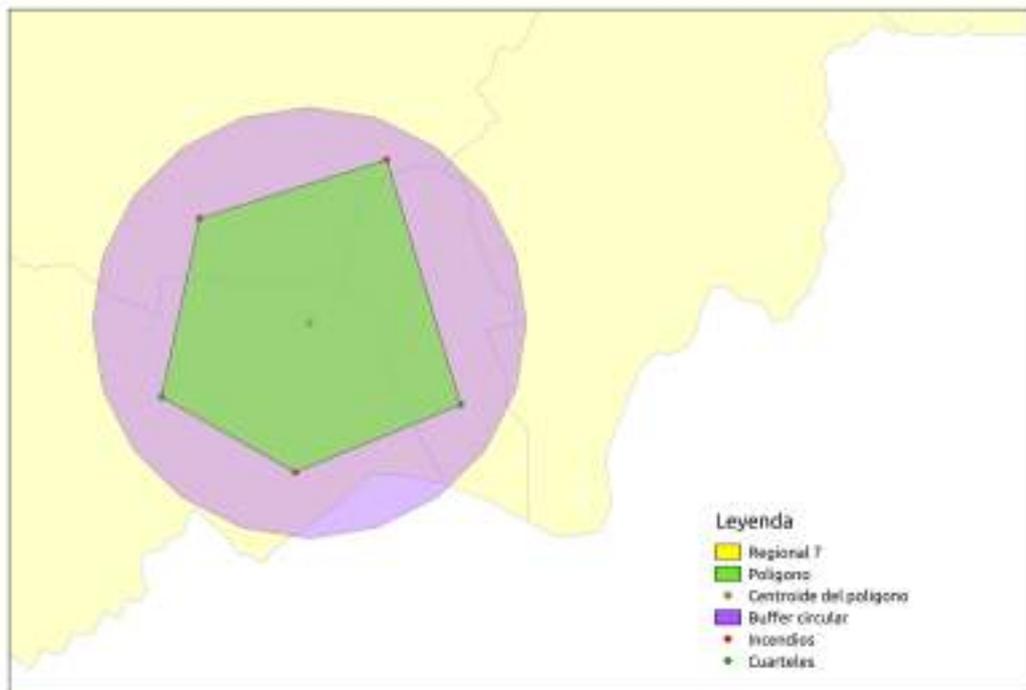


Figure 3.7: Córdoba, Región 7

Se modificaron los ids de las **bifurcaciones (ID)** para tomar como el nombre (no se usa los ids que devuelve la herramienta lineinterseccion, o el id heredado en el caso de los puntos de tipo cuartel o incendio sino más

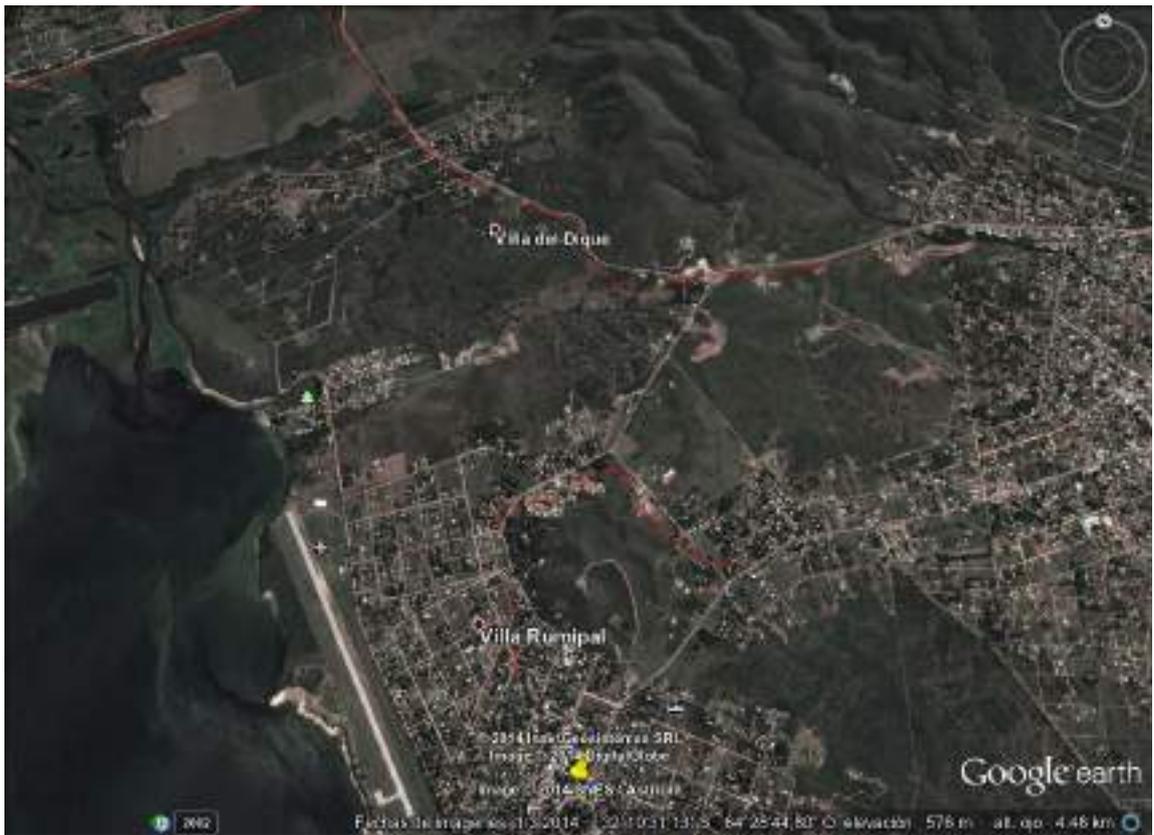


(a)

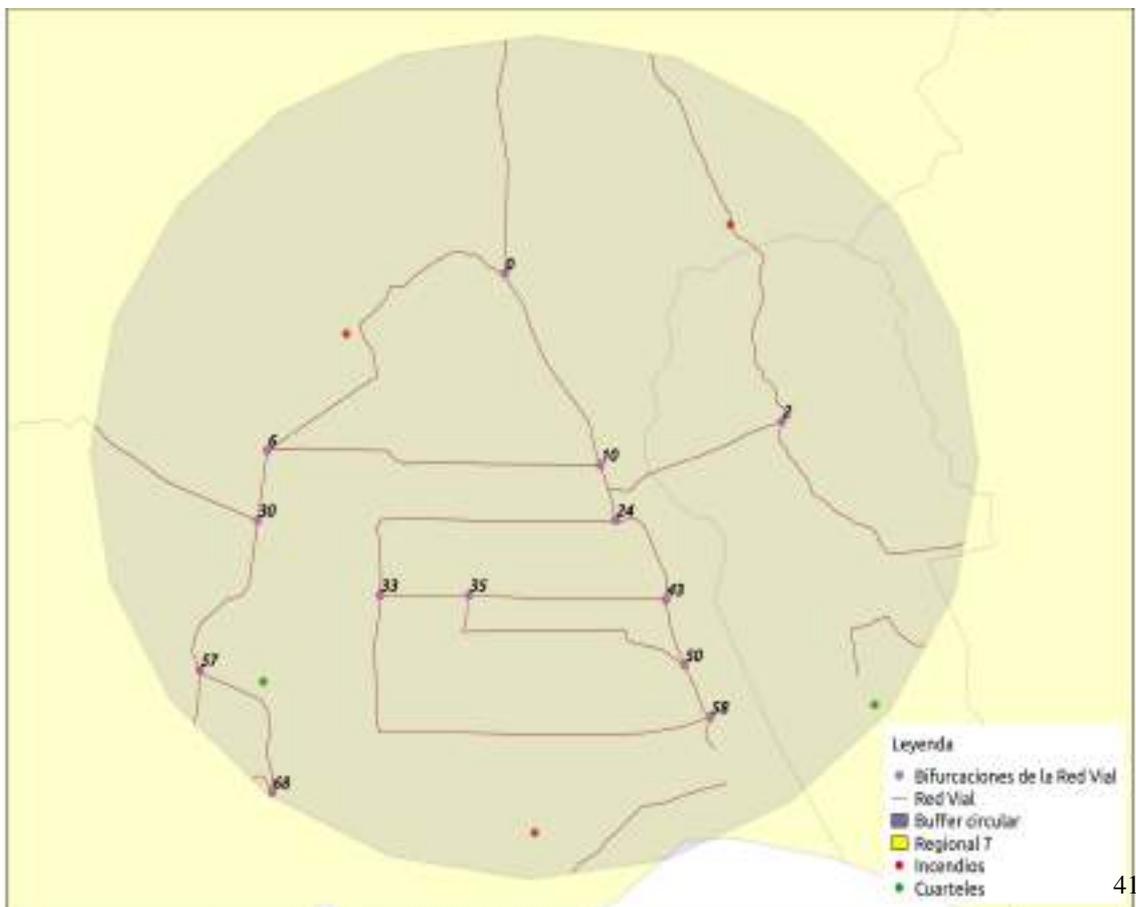


(b)

Figure 3.8: (a) Obtención de los cuarteles (b) Reducción del área de interés



(a)



(b)

Figure 3.9: (a) Área de interés reducida, mediante el buffer (b) Bifurcaciones de la Red Vial de 3.9b

bien, se borra la columna y se calcula de nuevo el id). Si nos olvidamos de esto, va a saltar una excepción avisándonos cuando se corra el programa.

Además a la capa de bifurcacion se le agregan dos columnas **X** e **Y**, para guardar las coordenadas de cada punto en coordenadas planas.

La capa de Red Vial tiene algunos cortes en los caminos, ver imagen 3.9a. Para lo cual fue necesario editarla, para agregar los tramos faltantes. Para el caso del ejemplo 2 no hizo falta editar la capa.

La capa de **incendios** también fue modificada agregando una columna llamada **Nombre**, que indica el nombre del incendio. Y sus coordenadas **x** e **y** respectivamente.

3.2.6 Closest point search (Detección del punto más cercano de camino para el problema AA)

En esta sección vamos a describir cómo se obtuvo el punto más cercano de un camino desde un incendio a la capa Red Vial para el problema AA, para el ejemplo VD.

Este camino es agregado en la capa geográfica “Red Vial” por la unidad Closest point search. Este preprocesamiento queda manualmente, pero a futuro se puede automatizar.

1) Para cada incendio (mostrados en la figura 3.10) se calcula un mapa de distancia de 500 píxeles que es el tamaño del área 1 que estamos trabajando, mediante la herramienta de Envi ‘Calculate Buffer Zone’ (ver imagen 3.11a). Un mapa de distancia es un raster, dónde cada píxel tiene la distancia de éste hasta el punto con el cuál fue creado (para nuestro caso es el punto de incendio).

2) Se crea la máscara de los caminos (ver imagen 3.11b) con la capa de vegetación de fondo, previamente recortada para esta zona de interés. Ésta fue recortada usando la herramienta ‘Clip raster by mask.’ de QGIS.

3) Se multiplica la máscara de caminos con el buffer (construido en 2).

Id incendio	Valor	Columna	Fila
2	18.3848	258	166
1	1.0	53	273
0	6.82843	103	107

Tabla 3.9: Detalle de los puntos más cercanos a los caminos para los incendios, para el ejemplo VD

Mediante el archivo de python lectura.py (adjuntado en el paquete entregable de código), obtenemos el píxel con el mínimo valor (ver tabla 3.9) para los incendios 2 ,1 y 0 respectivamente.

Estos serán los píxeles más cercano del incendio 2, 1 y 0, a los cuál crearemos una línea. Previamente se ubica el píxel para obtener sus coordenadas (mediante Envi).

Obtenemos las coordenadas esféricas o geográficas (wgs-84), para el incendio 2:

E: -64.52268336
N: -32.21010842

transformadas a planas (PosGar 94, argentina zona4) en metros, para el incendio 2:

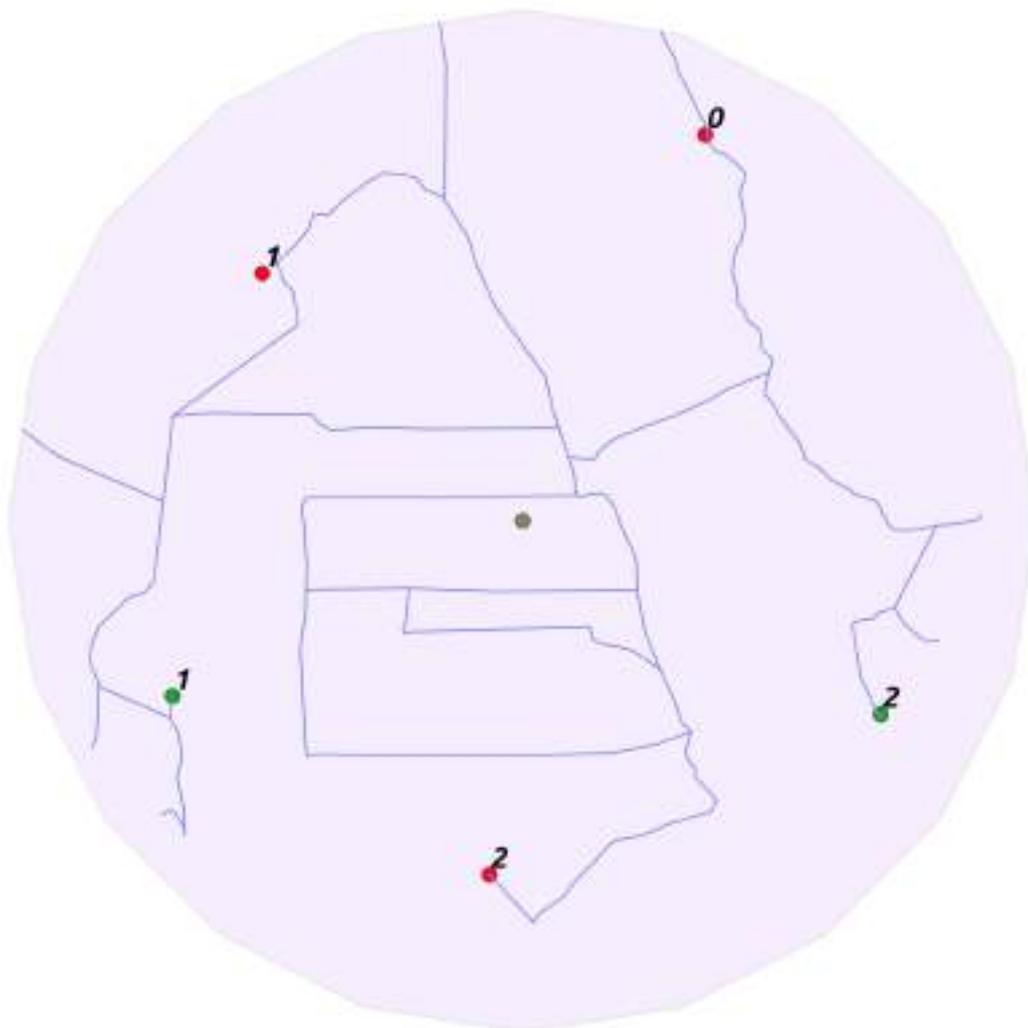


Figure 3.10: Cálculo de distancia de un incendio hacia el punto de camino más cercano

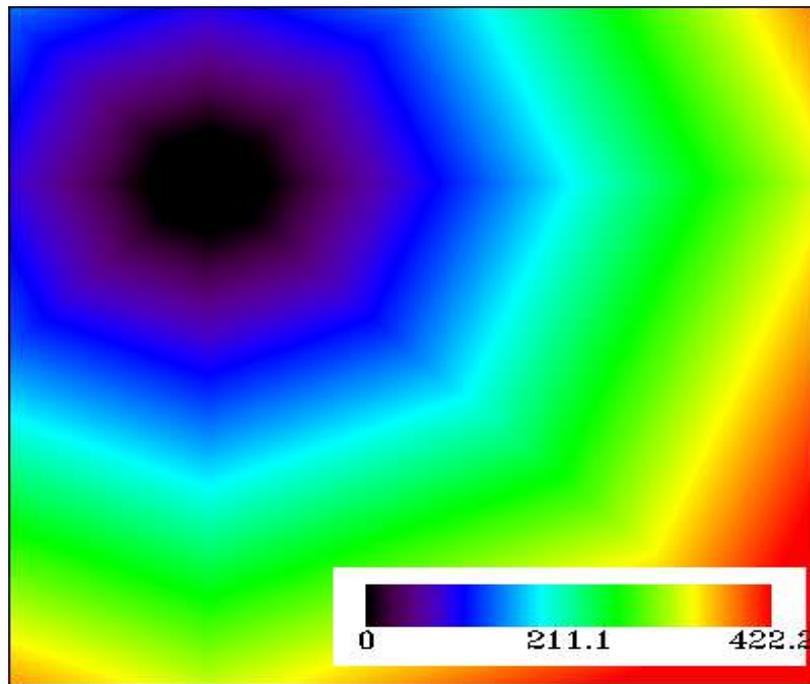
E: 4356438.5894
N: 6435797.6922

Para el incendio 0, las coordenadas esféricas o geográficas:

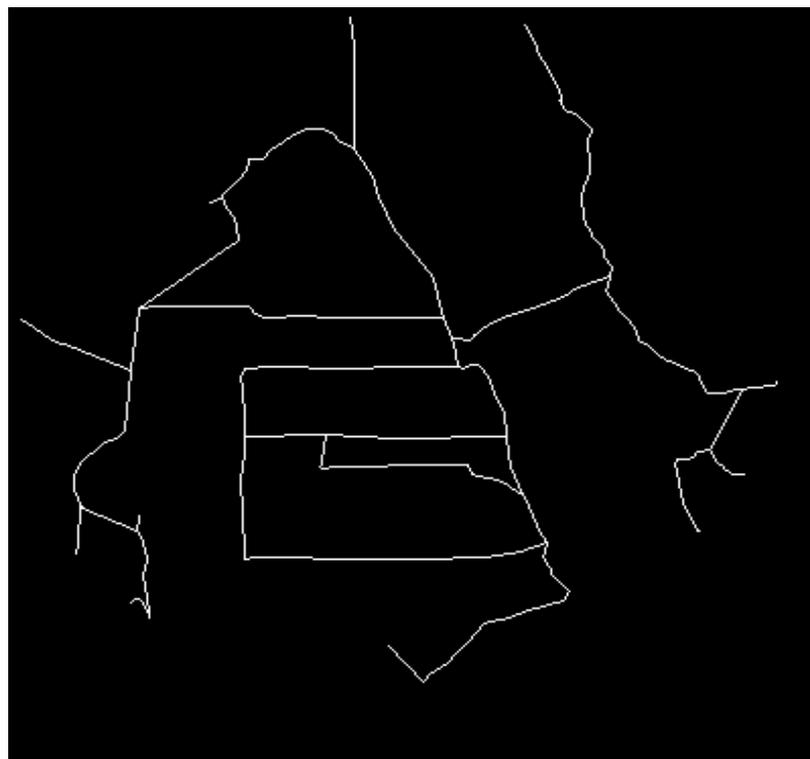
E: -64.49977189
N: -32.12660823

Transformadas a coordenadas planas (PosGar 94) en metros:

E: 4358470.2640
N: 6445059.1683



(a)



(b)

Figure 3.11: (a) Mapa de distancia, creado con Envi de 500 píxeles (b) Máscara de los caminos

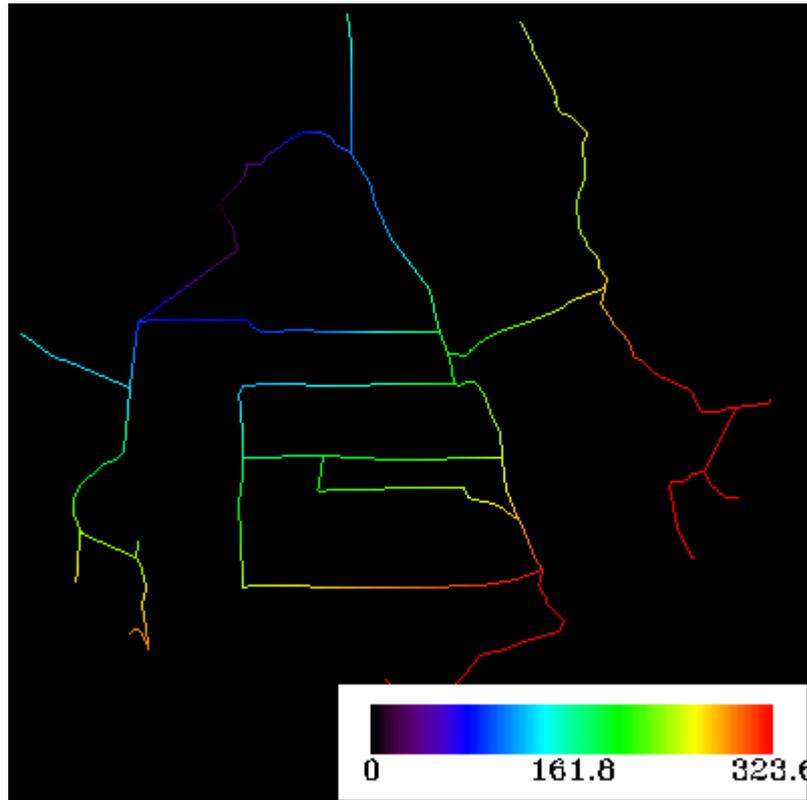


Figure 3.12: Distancia hacia el punto más próximo del incendio 1

Para el incendio 1, en coordenadas geométricas:

E: -64.55329894

N: -32.1402272

Para el incendio 1, obtenemos las coordenadas planas (PosGar 94) en metros:

E: 4353439.8671

N: 6443507.3480

	Coordenadas planas	
	E	N
Incendio 0	4358470.264	6445059.168
Incendio 1	4353439.867	6443507.348
Incendio 2	4356438.589	6435797.692

Tabla 3.10: Detalle de los puntos más cercanos a los caminos para los incendios, para el ejemplo 1

La tabla 3.10 resume las coordenadas planas, de los puntos más cercanos a los incendios en algún camino.

Se creó un csv con las coordenadas resumidas en dicha tabla, para poder superponerlo al shapefile de Red Vial.

Se creó la línea como un nuevo feature (mediante la herramienta de ArcGis) a la capa geográfica Red Vial.

Por último la capa de **Red** fue modificada mediante Arcgis, (con la herramienta **split line at points**, con las bifurcaciones) para el cálculo óptimo de los costos.

Se le agregó una columna con el nombre **LONG**, que tiene la longitud de cada línea en el shapefile de Red Vial.

Se actualizó los ids (**ID**) de las líneas que pertenecen a las capa de **Red**, para que fueran distintos.

3.2.7 Closest point search (Detección del punto más cercano de camino para el problema GC)

En esta sección explicaremos el procedimiento para encontrar los puntos de camino más cercanos al incendio, para las cisternas.

Como las cisternas no pueden entrar a caminos no digitalizados (i.e. caminos que fueron agregados cómo en la sección 3.2.6), fue necesario asignar un tipo a dichos caminos DeTierra2 para que posteriormente el PPG los tuviera en cuenta y avanzar al punto (bifurcación) más cercano al incendio pero sin pasar por los caminos del tipo 'deTierra2'.

Entonces así se logra encontrar los puntos más cercanos al incendio de caminos (para este caso de tipos: Asfaltado, Consolidado y DeTierra), para el caso de las cisternas.

3.2.8 Closest point search (Detección del punto más cercano de las fuentes de agua, problema 2 GC)

En ésta sección explicaremos cuáles fueron los cambios necesarios a las capas, para que el PPGenerator encontrara puntos de agua más cercanos para la recarga de agua para las cisternas.

1) Se hizo una intersección entre la capa de caminos y la capa de agua permanente. Mediante la herramienta de QGIS Line intersections. La capa permanente fue editada, para agregarles sus coordenadas a cada punto (X e Y). Y también se le agregó una columna con el **id**.

2) Se hizo una unión entre la capa (obtenida en el punto 1) y las bifurcaciones, esta nueva capa será para el segundo problema nuestra nueva capa de bifurcaciones. Se la editó para agregarles las coordenadas y actualizar el id (para no incluir ids repetidos).

Dado que en la sección: 3.2.5 habíamos llegado a que esta es nuestra nueva área de interés (en relación al buffer circular) es con el cual vamos a intersecar el aguaPermanente. La capa de agua permanente (ver imagen 3.13) fue obtenida mediante la unión de las siguientes capas:

- cursosDeAguaR7
- hidrografía

Ambas pertenecen al Proyecto Mapear, dado que para esta área la capa de cuerposDeAgua del IGN tenía algunos errores.

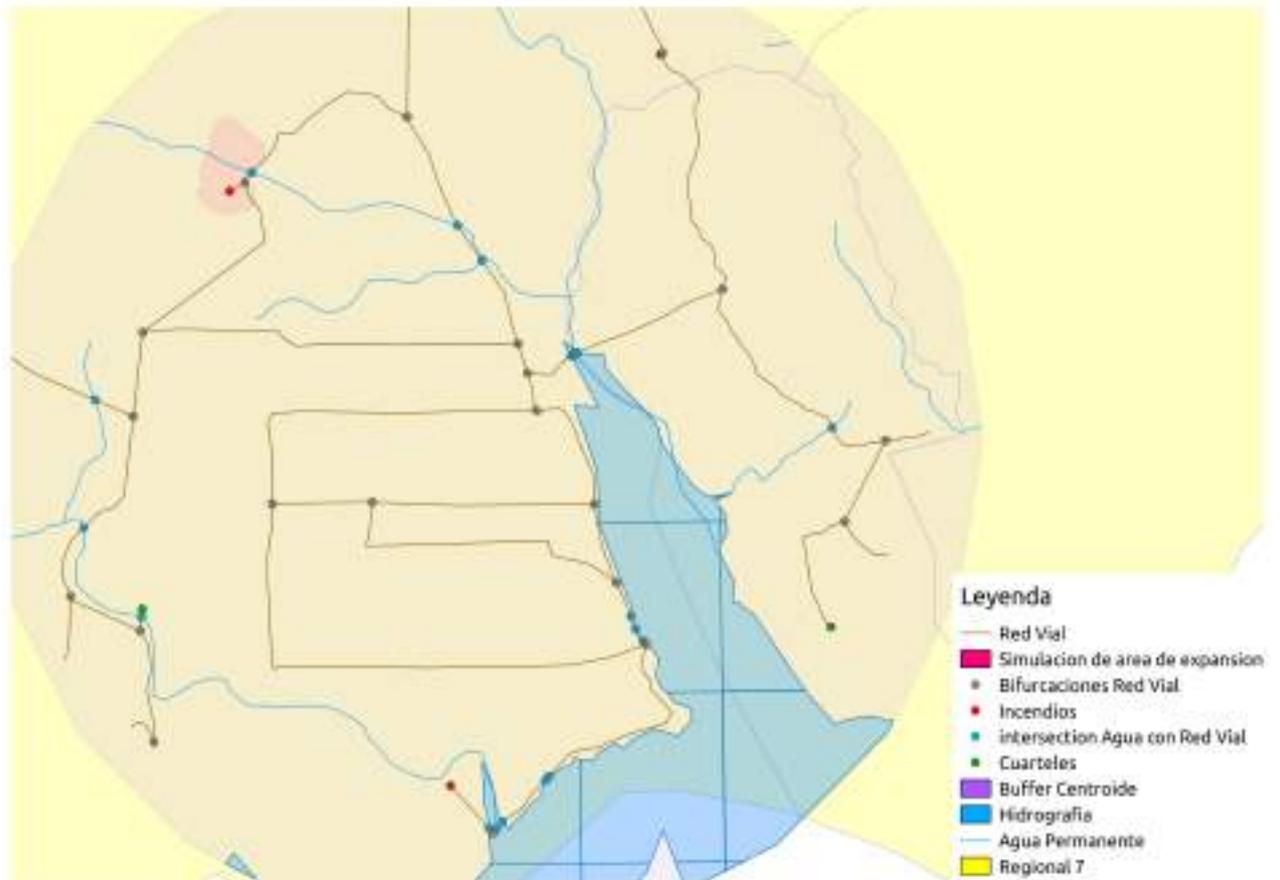


Figure 3.13: Capas geográficas del problema 2

La capa hidrografía fue transformada de polígonos a líneas, mediante la herramienta de QGIS.

