



Instituto Tecnológico de Buenos Aires – ITBA
Escuela de ingeniería y gestión

DRONES BOMBEROS

COMBATE AUTOMATIZADO DE INCENDIOS FORESTALES CON DRONES

AUTOR

SANTIAGO CAMISAY (LEG. N°47583)

TUTOR

RODRIGO RAMELE

Proyecto final presentado para la obtención del título de
Ingeniero en Informática

BUENOS AIRES
31 DE MAYO DE 2021

Resumen

Este trabajo describe el desarrollo de un simulador de enjambres de drones bomberos y tanques proveedores de agua que extinguen incendios forestales. Este proyecto determina y evalúa las interacciones de las tres partes que componen el sistema (drones, fuegos y tanques) y su impacto en el proceso de extinción.

Adicionalmente, se desarrolló una herramienta web diseñada para este trabajo, con la que se pueden llevar a cabo la gestión, producción y análisis de las simulaciones o experimentos.

En base a los resultados obtenidos y modelos desarrollados se puede verificar que: (1) El tiempo de extinción decrece exponencialmente al aumentar la cantidad de drones y tanques, (2) la distancia entre fuegos y tanques afecta el rendimiento de los drones, (3) el incremento en la cantidad de drones en el sistema no entorpece el funcionamiento del enjambre y (4) que la autoorganización de los drones produce un efecto positivo adicional en la extinción del incendio.

Finalmente, se concluye, que un enjambre de drones bomberos puede ser eficiente en combatir incendios forestales, siempre y cuando trabajen en forma coordinada y cooperativa.

Índice general

1. Introducción	1
2. Estado del arte	5
2.1. Estado del arte	5
2.2. Experimentación	7
2.2.1. Metodología	7
2.2.2. Escenario	8
2.3. Componentes de los incendios y su modelado	8
2.3.1. Causas	9
2.3.2. Proceso de ignición	10
2.3.3. Fases de combustión	12
2.3.4. Otras propiedades	13
2.3.5. Consecuencias	14
3. Partes del sistema	15
3.1. Escenario	15
3.1.1. Posiciones vecinas	16

3.1.2. Orientaciones vecinas	16
3.1.3. Evolución	17
3.2. Drones	18
3.3. Fuegos	22
3.4. Tanques	24
4. Simulaciones y experimentos	27
4.1. Simulación	27
4.2. Conceptos útiles	29
4.2.1. Tiempo de extinción	29
4.2.2. Ciclo de carga de un dron	29
4.3. Experimentos	31
4.3.1. Enjambre de drones contra un superdron	31
4.3.2. Optimizando el tiempo de extinción	36
4.3.3. Distancia entre fuegos y tanques	39
4.3.4. Distancia límite	42
5. Comportamiento emergente de los drones	45
5.1. Definiciones y objetivos	45
5.2. Patrones de correlación	46
5.3. Interacciones sinérgica	48
5.4. Formación de patrones	50
6. Conclusión	55

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	v
7. Trabajos futuros	57
7.1. Expansión del escenario a tres dimensiones	57
7.2. Propagación de fuegos	58
7.3. Implementación del viento	59
7.4. Drones con energía eléctrica limitada	59
8. Anexo	61
8.1. Casos de uso	61
8.2. Arquitectura y diseño	64
8.3. Implementación	65
Bibliografía	69

Capítulo 1

Introducción

El objetivo de este trabajo es entender la efectividad y el comportamiento de un enjambre de drones bomberos junto a un conjunto de tanques proveedores de agua para extinguir incendios forestales. Para ello, se realiza un modelado y simulación de drones bomberos a los que se les otorga autonomía en sus decisiones y un conjunto de capacidades limitadas a: buscar el incendio más cercano, buscar el tanque más conveniente para cargar agua, cargar agua del tanque, detenerse en medio del trayecto a un objetivo, aterrizar y despegar.

Todos los años se desencadenan incendios forestales a lo largo del mundo. Algunos llegan a ser catastróficos, como los ocurridos recientemente en el Amazonas, Australia y California. Las consecuencias van desde destrucciones materiales hasta pérdidas de vidas humanas sin dejar de lado el fuerte impacto ambiental [1]. Hoy en día el combate de incendios es principalmente dado por bomberos que ponen en riesgo sus vidas y tienen dificultades para llegar a muchos de los focos a causa de los obstáculos en el terreno [2].

El presente trabajo se enfoca en proponer una alternativa al contexto de combate de incendios forestales actual. Por medio de un simulador se pretende reproducir y entender las interacciones de las tres partes que componen el sistema: drones, fuegos y tanques. También se pretende hacer foco sobre las variables del escenario que se vean afectadas por estas interacciones como la temperatura del sistema.

Este trabajo se limita a proponer un modelo simplificado de este problema y simular su comportamiento mediante el desarrollo de un simulador. El escenario hace una representación bidimensional de la realidad donde interactúan únicamente las tres partes del sistema.

En los últimos años hubo avances en distintas áreas estratégicas para este problema: drones especializados, algoritmos de enjambres y sistemas de inteligencia artificial para detección de incendios. Se propone combinar algunos elementos pertenecientes a estas áreas que deriven en un conjunto de soluciones para este tipo de problemas. Estas soluciones innovadoras son la autonomía de cada uno de los drones bomberos sobre un conjunto de acciones y la capacidad de recarga automatizada. Adicionalmente, una buena solución teórica puede inspirar la implementación de su versión física.

Este trabajo pretende abordar los siguientes planteos.

- ¿Cómo varía el tiempo de extinción en función de la cantidad de drones, tanques y fuegos?
- ¿Cómo afectan al tiempo de extinción las posiciones iniciales de las partes?
- ¿Qué criterios determinan que un conjunto de drones no puedan apagar un incendio?
- ¿El incremento de la cantidad de drones se vuelve contraproducente para el tiempo de extinción en algún punto?
- ¿Se obtiene algún efecto adicional al agregar tanques y drones, en comparación al efecto de la suma de sus partes individuales?

El trabajo esta estructurado por una serie de capitulos que se detallan a continuación:

Capítulo 2: Se hace una exposición del estado del arte donde se contrastan las áreas de conocimiento útiles para el problema y sus nexos. La segunda parte de este capítulo se enfoca en la metodología y los métodos que se usan en este proyecto para realizar los experimentos. La última parte trata los elementos que componen a un incendio forestal y las decisiones que se toman para modelar o no a cada uno de ellos.

Capítulo 3: En este capítulo se hace una explicación detallada de las partes que componen al sistema: el escenario, los fuegos, los drones y los tanques. En cada sección se describe la composición, el comportamiento y la interacción de cada una de las partes con el resto.

Capítulo 4: En este lugar se llevan a cabo los experimentos que servirán para comprobar o responder las hipótesis. El primer experimento compara el rendimiento de un enjambre de drones con un superdrone. El segundo modela la relación entre el tiempo de extinción y las partes del sistema. El siguiente trata de la importancia que tiene la distancia entre los tanques y los fuegos en este problema. Y por último, se profundiza sobre dicha distancia, vista como un factor límite para decidir la factibilidad de extinción de incendios.

Capítulo 5: Aca se analizan los distintos comportamiento emergentes que surgen de la interacción sinérgica de las partes y de sus patrones de correlación. Los análisis se basan en los resultados obtenidos por los experimentos realizados en el capítulo anterior.

Capítulo 6: En esta parte se listan las conclusiones derivadas de los razonamientos y experimentos llevados a cabo en el trabajo.

Capítulo 7: Luego se propone una serie de aspectos que se pueden implementar para poner a prueba o mejorar el comportamiento del enjambre de drones bomberos en diferentes escenarios más cercanos a la realidad.

Capítulo 8: Por último se exponen detalles de funcionalidad, diseño e implementación de la herramienta desarrollada para este trabajo.