También la capa de Red Vial fue modificada mediante Arcgis (con la herramienta **split line at points**) con las bifurcaciones para el cálculo óptimo de los costos i.e. se calcula la longitud de cada tramo.

Se le agregó una columna con el nombre **LONG**, que tiene la longitud de cada línea en el shapefile de Red Vial.

Entonces PPG encontrará el punto más cercano desde un punto más cercano al camino previamente calculado, a un punto que esté en la capa de intersecciones esto quiere decir que efectivamente es un punto de agua.

Solución del problema de planificación modelizado

4.1 Algoritmo seleccionado para el problema AA

Considerando que el objetivo principal del presente trabajo es presentar un sistema para el soporte de la planificación de las actividades de la lucha contra el fuego y mostrar la factibilidad del mismo se optó por seleccionar para la solución del problema del camino más corto al algoritmo A* dejando como trabajo a futuro la exploración de otros algoritmos que puedan escalar mejor para problemas más grandes.

El algoritmo de búsqueda A* (pronunciado 'A estrella') resuelve el problema de los caminos más cortos entre un par de vértices usando la heurística para intentar agilizar la búsqueda. Este algoritmo se clasifica dentro de los algoritmos de búsqueda en grafos (ver apéndice C.2 para más información). Este algoritmo encuentra, siempre y cuando se cumplan ciertas determinadas condiciones el camino de menor coste entre un nodo origen y uno objetivo.

Este algoritmo A* utiliza una función de evaluación $f(n) = g(n) + h'(n)$, donde:

$h'(n)$ representa el valor heurístico del nodo a evaluar, desde el actual n , hasta el final y $g(n)$ el coste real del camino recorrido para llegar a dicho nodo n , desde el nodo inicial.

A* mantiene dos estructuras de datos auxiliares, que podemos denominar **abiertos** implementado como una cola de prioridad (ordenada por el valor $f(n)$ de cada nodo) y **cerrados** donde se guarda la información de los nodos que ya han sido visitados.

En cada paso del algoritmo se expande el nodo que esté primero en abiertos y en caso de que no sea un nodo objetivo, calcula la $f(n)$ de todos sus hijos, los inserta en abiertos y pasa el nodo evaluado a cerrados.

El algoritmo es una combinación entre búsquedas del tipo primero en anchura con primero en profundidad: mientras que $h'(n)$ tiende a primero en profundidad, $g(n)$ tiende a primero en anchura. De este modo, se cambia de camino de búsqueda cada vez que existen nodos más prometedores.

Propiedades Como todo algoritmo de búsqueda en amplitud, A* es un algoritmo **completo** (ver apéndice A): en caso de existir una solución, siempre dará con ella.

Si para todo nodo n del grafo se cumple $g(n)=0$, nos encontramos ante una búsqueda voraz. Si para todo nodo n del grafo se cumple $h(n)=0$, A^* pasa a ser una búsqueda de coste uniforme no informada.

Para garantizar la optimalidad del algoritmo la función $h(n)$ debe ser heurística admisible, esto es que no sobrestime el coste real de alcanzar el nodo objetivo.

Un ejemplo obvio de una heurística admisible es la distancia en línea recta h_{DLR} que usamos para ir al nodo destino (ver [17]). La distancia en línea recta es admisible porque el camino más corto entre dos puntos cualquiera es una línea recta, entonces la línea recta no puede ser una sobrestimación.

De no cumplirse dicha condición el algoritmo pasa a denominarse simplemente A y a pesar de seguir siendo completo, no se asegura que el resultado obtenido sea el camino de coste mínimo.

Complejidad computacional La complejidad computacional del algoritmo está íntimamente relacionada con la calidad de la heurística que se utilice en el problema. En el peor caso con una heurística de pésima calidad la complejidad será exponencial, mientras que en el caso mejor con una buena $h'(n)$ el algoritmo se ejecutará en tiempo lineal.

Complejidad en memoria El espacio requerido por A^* para ser ejecutado es su mayor problema. Dado que tiene que almacenar todos los posibles siguientes nodos de cada estado, la cantidad de memoria que requerirá será exponencial con respecto al tamaño del problema. Para solucionar este problema, se han propuesto diversas variaciones de este algoritmo, como pueden ser RTA^* , IDA^* o SMA^* .

Implementación en pseudocódigo A continuación se presenta el pseudocódigo con breve descripción del algoritmo A^* .

```
1 function A*(start,goal)
2   closedset := the empty set // The set of nodes already evaluated.
3   openset := {start} // The set of tentative nodes to be evaluated,
4     initially containing the start node
5   came_from := the empty map // The map of navigated nodes.
6
7   g_score[start] := 0 // Cost from start along best known path.
8   // Estimated total cost from start to goal through y.
9   f_score[start] := g_score[start] + heuristic_cost_estimate(start, goal)
10
11   while openset is not empty and current is not goal
12     current := the node in openset having the lowest f_score[] value
13
14     remove current from openset
15     add current to closedset
16     for each neighbor in neighbor_nodes(current)
17       if neighbor in closedset
18         continue
19       tentative_g_score := g_score[current] + dist_between(current,
20         neighbor)
21
22       if neighbor not in openset or tentative_g_score < g_score[neighbor]
23         came_from[neighbor] := current
24         g_score[neighbor] := tentative_g_score
25         f_score[neighbor] := g_score[neighbor] + heuristic_cost_estimate
26           (neighbor, goal)
```

```

24         if neighbor not in openset
25             add neighbor to openset
26
27     if current = goal
28         return reconstruct_path(came_from, goal)
29     else
30         return failure
31
32 function reconstruct_path(came_from, current)
33     total_path := [current]
34     while current in came_from:
35         current := came_from[current]
36         total_path.append(current)
37     return total_path

```

Detalles de implementación Hay una serie de optimizaciones simples o detalles de implementación que pueden afectar significativamente el rendimiento de una aplicación A*. El primer detalle a destacar es la forma en la que cola de prioridad maneja lazos puede tener un efecto significativo en el rendimiento en algunas situaciones. Si los lazos son rotos la cola se comportará en una manera LIFO, A* se comportará como búsqueda en primero en profundidad, entre los caminos de igual costo (evitando explorar de más de una solución igualmente óptima).

Cuando se requiere un camino en el final de la búsqueda, es común mantener para cada nodo una referencia al padre de ese nodo. Al final de la búsqueda éstas referencias se pueden utilizar para recuperar el camino óptimo. Si estas referencias se mantienen entonces puede ser importante que el mismo nodo no aparezca en la cola de prioridades más de una vez (cada entrada corresponde a un camino diferente a el nodo, y cada uno con un costo diferente).

Un enfoque estándar aquí es comprobar si un nodo a punto de ser añadido ya aparece en la cola de prioridad. Si lo hace, entonces los punteros de prioridad y de los padres se cambian para corresponder a la ruta de menor coste. Cuando la búsqueda de un nodo en una cola va realizar esta comprobación, muchas implementaciones estándar de una pila mínima requieren $O(n)$ tiempo. Aumentar la pila con una tabla hash puede reducir esto a la constante de tiempo.

4.1.1 Librerías disponibles

A continuación se muestran las librerías disponibles que implementan el algoritmo A*.

Java

GUI de java disponible

<http://aima-java.googlecode.com/svn/trunk/aima-all/release/aima3ejavademos.html>

Código de java:

<https://code.google.com/p/aima-java/>

Java implementation of algorithms from Norvig And Russell's 'Artificial Intelligence - A Modern Approach 3rd Edition.'

Python

<https://code.google.com/p/aima-python/>

Python implementation of algorithms from Russell and Norvig's 'Artificial Intelligence: A Modern Approach'

<https://code.google.com/p/aima-python/wiki/ReadMe>

<https://wiki.python.org/moin/PythonGraphApi>

<http://igraph.sourceforge.net/doc/python/igraph.GraphBaseclass.html> calcula usando el algoritmo de dijkstra.

Se utiliza aima-python en la unidad PPSolver, con una heurística euclídea normal ($\sqrt{(a_x - b_x)^2 + (a_y - b_y)^2}$), i.e. la longitud del vector desde el origen al punto (A,B).

4.1.2 Pseudo código del sistema

A continuación se presenta el pseudocódigo del algoritmo relacionado a las autobombas:

```
1
2   crea el grafo
3
4   while numAutoNec >0
5
6       for cada incendio in lista_incendios
7           if incendio necesita > 0 autobombas
8               for cada cuartel in lista_cuarteles
9
10                  res = A*[cuartel, incendio]
11
12                  resulting_list.append((res,cuartel))
13
14
15                  resulting_path_incendio_cuartel = minium_path(resulting_list)
16
17
18   numAutoNec--
```

en la creación del grafo cada segmento no sólo se tiene en cuenta la longitud del segmento, si no es una multiplicación del costo del segmento por la longitud del mismo.

dónde lista_incendios lista de incendios ordenada de mayor a menor por área. El área de cada incendio es leída de la capa geográfica de simulación.

numAutoNec es el total de autobombas del problema actual necesarias para apagar todos los incendios. El mismo se inicializa con la suma de todas las autobombas necesarias para cada incendio, que se detallan en la capa geográfica de incendios.

En minium_path se crea una lista si la estación tiene recursos, luego se ordena y se obtiene el primero. A continuación se muestra el pseudocódigo de minium_path:

```
1   for i in path_list
2       #i es el par (ruta, idEstacion)
3       e = i[1]
4       r = i[0]
```

```

5     d = distancia_path(r, cba_dict)
6
7     if autobombas_de_la_estacion[e] > 0
8         path_distance_list_tuple.append((r,d,e))
9
10    sort_list = sorted(path_distance_list_tuple,r)
11
12    if len(sort_list) > 0
13        res = sort_list[0]
14        resulting_path = res[0]
15        minium_distance = res[1]
16        est = res[2]
17        update_dictionaries(cuartel,incendio,...)

```

dónde distancia_path calcula la distancia total, sumando todos los segmentos.

update_dictionaries: actualiza los recursos del incendio y el cuartel.

El orden del algoritmo autombombas en el peor caso será:

Peor caso: $a^n * n^2$ porque el $O(A^*) = a^n$ en el peor caso.

Y en el mejor caso el orden es : n^3 dado que el $O(A^*) = n$ en el mejor caso.

4.2 Algoritmos relacionados al problema GC

Para solucionar este problema, también utilizamos el algoritmo A^* . En este caso los nodos de partida son las bifurcaciones más próximas a los incendios, y los nodos destinos son los puntos de agua.

4.3 Resultados obtenidos en problemas AA y GC

En la siguiente sección, se muestran los resultados obtenidos por el PPSolver para el ejemplo VD.

La sección 4.3.1 se muestran una versión simplificada del ejemplo, sin costos a los caminos y luego otra versión con asignación de costos a los caminos. Los resultados resumidos muestran que variando el tipo de camino, se obtienen los resultados esperados i.e. la solución respeta los costos de los caminos.

La sección 4.3.2 muestra los resultados obtenidos variando la prioridad de los incendios (se muestra que PPSolver respeta la prioridad de los mismos).

Y en la sección 4.3.3 se muestran los resultados obtenidos variando la cantidad de iteraciones (se muestra que PPSolver respeta la cantidad de iteraciones).

4.3.1 PPSolver: costos según tipos de caminos

Ejemplo sin costo

La distancia se calcula mediante la suma de las longitudes de los segmentos, o la distancia de éstos.

$$d = d_1 + d_2 + \dots + d_n$$

A continuación se muestra como calcular la distancia de una estación a un incendio.

```
1 #Del incendio 3 a la estacion 1
2 nombreInc = "incendio3"
3 nombreEst = "Estacion1"
4
5 inc3_Est1 = GraphProblem(nombreInc, nombreEst, cordoba)
6 Res = [node.state for node in astar_search(inc3_Est1).path()]
7 print Res
```

La salida es:

```
['Estacion1', 54, 29, 1, 19, 20, 40, 47, 61, 0, 'incendio3']
```

Dónde 54, ...,0 son ids de los nodos del grafo de la imagen 4.1. La definimos como R1, porque para la subsección 4.3.1 la vamos a usar.

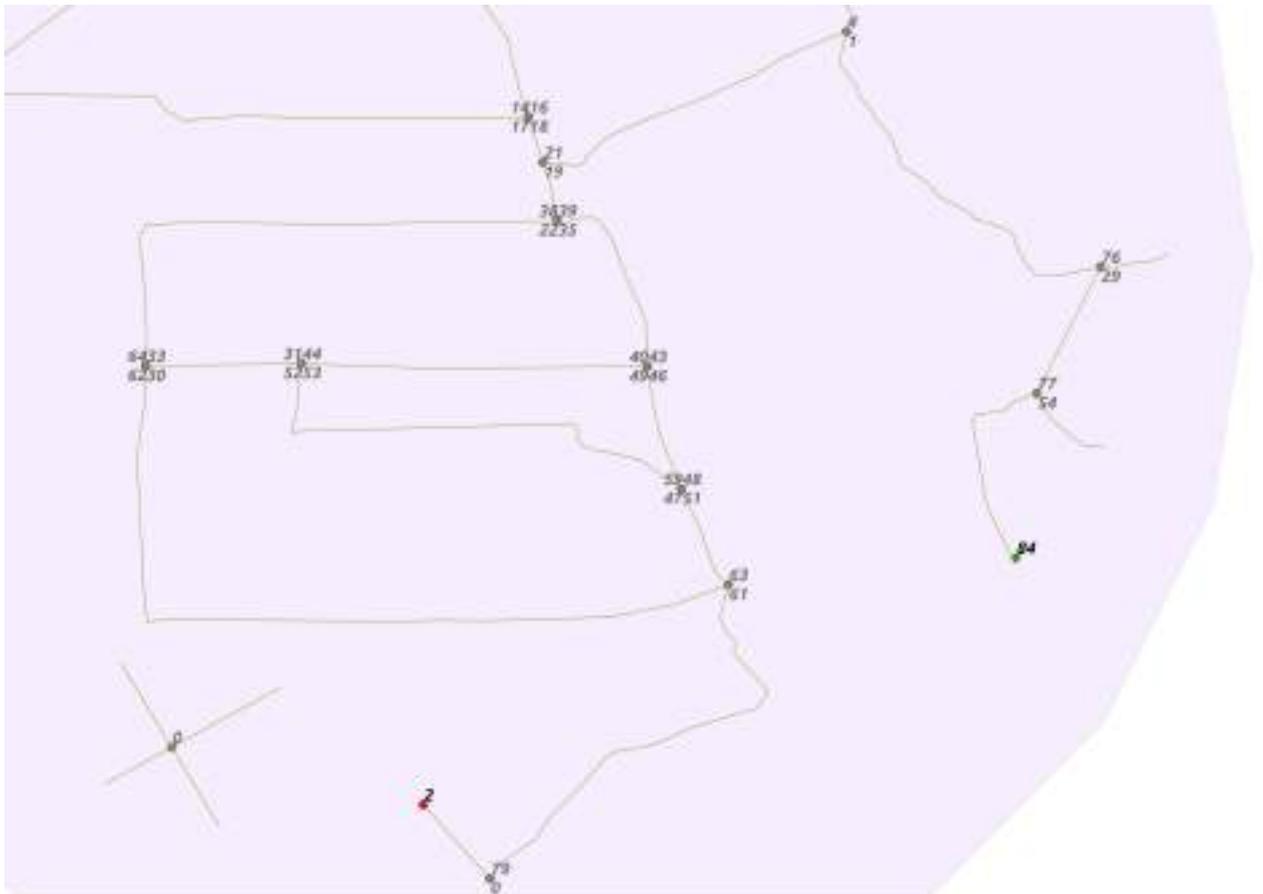


Figure 4.1: Cálculo sin Costo

Corroborando que el camino sea el óptimo

Se calculó la distancia total de éste camino y resultó: 17,98 m.

Para corroborar que dicho camino es el óptimo, se calcularon otros 2 caminos que se consideran ser posibles óptimos.

[‘Estacion1’, 54, 29, 1, 19, 20, 30, 61, 0, ‘incendio3’]

Definido como R2, que también va a ser usado en la sección 4.3.1. Cuya distancia resultó: 25,9 m

Y el tercer camino, definido como R3:

[‘Estacion1’, 54, 29, 1, 19, 20, 40, 32, 47, 61, 0, ‘incendio3’]

Con su respectiva distancia: 22,4 m.

En base a estas 3 distancias, podemos concluir que el algoritmo A* está calculando el camino óptimo.

Incluyendo costos

En la primera parte de la sección 4.3.1, calculamos la distancia mediante la suma de las distancias de los segmentos. Es decir $d = f(d_{T2}, d_T, d_A, d_C)$ queda definido para cualquier camino, dependiendo de la cantidad de segmentos y de cada segmento su tipo. Dónde d_{T2} es la distancia de un segmento de tipo Tierra2, d_T es la distancia de un segmento de tipo Tierra, d_A de tipo Asfalto y d_C de tipo consolidado.

Ahora consideremos el tiempo que tardamos en recorrer un camino, también va a quedar en función de la cantidad de segmentos y por cada segmento su tipo. Veamos por ejemplo:

$$t_c = t_{cA} + t_{cC} + t_{cT} + t_{cT2} \quad (4.1)$$

donde t_c es el tiempo que una autobomba tarda en recorrer un camino (el cual está compuesto por cuatro segmentos), éste será la suma de por el tiempo que tarde por asfalto t_{cA} , más por consolidado t_{cC} , más por t_{cT} de tierra, más por t_{cT2} de tierra2.

Recordemos que $V = E \div T$ (velocidad es espacio sobre tiempo), despejando tenemos

$$T = E \div V \quad (4.2)$$

Volviendo a la ecuación 4.1, si reemplazamos por la ecuación 4.2, resulta:

$$t_c = (1 \div V_A) * d_{cA} + (1 \div V_C) * d_{cC} + (1 \div V_T) * d_{cT} + (1 \div V_{T2}) * d_{cT2} \quad (4.3)$$

Y si definimos al costo como

$$C = 1 \div V \quad (4.4)$$

entonces resulta:

$$t_c = C_{cA} * d_{cA} + C_C * d_{cC} + C_{cT} * d_{cT} + C_{cT2} * d_{cT2} \quad (4.5)$$

Reemplazando por la ecuacion 4.4 obtenemos:

$$(C_{cT2}, C_{cT}, C_{cC}, C_{cA}) = (1 \div V_{T2}, 1 \div V_T, 1 \div V_C, 1 \div V_A)$$

$$\frac{1}{20}, \frac{1}{20}, \frac{1}{60}, \frac{1}{100} = (1, 1, 0.33, 0.2), \text{ si multiplicamos por } 100,$$

$$(100, 100, 33, 20) = C_{t2}, C_t, C_c, CA$$

Corroborando que el camino sea el óptimo

Para corroborar que nos sigue devolviendo el camino óptimo, con los caminos previamente calculados le cambiamos el tipo a ciertos segmentos.

Recordemos:

R1 = ['E1', 54, 29, 1, 19, 20, 40, 47, 61, 0, 'i3']

R2 = ['E1', 54, 29, 1, 19, 20, 30, 61, 0, 'i3']

R3 = ['E1', 54, 29, 1, 19, 20, 40, 32, 47, 61, 0, 'i3']

Dónde i3 es incendio3 y E1 es Estacion1.

Sin cambiar los tipos (i.e. dejando los tipos como estan en la capa del IGN), hicimos los cálculos y obtenemos los siguientes tiempos:

t1 = 18,005 minutos

t2 = 38,57 minutos

t3 = 36,35 minutos

Dónde t1 es en relación a R1, ídem para t2 con R2 y t3 con R3.

Caso: Tierra / Tierra / Tierra

En el caso que R1, R2 y R3 se les asigna el tipo tierra, obtenemos los siguientes tiempos:

t1: 53,94 minutos

t2: 72,06 minutos

t3: 70,34 minutos

Caso: Consolidado / consolidado / consolidado

En el caso que R1, R2 y R3 se les asigna el tipo consolidado, obtenemos los siguientes tiempos:

t1: 17,9 minutos

t2: 25,26 minutos

t3: 23,35 minutos

Caso: Pavimentado / pavimentado / pavimentado

En el caso que R1, R2 y R3 se les asigna el tipo consolidado, obtenemos los siguientes tiempos:

t1: 10,78 minutos

t2: 15,21 minutos

t3: 14,06 minutos

Caso: Tierra / Asfalto / Tierra

En éste caso tendremos la siguiente asignación:

R1: de tipo Tierra (Todos los segmentos son de asfalto, excepto los que intersectan) R2: de tipo Asfalto
R3 : de tipo Tierra

Cuando decimos R1: de tipo Tierra no queremos decir que todo el camino va a ser tierra, si no más bien los segmentos que no se intersecten con los otros caminos esos van a ser modificados.

En el caso de R2 los segmentos que no intersectan son:

línea 192 = que va desde el 61 al 30 va a ser pavimentado (porque pertenece a la ruta R2)
línea 181 = que va desde el 30 al 20 va a ser pavimentado (porque pertenece a la ruta R2)

Calculando los tiempos para estas nuevas rutas (en el sentido de tipos de segmentos nuevos) obtenemos:

t1: 53,94 minutos
t2: 49,05 minutos
t3: 70,34 minutos

El software (toma el shapefile de caminos donde se modifican los tipos de los segmentos mencionados arriba) y nos devuelve:

R2 = ['Estacion1', 54, 29, 1, 19, 20, 30, 61, 0, 'incendio3']

Que es la ruta, con menor costo.

Caso: Tierra / Tierra / Asfalto

En éste caso tendremos la siguiente asignación:

R1: de tipo Tierra
R2: de tipo Tierra (Todos los segmentos van a ser de tipo asfalto excepto los que intersectan con otra ruta)
R3: de tipo Asfalto

R1 = ['E1', 54, 29, 1, 19, 20, 40, 47, 61, 0, 'i3']

R2 = ['E1', 54, 29, 1, 19, 20, 30, 61, 0, 'i3']

R3 = ['E1', 54, 29, 1, 19, 20, 40, 32, 47, 61, 0, 'i3']

No vamos a poder elegir R3 salvo que Ca sea negativo, dado que R3 es casi igual a R1 en la diferencia de que se agrega un nodo más para ir al nodo 40 desde 47 (en el caso de R3 es 32).

Todos los casos nos devuelven la ruta esperada, por lo tanto modificando el tipo a ciertos segmentos podemos hacer que el PPSolver elija otra ruta en relación al caso nominal.

4.3.2 PPSolver: prioridad

En esta sección mostraremos que cambiando la prioridades de los incendios, las soluciones encontradas son las esperadas ie PPSolver asigna las prioridades de acuerdo al área de expansión.

La capa de salida mencionada en 3.2.2 fue utilizada como una nueva capa de entrada para el PPG. Donde para cada id de cada incendio, se cuenta con el área del mismo en el shapefile (**id** y **area**). Luego dichos incendios son ordenados (por el PPSolver) de mayor a menor de acuerdo a ésta área, para la asignación de recursos de las estaciones. Nóte que los ids de los incendios coinciden con los que se encuentra en la capa de incendios.

La capa de **cuarteles** fue modificada, en la cuál se le agregó una columna (denominada **AUTOBOMBAS**) mediante una herramienta de QGIS, que indica el número de autobombas que dispone cada cuartel. También se le agregó una columna (denominada **CISTERNAS**), que indica el número de cisternas que dispone cada cuartel.

En la capa de **incendios**, dos columnas fueron agregadas (nombradas **AutoBomNec** y **CistNec**) para indicar cuántas autobombas y cisternas son necesarias para apagar un incendio respectivamente.

Las siguientes prioridades para los incendios, se definen para los siguientes ejemplos:

[(1, 627297), (0, 1311), (2, 2)]

I.e. el incendio con id 1 tiene más prioridad, siguiendo el incendio 0 con menos prioridad y concluyendo con el incendio 2 que tiene la prioridad más baja. (Ver tabla 4.1)

Id de incendio	Prioridad
0	2
1	1
2	3

Tabla 4.1: Prioridad inicial de los incendios

La tabla 4.1 muestra la prioridad inicial de los incendios, es decir que se tomará dicha prioridad salvo que se aclare que va a ser modificada.

Id de incendio	AutoBomNec
0	1
1	1
2	1

Tabla 4.2: Recursos necesarios por incendio, para el ejemplo 1

Asumiendo que para cada incendio es necesario sólo una autobomba para apagarlo (ver tabla 4.2). Esto es seteado así para demostrar que la prioridad de los incendios se respeta por cada iteración, es decir se encuentran las soluciones esperadas.

La tabla 4.3 muestra un resumen de los ejemplos que serán mostrados en esta sección.

Caso 1) 0 Recursos para la Estacion83 y para la Estacion84 (Ver tabla 4.4).

Número de caso	Nombre del ejemplo	Cantidad de iteraciones	Prioridad
1	Ejemplo 1(Villa del Dique)	Cero iteraciones	Prioridad inicial
2	Ejemplo 1(Villa del Dique)	Con una iteración	Prioridad inicial
3	Ejemplo 1(Villa del Dique)	Con una iteración	Prioridad cambiada

Tabla 4.3: Resumen de los problemas planteados con prioridades

Id de cuartel	AUTOBOMBAS
83	0
84	0

Tabla 4.4: Recursos disponibles por cuartel, para el caso 0

Obtenemos:

```

-----
[(1, 627297), (0, 1311), (2, 2)]
incendio1
Estacion83
Estacion84
[]
No alcanza los recursos
incendio0
Estacion83
Estacion84
[]
No alcanza los recursos
incendio2
Estacion83
Estacion84
[]
No alcanza los recursos
----->>>>>>>>>>
{0: [], 1: [], 2: []}

```

Caso 2) Con 1 recurso para la Estacion83 y dos para la Estacion84, y con prioridad inicial para los incendios:

Id de cuartel	AUTOBOMBAS
83	1
84	2

Tabla 4.5: Recursos disponibles por cuartel, para el caso 1

En la tabla 4.5 se muestran los recursos disponibles por cuartel para el caso actual.

Obtenemos la siguiente solución:

```

incendio1
Estacion83
Estacion84
[['Estacion83', 71, 57, 23, 5, 82, 'incendio1'], 433765.0, 83),
(['Estacion84', 54, 29, 1, 19, 9, 2, 82, 'incendio1'], 626716.3830500001, 84)]
incendio0
Estacion83
Estacion84
[['Estacion84', 54, 29, 1, 80, 'incendio0'], 223077.0, 84),
(['Estacion83', 71, 57, 23, 5, 9, 19, 1, 80, 'incendio0'], 469779.38305, 83)]
incendio2
Estacion83
Estacion84
[['Estacion84', 54, 29, 1, 19, 20, 40, 47, 61, 0, 'incendio2'], 561333.3830500001, 84),
(['Estacion83', 71, 57, 23, 5, 9, 19, 20, 40, 47, 61, 0, 'incendio2'], 640433.0, 83)]

```

```
----->>>>>>>>>>
{0: ['Estacion84', 54, 29, 1, 80, 'incendio0'], 1: ['Estacion83', 71, 57, 23, 5, 82, 'incendio1'],
2: ['Estacion84', 54, 29, 1, 19, 20, 40, 47, 61, 0, 'incendio2']}
```

Caso 3) Cambiando la prioridad de los incendios a: 2, 1 ,0 (con los siguientes valores: 627297, 1311, 2, ver tabla 4.6) y 1 recursos para la Estacion83 y 1 recursos para la Estacion84 (ver tabla 4.7):

Id de incendio	Prioridad
0	3
1	2
2	1

Tabla 4.6: Prioridad cambiada de los incendios, para el caso 3

Id de cuartel	AUTOBOMBAS
83	1
84	1

Tabla 4.7: Recursos disponibles por cuartel, para el caso 3

Obtenemos:

```
-----
[(2, 627297), (1, 1311), (0, 2)]
incendio2
Estacion83
Estacion84
[['Estacion84', 54, 29, 1, 19, 20, 40, 47, 61, 0, 'incendio2'], 561333.3830500001, 84), (['Estacion83',
, 71, 57, 23, 5, 9, 19, 20, 40, 47, 61, 0, 'incendio2'], 640433.0, 83)]
incendio1
Estacion83
Estacion84
[['Estacion83', 71, 57, 23, 5, 82, 'incendio1'], 433765.0, 83)]
incendio0
Estacion83
Estacion84
[]
No alcanza los recursos
----->>>>>>>>>>
{0: [], 1: ['Estacion83', 71, 57, 23, 5, 82, 'incendio1'], 2: ['Estacion84', 54, 29, 1, 19, 20, 40, 47,
61, 0, 'incendio2']}
```

4.3.3 PPSolver: Iteraciones para asignación de recursos

En esta sección mostraremos que cambiando el número de iteraciones, las soluciones encontradas son las esperadas ie PPSolver asigna los recursos de acuerdo al número de iteracion correctamente. Se muestran los resultados, para los problemas planteados en la tabla 4.8:

Caso 4): Para este problema se cuenta con los recursos mostrados en la tabla: 4.9, y se requieren los recursos mostrados en la tabla 4.10.