Capítulo 2

Estado del arte

En el presente capítulo se detalla, compara y analiza la bibliografía y trabajos más relevantes que se relacionan con este proyecto. Se establecen las áreas de estudio, sus nexos, mejoras posibles y finalmente se explica como el presente trabajo propone justificar su aporte en este tipo de problemas. Luego, la segunda parte del capítulo explica las metodologías y métodos que se usaron en los experimentos realizados para probar y responder las hipótesis del proyecto. La última parte trata los elementos que componen a un incendio forestal y las decisiones que se toman para modelar o no a cada uno de ellos.

2.1. Estado del arte

En esta sección se detallan las investigaciones y desarrollos que se asemejan o brindan aspectos esenciales para el presente trabajo. Los proyectos evaluados se pueden categorizar en tres áreas de potencial importancia para el problema que se quiere resolver: drones solitarios especializados, enjambre de drones y sistemas de inteligencia artificial.

Muchos de los proyectos se enfocan en drones especializados que resuelven problemas individualmente. Los que se especializan en apagar fuegos tienen una manguera conectada a una fuente de agua (manguera llevada por un solo dron [3] o por una fila de drones [4]) o un tanque interno ([5] y [6]) pero nunca ambas combinadas. Los inconvenientes de estar

conectado a una manguera son las limitaciones en el movimiento y la imposibilidad de traslado a focos más lejanos, porque la manguera no se mueve de su posición de anclaje, sin embargo la ventaja es que el recurso de extinción es ilimitado. Por otro lado, el contar con un tanque interno, evita que el drone tenga las desventajas de desplazamiento previamente mencionadas pero no tiene forma de recargar su tanque cuando se queda sin reservas. Por lo general, estos drones bomberos se especializan en incendios urbanos y uno solo en rurales, sin embargo todos son modelos experimentales o prototipos. Los que no se especializan en combatir incendios lo hacen en detectarlos por medio de sus sensores que utilizan el procesamiento de imágenes a través de diversos algoritmos [7]. El común denominador en estos proyectos es el control manual que se hace de los drones por parte de un usuario (y en algunos casos multiusuario [8]).

La mayoría de los trabajos analizados son sobre sistemas de enjambres de drones, particularmente implementados en simuladores. El grueso de los sistemas no tienen como objetivo la lucha contra el fuego sino más bien se enfocan en mantener un patrón de organización en el enjambre mediante sensores y protocolos de comunicación para lograr su propósito que suele ser de búsqueda y reconocimiento [9] o traslado de algún cargamento [10]. Por otro lado, una característica común a todos, son los sensores, que les sirven tanto para relacionarse con los otros miembros del enjambre como para medir distintas variables en el ambiente [11]. Los sensores suelen ser térmicos [12], por imágenes y la comunicación inalámbrica. Los sistemas que tienen drones bomberos cuentan con un tanque interno, sin posibilidad de recarga, algunos dividen el enjambre en dos tipos de drones [13]: los que buscan fuego y los que lo combaten. La cooperación entre drones es la regla como también la autonomía en su control, aunque en menor medida. Entre los algoritmos que muchos proyectos tienen se encuentra el de control de colisiones, que necesita establecer una distancia mínima entre los drones [14]; y otro es el de formación de patrones [15], que requiere una distancia máxima para que no se desarme el enjambre. La arquitectura de control suele ser del tipo amo-esclavo, donde hay un dron maestro que coordina al resto; aunque otras arquitecturas permiten a cada dron tener autonomía sobre el marco de un conjunto de reglas [16].

Los sistemas de inteligencia artificial que se analizaron se enfocan en algoritmos de visión artificial empleados para detectar incendios. Uno de ellos trabaja en el reconocimiento de llamas y humos a través de una secuencia de imágenes [17]. El otro es un sistema de búsqueda y

reconocimiento de incendios que analiza áreas determinadas y las categoriza por niveles de peligrosidad [18]; usa para su implementación sistemas expertos y lógica difusa. Lo que vale destacar de estos trabajos es su alto grado de precisión, sin embargo la detección se hace a distancias muy cercanas o demasiado lejanas, que no son imposibles para que las haga un drone desde su posición aunque sí inconvenientes.

El presente trabajo busca integrar elementos de los trabajos anteriores y ofrecer soluciones a los inconvenientes remarcados, como por ejemplo que los drones bomberos, pertenecientes al enjambre, tengan autonomía para la toma de decisiones individuales, tales como apagar un incendio o recargar agua. También, que posean la capacidad, mediante sus sensores térmicos, de detectar focos de fuego en forma eficiente. Y sobre todo, que el enjambre muestre un comportamiento emergente fruto de las interacciones cooperativas, que haga la tarea de los drones más efectivas en conjunto que ejecutadas individualmente.

Adicionalmente se destaca el interés generado a nivel de política ecológica, a modo de ejemplo, la CONEA, agencia espacial de Argentina, ofrece un programa de financiamiento a proyectos tecnológicos destinados a la prevención de incendios forestales mediante el uso de tecnologías espaciales [19].

2.2. Experimentación

2.2.1. Metodología

En este trabajo se presenta un simulador donde se aplican restricciones en base a puntos asumidos sobre un modelo del ambiente real, y sobre el mismo se pretende ganar más entendimiento de cómo la coordinación de un enjambre de drones junto a tanques, fuentes proveedoras de agua, puede ayudar en el combate de incendios forestales.

Para entender la medida en que tiene impacto este problema, se busca establecer una relación efecto-consecuencia en el tiempo de extinción del incendio en relación con la cantidad de drones, tanques, fuegos y la disposición de estos elementos en el escenario.

2.2.2. Escenario

En cada experimento se especifica la configuración del escenario en términos de cantidades de drones, tanques, fuegos y sus posiciones en el escenario. Los datos de todas las partes son recolectados en cada paso temporal, luego una vez finalizada la simulación podrán ser leídas y posteriormente procesadas y analizadas.

Como herramienta principal, se desarrolló una aplicación web especializada para este problema y bautizada como “drones bomberos web”, que tiene las funcionalidades de creación de escenarios y la posterior corrida del mismo como simulación, reproductor de simulaciones, almacenamiento de las corridas junto a todos sus valores, un filtro de búsqueda y graficadores para el análisis conjunto o individual de simulaciones. En el anexo se brinda información técnica de este desarrollo.

El procedimiento de experimentación consiste en diseñar un escenario con el editor en base a las especificaciones del problema, luego correrlo como simulación y por último se la puede analizar cualitativamente por medio del animador de simulaciones o cuantitativamente usando el graficador. Este último, además de proveer gráficos interactivos para distintas variables del problema, permite exportar diversos datasets de la simulación para un posterior análisis y procesamiento con otra herramienta.

Como herramientas de post-procesamiento se combinan notebooks de python con hojas de cálculo.

Si se pretende replicar los experimentos será necesario el uso de “drones bomberos web” que se encarga del cálculo y la medición de las variables.

2.3. Componentes de los incendios y su modelado

En esta parte se combina la literatura que describe los componentes y el comportamiento de los incendios forestales con las decisiones que se toman en este trabajo para su modelado.

2.3.1. Causas

A lo largo del mundo, se estima que solo el 4 %, [1] de los incendios comienzan en forma natural. Sin embargo, la proporción de los generados por humanos contra los iniciados por rayos varían ampliamente de región en región. Por ejemplo, en los EE. UU., el 84 % [20] de los incendios son iniciados por humanos. Sin embargo, en Canadá, la mayoría (55 %) [21] de los incendios forestales son iniciados por rayos eléctricos.