Número de caso	Nombre del ejemplo	Cantidad de iteraciones	Prioridad	ubicación en la tesis
4	VD	Con una iteracion	inicial	4.3.3
5	AG	Con una iteración	inical	A.5.1
6	VD	Con mas de una iteración (con 2)	inical	4.3.3
7	AG	Con mas de una iteración (con 2)	inical	A.5.1

Tabla 4.8: Resumen de los problemas planteados, con iteraciones

Id de cuartel	AUTOBOMBAS	CISTERNAS
83	1	1
84	1	1

Tabla 4.9: Recursos disponibles por cuartel, para el ejemplo 1

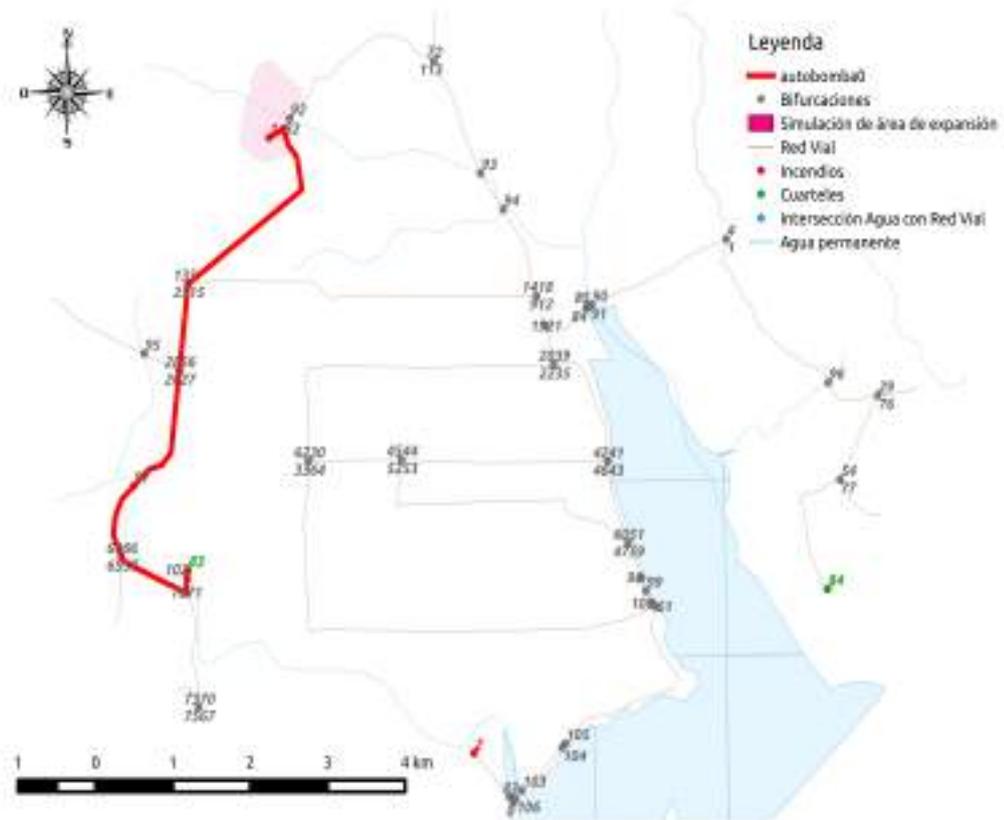
Id de incendio	AutoBomNec	CistNec
0	1	1
1	1	1
2	1	1

Tabla 4.10: Recursos necesarios por incendio, para el ejemplo 1

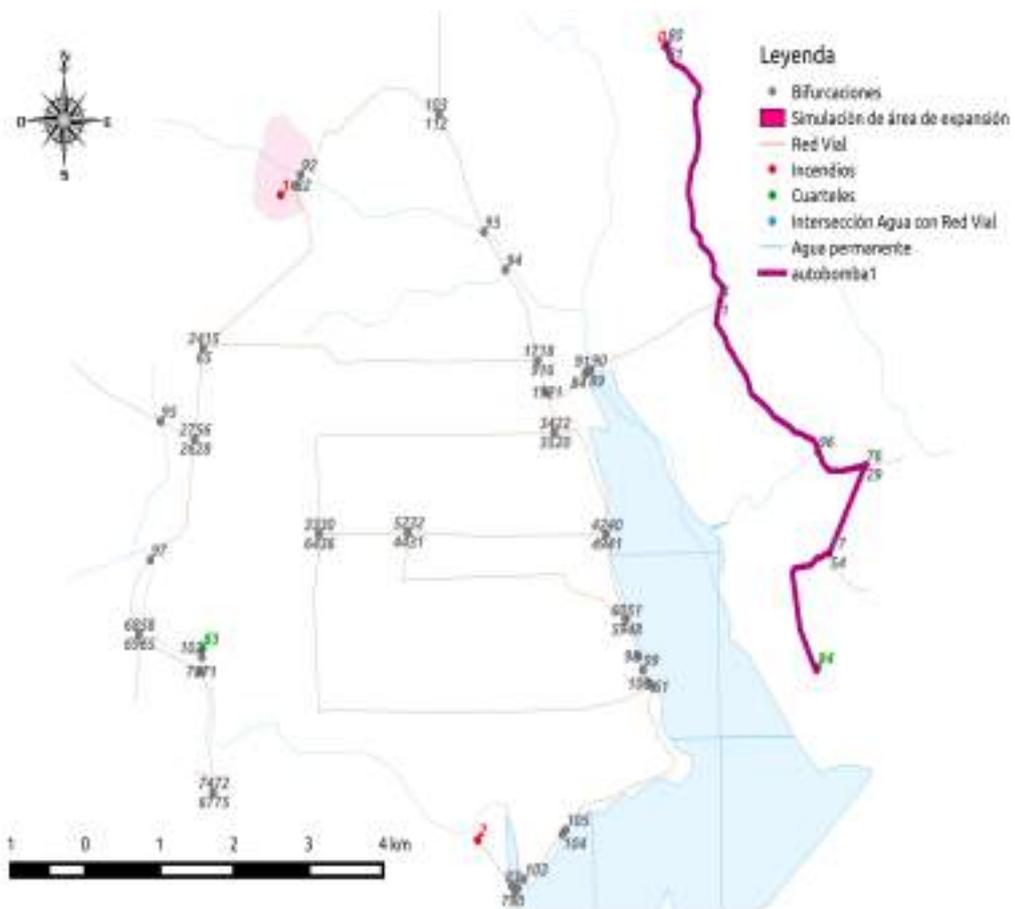
Las figuras 4.2a y 4.2b muestran el recorrido que tienen que hacer las autobombas 0 y 1 respectivamente desde los cuarteles hasta los incendios para el caso 4.

Las figuras 4.3a y 4.3b muestran el recorrido que tienen que hacer las cisternas 0 y 1 respectivamente desde los cuarteles hasta los incendios para el caso 4.

Las figuras 4.4a y 4.4b muestran el recorrido que tienen que hacer las cisternas 0 y 1 desde los incendios hasta el punto mas cercano de agua para recargar las mismas.

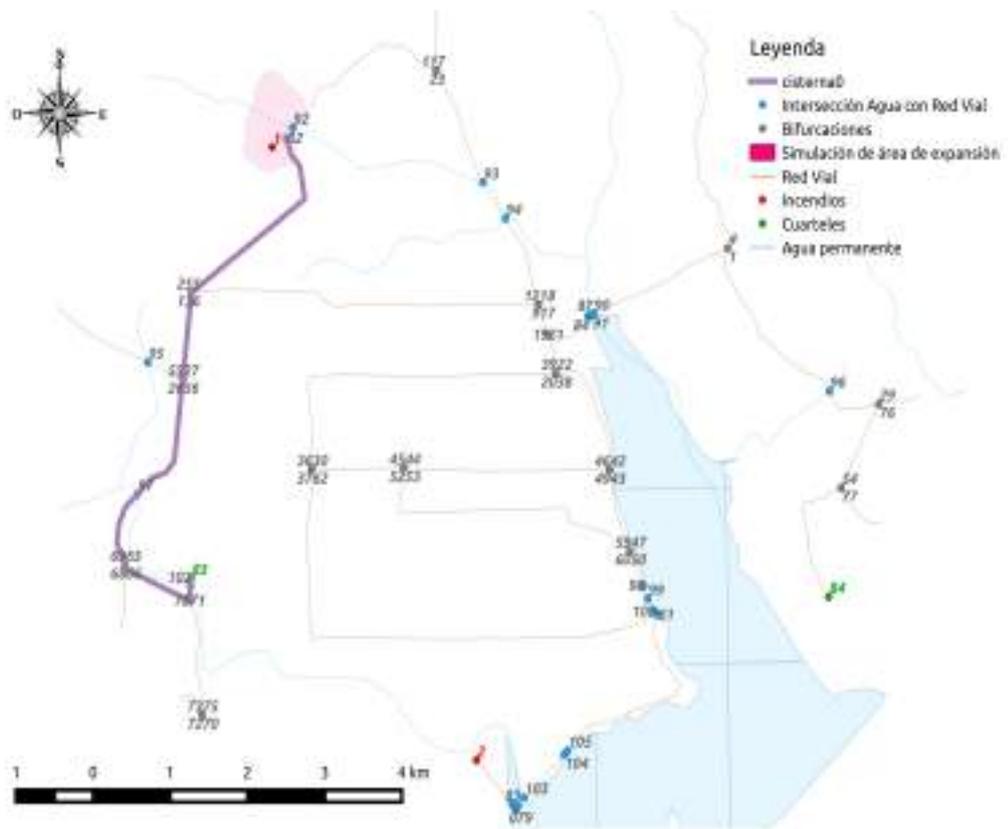


(a)

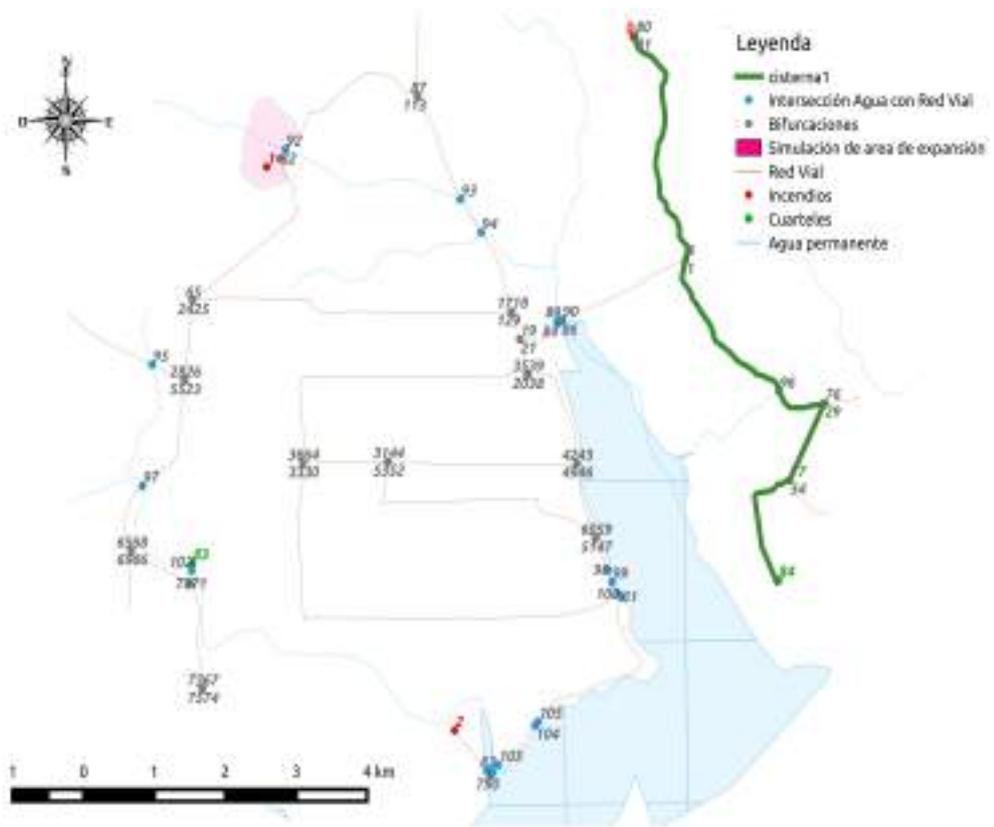


(b)

Figure 4.2: (a) Capa de información geográfica de salida para la autobomba 0, caso 4 (b) Capa de información geográfica para la autobomba 1, caso 4

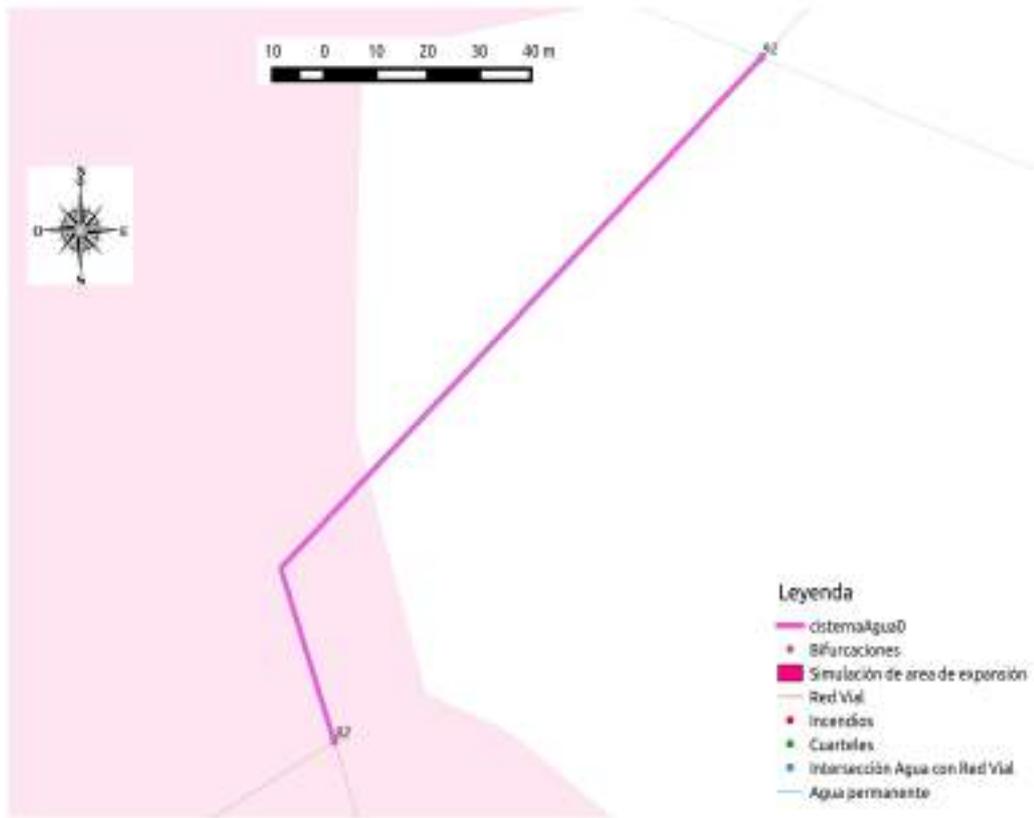


(a)

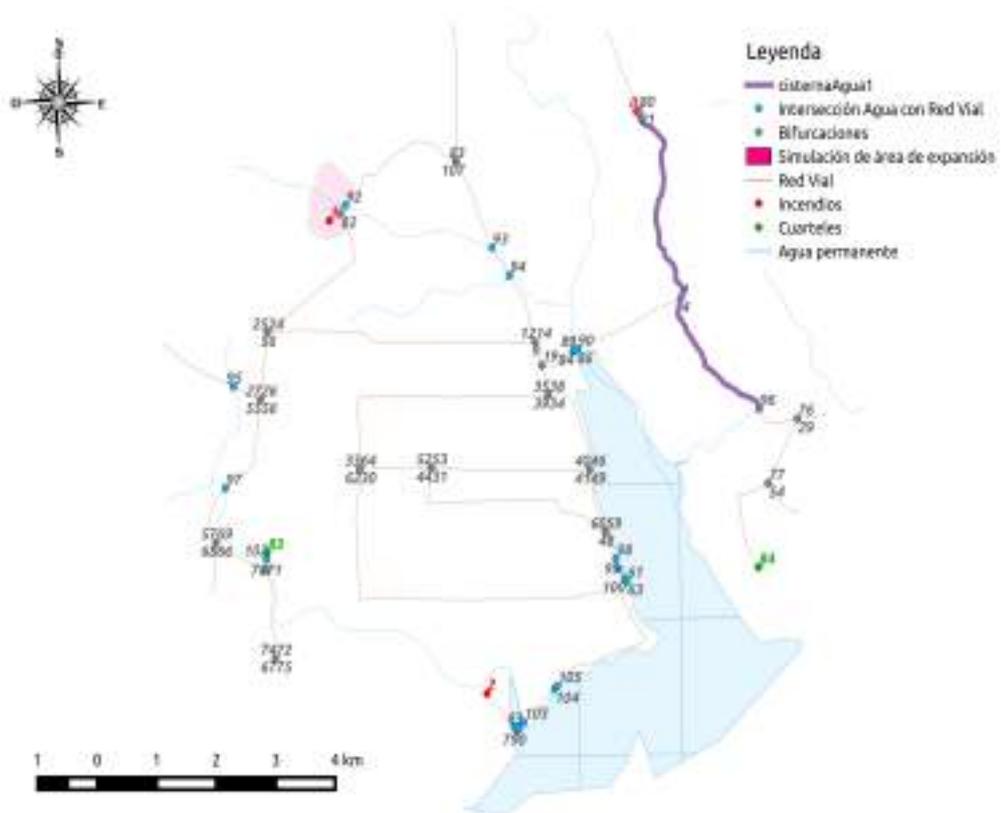


(b)

Figure 4.3: (a) Capa de información geográfica de salida para la cisterna 0, caso 4 (b) Capa de información geográfica de salida para la cisterna 1, caso 4



(a)



(b)

Figure 4.4: (a) Capa de información geográfica de salida para la cisterna de agua 0, caso 4 (b) Capa de información geográfica de salida para la cisterna de agua 1, caso 4

Caso 6): Resultados para el del ejemplo VD, con más de una iteración

Las figuras 4.5a, 4.5b, 4.6a y 4.6b muestran el recorrido que tienen que hacer las autobombas 0, 1, 2 y 3 respectivamente desde los cuarteles hasta los incendios para el caso 6.

Las figuras 4.7a, 4.7b, 4.8a y 4.8b muestran el recorrido que tienen que hacer las cisternas 0, 1, 2 y 3 respectivamente desde los cuarteles hasta los incendios para el caso 6.

Las figuras 4.9a y 4.9b muestran el recorrido que tienen que hacer las cisternas 0 y 1 desde los incendios hasta el punto más cercano de agua para recargar las mismas. Y para las cisternas 2 y 3 el resultado es mostrado por consola.

Los resultados mostrados en las figuras 4.5a, 4.5b, 4.6a, 4.6b son correctos. Porque en la primera iteración asigna 1 autobomba al incendio 2, luego otra al incendio 1 y por último al incendio 0. Y en la segunda iteración se le asigna una autobomba más al incendio 0.

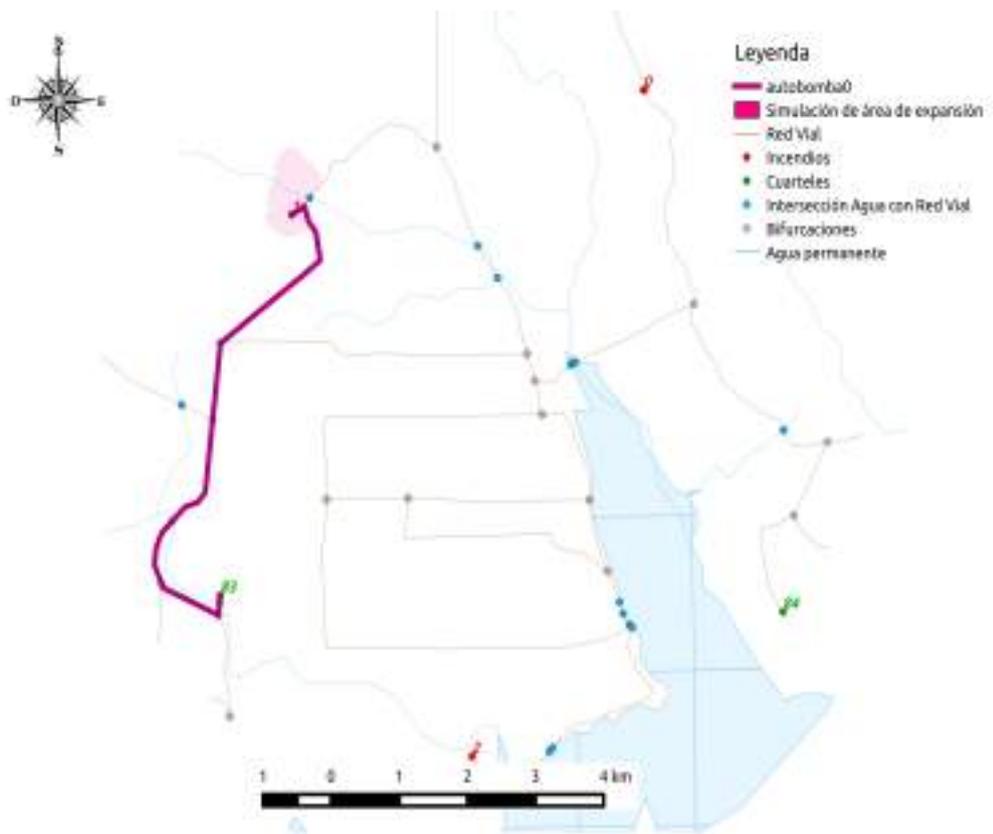
En las imágenes 4.7a, 4.7b, 4.8a, 4.8b se muestran las capas geográficas (formato shapefile) de las cisternas para el ejemplo VD.

Las imágenes 4.9a y 4.9b muestran los shapefiles de las cisternas de agua 2 y 1.

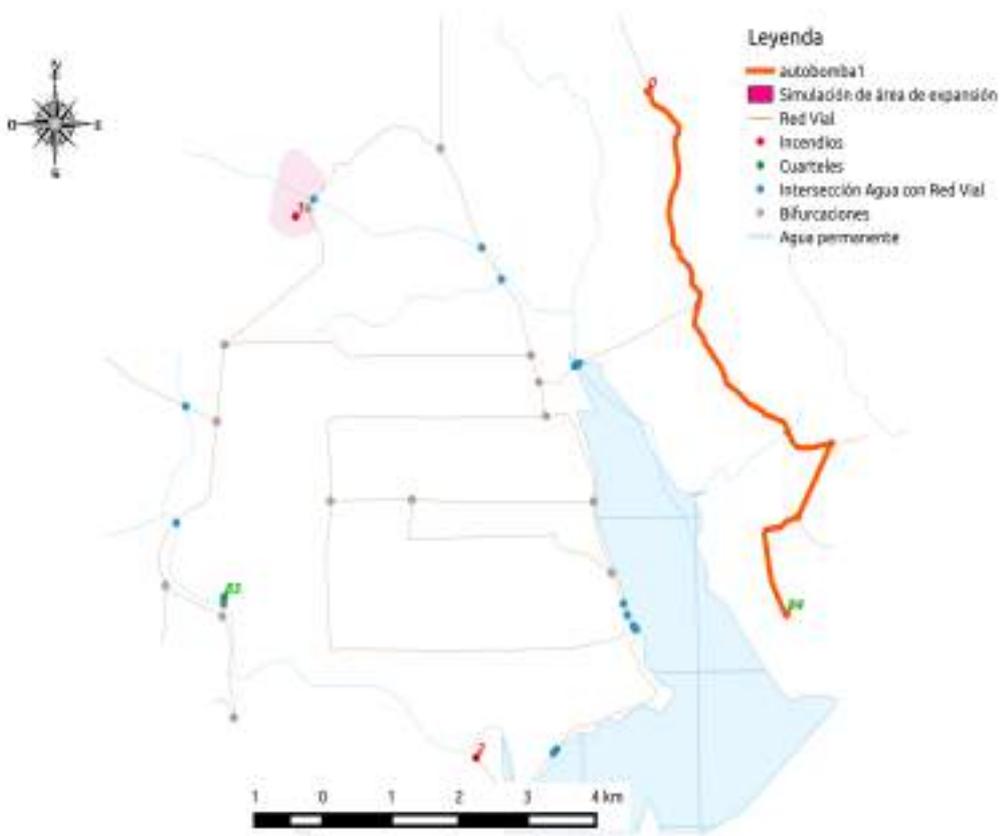
Para las cisternas de agua con ids 0 y 3 se muestran por consola los mensajes :

```
rutaRes:
[<osgeo.ogr.Feature; proxy of <Swig Object of type 'OGRFeatureShadow *' at 0xb72f7b90> >]
La bifurcacion ya es un punto de agua
[]
cuarteles
[83, 84]
83
rutaRes:
[<osgeo.ogr.Feature; proxy of <Swig Object of type 'OGRFeatureShadow *' at 0xb72f7b90> >]
La bifurcacion ya es un punto de agua
[]
```

Los resultados presentados en la sección 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3 son los esperados.