Como se explica en “The cost of climate change: Ecosystem services and wildland fires” [22], es probable que el cambio climático aumente la frecuencia e impacto de los incendios forestales. Las investigaciones han demostrado que existe un fuerte vínculo entre el aumento de incendios y el cambio climático [23], [24]. Existe un consenso generalizado de que el cambio climático es y seguirá siendo un impulsor principal en los incendios forestales, superando incluso la influencia humana directa en los patrones de incendios forestales [25].

Hay veces en que los incendios forestales cumplen un rol ecológico, en muchas regiones del mundo, son procesos naturales, como lo señala la WWF en su artículo: “Forests ablaze: causes and effects of global forest fires” [1] . En estos casos pueden tener efectos beneficiosos en los bosques; por ejemplo cuando los conos o estróbilos liberan sus semillas para que broten nuevos árboles luego de ser expuestos al calor extremo generado por el fuego. Las áreas quemadas mantienen la estructura y composición características de los ecosistemas que han evolucionado con el fuego. En los bosques con regímenes naturales de incendio, el rejuvenecimiento de los árboles depende parcialmente de los incendios o se promueve mediante la quema.

Aunque los incendios también se inician en forma natural, y en determinadas circunstancias, son esenciales para la salud del ecosistema, se predice que el cambio climático va a dejar al ecosistema más vulnerable a los incendios y reducirá su capacidad de recuperarse de los mismos [26]. Por ejemplo, se espera que la alerta de rayos tienda a aumentar [27]; en la década anterior a 2013, los incendios causados por rayos quemaron el 64 % de la superficie total afectada por incendios forestales [28].

En este trabajo los incendios se inician solamente al principio de la simulación y no se propagan por el escenario, son estáticos.

2.3.2. Proceso de ignición

Como detalla A. L. Sullivan en “A review of wildland fire spread modelling, 1990-present: Physical and quasi-physical models” [29], un incendio forestal es la combinación compleja de energía liberada (en forma de calor) debido a reacciones químicas (ampliamente categorizadas como una reacción de oxidación) en el proceso de combustión y el transporte de esa energía al combustible no quemado circundante y la posterior ignición de dicho combustible. El primero pertenece al dominio de la química (más específicamente, cinética química) y ocurre en la escala de moléculas, y este último es del dominio de la física (más específicamente, transferencia de calor y mecánica de fluidos) y ocurre en escalas que van desde milímetros hasta kilómetros (Cuadro 2.1).

Tipo	Escala temporal (s)	Escala vertical (m)	Escala horizontal (m)
Reacción de combustión	0.0001 - 0.01	0.0001 - 0.01	0.0001 - 0.01
Combustible de partículas	-	0.001 - 0.01	0.001 - 0.01
Combustible complejo	-	1 - 20	1 - 100
Llamas	0.1 - 30	0.1 - 10	0.1 - 2
Radiación	0.1 - 30	0.1 - 10	0.1 - 50
Conducción	0.01 - 10	0.01 - 0.1	0.01 - 0.1
Convección	1 - 100	0.1 - 100	0.1 - 100
Turbulencia	0.1 - 1000	1 - 1000	1 - 1000
Brasas	1 - 100	1 - 3000	1 - 10000
Pluma	1 - 10000	1 - 10000	1 - 100

Cuadro 2.1: Esquema de los principales componentes y procesos, físicos y químicos, que ocurren en un incendio forestal acompañadas por las escalas temporales y espaciales (vertical y horizontal) sobre las que operan [29].

Es la interacción de estos procesos, en la amplia gama de escalas temporales y espaciales, lo que hace que el modelado del comportamiento de los incendios forestales sea un problema considerable.

En cuanto a lo relacionado con las reacciones químicas se puede mencionar al combustible de los incendios forestales. Este se compone de material vegetal vivo y muerto que consiste principalmente de hojas, ramas, corteza, madera, pastos y arbustos. [30], con un rango considerable de estructuras físicas, componentes químicos, edad y nivel de descomposición biológica. El

principal componente químico del combustible de biomasa es la celulosa.

Cuando se aplica calor a la celulosa, sufre una reacción llamada degradación térmica. En ausencia de oxígeno, esta degradación se denomina pirólisis, aunque en la literatura el término pirólisis a menudo se usa incorrectamente para describir cualquier forma de degradación térmica [31]. La celulosa puede sufrir dos formas de reacciones de degradación competitivas: volatilización y carbonización [29].

La volatilización generalmente se produce en condiciones de humedad baja o nula e implica la termólisis de los enlaces glucosídicos, la ciclación y la liberación de levoglucosano libre mediante termólisis en el siguiente enlace de la cadena [32]. Esta reacción es endotérmica (requiere alrededor de 100Jg^{-1}) y tiene una energía de activación relativamente alta.

La carbonización, por otro lado, ocurre cuando la degradación térmica sucede en presencia de humedad o bajas tasas de calentamiento. Esta reacción tiene una energía de activación relativamente baja (alrededor de 150kJmol^{-1} [33]) y es exotérmica.

Por otro lado se tiene a las reacciones físicas. La física involucrada en la combustión de combustibles agrestes y el comportamiento de los incendios forestales es, al igual que la química, complicada y altamente dependiente de las condiciones en las que arde un incendio. El proceso físico principal en un incendio forestal es el de la transferencia de calor [29].

Los procesos físicos primarios que impulsan la transferencia de calor en un incendio forestal son la radiación, convección y conducción. En condiciones de poco o nulo viento, el proceso de radiación es abrumadoramente responsable de la transferencia de calor entre la llama y el receptor y el segundo importante es la conducción [34], [35], [36], [37], [38]. El calor propagado por radiación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separa al fuego del punto de percepción [39]. En condiciones donde el viento no es insignificante, es la convección la que domina [40].

El modelado de la combustión de un incendio se hace restando una cantidad fija de material combustible por tiempo, hasta que el mismo se agota provocando que el incendio se extinga.

El viento no se modela porque se desea recrear un sistema de incendios menos complejo, por lo tanto no hará falta representar la propagación por

convección. Y como la conducción tiene una incidencia muy pequeña en los incendios forestales, como ya se vio, se toma la decisión de tampoco modelarla. Por lo tanto, solamente se simula la radiación y de este modo el calor propagado al entorno del incendio decrece cuadráticamente.

2.3.3. Fases de combustión

Existen tres fases para la combustión: precalentamiento, con llamas y sin llamas (smoldering y glowing) [41].

Primero se da el precalentamiento donde se produce la evaporación de compuestos altamente volátiles y el proceso de pirólisis, ambos debido al calor irradiado por las llamas. En esta fase el combustible aún no ha sido quemado.

Luego llega la combustión con llamas que se produce a través de un proceso de llama de difusión, donde el combustible del interior de la llama (área deficiente en oxígeno) se difunde hacia afuera y el oxígeno del aire libre lo hace hacia adentro.

Por último se llega a la fase que esta compuesta por dos subfases, la de smoldering y glowing, que son muy parecidas, tienen en común que la combustión se realiza sin llamas. La primera ocurre bajo tierra y la segunda es más superficial.

Las fases compiten por el combustible disponible (Figura 2.1) y son fenómenos marcadamente diferentes que contribuyen a la diversidad de los productos combustibles.

Solamente se modela la fase con llamas porque las otras dos no tienen sentido por las condiciones del problema, como se describe a continuación. Al iniciarse de forma fija un incendio no hay lugar para la fase de precalentamiento. Como se decidió que un incendio solo puede irradiar calor mientras tenga material combustible, al extinguirse ya lo tendría consumido, por lo tanto no hay posibilidad de que siga irradiando calor después de extinto, lo que descarta la fase de combustión sin llamas.