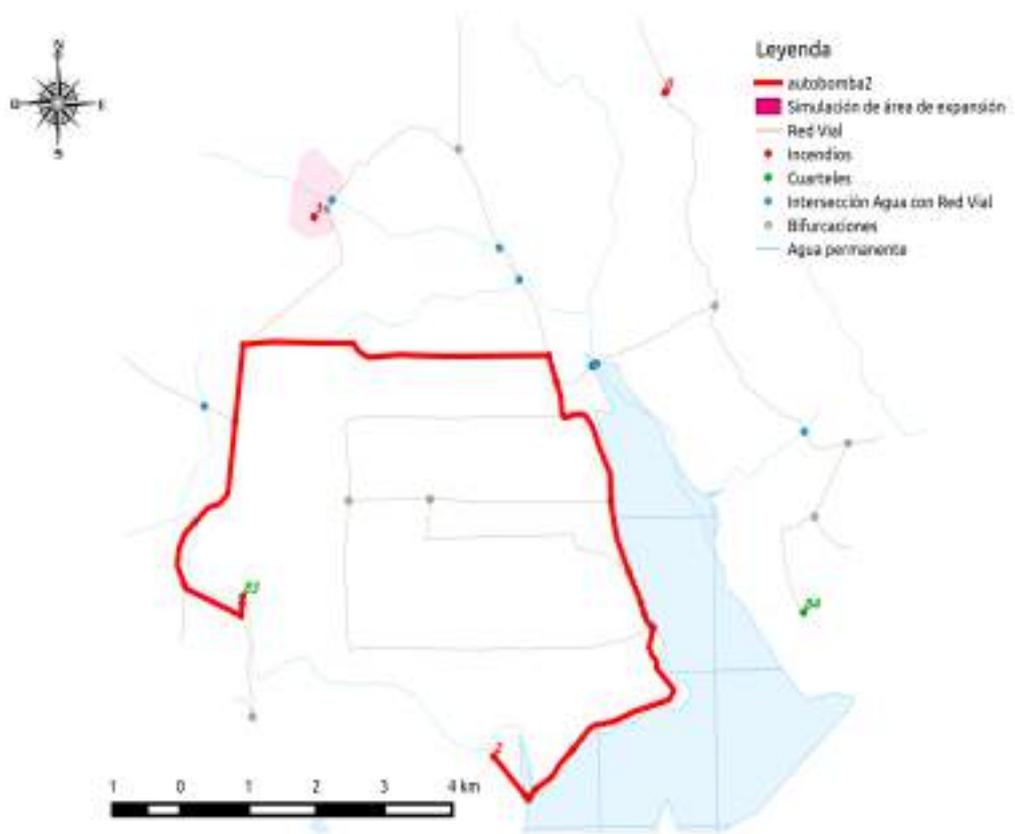


(a)

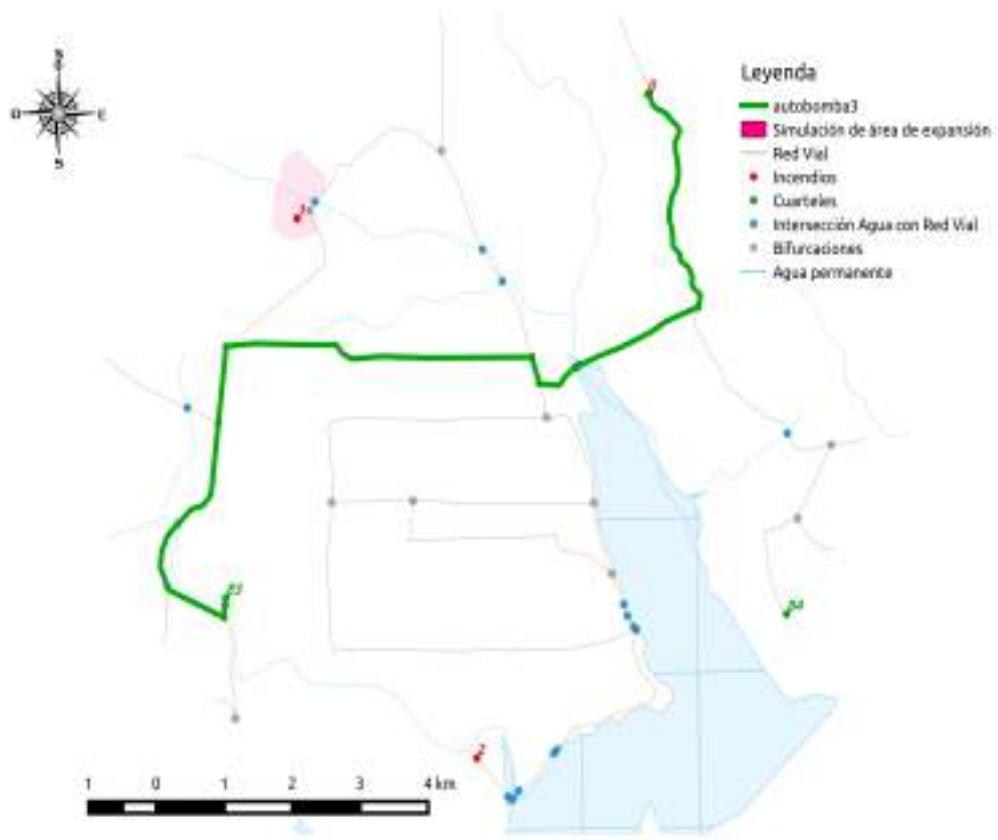


(b)

Figure 4.5: (a) Capa de información geográfica de salida para la autobomba 0 del Ejemplo VD, con mas iteración, caso 6 (b) Capa de información geográfica de salida para la autobomba 1 del Ejemplo VD con mas iteración, caso 6

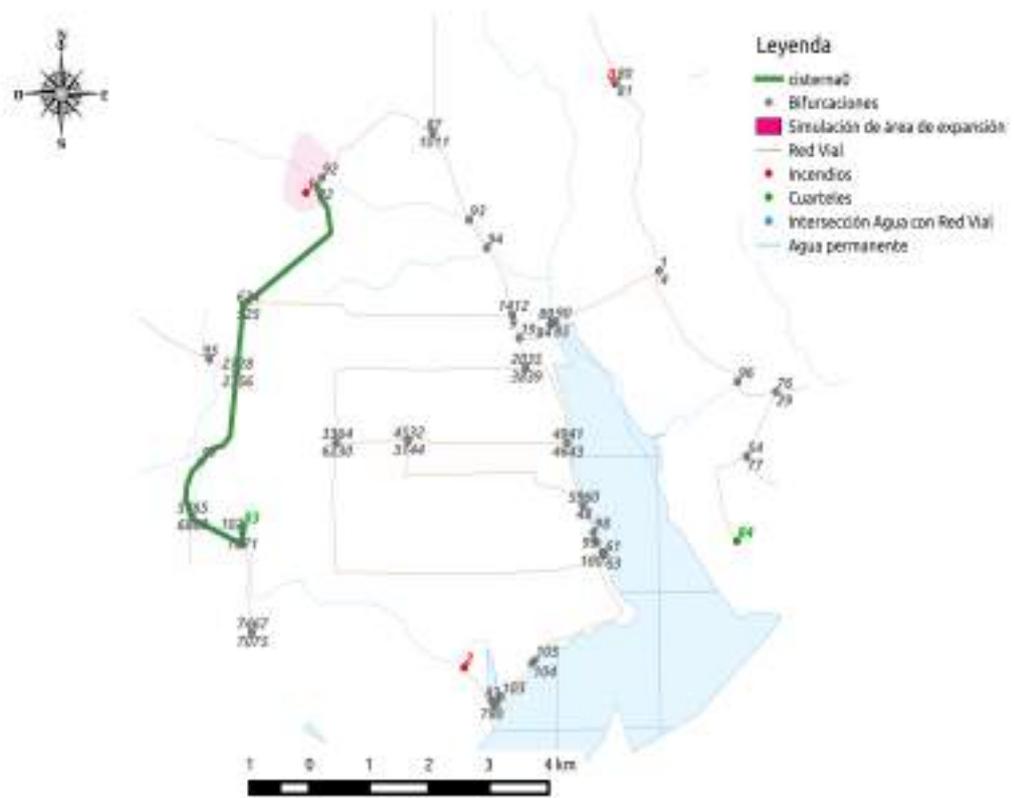


(a)

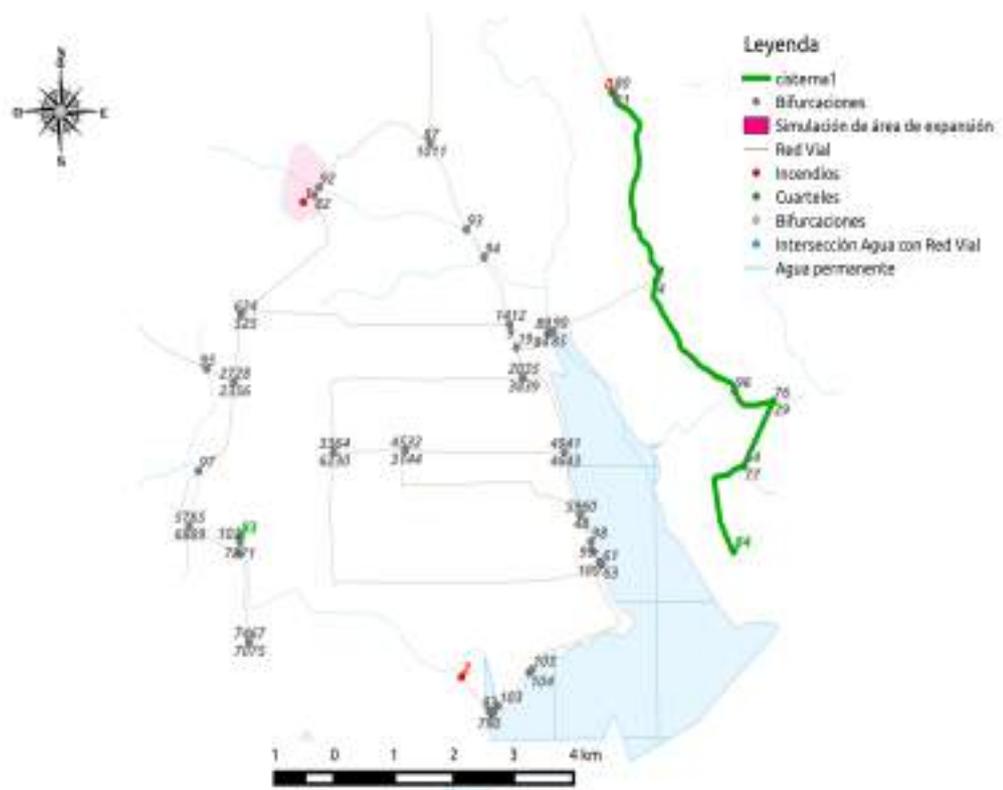


(b)

Figure 4.6: (a) Capa de información geográfica de salida para la autobomba 2 del Ejemplo VD, con mas iteración, caso 6 (b) Capa de información geográfica de salida para la autobomba 3 del Ejemplo VD con mas iteración, caso 6

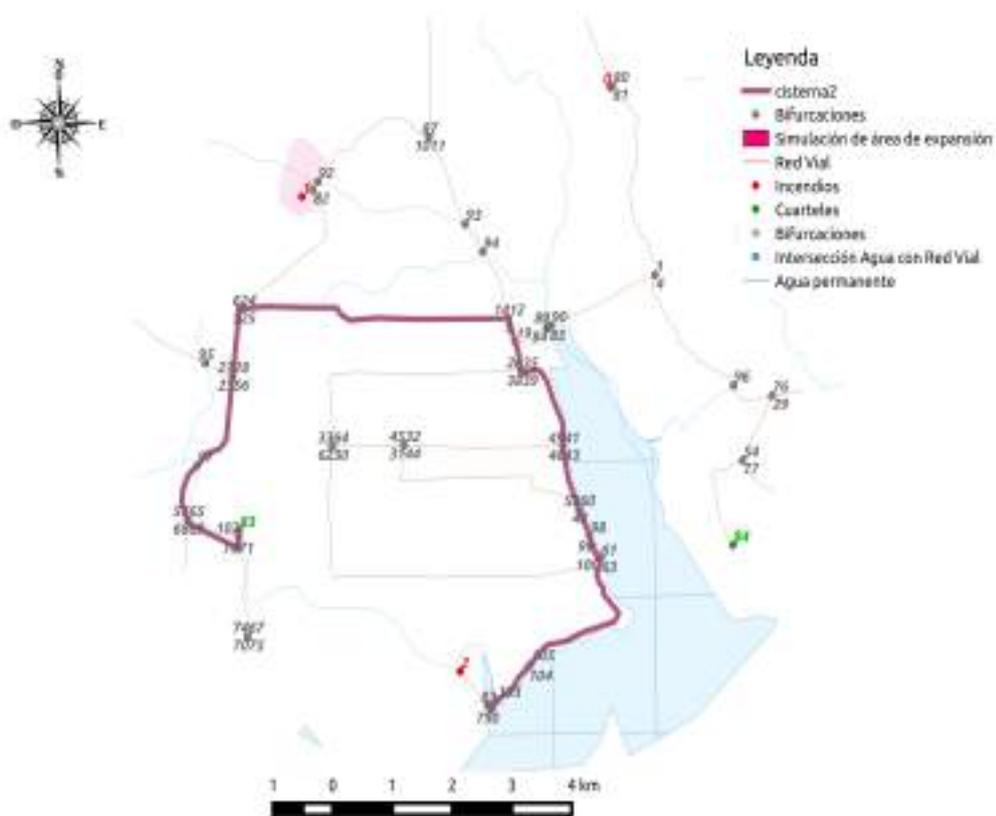


(a)

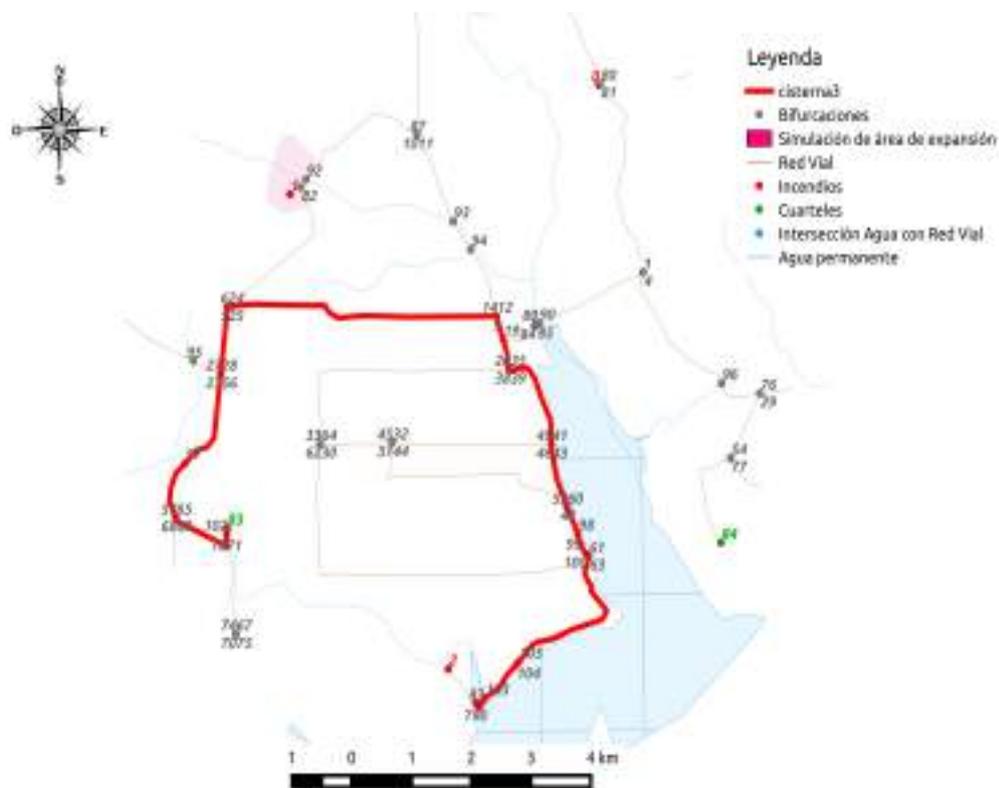


(b)

Figure 4.7: (a) Capa de información geográfica de salida para la cisterna 0 del Ejemplo VD con mas iteración, caso 6 (b) Capa de información geográfica de salida para la cisterna 1 del Ejemplo VD con mas iteración, caso 6

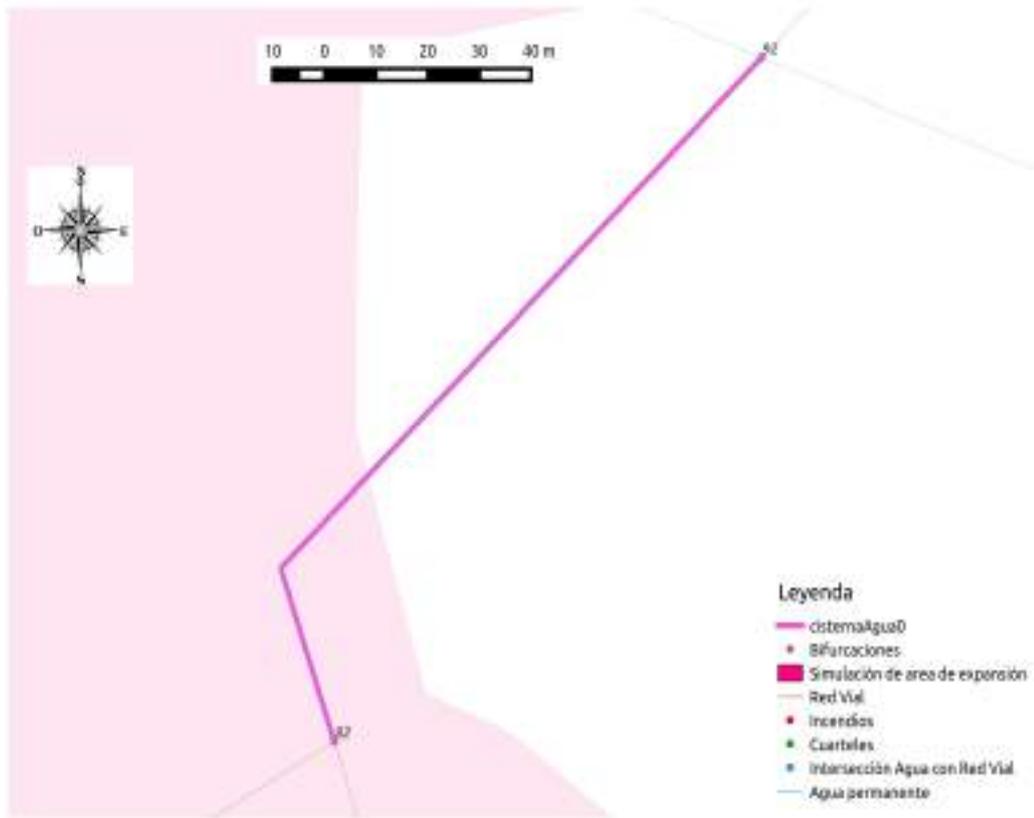


(a)

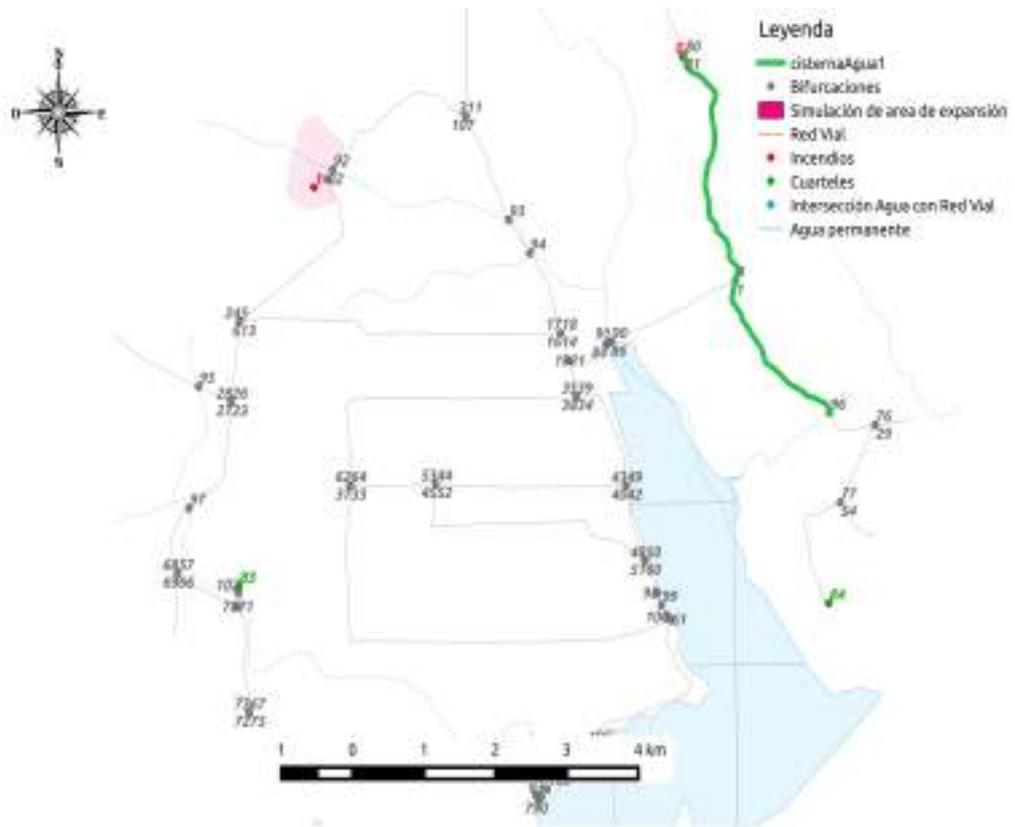


(b)

Figure 4.8: (a) Capa de información geográfica (formato shapefile) de salida para la cisterna 2 del Ejemplo VD con mas iteración, caso 6 (b) Capa de información geográfica de salida para la cisterna 3 del Ejemplo VD con mas iteración, caso 6



(a)



(b)

Figure 4.9: (a) Capa de información geográfica de salida para la cisterna de agua 2 del Ejemplo VD con mas iteración, caso 6 (b) Capa de información geográfica de salida para la cisterna de agua 1 del Ejemplo VD con mas iteración, caso 6

4.4 Margen brindado por algoritmos alternativos

Existen varias alternativas a explorar como trabajo a futuro al algoritmo que hemos utilizado. A continuación vamos a presentar algunas de éstas:

- Como por ejemplo el algoritmo SMA* procede cómo A* (ver [17]), expandiendo el mejor nodo hasta que la memoria este llena. En éste punto no puede sumar un nodo a el árbol sin borrar uno viejo. SMA* siempre borra el peor nodo hoja (el que tiene más alto valor de f). SMA* respalda el valor del nodo olvidado a su padre. De ésta manera el ancestro de un subárbol olvidado conoce la calidad del mejor path en aquel subárbol. Con esta información SMA* regenera el subárbol cuando todos los otros paths han sido mostrados peor que el path olvidado. Y ¿ Que pasa si todos los nodos tienen el mismo valor de f ? SMA* resuelve esto expandiendo la mejor hoja más nueva y borrando la peor.

SMA* es completa si hay cualquier solución alcanzable i.e. si d la profundidad de la más superficial nodo meta, es menor que la memoria (expresado en nodos). Es óptima si cualquier solución óptima es alcanzable, de otra manera devuelve la mejor solución alcanzable. En términos prácticos, SMA* podría ser el mejor algoritmo general para encontrar soluciones óptimas.

- En la bibliografía (ver [9]) se pueden encontrar otros algoritmos como por ejemplo el de “Floyd-Wharshall”, que para un grafo con n vértices y m aristas encuentra todos los pares de vértices de caminos mas cortos en el problema, en un orden $O(n^3)$.
- En la bibliografía (ver [18]) se pueden observar varios algoritmos entre los cuáles se encuentra Jhonson de orden $O(n^2 \log n + nm)$ en tiempo. En el trabajo presentado por Planken (ver [15]) se muestran otros algoritmos (Chleq-ASP y Snowball) que son más rápidos que Jhonson, en el orden de $O(n^3 \log^4 n w^{*5} \log w^*)$.
- En lugar de computar el algoritmo A* por incendio y cuartel, es posible realizar estos calculos previamente para buscar después la solución. Esta estrategia tiene la ventaja de que el algoritmo sea más óptimo al presentado, pero tiene la desventaja de la variabilidad posiblemente insertada en cualquier momento. Es decir supongamos que se informa que un camino ha sido bloqueado por una tranquera (ej: candado en la misma), o que un nuevo camino ha sido abierto por un dueño de un campo. Dichos caminos dejan o no de existir en la presentación del problema, por lo que puede impactar en el camino final del incendio al cuartel.

Otro ejemplo: Cómo se mencionó en el capítulo 2 (sección 2.2.2) es posible que ciertos cuarteles se nieguen al envío de recursos, dicha especificación también impacta en que dichos caminos dejan o no de existir en el problema.

De todas estas alternativas y otras, nos dan un margen amplio de mejora al que estamos proponiendo. Cómo mencionamos en la sección 1.2 el objetivo fue de mostrar la factibilidad del sistema, con el cual dichos algoritmos nos darían un margen para abarcar un área mayor. En la sección 4.5 la performance es suficiente para el nivel que hemos probado. Para un área de $700km^2$ con 25 recursos demora 4 horas en encontrar la solución, que es aproximadamente el área de una jurisdicción. Esta planificación puede ser pensada en realizarse en un momento dónde menos interfiera con el trabajo de los bomberos, por ejemplo de noche si son muchos recursos. En el anexo A se muestra el ejemplo con menos recursos.

4.5 Performance

El objetivo de esta sección es verificar si el esquema propuesto con el algoritmo (descrito en 4.1) escala adecuadamente para el tamaño de problemas de interés (área y cantidad de recursos típicos de las regiones de los cuarteles).

Mediante el código adjuntado a la tesis, fue posible generar las capas necesarias para evaluar la performance. Se generaron las capas: Red Vial, la capa de bifurcaciones, la capa de simulación de propagación, la capa de cuarteles, la capa de incendios y la capa de intersecciones, dónde éstas 3 últimas fueron generadas al azar.

Éstas capas incluyen en sus respectivos nombres el número de test, para poder distinguirlas. Lo mismo fue implementado para las capas de salida.

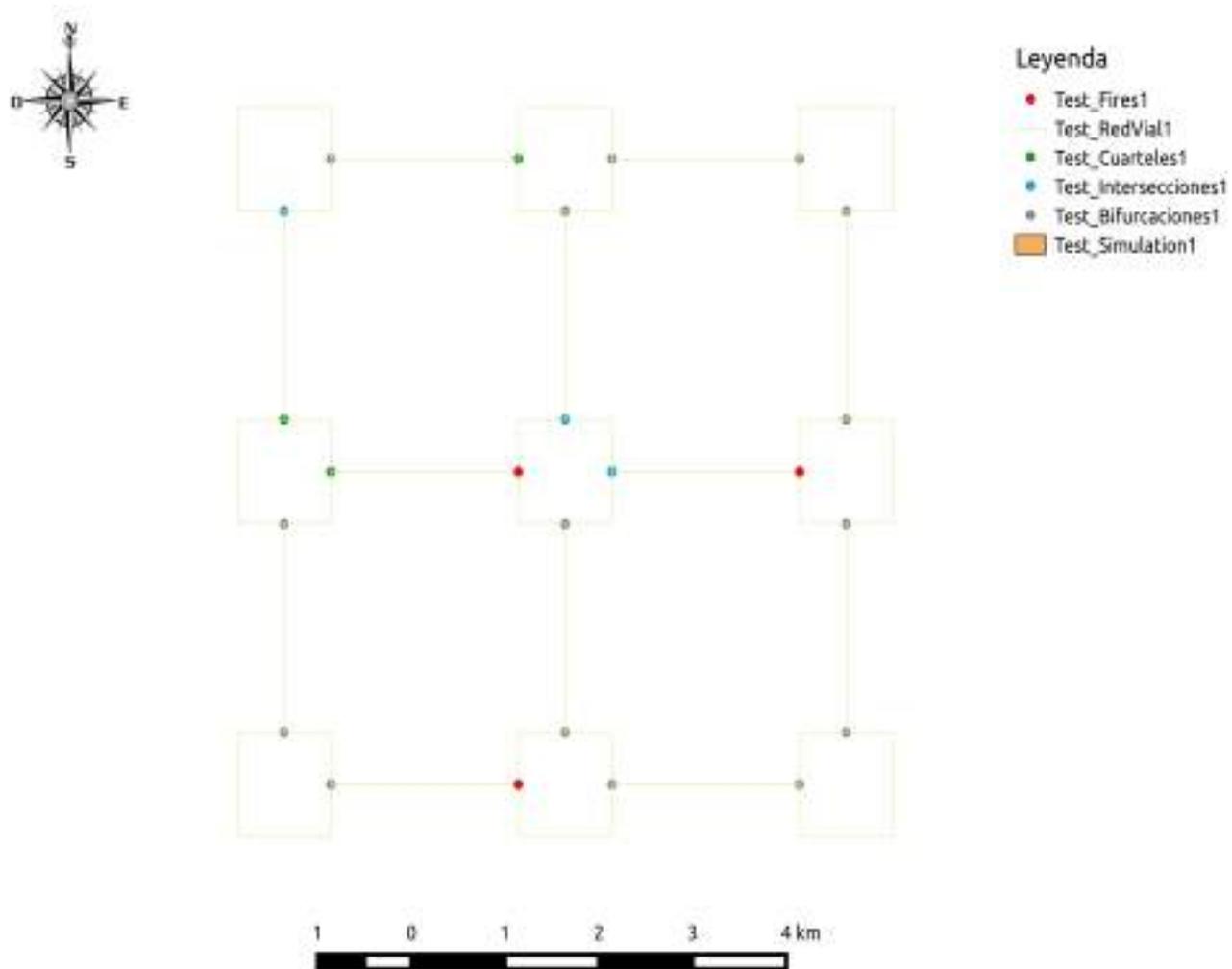


Figure 4.10: Test 1

En la figura 4.10 se muestra un ejemplo de un juego de capas simuladas que se crearon con el propósito de ver los tiempos de resolución del sistema. Un juego será el conjunto de capas geográficas que incluyen bifurcaciones, red vial, cuarteles, intersecciones, incendios y simulación.