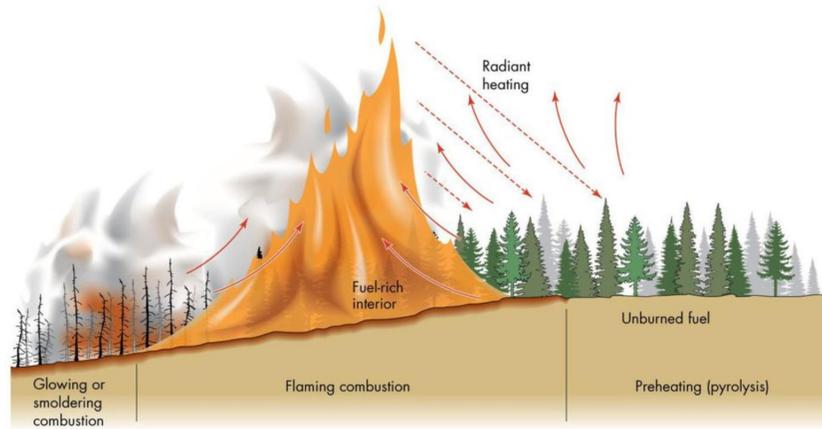


Figura 2.1: Fases de combustión: Avanzada del fuego moviéndose de izquierda a derecha. El diagrama está seccionado en las tres fases de combustión: sin llamas (glowing and smoldering), con llamas (flaming) y precalentamiento (preheating) (créditos ilustración [42] y [41]).

2.3.4. Otras propiedades

La sequedad del combustible es una característica que tiene impacto en los incendios. Existen modelos ([43], [44]) que utilizan un índice de sequedad de la vegetación (VDI) para estimar el contenido de agua de la vegetación global. Su utilidad es la detección de áreas con un alto potencial de ignición, y la dirección de propagación del fuego. Los episodios de sequía ejercen un impacto cada vez más significativo en la actividad de incendios forestales [45].

La duración del incendio es una propiedad importante que está asociada con la cantidad de combustible que fue consumida [46].

Para cada incendio se calcula un índice de sequedad, el cual se ve afectado positivamente por el calor generado y negativamente por el agua descargada por los drones. Este índice tiene impacto en el modelo del proceso de combustión y generación de calor.

El proceso de combustión que se modela define la velocidad a la que se consume el material combustible para convertirlo en calor y por ende la

duración del incendio. Como todos los materiales combustibles simulados son iguales, también lo es la duración de todos los incendios. Vale aclarar que un escenario puede tener varios incendios, cada uno representado como una llama que consume un material combustible.

2.3.5. Consecuencias

Los incendios forestales principalmente generan daños económicos y ecológicos. [47]. Sin embargo, no solo devastan los bosques y destruyen propiedades; también ponen en peligro vidas humanas [48].

Como efectos ecológicos, se destaca el humo que impide las precipitaciones y prolonga el período de sequías. En consecuencia, los incendios se fortalecen y así se termina conformando un proceso de retroalimentación peligroso [49].

Un problema para combatir los incendios forestales es su demanda de agua. El suministro de agua es problemático para la mayoría de los incendios forestales, ya que las fuentes de agua suelen estar muy lejos y el bombeo y el transporte de agua deben instalarse a grandes distancias. Además, los incendios forestales ocurren principalmente en áreas con sequías estacionales o anuales. La lucha contra los incendios forestales requiere enormes cantidades de agua, lo que provoca escasez para otros usos importantes como el riego agrícola [50].

En este trabajo se propone la solución a este último problema mediante el transporte de carga de agua a cargo de los drones, que consiguen este recurso a través de un conjunto de tanques fijos en las proximidades de los incendios.

Capítulo 3

Partes del sistema

El sistema está formado por cuatro partes: el escenario, los drones, los fuegos y los tanques. El primero es el lugar que contiene al resto de las partes y donde se dan las interacciones entre las mismas; es decir que el escenario es una parte única y especial del sistema. Por otro lado, los fuegos son los objetivos a extinguir de los drones, que necesitan de los tanques para poder abastecerse del recurso necesario para realizar la mencionada extinción.

3.1. Escenario

El escenario o ambiente que modela este problema está diseñado en base a un autómata celular.

Los autómatas celulares son una idealización matemática de sistemas físicos en los que el espacio y el tiempo están discretizados y las cantidades físicas adquieren un conjunto finito de valores ([51] y [52]).

Estos pueden describirse como universos lógicos discretos de espacio/tiempo, cada uno de los cuales obedece a su propia física local [53]. Cada célula del espacio está en alguno de los estados finitos en cualquier momento. Generalmente, las autómatas se implementan como un retículo (es decir, 2D) pero pueden ser de cualquier dimensión.

El atributo clave de un autómata celular es que las reglas que gobiernan el estado de cualquier célula son simples y se basan principalmente en los estados de sus vecinas, lo que puede resultar en un comportamiento sorprendentemente complejo, incluso con un número limitado de estados posibles [54] y puede ser capaz de realizar cálculos universales [55].

Los pasos son incrementos de tiempo del tipo entero y positivo. La unidad básica es la célula que hace las veces de posición y un conjunto de estas configura una estructura matricial que dan forma al escenario, es decir que este último tiene forma rectangular.

Una posición tiene estado por lo que evoluciona en cada paso, como los objetos que contenga, que pueden ser fuegos, tanques o drones. También cuenta con propiedades como la cantidad de agua acumulada en ella y su temperatura.

3.1.1. Posiciones vecinas

Cada posición tiene un conjunto de vecinos del mismo tipo, con los que puede interactuar en diferentes formas. Estas pueden ser para transmitir calor o visibilizar tanques y drones en el vecindario. La cantidad de vecinos varía de acuerdo al lugar en el que esté la posición dentro del escenario; serán ocho en caso de que la posición no se encuentre en uno de los límites, tres si está en una esquina y cinco si es parte de alguno de los bordes.

3.1.2. Orientaciones vecinas

Las orientaciones vecinas son los lugares donde una posición guarda las temperaturas que recibe de sus vecinos. Por cada vecino una posición tiene una orientación correspondiente.

Al sumar el valor de todas las orientaciones vecinas de una posición, se obtiene la temperatura de la misma para un instante determinado.

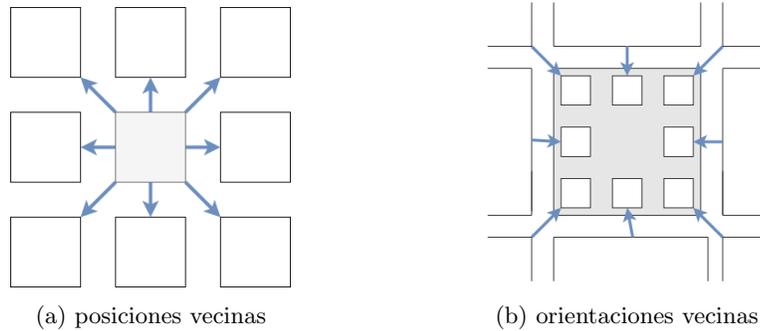


Figura 3.1: Vecinos: Interacción entre posiciones: (a) La posición del centro se puede relacionar con sus vecinos. (b) Dentro de una posición hay una orientación por cada posición vecina.

3.1.3. Evolución

El escenario evoluciona al ritmo de los pasos temporales. En este proceso todas las posiciones también lo hacen y es lo que se verá con detalle a continuación.

Lo primero que hace la posición es calcular su temperatura sumando el valor de sus orientaciones vecinas (Figura 3.2).

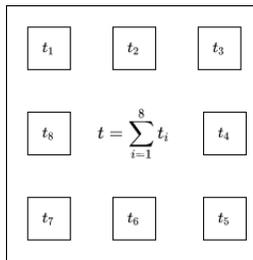


Figura 3.2: Cálculo de temperatura: La temperatura de la posición se calcula sumando la temperatura de sus ocho orientaciones vecinas.

Las posiciones son contenedoras de las partes del sistema como los tanques, los fuegos y los drones. Es en este momento cuando su contenedora les pasa el mensaje de evolucionar para que cada una de las partes tenga la responsabilidad de hacerlo por sí sola.

Luego, la posición debe transmitir el calor que recibió de sus vecinos y que

tiene registrado en sus orientaciones. Hace la transmisión de calor en dos pasos, primero lee la temperatura de alguna orientación y sé la suma a su orientación opuesta y a las adyacentes de esta última. Finalmente, dichas orientaciones pasan su valor acumulado a la posición vecina que les corresponde; en consecuencia, la misma escribe un porcentaje del valor transferido en su orientación vecina asociada. Este procedimiento es ejecutado por la posición en todas sus orientaciones vecinas.

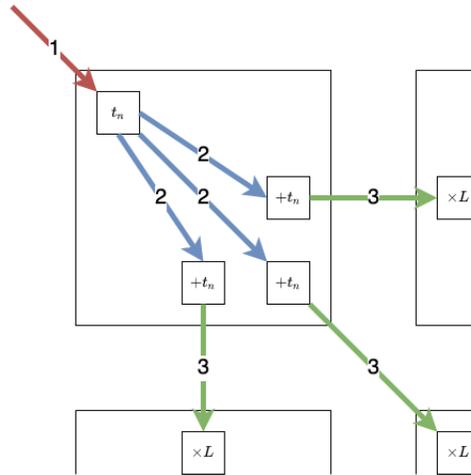


Figura 3.3: Propagación de calor: La temperatura en este ejemplo se transmite del noroeste al sureste en tres pasos.

A modo de ejemplo ilustrativo (figura 3.3), si el calor viene del noroeste, la posición va a notarlo por el valor de su orientación noroeste y se lo va a sumar a su opuesta (sudeste) y a las adyacentes de esta última (este y sur). Después las posiciones vecinas sudeste, sur y este recibirán en sus orientaciones correspondientes el valor transferido disminuido.

Para el caso en el que una posición evoluciona un fuego, esta obtiene el calor que genera, una vez evolucionado, y lo transfiere a sus vecinos con el mismo procedimiento previamente explicado.

3.2. Drones

Los drones son probablemente la parte más compleja del sistema, y cargan con la misión protagónica de organizarse para apagar los fuegos. Cada

drone se identifica con un número único y le corresponde una posición que le es exclusiva mientras la ocupe. Por esta restricción no puede haber más de un drone en un mismo lugar, lo que funciona como una política de prevención de colisiones. Esto se ha logrado en situaciones reales con drones al establecer una capa de comunicación vía mensajes broadcast con las posiciones dadas por las coordenadas GPS de cada drone. El requisito para lograr lo anterior es que todos los drones cuenten con la misma tecnología [56].

Aunque los drones reales pueden variar su velocidad en distintas situaciones [57], en este caso siempre lo hacen a velocidad constante. Los drones al moverse lo hacen a una velocidad de una posición por paso temporal.

Completando la descripción, posee como recurso limitado y variable una cantidad de agua para combatir a los fuegos.

Un drone actúa en base al autómata finito determinístico de la figura 3.4. Los estados representan la situación aérea del drone y las transiciones son las decisiones que puede tomar en cada una de esas situaciones. Por cada paso temporal o turno el drone puede ejecutar a lo sumo una transición.

Todo drone comienza posicionado en tierra y decide buscar algún fuego hacia donde moverse haciendo una búsqueda por calor. Para lograrlo percibe el calor midiendo la temperatura en sus posiciones vecinas; las ordena en forma decreciente y prueba si alguna de ellas contiene un fuego para elegir esa posición. Si no encuentra ningún fuego entonces elige la posición con temperatura más alta, es decir la primera en la lista.

Al obtener una posición candidata, el drone controla que no esté ocupada por otro, ya que solo puede haber un drone por posición en el mismo instante. Si está ocupada permanece en tierra para volver a intentar todo este procedimiento en el siguiente turno, si esta libre se corre a esa posición desde donde despega y cambia su estado a “hacia un fuego”.

Un drone identifica un fuego en una posición cuando esta tiene una temperatura superior a la de todos sus vecinos, es decir un máximo local. Este es el criterio fundamental que funciona como la vista de un drone para que pueda identificar a sus objetivos que son los fuegos que quiere apagar. Es simple en su lógica y computacionalmente económico. De todos modos en esta abstracción de la realidad se asume que los sensores siempre

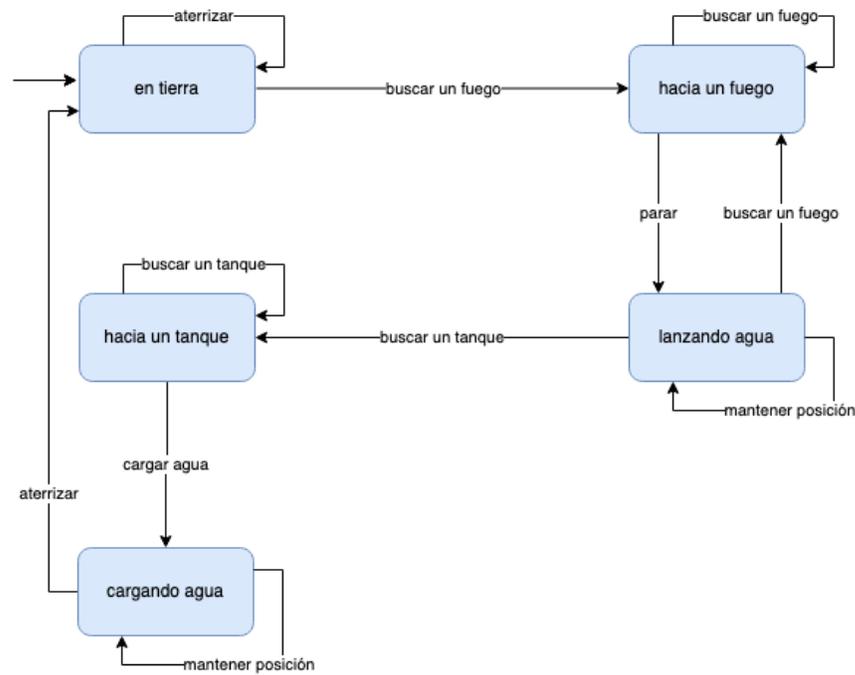


Figura 3.4: Diagrama de estados: Transiciones y estados usados por los drones para evolucionar en el sistema.

funcionan sin desperfectos y los valores percibidos son correctos. Es posible implementarlo en la realidad a través del uso de sensores de microondas que pueden medir la temperatura del ambiente; tienen buen alcance pero son costosos y pesados [58]. En la figura 3.5 se muestra un ejemplo de cómo un drone puede percibir dos fuegos por medio de los dos máximos locales de la temperatura en el escenario.

En este punto el drone tiene el objetivo de rastrear el fuego más cercano. Primero busca si alguna de las posiciones vecinas tiene un fuego.

Si encuentra alguno entonces detiene su marcha, guarda en su estado interno la posición del fuego objetivo y pasa al estado “lanzando agua”. Si ninguna de las posiciones vecinas tiene fuego entonces se mueve a la más caliente siempre que esté disponible, así como lo hizo en el estado anterior. En este caso permanece en el estado “hacia un fuego”.