En la figura 4.10 podemos ver las bifurcaciones distribuidas espacialmente en un área de 7km por 7km, una capa de cuarteles que contiene 3 cuarteles distribuidos aleatoriamente y una capa de incendios también distribuidos aleatoriamente.

Para esta área de $(49km^2)$ se crearon 10 juegos de capas entre los cuáles se listan debajo su diferencia, todas con 3 cuarteles y 3 incendios:

- el primer juego tiene 3 autobombas en total y 3 cisternas en total (1 por cuartel), ídem para las autobombas necesarias y cisternas necesarias (1 autobomba necesaria por incendio)
- el segundo juego tiene 12 autobombas y 12 cisternas (4 por cuartel), ídem 4 autobombas necesarias por incendio
- el tercer juego tiene 24 autobombas y 24 cisternas (8 por cuartel), ídem 8 autobombas necesarias por incendio
- el cuarto juego tiene 36 autobombas y 36 cisternas (12 por cuartel), ídem 12 autobombas necesarias por incendio
- el quinto juego tiene 48 autobombas y 48 cisternas (18 por cuartel), ídem 18 autobombas necesarias por incendio
- el sexto juego tiene 72 autobombas y 72 cisternas (24 por cuartel), ídem 24 autobombas necesarias por incendio
- el séptimo juego tiene 96 autobombas y 96 cisternas (32 por cuartel), ídem 32 autobombas necesarias por incendio
- el octavo juego tiene 144 autobombas y 144 cisternas (48 por cuartel), ídem 48 autobombas necesarias por incendio
- el noveno juego tiene 168 autobombas y 168 cisternas (56 por cuartel), ídem 56 autobombas necesarias por incendio
- el décimo juego tiene 195 autobombas y 195 cisternas (65 por cuartel), ídem 65 autobombas necesarias por incendio

Se repitieron los juegos pero con áreas de $100km^2$, $169km^2$, $256km^2$, $361km^2$, $484km^2$, $625km^2$, $784km^2$, $961km^2$ y $1156km^2$. Quedando un total de 100 casos.

Una vez corrido el sistema con estas capas el software genera un csv con los valores de los casos entre los cuáles incluye el tiempo de resolución del problema. También se encuentran los siguientes valores:

- número de test (identificador del mismo)
- tiempo de construcción del grafo
- tiempo de resolución del problema
- tiempo total (tiempo de construcción del grafo + tiempo de resolución del problema)
- área del test
- número de incendios en el test
- número de cuarteles en el test
- número de autobombas necesarias
- número de autobombas disponibles
- número de cisternas necesarias
- número de cisternas disponibles
- número de recursos (número de cisternas disponibles + número de autobombas disponibles)

Todos los casos fueron ejecutados sobre una máquina que posee un micro Intel Core Duo T2370 (1.72Ghz) con 3GB de memoria RAM y sistema operativo linux de 32-bit.

Con los casos ejecutados dónde se variaron los recursos (autobombas mas cisternas) y el área se crearon tres diagramas, para mostrar el comportamiento del tiempo en función de éstas dos variables.

La figura 4.11 muestra que la complejidad computacional crece exponencialmente.

La figura 4.12a muestra que la complejidad crece linealmente en función de los recursos, dónde los recursos son el total de autobombas disponibles en los cuarteles más el total de cisternas disponibles en los cuarteles.

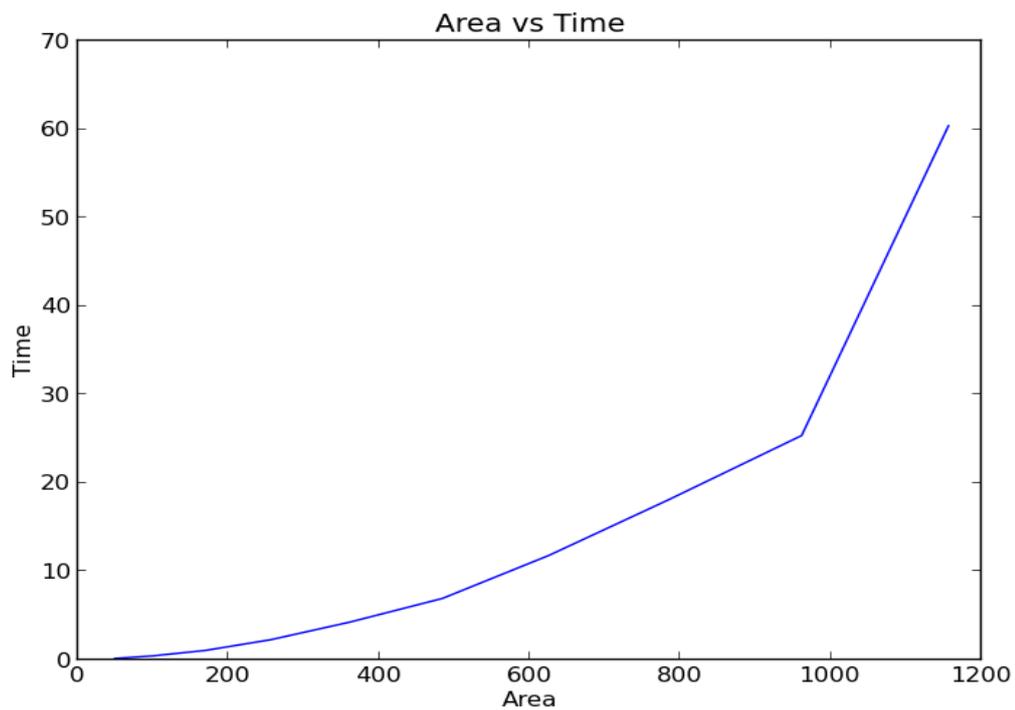
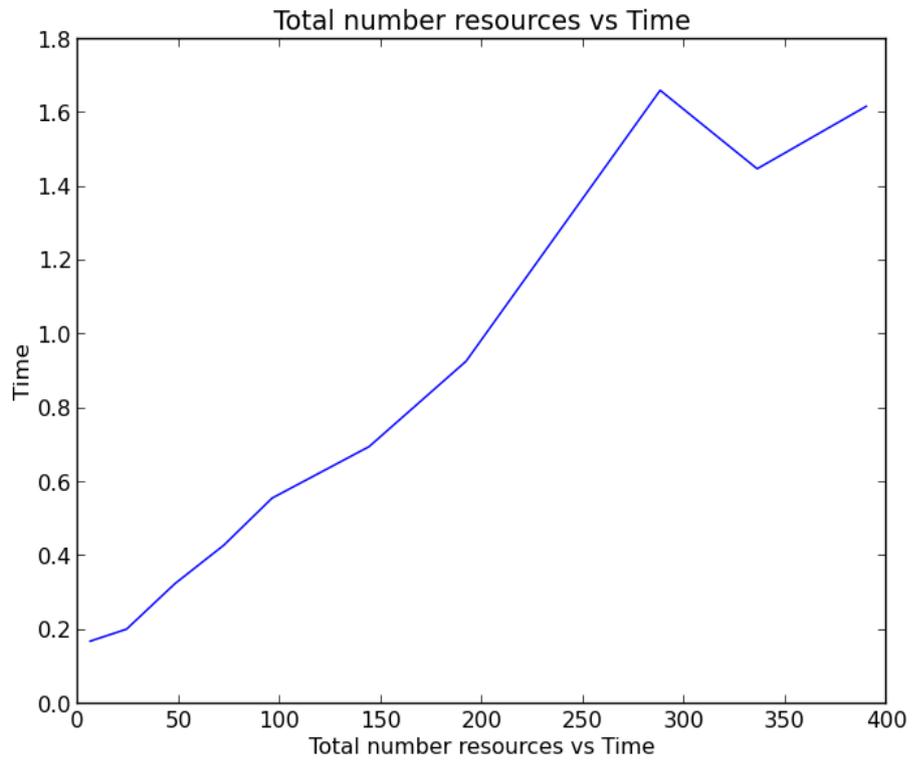


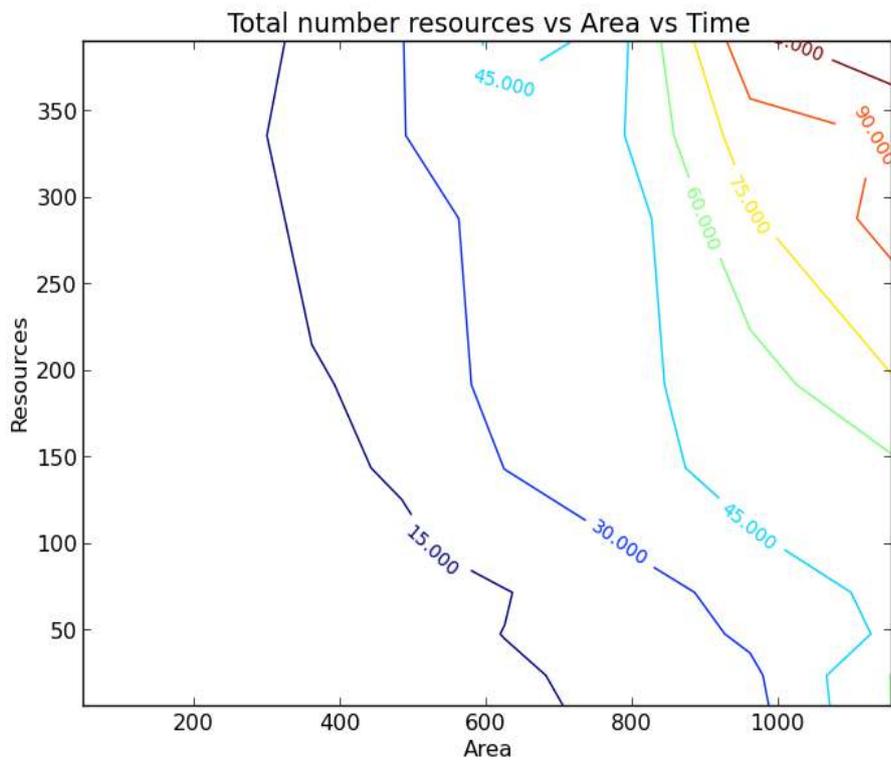
Figure 4.11: Area (km^2) y Tiempo (segundos)

Y por último en el gráfico 4.12b se muestra a los usuarios interesados, de acuerdo al área y a la cantidad de recursos, la aproximación de cuánto tiempo demorará PPSolver en encontrar la solución. Nótese que el mismo muestra que para un área de $700 km^2$ aproximadamente, con 25 recursos el sistema va a demorar 15000 segundos (4 horas).

Los resultados presentados muestran que incluso con el algoritmo utilizado se pueden resolver los problemas que son el foco de interés de esta tesis. Introduciendo mejoras sobre los algoritmos discutidos en la sección 4.4 se podrá mejorar la performance o resolver problemas de mayor tamaño.



(a)



(b)

Figure 4.12: (a) Total number resources and Time (segundos) (b) Total number resources and Area (km^2) and Time (segundos)

Conclusiones

El resultado más significativo que presenta esta tesis es el desarrollo de una arquitectura conceptual para un sistema de soporte a la planificación de la lucha contra el fuego, conjuntamente a resultados experimentales de la implementación de un prototipo preliminar y parcial de este sistema, demostrando la factibilidad del mismo.

El relevamiento detallado de las principales características de la lucha contra el fuego y de su planificación, en el contexto de las actividades reales de los bomberos en la provincia de Córdoba, ha permitido la construcción del escenario principal para el diseño del sistema presentado en este trabajo.

La descripción en detalle de la implementación preliminar del prototipo de este sistema, ha permitido entre otros: el análisis de la factibilidad del mismo y la reutilización e integración de programas y librerías (cómo Farsite y aim-python), en base al desarrollo de un código que tiene la funcionalidad de adaptar distintos formatos de entrada y salida.

Es de destacar que para este análisis de factibilidad se utilizaron ejemplos con áreas de alrededor de 1000 Km^2 , similares a los que tienen algunos cuarteles de bomberos bajo su responsabilidad. De este modo permite concluir que el prototipo de sistema implementado cumple con los requerimientos para la distribución de recursos dentro de regiones operativas. Pero en caso de que usuarios quieran utilizarlo es recomendable mejorar la performance del sistema, como así también el algoritmo que realiza la distribución de autobombas y/o cisternas.

Mejoras y trabajo a futuro:

Se considera que existen aún varios aspectos a tomar en cuenta si se desea proceder a implementar un sistema de similares características:

- Por ejemplo, será necesario automatizar la conexión con el simulador y las unidades Clipper y Closest point search, así cómo la implementación de estas dos últimas unidades.
- Brindar soporte al problema de relevo de los bomberos durante las tareas de combate del fuego.
- A la vez, será necesario tener en cuenta las características de combustibilidad de la región en la que se produce el incendio, cómo el tráfico y otros impedimentos para la movilidad en los caminos, agregando éstas características por ejemplo al costo de los caminos.
- Por otra parte, se sugiere explorar la conveniencia de incluir módulos que permitan ajustar tiempos usados en el sistema. Como por ejemplo el tiempo que un incendio finaliza y se considera que los

recursos ya está disponibles para ser utilizados, para combatir un nuevo incendio. También evaluar la conveniencia de incorporar un módulo para la toma de decisiones críticas, como evacuar el personal en caso de condiciones de viento cambiante.

- Se considera necesario explorar una división de fases u otra alternativa, dónde se realice la negociación entre los agentes de acuerdo a la división de regionales y federación.
- Por último, sería interesante analizar la utilización de otras técnicas de planificación automática, como Hierarchical task network (PDDL, utilizada en [7]) y la de otros simuladores de propagación de incendios.

APENDICE A

Ejemplo AG

Este apéndice introduce el ejemplo AG que está ubicado en Alta Gracia, como lo indica la tabla 3.6 para los problemas AA y GC.

Capas para el ejemplo AG

Nombre de capa	Descripción	Origen
Cuarteles	cuarteles de la region del ej AG	PPMF
RedVialIGN	Red Vial de la region del ej AG	IGN
Incendios	Construída a partir de un csv	
Bifurcaciones	Construída a partir de la unión de las bif, estaciones, incendios e intersecciones	
cursodeAgua	Cursos de agua de la región del ej AG	Proyecto Mapear
hidrografía	Hidrografía de la región del ej AG	Proyecto Mapear
aguaPermanente	Union de cursos de Agua e hidrografía (convertida a líneas)	
intersecciónAguaConRedVial	Intersección del agua permanente con Red Vial	
zackYCabidoR	Región de interés del ej AG del mapa de Zack y Cabido	
simulacionR	Simulación de área de expansión, obtenida a partir de Farsite	

Tabla A.1: Detalle de cartografía utilizada, para el ejemplo AG

Las capas disponibles para el ejemplo AG, se pueden ver en la tabla A.1. También dichas capas fueron obtenidas mediante las capas originales (para toda Argentina), pero recortadas para la zona del ejemplo AG. Todas las capas son de tipo vectorial, a excepción de zackYCabidoR que es de tipo ráster.

A.1 Clipper 1, ejemplo AG

En esta sección explicaremos cual fue el procedimiento para reducir el área de Argentina al área de interés para el ejemplo AG.

Se procedió igual que en la sección 3.2.5, con la excepción de que cuando se calcula la distancia más grande de los puntos del polígono (ver imagen A.1a) dió 22km, a los cuáles se le sumaron 10km más para

tener un margen de caminos no tenidos en cuenta y no romper caminos que en partes se incluían, y en lo posible incorporar estaciones que están cercanas a los incendios no incluidas en esta área (ver imagen A.1b).

Nota: Cabe mencionar que podríamos haber agregado este margen al ejercicio VD, pero como no sumaba información importante, no fue necesario agregarlo.

El área de interés para este segundo ejemplo queda de 32km por 32km (Ver imagen A.2a).

Las bifurcaciones de este ejemplo son mostradas en la imagen A.2b.

Para este ejemplo no hizo falta editar los caminos, dado que la capa se encontraba bien para dicha zona.

A.2 Closest point search (Detección del punto más cercano de camino para el problema AA)

	Coordenadas planas	
	E	N
Incendio 1	4341749.633	6522460.340
Incendio 2	4363022.957	6514809.145
Incendio 3	4364133.131	6491615.521

Tabla A.2: Detalle de los puntos más cercanos a los caminos para los incendios, para el ejemplo AG

En esta sección explicaremos cuál fue el procedimiento para encontrar el punto más cercano de camino para el ejemplo AG.

Se procedió igual que en la sección 3.2.6, obteniendo las coordenadas (ver tabla A.2) de los puntos más cercanos en el camino.

Nota: El punto que está más cercano al incendio 2, es el mismo punto.

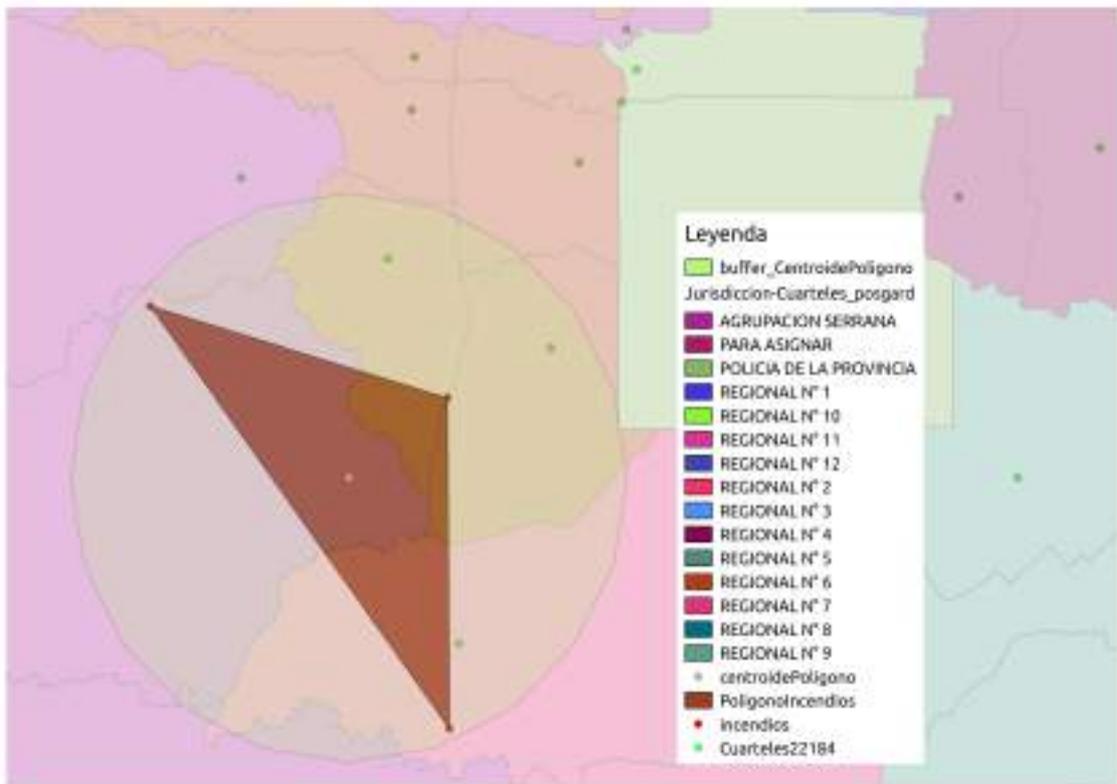
A.3 Closest point search (Detección del punto más cercano de camino para el problema GC)

Para detectar los puntos más cercanos de camino para el problema GC, se procedió igual que en la sección 3.2.7 pero con las capas asociadas al problema GC del ejemplo AG.

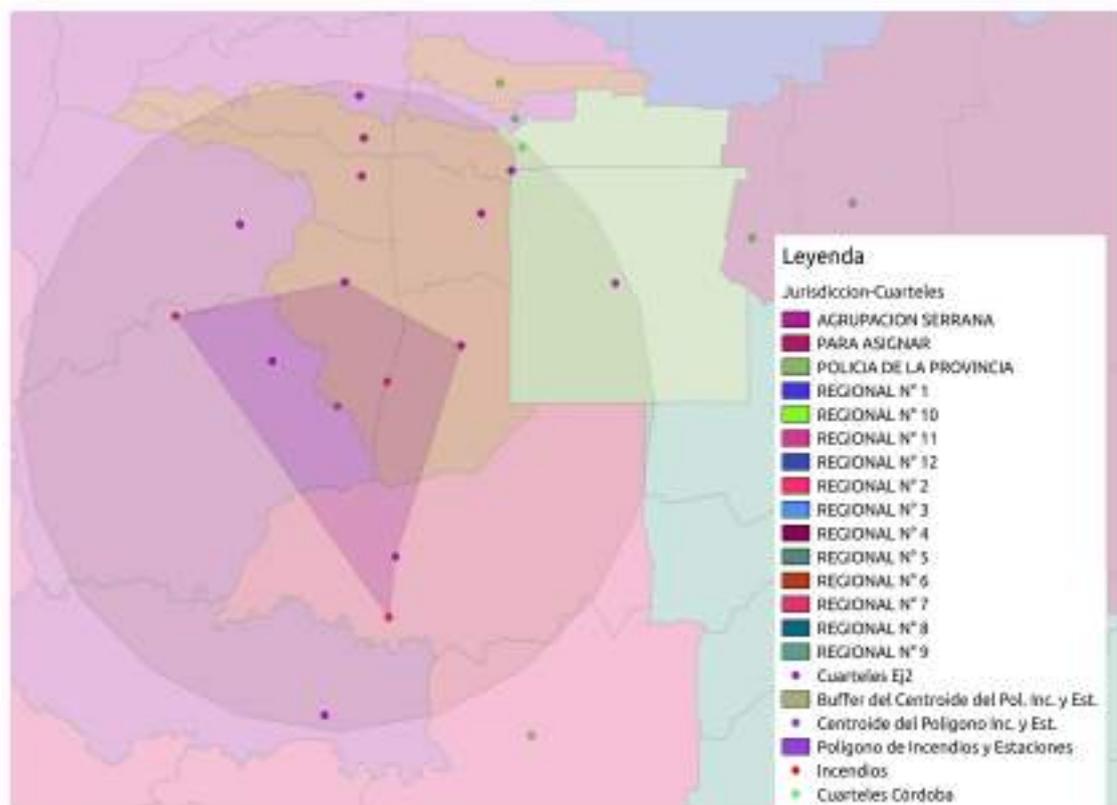
A.4 Closest point search (Detección del punto más cercano de las fuentes de agua, problema GC)

En esta sección explicaremos cuáles fueron los cambios necesarios a las capas, para que el PPG encontrara puntos de agua más cercanos para la recarga de agua para las cisternas pero para el ejemplo AG.

Se procedió igual que en la sección 3.2.8, pero con las capas asociadas al problema GC del ejemplo AG.

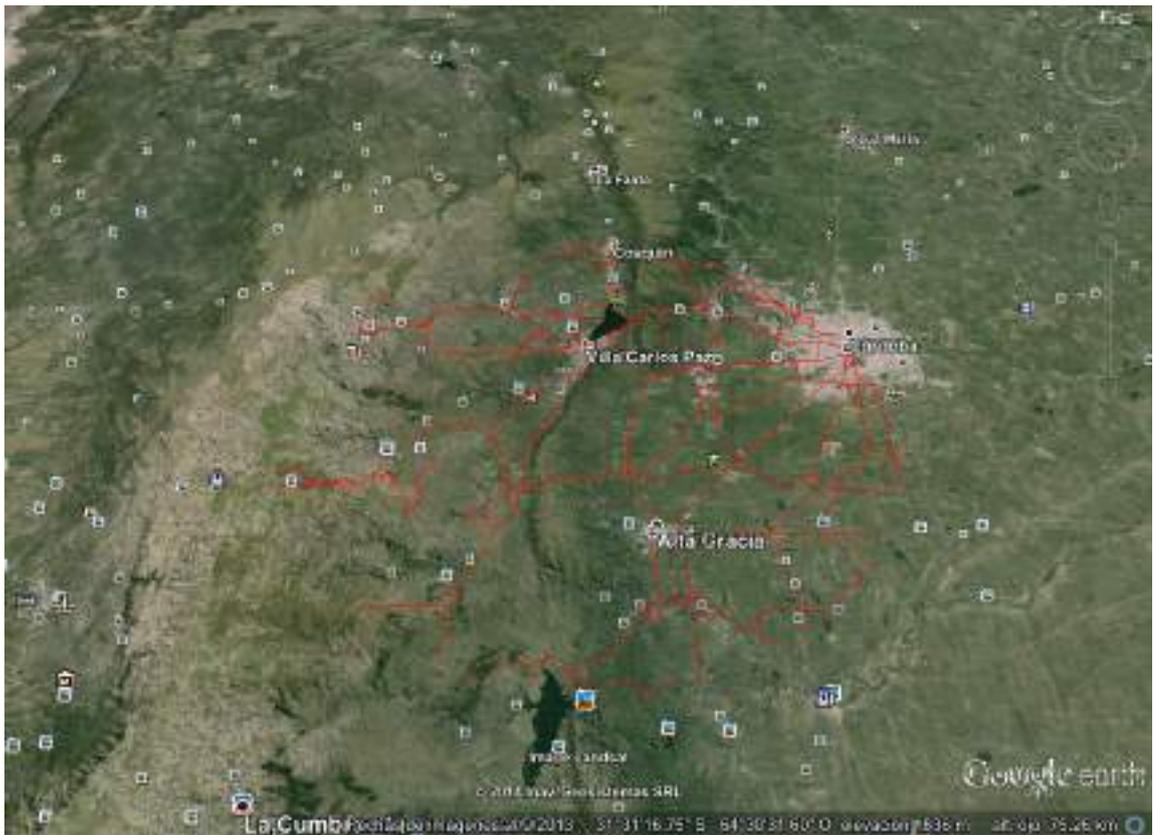


(a)

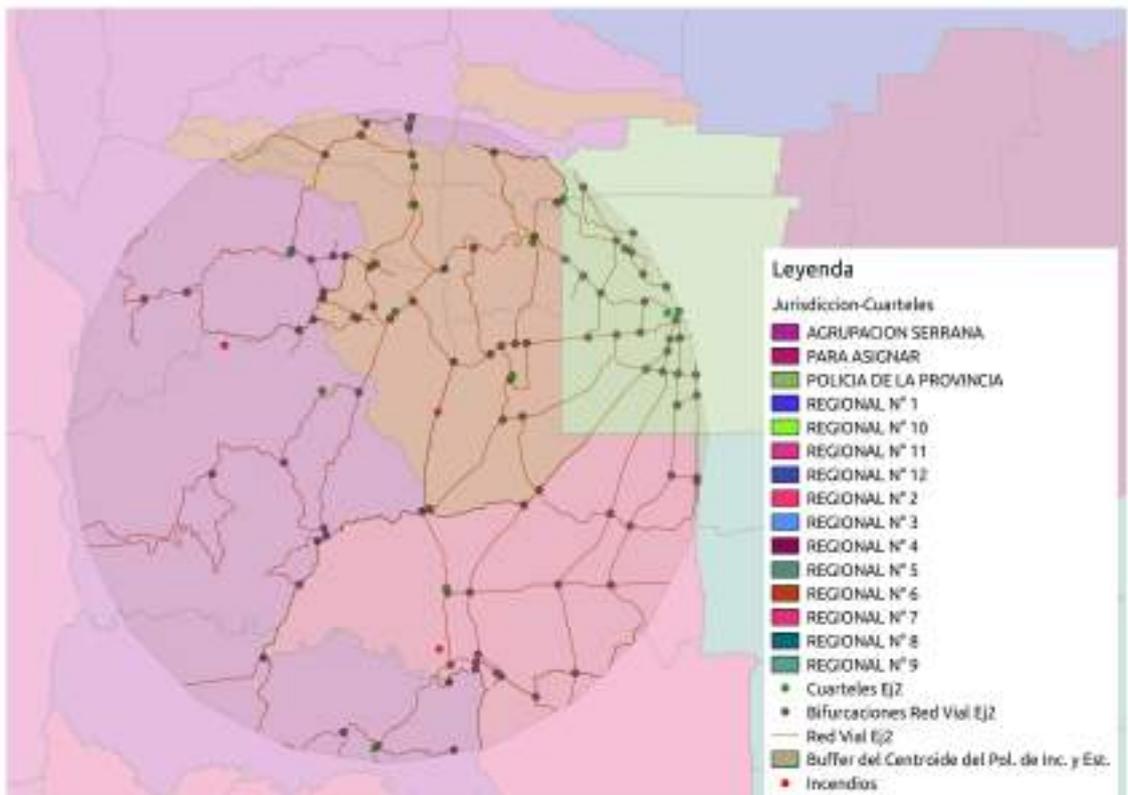


(b)

Figure A.1: (a) Obtención del polígono que contiene a los cuarteles (b) Reducción del área de interés para el ejemplo



(a)



(b)

Figure A.2: (a) Área de interés reducida, mediante el buffer (b) Bifurcaciones de la red vial

A.5 Resultados obtenidos

A.5.1 PPSolver: iteración

Caso 5): Resultados del ejemplo AG con una iteración

Id de cuartel	AUTOBOMBAS	CISTERNAS
21	1	1
22	1	1
26	1	1
27	1	1
28	1	1
30	1	1
32	1	1
44	1	1
45	1	1
46	1	1
47	1	1
54	1	1

Tabla A.3: Recursos disponibles por cuartel para el ejemplo AG

Id de incendio	AutoBomNec	CistNec
0	1	1
1	1	1
2	1	1
3	1	1
4	1	1
5	1	1
6	1	1

Tabla A.4: Recursos necesarios por incendio para el ejemplo AG

Para el ejemplo AG se cuenta con 11 autobombas y 11 cisternas, 1 por estación (Ver tabla A.3). Y se necesitan los recursos resumidos en la tabla: A.4.

La figura A.3 muestra los resultados para las autobombas, i.e. los recorridos que tienen que hacer las autobombas desde los cuarteles hasta los incendios. Los resultados son los esperados dado que a cada autobomba se le recomienda que vaya al cuartel mas cercano.

El recorrido para la cisterna 0 desde el cuartel hasta el incendio se muestra en la figura A.4a y el recorrido desde el incendio hasta el punto mas cercano de agua se muestra en la figura ???. El punto de agua mas cercano es el esperado dado que su distancia es mínima en comparación a los otros puntos de agua que estan cercanos al incendio.

La cisterna 1 y cisterna de agua 1 se muestran en la figura A.4b. Ídem para la cisterna 2 en la figura A.5a. La cisterna 3 se muestra en la figura A.5b, la cisterna 4 en la figura A.6a. Y por último para las cisternas 5 y 6 se muestran en las figuras A.6b y A.7 respectivamente.

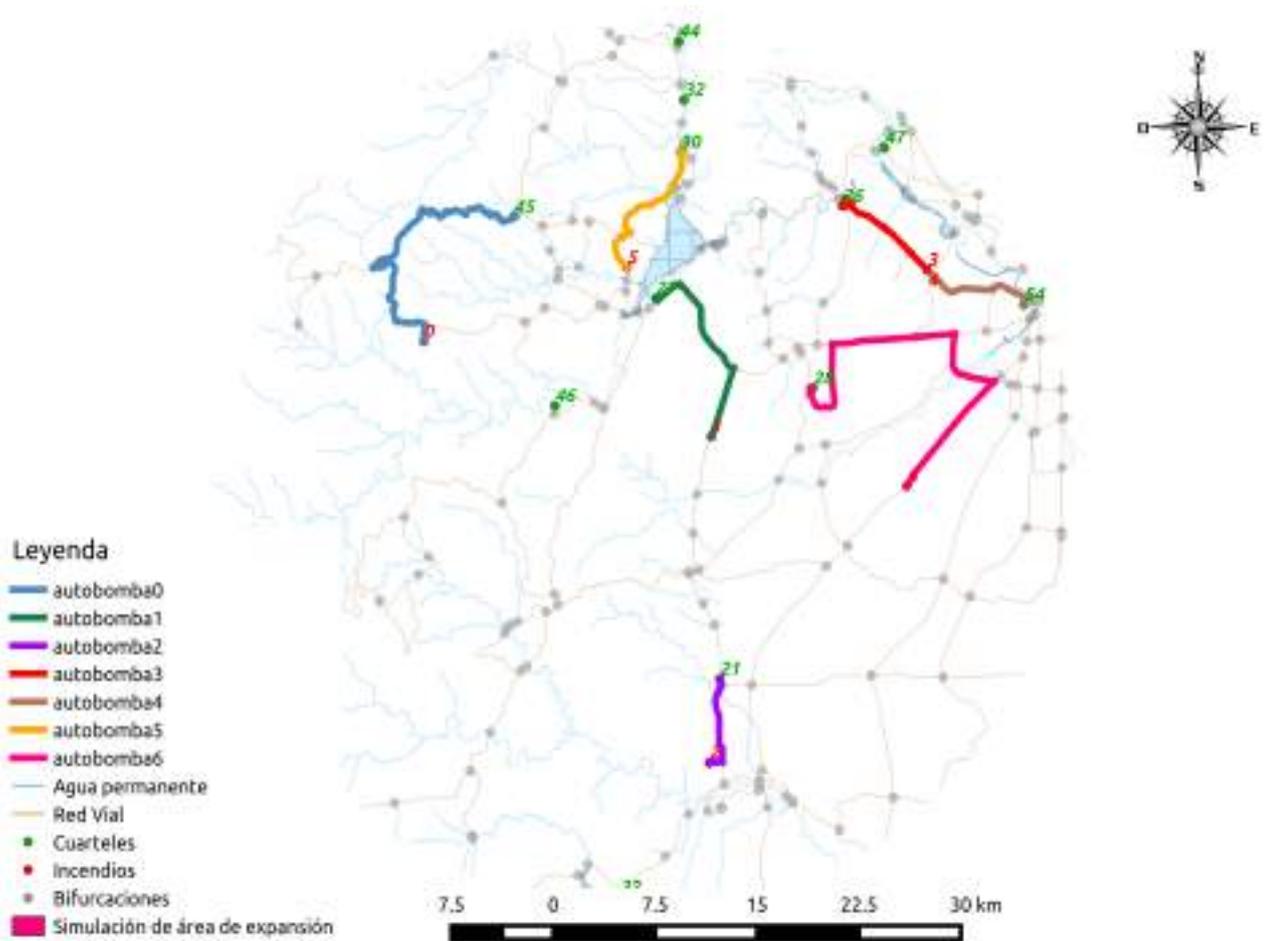


Figure A.3: Resultado de la asignación de las autobombas a los incendios, caso 5

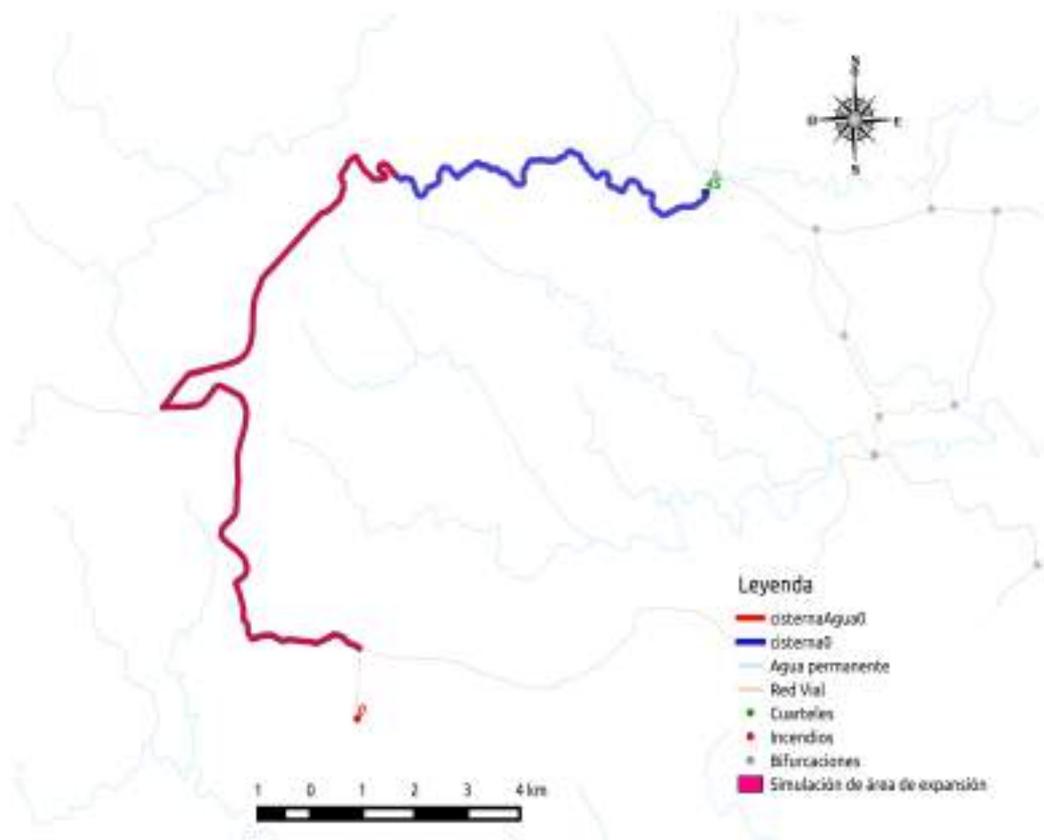
Caso 7): Ejemplo AG con más de una iteracion.

Id de incendio	AutoBomNece	CistNec
0	2	1
1	1	2
2	1	1
3	1	1
4	1	1
5	1	1
6	1	1

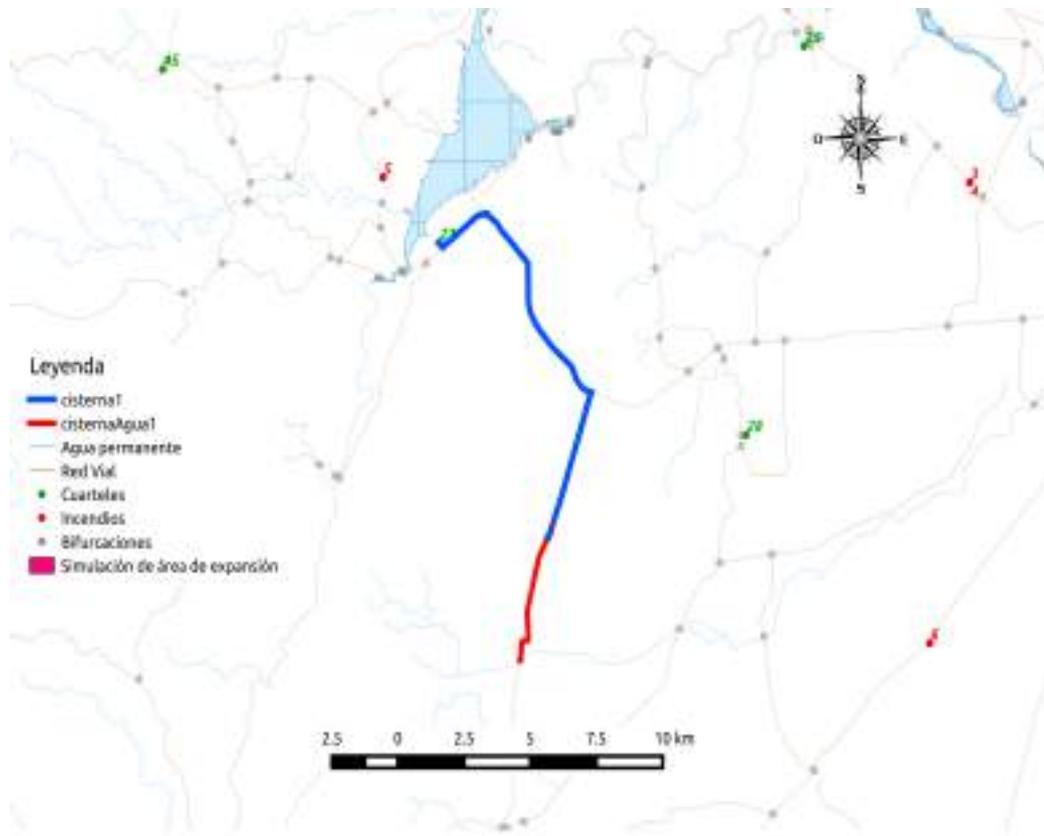
Tabla A.5: Autobombas necesarias por incendio para el ejemplo AG con más de una iteración

La prioridad para todos los incendios es la misma, dado que todos tienen la misma área de propagación.

La cantidad de recursos que tienen los cuarteles se muestran en la tabla A.6.

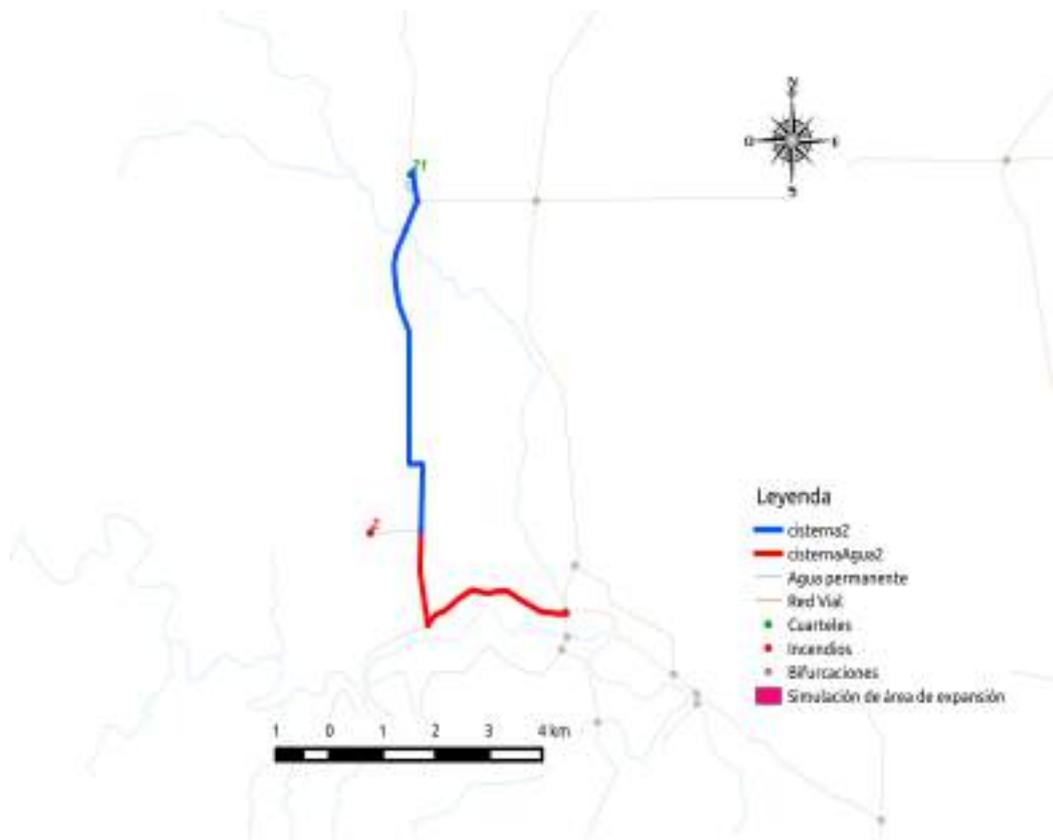


(a)

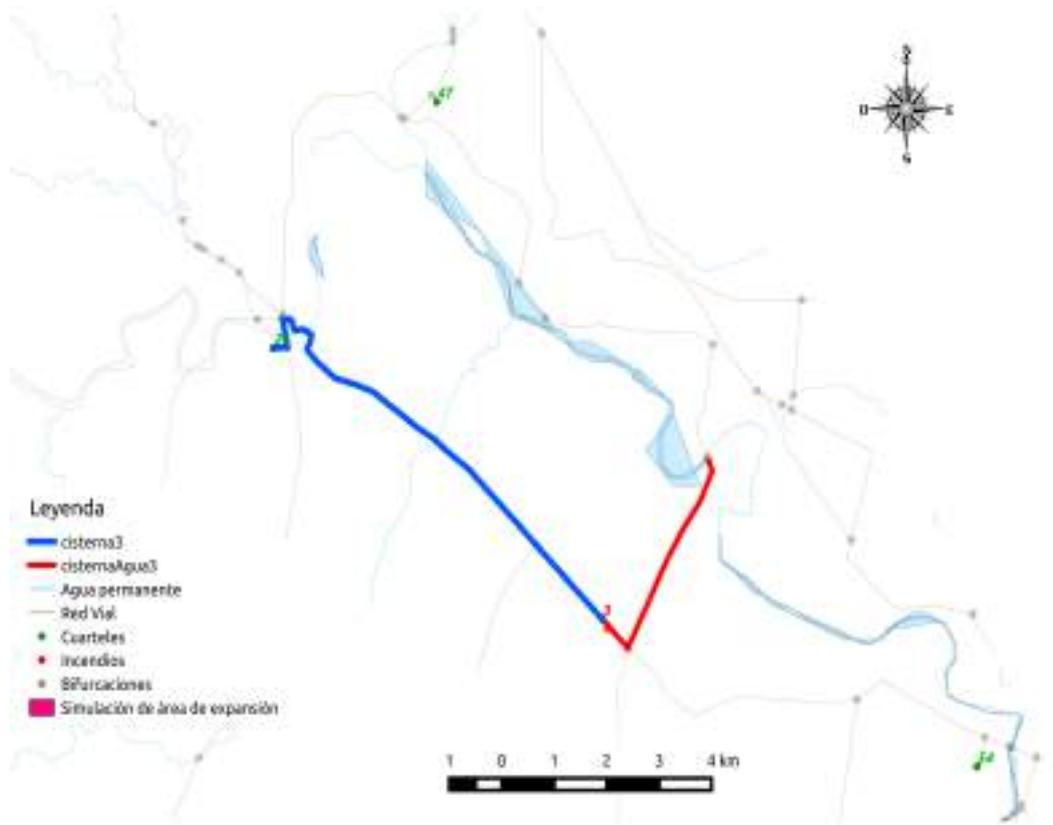


(b)

Figure A.4: (a) Capa de información geográfica de salida para la cisterna 0 del Ejemplo AG, caso 5 (b) Capa de información geográfica de salida para la cisterna 1 del Ejemplo AG, caso 5

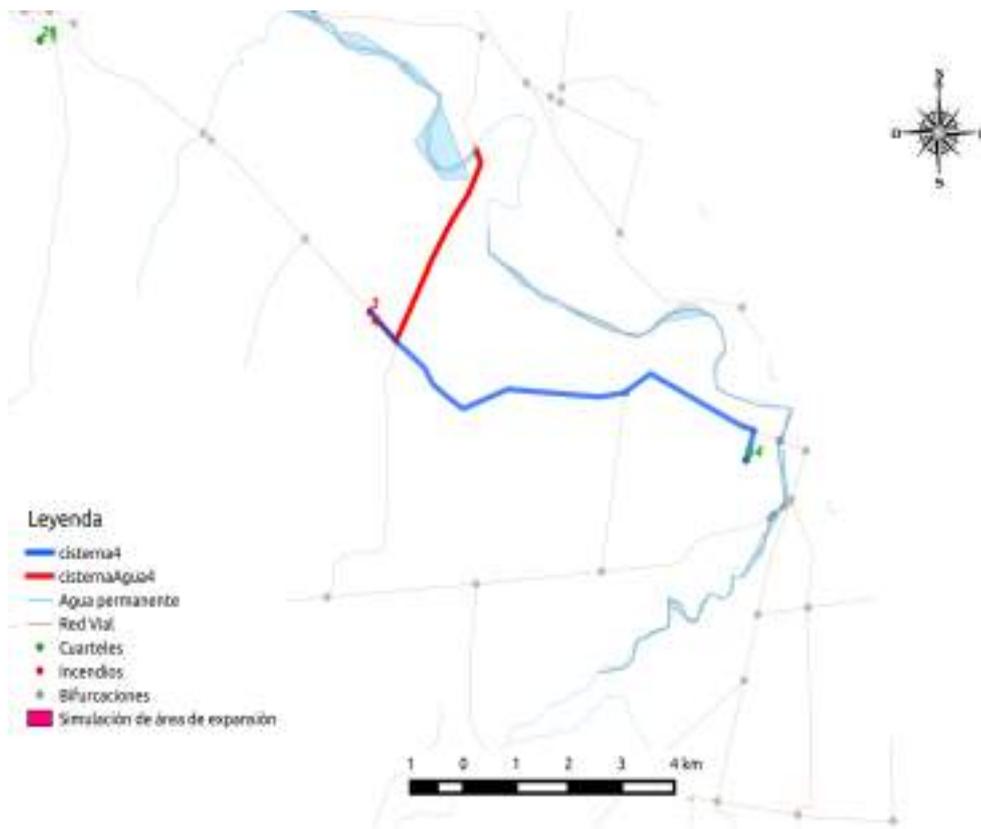


(a)

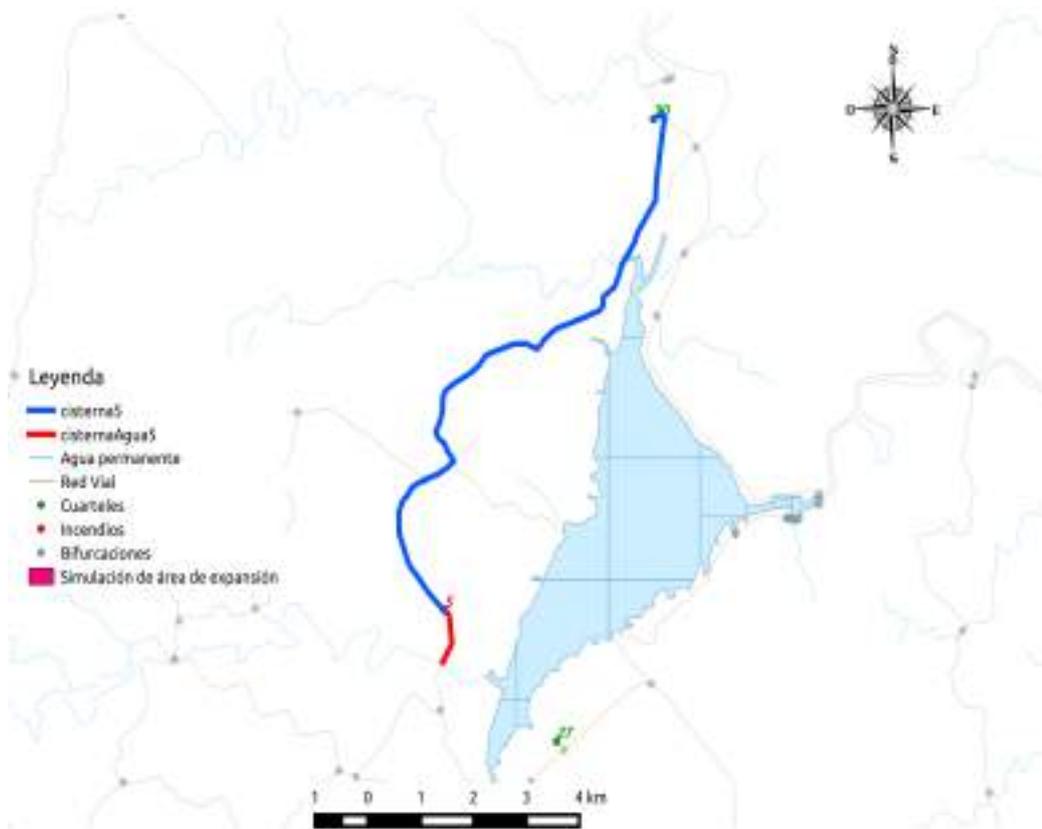


(b)

Figure A.5: (a) Capa de información geográfica de salida para la cisterna 2 del Ejemplo AG, caso 5 (b) Capa de información geográfica de salida para la cisterna 3 del Ejemplo AG, caso 5



(a)



(b)

Figure A.6: (a) Capa de información geográfica de salida para la cisterna 4 del Ejemplo AG, caso 5 (b) Capa de información geográfica de salida para la cisterna 5 del Ejemplo AG, caso 5

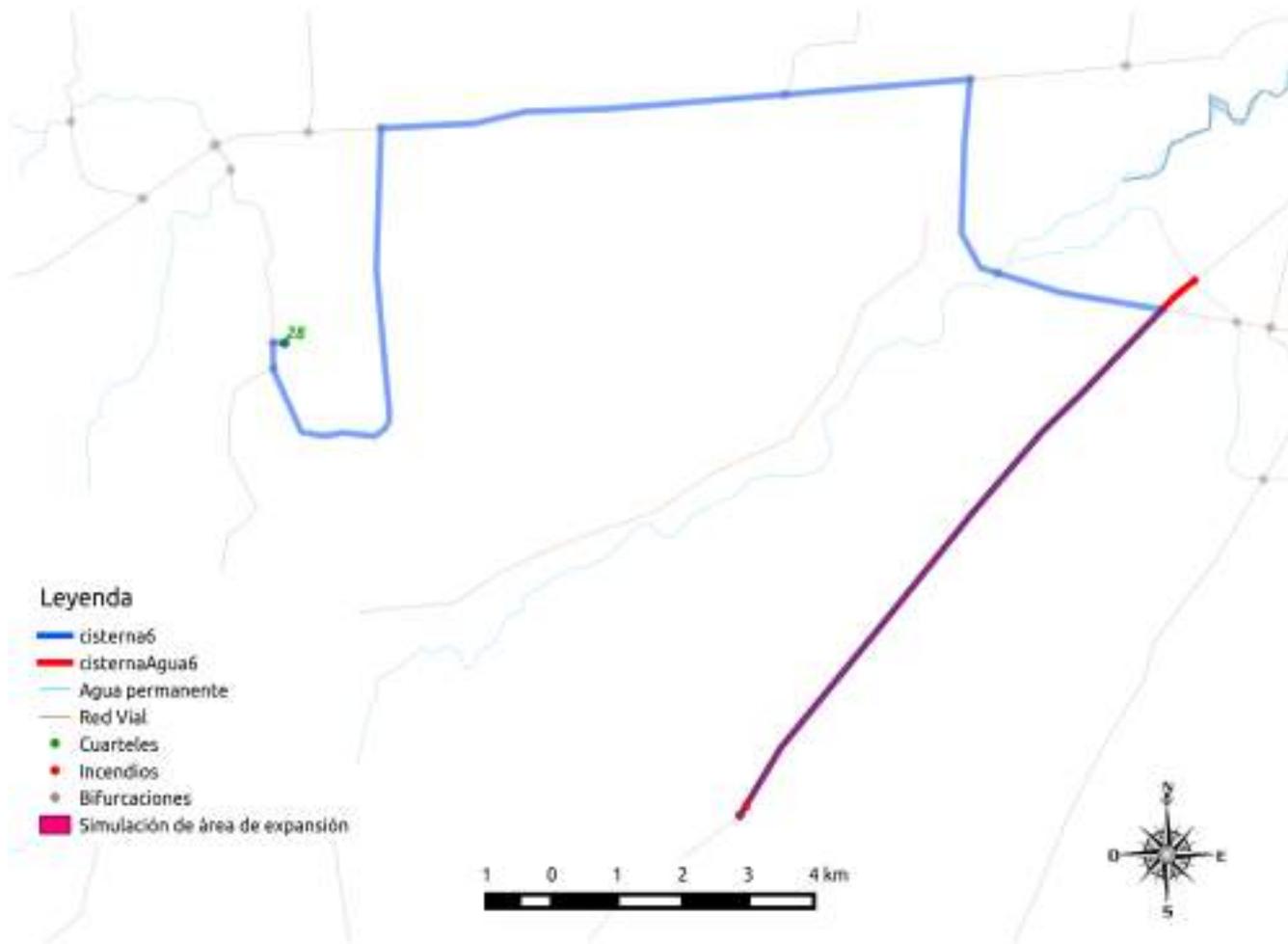


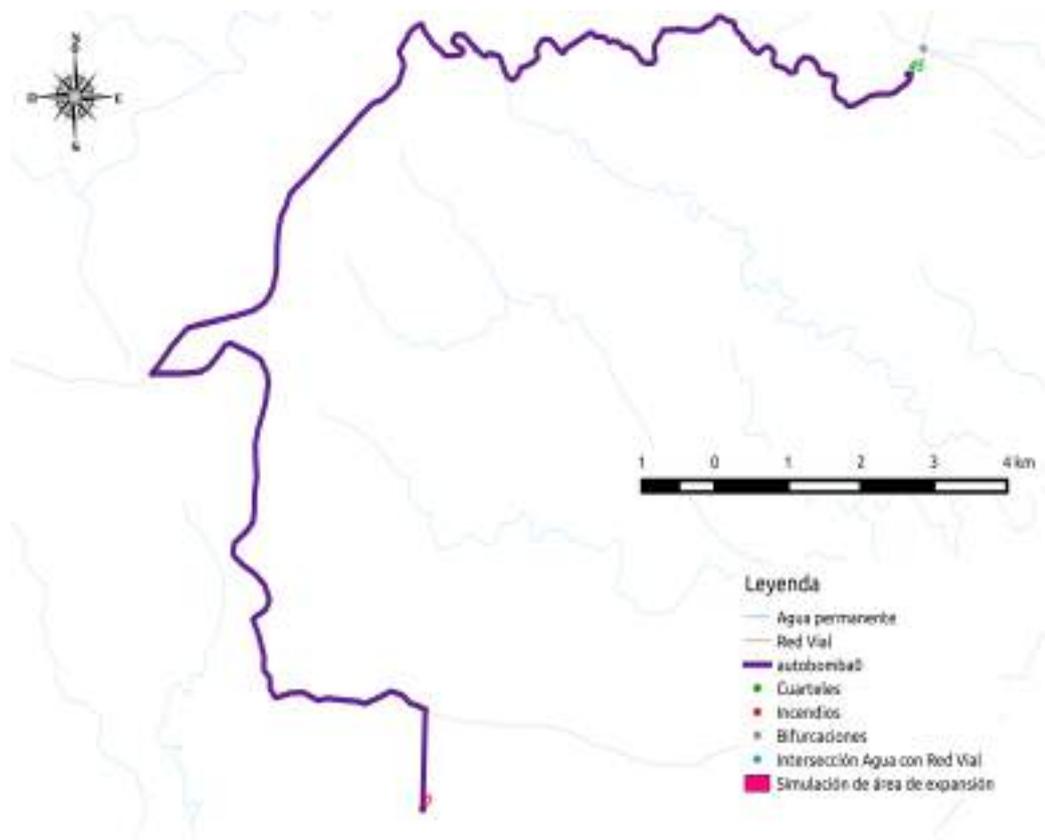
Figure A.7: Capa de información geográfica de salida para la cisterna 6, caso 5

ID de cuartel	AUTOBOMBAS	CISTERNAS
21	1	0
22	1	1
26	1	0
27	1	0
28	1	0
30	1	0
32	1	0
44	1	0
45	1	1
46	1	1
47	1	0
54	1	1

Tabla A.6: Recursos por cuartel para el ejemplo AG con más de una iteración

En las imágenes A.8a, A.8b, A.9a, A.9b, A.10a, A.10b, A.11a, A.11b se muestran los resultados de las autobombas para el ejemplo AG con 2 iteraciones.