Ahora, en el estado “lanzando agua”, se combate el fuego. El drone

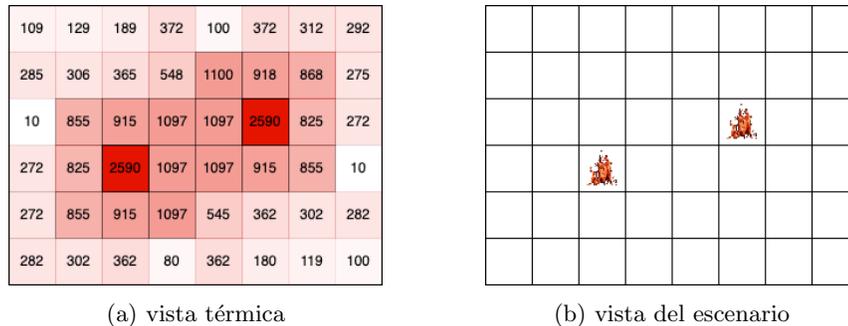


Figura 3.5: Detección de fuegos: Por medio de la vista térmica (a) un dron puede detectar los dos máximos locales en el escenario (b) y entenderlos como fuegos.

comienza por verificar si le queda agua en su tanque interno. De faltarle, cambia su estado a “hacia un tanque”.

Por otro lado, al verificar que tiene agua para lanzarla sobre el objetivo controla que la posición del fuego que había guardado en el estado anterior siga siendo un máximo local. De verificarse esto se sabe que en esa posición todavía hay un fuego y el dron decide actuar lanzando una cantidad de agua que es constante por turno. Esta cantidad es un porcentaje fijo de la capacidad del tanque interno que tiene el dron. El disparo, en consecuencia, baja el nivel del agua del tanque en esta misma cantidad y pasa directamente a la posición en la que está el fuego, que a su vez reacciona bajando la temperatura que propaga al entorno. El dron, después de ejecutar esta acción permanece en el estado “lanzando agua”.

En caso de que la posición no sea un máximo local, se deduce que el fuego fue apagado en el turno anterior por este dron o por otro. Y ahora este tiene que buscar un nuevo fuego como objetivo, entonces cambia su estado a “hacia un fuego”.

En este punto, el dron se encuentra en la búsqueda de un tanque para cargar el agua que le va permitir seguir combatiendo a los fuegos; por lo que se encuentra en el estado “hacia un tanque”. En esta situación el primer paso que toma es ver si alguna de sus posiciones vecinas tiene un tanque. De no haber ninguno en los vecinos, entonces el dron realiza una búsqueda para encontrar la posición con el tanque que le resulte más conveniente. Esta conveniencia se define como la combinación más pequeña

entre cercanía y tiempo de espera en la cola. Donde la cercanía entre las posiciones del tanque y la del dron se calcula con la distancia taxi.

La distancia taxi [59] entre dos puntos (x_1, y_1) y (x_2, y_2) se calcula

$$|x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| \quad (3.1)$$

en lugar de la distancia euclídea

$$\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (3.2)$$

Y el tiempo de espera en la cola es la cantidad de turnos que el dron tiene que esperar para ser atendido por el tanque, ya que puede haber más de un dron siendo cargado en ese momento.

Esta lógica evita situaciones indeseables como la saturación de los tanques más cercanos a los fuegos produciendo cuellos de botella en el tiempo de extinción. Por lo contrario, lo que se genera es un comportamiento distributivo de recursos que retorna en una mayor eficiencia del tiempo de extinción.

Ante esta situación el dron elige la posición vecina más conveniente que esté disponible y mantiene el estado actual.

Por otro lado, si hay un tanque en las posiciones vecinas, el dron evalúa si este es el más conveniente. Si no lo es, cae en el caso anterior que sigue la búsqueda. En caso de que si lo sea, el dron entra en la cola de espera del tanque y cambia su estado a “cargando agua”.

Durante el proceso de carga de agua, el tanque tiene el control. Cuando el mismo termina de abastecer al dron, este último se ubica en una posición vecina al tanque que esté disponible. De no haber ninguna disponible espera hasta que logre posicionarse. Es ahí cuando cambia su estado a “en tierra” y el ciclo vuelve a empezar.

3.3. Fuegos

Los fuegos son la parte del sistema que simbolizan el problema a resolver. Generan calor que se propaga por el escenario cuya generación se da por la

combustión de un material combustible o recurso finito que se va consumiendo conforme avancen los turnos.

La lógica evolutiva del fuego se desarrolla a lo largo de una serie de pasos. El primero consiste en calcular un valor que apalanca la fuerza del fuego, llamado nivel de sequedad y que varía entre cero y uno. Para su valor inicial arranca con uno, en una sequedad absoluta. A medida que este valor se acerca a su límite superior, la temperatura generada por el fuego se maximiza, por lo contrario, cuando la sequedad está cerca del mínimo la temperatura disminuye e inclusive llega a desaparecer cuando es cero. Es decir que cuando la posición esté absolutamente humedecida el fuego ya no podrá sostenerse. El nivel de sequedad para el turno actual s_n se calcula con tres valores: la incidencia generada por el fuego f_n , la incidencia del agua acumulada en la posición a_n y el nivel de sequedad del turno anterior s_{n-1} .

La incidencia generada por el fuego es un número positivo que depende de la temperatura que hubo en la posición. La temperatura en cuestión es la que se midió en la posición durante el último turno t_{n-1} , pero cuando no hay un turno previo, se establece como valor inicial la alcanzada por la combustión del fuego. Para el caso general, la temperatura en la posición de un fuego puede ser resultado del aporte de otros fuegos en el escenario además del propio. La temperatura siempre va a ser mayor a cero y el cálculo se expresa con la ecuación logarítmica 3.3 donde α es una constante positiva y entera.

$$f_n = f(t_{n-1}) = \frac{\log(t_{n-1})}{\alpha} \quad (3.3)$$

La incidencia del agua acumulada es la descarga que recibe la posición por parte de los drones en un turno determinado. Si en un turno había una cantidad de agua acumulada en la posición pero en el siguiente ya no hay más drones descargando, entonces el agua acumulada pasa a ser cero.

Mediante la expresión 3.4 con (S_{max} valor de sequedad máximo) se calcula un valor intermedio en el que interviene el nivel de sequedad para el paso anterior y la diferencia entre valores antagónicos (f_n y a_n).

$$s_n^* = s_{n-1} + \frac{f_n - a_n}{S_{max}} \quad (3.4)$$

Luego en 3.5 después de haber fijado el valor temporal dentro de los límites se obtiene el nivel de sequedad para el turno actual.

$$s_n = \begin{cases} 1 & \text{si } s_{n^*} > 1 \\ 0 & \text{si } s_{n^*} < 0 \\ s_{n^*} & \text{otro caso} \end{cases} \quad (3.5)$$

Una vez que se tiene calculado el nivel de sequedad para la posición, el fuego lo utiliza para calcular qué temperatura va a generar su combustión en el turno actual. Esta acción se llama combustión. A este valor se lo llama temperatura debido al fuego f en el paso n , $t_f(n)$ y se calcula con la siguiente ecuación donde se multiplica un valor constante (beta) positivo y real por el nivel de sequedad.

$$t_f(n) = \beta s_n \quad (3.6)$$

Por lo tanto, ante un mayor nivel de sequedad el fuego alcanza mayores temperaturas. Y posteriormente la posición las transferirá a sus vecinos. Como consecuencia de la combustión, se consume una cantidad constante de materia combustible en el turno. El resultado de esta merma se plasma en la cantidad de material combustible disponible que al acabarse termina con la vida del fuego.

En conclusión, el fuego se debilita cuando baja el nivel de sequedad que se da cuando los drones aportan agua al fuego. Y por otro lado se recupera al no recibir más agua.

3.4. Tanques

Los tanques son las partes del sistema que tienen el rol de proveer agua a los drones. Tienen una reserva ilimitada de recursos pero cada tanque puede atender a un solo dron a la vez. Es por esto que los drones forman una cola en cada tanque para ser atendidos.

La evolución de un tanque consiste en el manejo de sus dos colas: de carga y de posicionamiento.