Las figuras A.8a y A.11b son las 2 autobombas que van al incendio 0, desde los cuarteles 45 y 32 cumpliendo

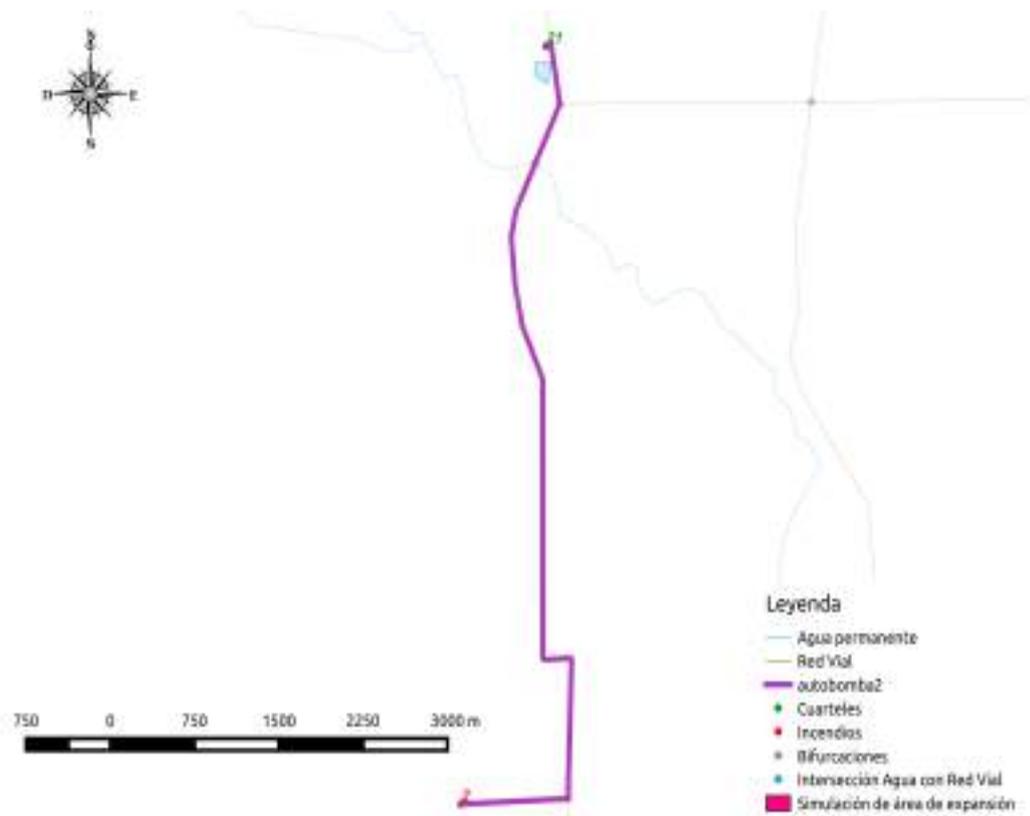


(a)

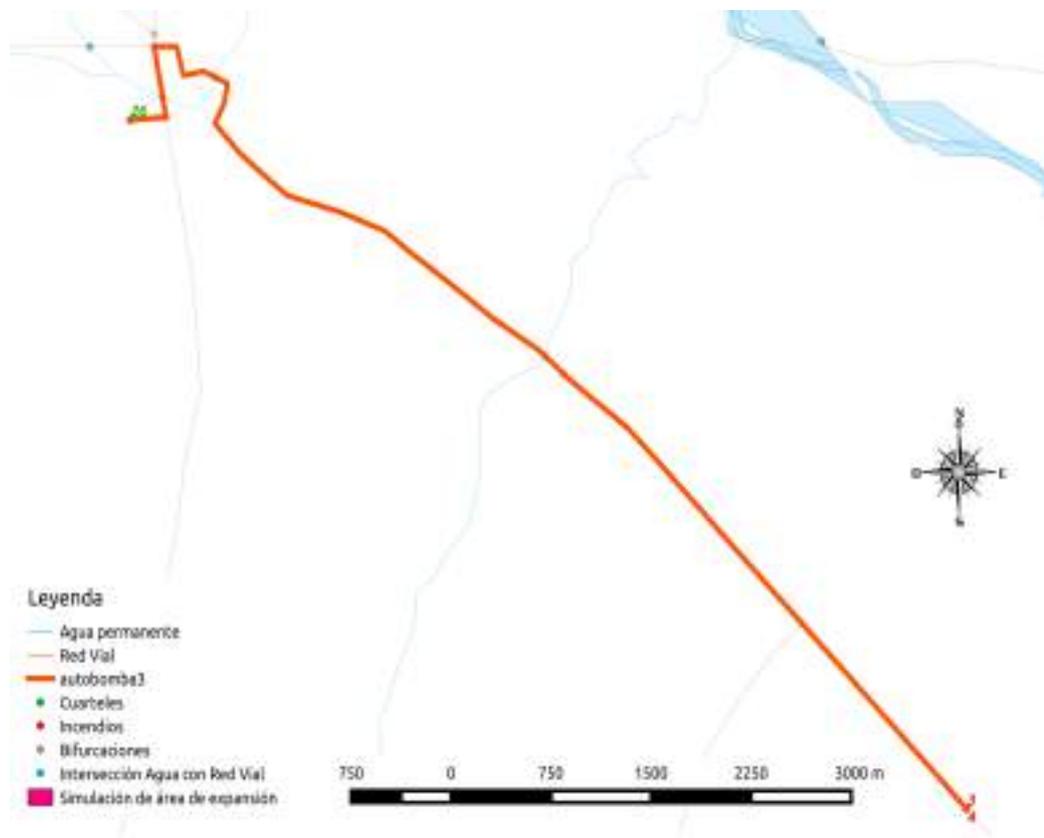


(b)

Figure A.8: (a) Capa de información geográfica de salida para la autobomba 0 del Ejemplo AG con mas iteracion, caso 7 (b) Capa de información geográfica de salida para la autobomba 1 del Ejemplo AG con mas iteracion, caso 7

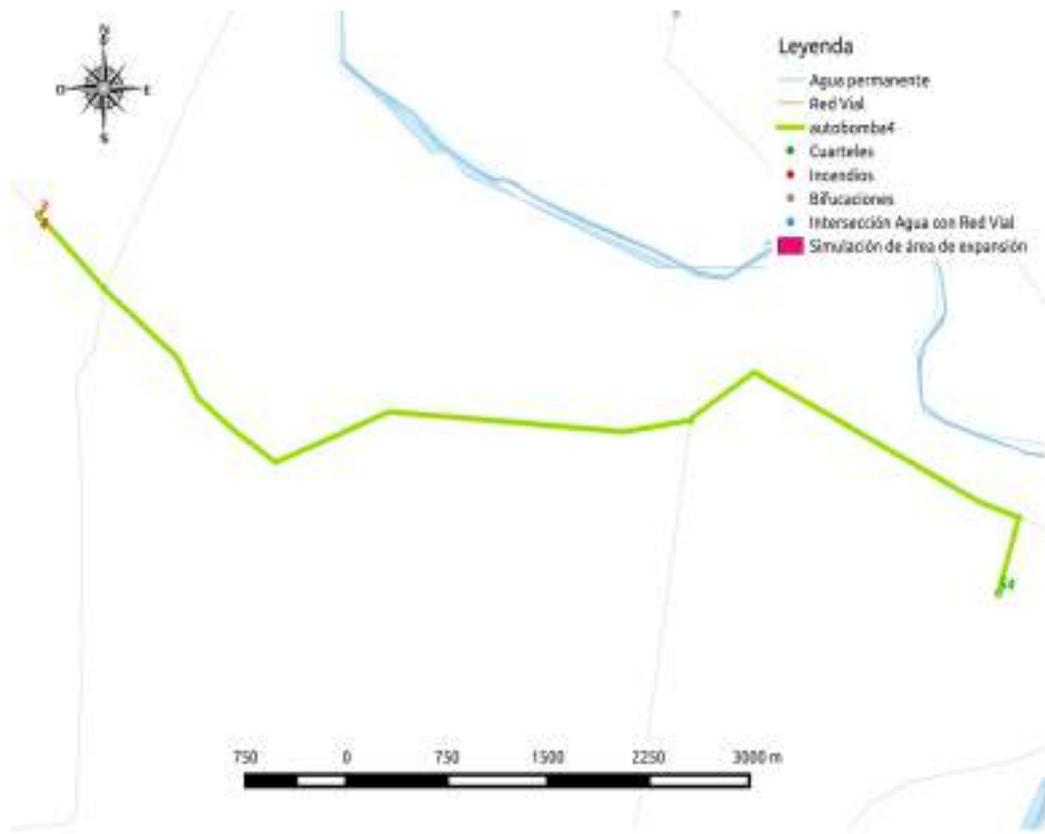


(a)

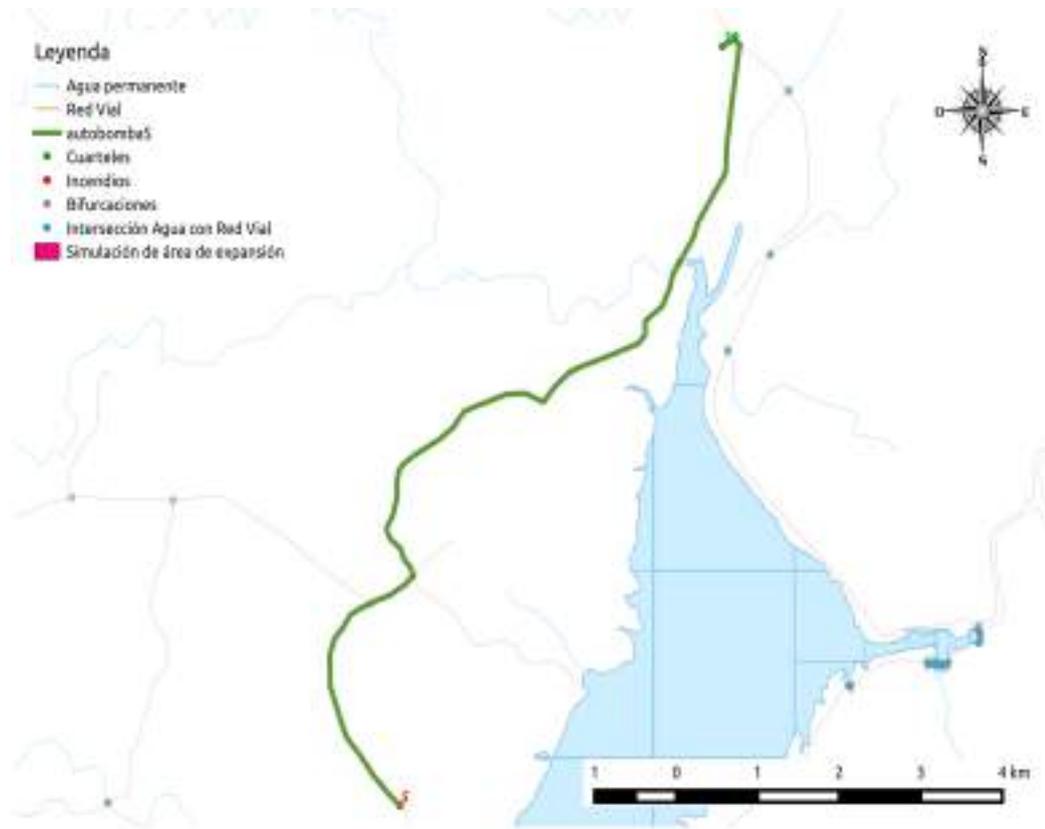


(b)

Figure A.9: (a) Capa de información geográfica de salida para la autobomba 2 del Ejemplo AG con mas iteracion, caso 7 (b) Capa de información geográfica de salida para la autobomba 3 del Ejemplo AG con mas iteracion, caso 7

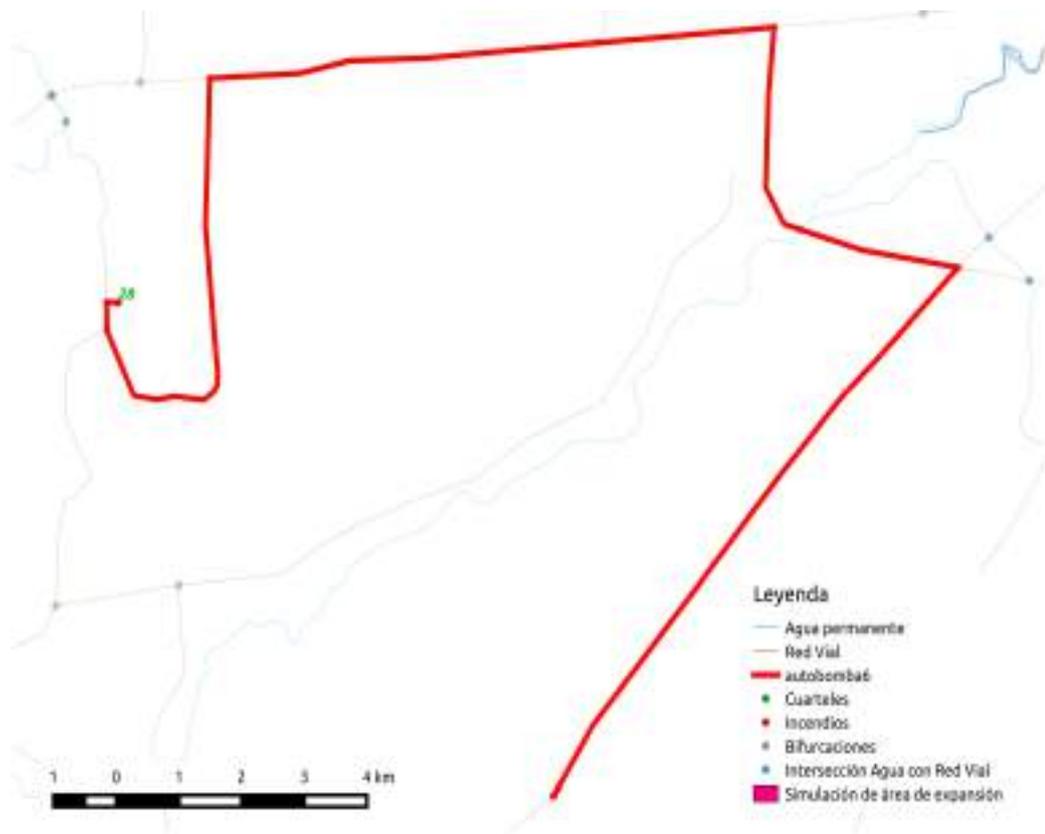


(a)

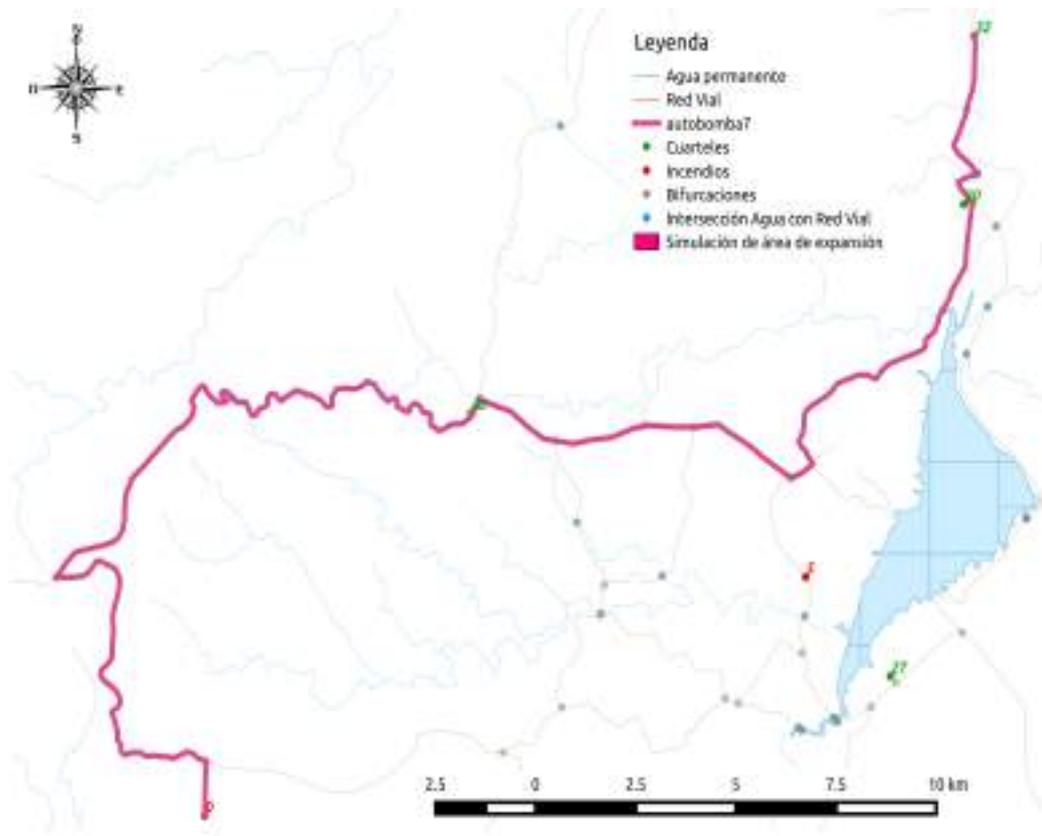


(b)

Figure A.10: (a) Capa de información geográfica de salida para la autobomba 4 del Ejemplo AG con más iteración, caso 7 (b) Capa de información geográfica de salida para la autobomba 5 del Ejemplo AG con más iteración, caso 7



(a)

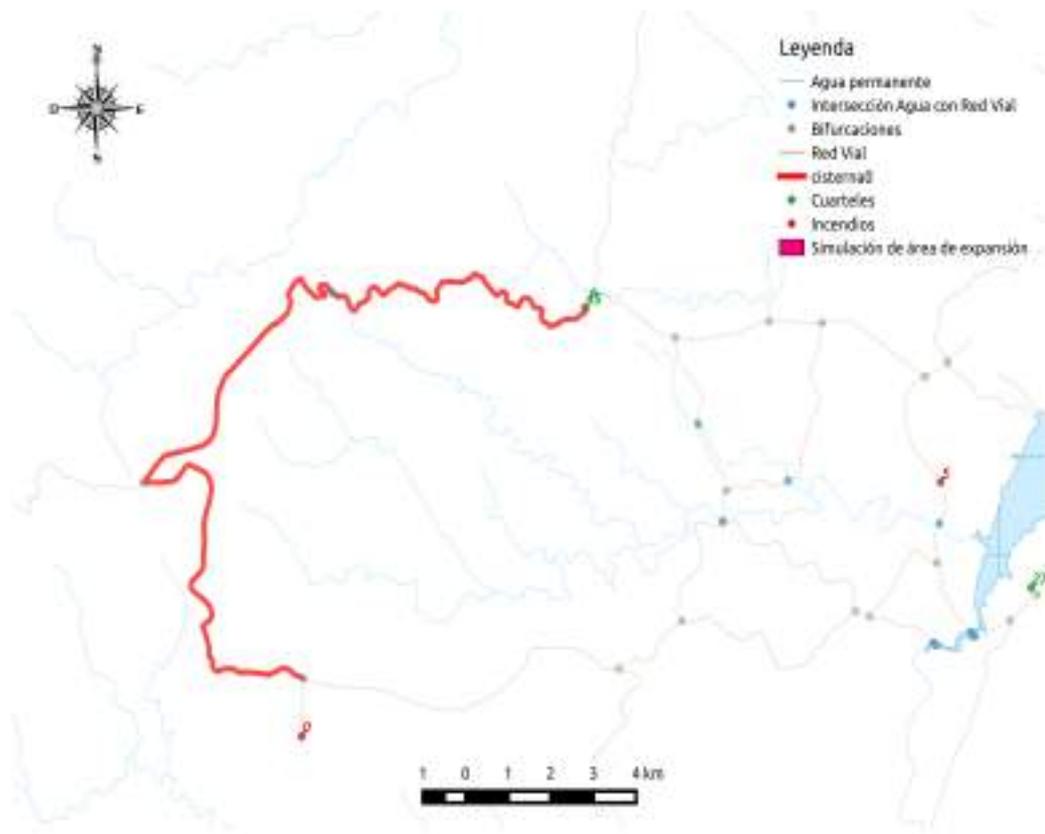


(b)

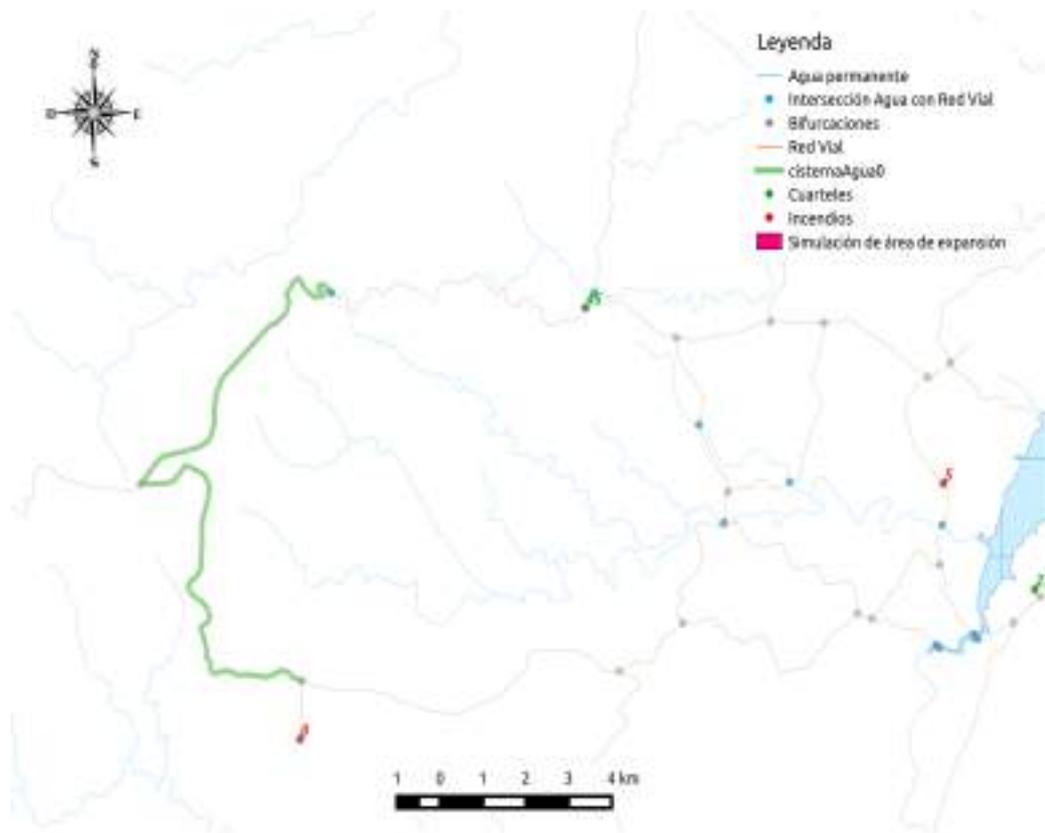
Figure A.11: (a) Capa de información geográfica de salida para la autobomba 6 del Ejemplo AG con más iteración, caso 7 (b) Capa de información geográfica de salida para la autobomba 7 del Ejemplo AG con más iteración, caso 7

la cantidad de autobombas que necesita el incendio 0 para poder extinguirlo. El cuartel 45 es el cuartel mas cercano para la segunda iteración, pero como ya no tiene mas autobombas porque la asignó en la primera iteracion el cuartel 32 es el mas cercano con autobombas disponibles como se esperaba. La figura A.8b es la autobomba que va desde el cuartel 27 al incendio 0.

En las imágenes A.12a, A.13a, A.14a, A.15a, A.12b, A.13b, A.14b y A.15b se muestran las soluciones para el problema 2, ejemplo AG con 2 iteraciones.
Las imágenes A.12a, A.13a, A.14a, A.15a y A.12b muestran el recorrido que se recomienda hacer para las cisternas desde los cuarteles hasta los incendios.
Y las imágenes A.12b, A.13b, A.14b y A.15b muestran el recorrido que se recomienda para que puedan recargar agua al punto mas cercano desde el incendio.