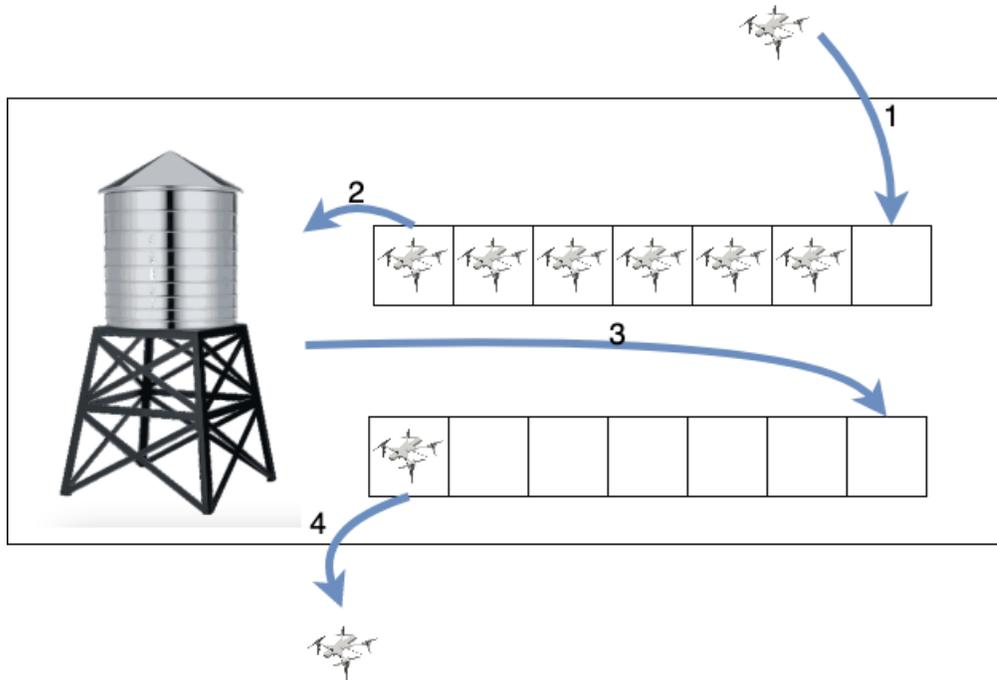


Figura 3.6: Proceso de carga: 1) Al llegar el drone al tanque se posiciona al final de la cola de carga. 2) Al estar el drone a la cabeza de la cola de carga, el tanque procede a cargarlo 3) Luego de estar cargado, el drone pasa al final de la cola de posicionamiento. 4) El drone se posiciona en el escenario.

Un drone, al llegar al tanque, pierde su posición en el escenario pero gana una al final de la cola de carga donde espera de ser atendido. Cuando llega su momento, se encuentra en la cabeza de la cola y el tanque le carga una cantidad constante de agua por turno. Terminar de cargar un drone puede llevar varios turnos. Una vez que el drone esté cargado, el tanque lo saca de la cola de carga y lo agrega al final de la cola de posicionamiento.

En esta última cola, se espera el momento oportuno para volver a colocar al drone en el escenario, dentro de alguna posición vecina al tanque. Se intenta liberar un drone por turno de la cola de posicionamiento.

Capítulo 4

Simulaciones y experimentos

En este capítulo se pretende contestar alguna de las preguntas planteadas por medio de la experimentación usando un conjunto de simulaciones para diversos escenarios.

4.1. Simulación

Una simulación es la imitación del funcionamiento de un proceso o sistema del mundo real a lo largo del tiempo, que implica la generación de una historia artificial de un sistema y la observación de esa historia artificial para extraer inferencias sobre las características operativas del sistema real. El comportamiento de un sistema a medida que evoluciona con el tiempo se estudia mediante el desarrollo de un modelo de simulación [60].

En estas condiciones, el tiempo es discreto y la distancia entre los intervalos es constante. Además, cada elemento en esta estructura simboliza un instante, es decir el estado de las partes del sistema en un determinado momento. Si se cuenta la cantidad de estos instantes se obtiene la duración de la simulación.

Las simulaciones se inician en un escenario con una determinada configuración y obedecen a un conjunto de reglas mandatorias o restricciones.

En este simulador desarrollado para este trabajo, la configuración se crea a través de un editor web desarrollado para este sistema. En este se definen aspectos relacionados a las partes (drones, tanques y fuegos) como la cantidad y sus posiciones iniciales en el escenario. De este último se definen sus dimensiones, es decir el alto y ancho.

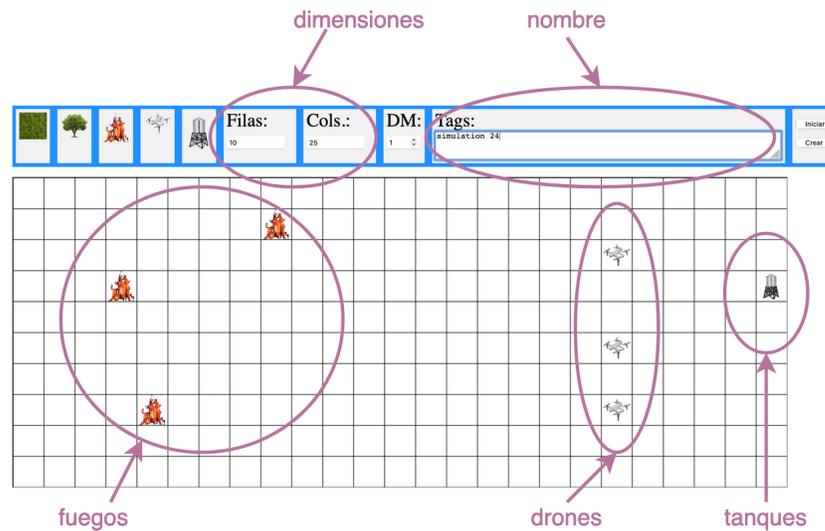


Figura 4.1: Editor de escenarios: Permite crear una configuración y correrla como simulación.

En cuanto a las restricciones, tenemos las siguientes: tiene que haber al menos un exponente de cada una de las partes. El sistema no podría funcionar o no tendría sentido si no hay al menos un fuego para ser extinguido, un drone para apagarlo y un tanque que pueda proveer agua.

En cuanto a las posiciones, solo puede haber un drone por posición, de esta manera se define la distancia mínima entre drones. No puede haber más de una parte terrestre (fuego o drone) en la misma posición. No tiene sentido tener más de un fuego o un tanque en el mismo lugar. Por otro lado, un fuego o un tanque pueden compartir la misma posición con un drone, porque esta situación no representa una superposición.

4.2. Conceptos útiles

Antes de avanzar sobre el desarrollo de los experimentos, que responden algunas de las hipótesis planteadas, hace falta explicar algunos conceptos usados en estos experimentos.

4.2.1. Tiempo de extinción

Se define a $t_e(f, n, t)$ como la función de tiempo de extinción y mide la cantidad de turnos que lleva extinguir f fuegos con n drones y t tanques para un escenario determinado.

$$t_e: \mathbb{N}^3 \rightarrow \mathbb{N} \quad (4.1)$$

El valor de esta función es la métrica principal que se usa en los experimentos para hacer comparaciones y sacar conclusiones.

4.2.2. Ciclo de carga de un drone

La temperatura del sistema disminuye cuando los drones descargan agua en los fuegos y sube cuando estos se alejan para cargar más agua.