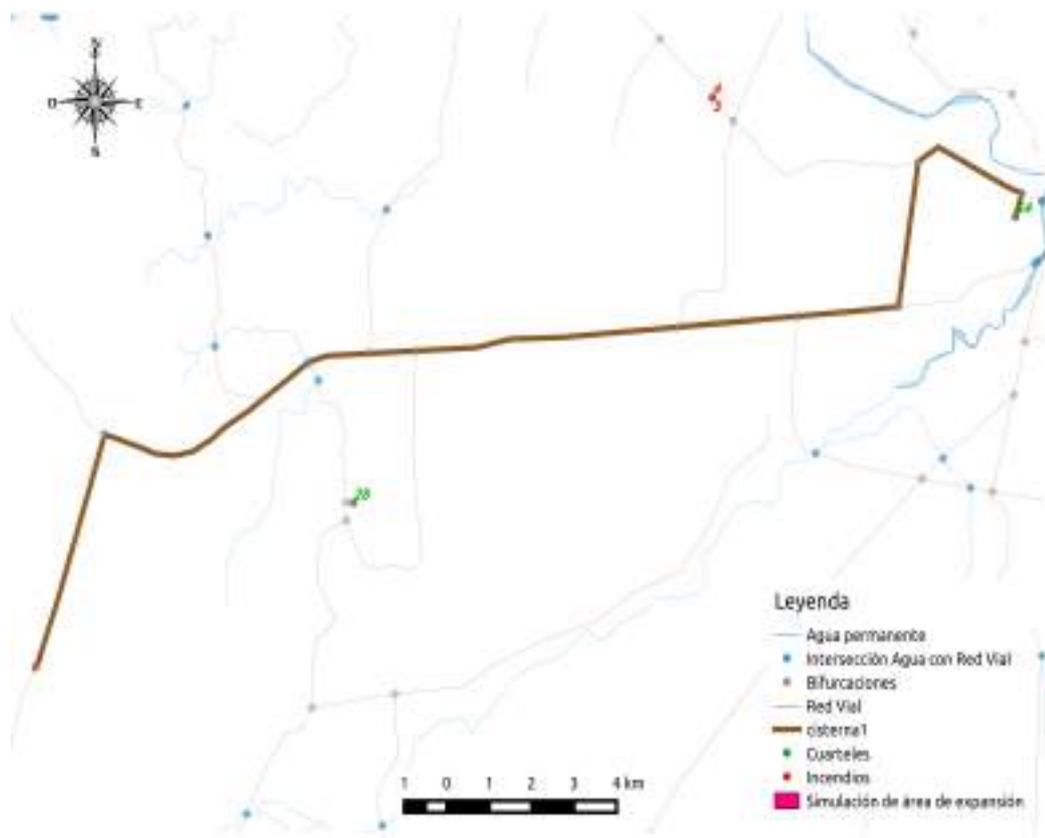


(a)

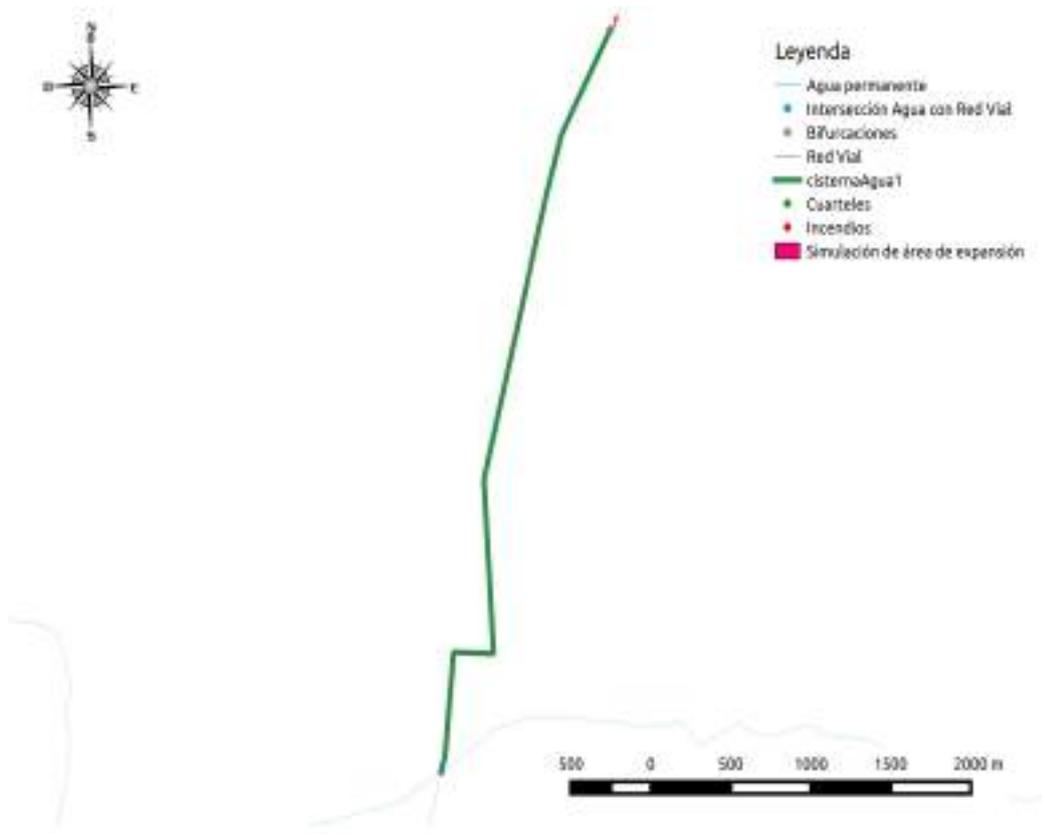


(b)

Figure A.12: (a) Capa de información geográfica de salida para la cisterna 0 del Ejemplo AG con más iteración, caso 7 (b) Capa de información geográfica de salida para la cisterna de agua 0 del Ejemplo AG con más iteración, caso 7

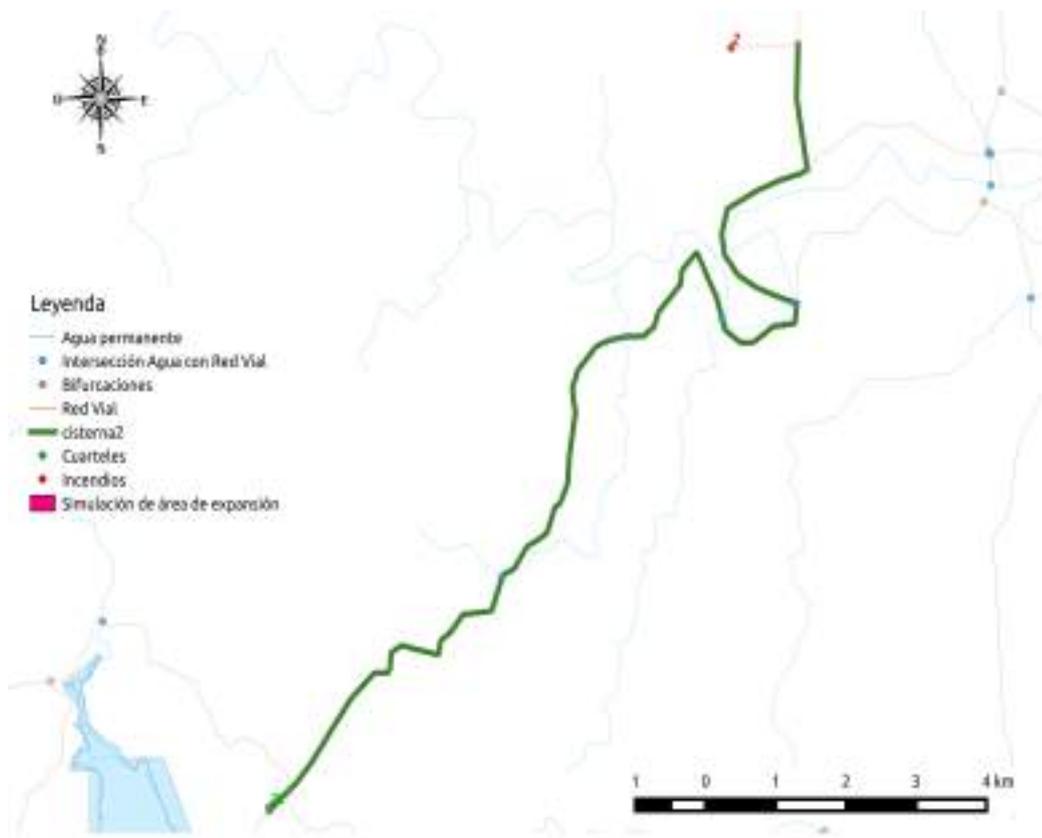


(a)

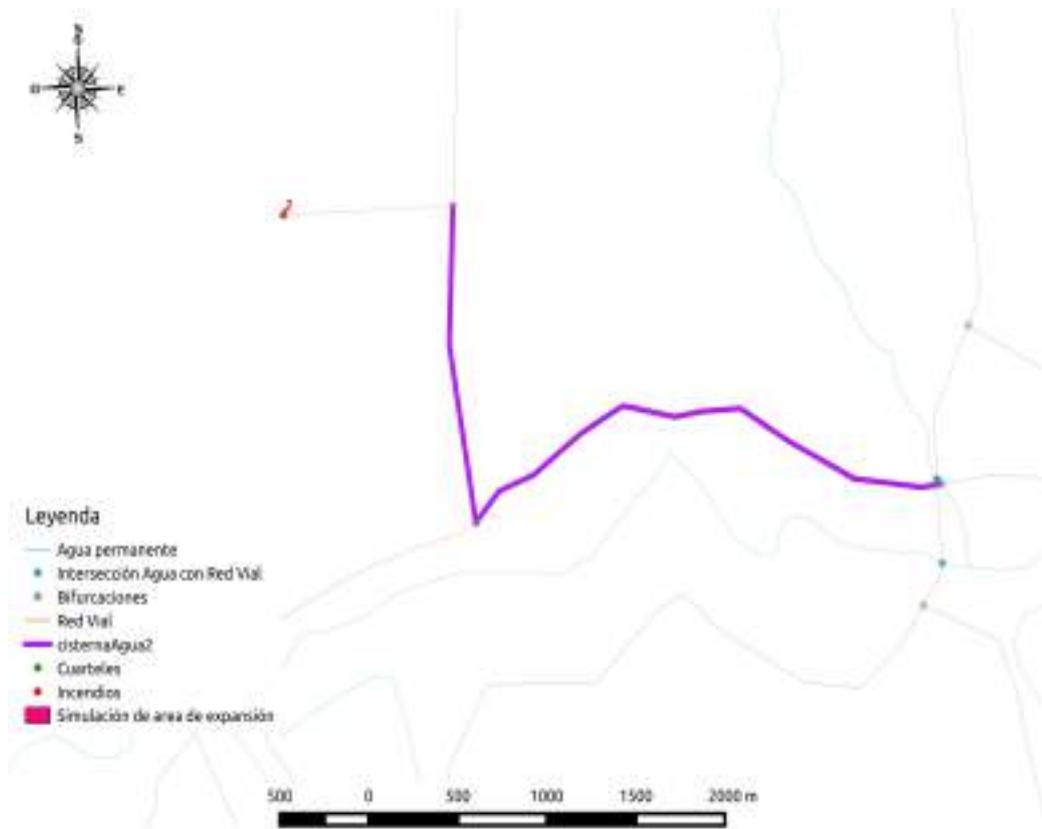


(b)

Figure A.13: (a) Capa de información geográfica de salida para la cisterna 1 del Ejemplo AG con mas iteración, caso 7 (b) Capa de información geográfica de salida para la cisterna de agua 1 del Ejemplo AG con mas iteración, caso 7

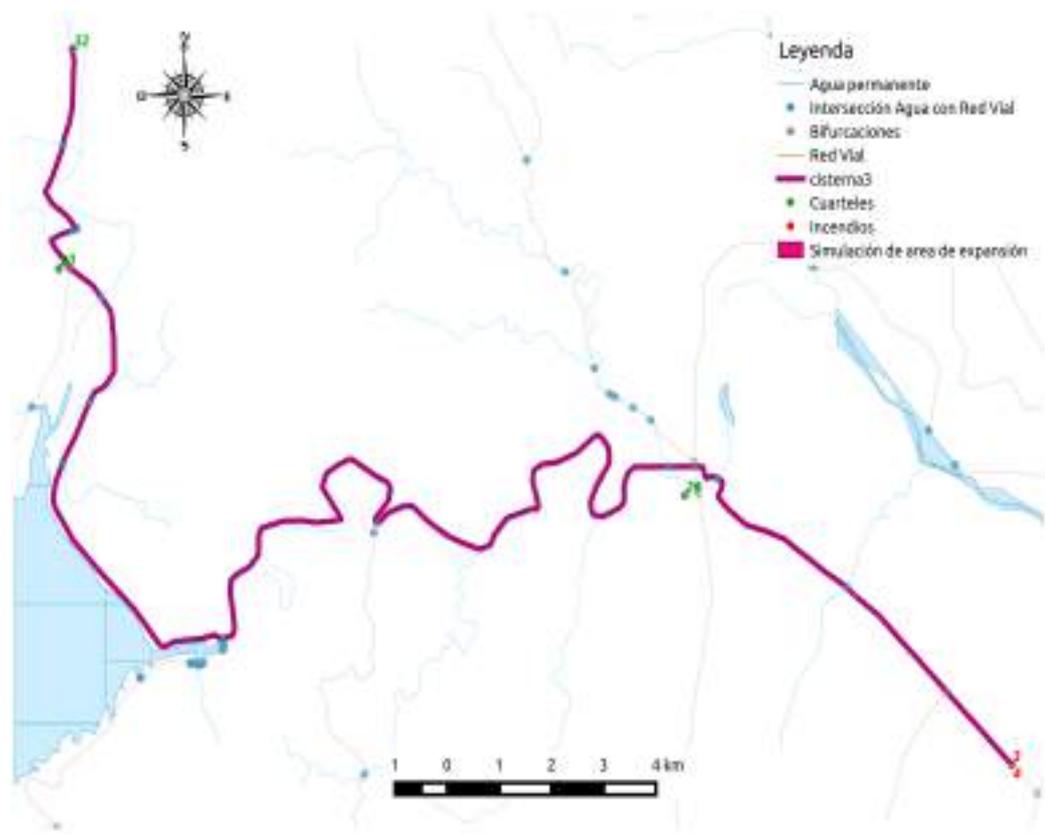


(a)

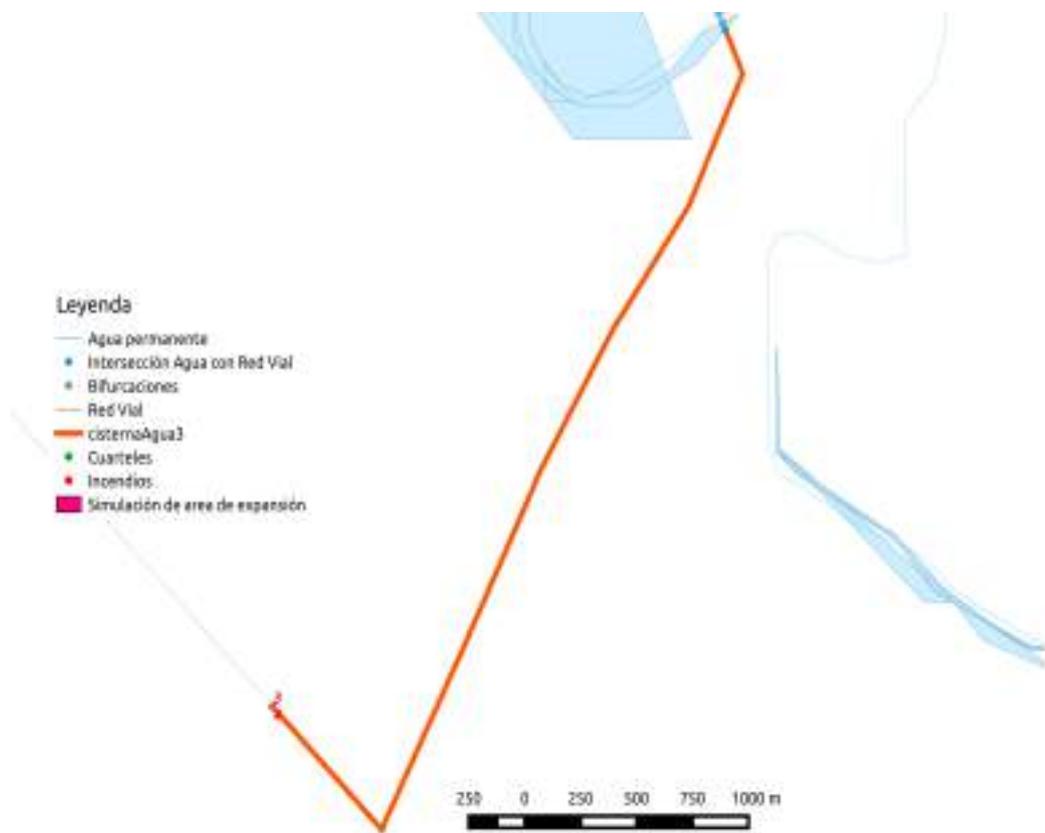


(b)

Figure A.14: (a) Capa de información geográfica de salida para la cisterna 2 del Ejemplo AG con mas iteración, caso 7 (b) Capa de información geográfica de salida para la cisterna de agua 2 del Ejemplo AG con mas iteración, caso 7



(a)



(b)

Figure A.15: (a) Capa de información geográfica de salida para la cisterna 3 del Ejemplo AG con mas iteración, caso 7 (b) Capa de información geográfica de salida para la cisterna de agua 3 del Ejemplo AG con mas iteración, caso 7

Este apéndice introduce algunos procedimientos técnicos en detalle de cómo fueron llevados a cabo algunos de ellos.

B.1 Preprocesamiento del DEM

En esta sección se explica cómo fue llevado a cabo el preprocesamiento del DEM para que sea tomado correctamente por Farsite.

Dado el vector de Córdoba, se extrajeron las siguientes coordenadas en relación al sur, norte: 29, 36. De éstos archivos se seleccionaron en base a a las coordenadas extraídas del vector de Córdoba, del este y oeste: 61 al 66. Los nombres elegidos de los archivos se listan a continuación:

- s29w61_45c.img
- s29w62_45c.img
- s29w63_45c.img
- s29w64_45c.img
- s29w65_45c.img
- s29w66_45c.img

Ídem para 30, 31, 32, 33, 34, 35 y 36.

Luego se hizo un mosaico mediante la herramienta de Envi:

Basic Tools -> Mosaicking -> Georeferenced.

para obtener el tile completo que va a contener los tiles que forman parte del dem de Córdoba.

Luego se construyó una máscara con el vector de Córdoba, y finalmente se le aplicó dicha máscara. Las coordenadas al final resultaron en coordenadas geográficas con datum WGS-84.

B.2 Reducción de área de interés en dem y capa de vegetación

Esta sección se explica el preprocesamiento de reducción al área de interés de el dem y la capa de vegetación, para que sean tomados como entrada en la construcción de LCP (landscape).

Preproceso para la capa de vegetación:

- 1) Fue transformado a Posgar (mediante QGIS)
- 2) Recortado con el vector del buffer (ver sección 3.2.5).

Preproceso para el dem:

- 1) Su sistema de coordenadas fue transformado a UTM zona 21 con Envi, dado que se debía cambiarle el tamaño del píxel a 30*30 para que coincidiera con el de la capa de vegetación.
- 2) Se cambió el tamaño del píxel a 30 mediante Envi con Resize data.
- 3) Fue recortado con el bufer (que previamente se lo había reproyectado en el sistema UTM mediante QGIS) mediante Clip Raster by Mask de QGIS.
- 4) Mediante Resize data se cambió de nuevo el tamaño de píxel a 30, dado que la herramienta Clip no deja un tamaño exacto de 30 si no con un error.
- 5) Se reproyectó a POSGAR mediante Envi, Map -> Convert map projection.
- 6) Finalmente se hizo Layer Stacking con opción exclusive para que recorte a ambos, dejando el tamaño del más chico de ambos (el dem y la capa de vegetación).

Mediante la herramienta de Envi, Topographic -> Topographic modeling se extrajeron el aspect y el slope.

Este apéndice introduce algunos conceptos.

C.1 Definiciones

Se mencionan características o definiciones, que fueron utilizadas:

Compleitud: encontrará una solución, si existe una y el factor de branching (o ramificación) es finito en cada nodo.

Admisibilidad: si todos los nodos tienen el mismo costo, éste encontrará una solución óptima.

Eficiencia: buena si los objetivos están cerca.

Problema: el consumo de memoria exponencial.

C.2 Algoritmos de búsqueda en grafos

Los algoritmos de búsqueda en grafos nacen por la necesidad de crear un mecanismo de navegación autónoma, bien sea de robots, coches, o personajes en un videojuego.

Un grafo, representa un conjunto de nodos unidos en una red. Si dos nodos están unidos, al viajar de uno a otro se considerara **sucesor** el nodo al que nos movemos, y **predecesor** el nodo del que venimos. Además, normalmente existirá un coste vinculado al desplazamiento entre nodos. Un algoritmo de búsqueda tratará de encontrar un camino óptimo entre dos nodos como por ejemplo un camino que minimice el coste de desplazamiento, o el número de pasos a realizar. La principal diferencia entre los algoritmos es la información que guardan a cerca del grafo. Algunos de ellos no guardan información alguna, simplemente expanden la búsqueda desde el nodo inicial hasta que se llega al nodo final, otros guardan el coste de viajar desde el origen hasta ese nodo, o incluso una estimación de lo prometedor que es un nodo para conducir el camino a su objetivo. La expansión de la búsqueda se realiza en forma de árbol. Partiendo del nodo inicial, se extenderá la búsqueda a sus nodos vecinos, de cada uno de estos nodos vecinos, a sus respectivos nodos vecinos, y así hasta que uno de los nodos a los que se expande la búsqueda es el nodo objetivo.

Notación

El algoritmo consta de dos listas, Abierta, y Cerrada. En la lista Abierta se guardan los nodos que aun no se han expandido para la búsqueda, que en otras palabras serian las hojas de un árbol. En la lista Cerrada, se guardan los nodos que ya se han procesado y expandido, estos nodos se guardan porque la expansión de la búsqueda podría intentar volver a pasar por uno de esos nodos y de estar almacenados, se tiene constancia de los nodos que ya se han procesado. Además, cada nodo almacenará información a cerca de quien es su nodo predecesor.

Ejemplo de algoritmo simple

```
1
2 Busqueda en grafo()
3
4 Crear dos listas vacias, Abiertos y Cerrados
5
6 Meter el nodo origen O en la lista Abiertos
7
8 Repetir
9
10     Si (Abiertos esta vacia) entonces
11
12         Devolver error
13
14     Seleccionar el primer nodo, N de Abiertos y ponerlo en Cerrados
15
16     Si (N == Destino) entonces
17
18         Devolver N
19
20         //Recuerda que este es un algoritmo de busqueda en un grafo
21
22         //Para obtener el camino que une el nodo origen y destino
23         //se utilizara otro algoritmo
24
25     Expandir (N) obteniendo un conjunto de sucesores
26
27     Para cada (S en {Sucesores(N)})
28
29     Si (S noen Abierta y S noen Cerrada) entonces
30
31         Guardar N como el predecesor de S
32
33         Meter S en la lista Abiertos
34
35 Hasta que el nodo destino se haya encontrado
```

Explicación del algoritmo

Primero se crean dos listas que almacenarán nodos, la lista Abiertos que contiene los nodos que se tienen que expandir, y la lista Cerrados que contiene los que ya han sido expandidos.

El nodo de origen, llamado O en este caso, se mete en la lista de Abiertos para ser expandido.

En este punto, se inicia la propagación de la búsqueda, se crea un bucle que acabará en dos posibles ocasiones: Cuando la lista Abiertos este vacía, o cuando se encuentre el nodo destino.

El bucle consiste en varios pasos: Primero se obtiene el primer nodo de la lista Abiertos.

El nodo seleccionado es arbitrario, en otros algoritmos se elegiría un nodo que cumpliera ciertas propiedades, pero no es lo que se busca aquí. Si esta lista esta vacía quiere decir que no quedan mas candidatos para la expansión, y aun así no se encontró el destino el algoritmo ha fallado. Por otra parte, si el nodo que seleccionamos de la lista Abiertos es el destino el algoritmo habrá acabado, ya que hemos encontrado el destino.

El camino entre el origen y el destino es un conjunto de nodos que se obtendrán guardando cada predecesor del nodo destino.

En otro caso se seguirá expandiendo la lista, obteniendo una lista de sucesores del nodo actual y guardando en la lista Abiertos aquellos nodos que no estuvieran antes en una lista, o con otras palabras aquellos nodos a los que aun no se había llegado. De esta forma, el algoritmo acabará encontrando el destino, o recorriendo todo el mapa.

Efectividad

Si la expansión estuviera orientada en dirección del nodo destino disminuiría el tiempo de computación, como se da con este algoritmo. Otro factor a tener en cuenta es que a pesar de haber alcanzado el nodo destino, el algoritmo no finaliza hasta que lo procesa, o en otras palabras hasta que pasa a ser el primer nodo de la lista Abiertos. Estas dos tareas, están relacionadas con la prioridad de búsqueda y en algoritmos más avanzados se corrige mediante el uso de estimadores heurísticos como la distancia manhattan, o la distancia euclídea. Usando estos estimadores el algoritmo procesará primero los nodos de la lista abierta que tengan una menor distancia al origen, evitando así expansiones innecesarias.

- [1] Regla treinta. http://www.teinteresa.es/espana/Regla-determina-peligrosidad-incendio_0_751125465.html.
- [2] Siadex. an integrated planning framework for crisis action planning. <http://decsai.ugr.es/siadex/index.htm>.
- [3] AUSIELLO, G., CRESCENZI, P., GAMBOSI, G., KANN, V., MARCHETTI-SPACCAMMELA, A., AND PROTASI, M. *Complexity and Approximation*.
- [4] AVESANI, P., PERINI, A., AND RICCI, F. Cbet: A case base exploration tool.
- [5] AVESANI, P., PERINI, A., AND RICCI, F. Interactive case-based planning for forest fire managment.
- [6] DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA), F. O. Los incendios en argentina dejan miles de hectáreas calcinadas y animales muertos. <http://www.economistaamerica.com.ar/sociedad-eAm/noticias/5478022/01/14/Argentina-Los-incendios-en-La-Pampa-argentina-deja-mas-de-300-mil-hectareas-quemadas-y-animales-muertos.html>.
- [7] EROL, K., HENDLER, J., AND NAU, D. Htn planning: Complexity and expressivity. *Computer Science Department, Institute for Systems Research and Institute for Advanced Computer Studies University of Maryland* (1994).
- [8] FERRARIS, G., AND ZACCONI, G. Zonificación preliminar de modelos de combustibles en la provincia de mendoza.
- [9] FLOYD, R. Algorithm 97: Shortest path. *Communications of the ACM*, 5(6), 345 (1962).
- [10] GEOGRÁFICO NACIONAL (IGN) REPÚBLICA ARGENTINA, I. Sig-250 instituto geográfico nacional. <http://www.ign.gob.ar/sig>.
- [11] KAUFMANN, M. Innovative approaches to planning, scheduling and control: proceedings of a workshop held at san diego, california. *Workshop on Innovative Approaches to Planning, S. and Control San Diego* (1990).
- [12] KOPTA, F., AND COLOMBATTI, M. Manejo rural sin fuego. In *Guía para productores de la provincia de Córdoba*. 2005.
- [13] MAPEAR, P. Cartografía vectorial de argentina. <http://www.proyectomapear.com.ar/>.
- [14] NILSSON, N. *Inteligencia artificial- Una nueva síntesis*. 2005.
- [15] PLANKEN, L. Computing all-pairs shortest paths by leveraging low treewidth. *Journal of artificial intelligence research* 43 (2012) 353-388.
- [16] RIVAS, K. C. Sig control y combate de incendios forestales. *Fundación UPC (Barcelona)* http://www-cpsv.upc.es/tesines/resumsig_kcontreras.pdf (2008).
- [17] RUSSEL, S., AND P, P. N. *Artificial intelligence a modern aproach*.
- [18] SCHRIJVER, A. *Combinatorial Optimization*. 2002.
- [19] VOZ DEL INTERIOR, L. <http://www.lavoz.com.ar/regionales/los-incendios-afectaron-95-mil-hectareas-de-sierras>.
- [20] ZALAZAR, L. Herramientas geoespaciales para la gestión de incendios en el parque nacional quebrada

del condorito.