Este fenómeno se explica por el ciclo de carga, que es un proceso iterativo que realiza un drone para poder apagar los fuegos. Este formado de cuatro partes con un orden definido:

Algoritmo 1: Algoritmo de carga y descarga de un drone

```

1 while mientras exista algún fuego do
2   | desplazamiento al fuego;
3   | descarga;
4   | desplazamiento a un tanque;
5   | carga;
6 end

```

El ciclo de carga no solo guarda una relación entre los drones que cargan agua en los tanques sino que también la extiende a los fuegos que al recibir

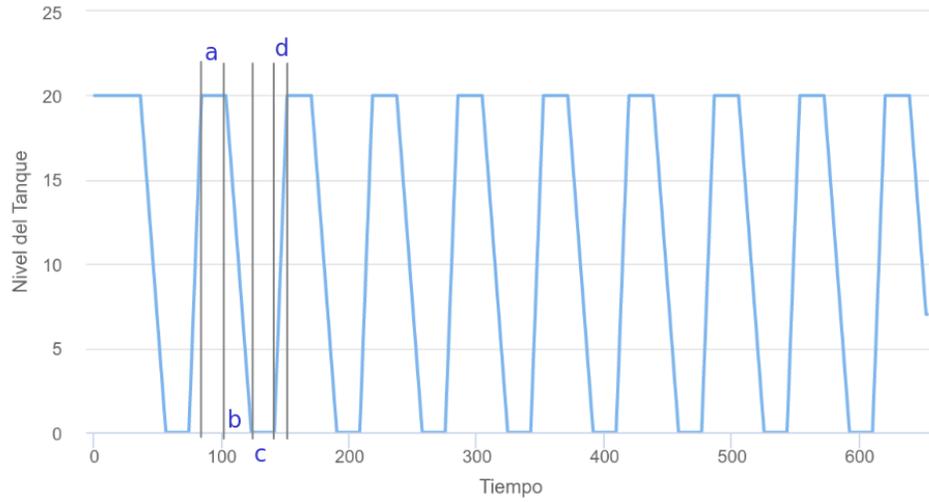


Figura 4.2: Ciclo de carga de un drone: a) desplazamiento al fuego. b) descarga. c) desplazamiento a un tanque. d) carga.

las descargas de los drones logran que baje la temperatura del sistema.

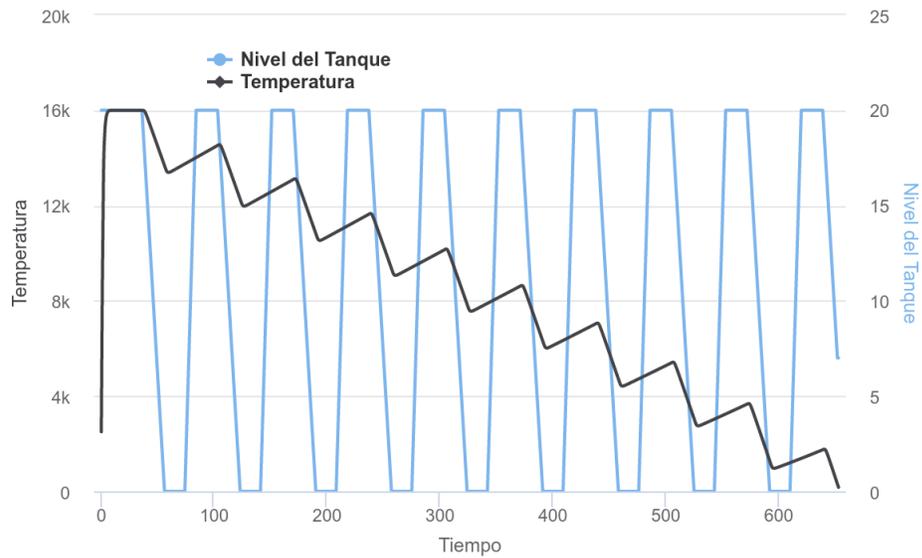


Figura 4.3: Temperatura y ciclo de carga: Durante la fase de descarga la temperatura baja en las otras fases crece.

La temperatura del sistema disminuye cuando el ciclo de carga está en la fase de descarga y aumenta en el resto de las fases. Es decir que el tiempo que dedique un dron en desplazarse hacia el fuego o a los tanques y en cargar agua será utilizado por el fuego para que el sistema recupere temperatura.

4.3. Experimentos

4.3.1. Enjambre de drones contra un superdron

Si se tuviera en un solo dron la capacidad de carga y descarga de todo un enjambre, ¿Sería capaz de extinguir a los fuegos más rápido? ¿Sería útil para bajar la temperatura del sistema con mayor velocidad que el enjambre? Son algunas de las preguntas que se responden en esta sección.

En este experimento, para comparar al superdron con un enjambre de n drones, se define que la cantidad de fuegos, tanques y drones sea la misma, es decir:

$$n = f = t \quad (4.2)$$

La cantidad de tanques es exageradamente grande para evitar que la provision de recursos sea un factor limitante o cuello de botella.

El hacer que la cantidad de fuegos f acompañe la cantidad de drones del enjambre n permite que se mantenga constante la proporción fuegos-drones.

El superdron tiene la capacidad de carga y descarga que suman los n drones del enjambre.

Se eligen 15 tamaños para el enjambre, es decir para n : 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 15, 17, 20, 25 y 30.

Por cada experimento se compara el mismo escenario para un enjambre de n drones y el superdron equivalente en capacidad de carga y descarga. Los escenarios que se comparan tienen idéntica cantidad de fuegos y tanques igual a n . También es igual el escenario en cuanto a las posiciones de los

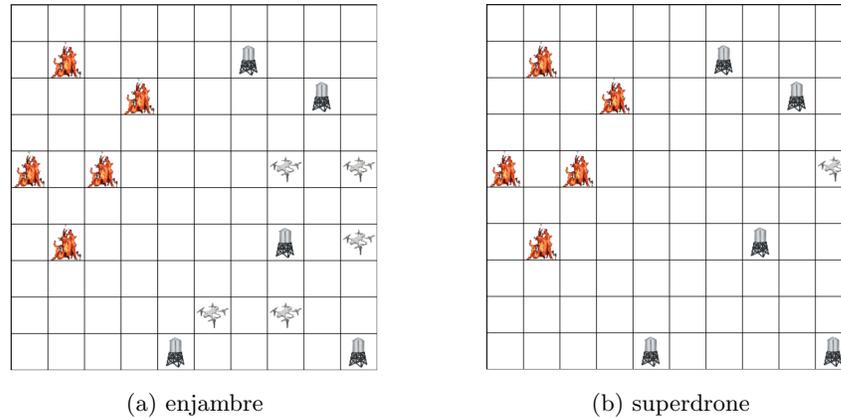


Figura 4.4: Enjambre y superdrone: El enjambre de $n = 5$ drones (a) comparado con el superdrone (b) en el mismo escenario.

tanques y los fuegos. En la figura 4.7 se ve un ejemplo de un escenario para $n = 5$.

Es decir que por cada n se tiene un par de escenarios iguales en relación a las cantidades y posiciones de los fuegos y tanques. Como hay 15 valores para n y un par de simulaciones por n donde una es para el enjambre y otra para el superdrone, entonces hay un total de 30 simulaciones.

Se agrupan los resultados de las 30 simulaciones por el número de drones n en forma ascendente y se comparan los resultados de las simulaciones con el valor que le llevó a cada simulación terminar, el tiempo de extinción t_e . El valor de esta variable es afectado por la condición 4.2.

La Figura 4.5 muestra estos resultados, donde hay dos series, una para el enjambre y otra para el superdrone. En un principio ambos apagan los fuegos en un tiempo parecido pero a medida que crece n el enjambre logra un mejor tiempo de extinción. Con lo que queda respondida la primera pregunta y se puede afirmar que un enjambre es más rápido para extinguir fuegos que un superdrone con las mismas capacidades en el mismo escenario. Más adelante se explicarán los fundamentos de esta propiedad.

En relación a la disminución de la temperatura como consecuencia de las descargas pasa algo similar a lo anterior. Ante un n bajo logran efectos parecidos pero al crecer esta variable se vuelve a despegar el enjambre, obteniendo temperaturas mucho menores. Esta tendencia se confirma al

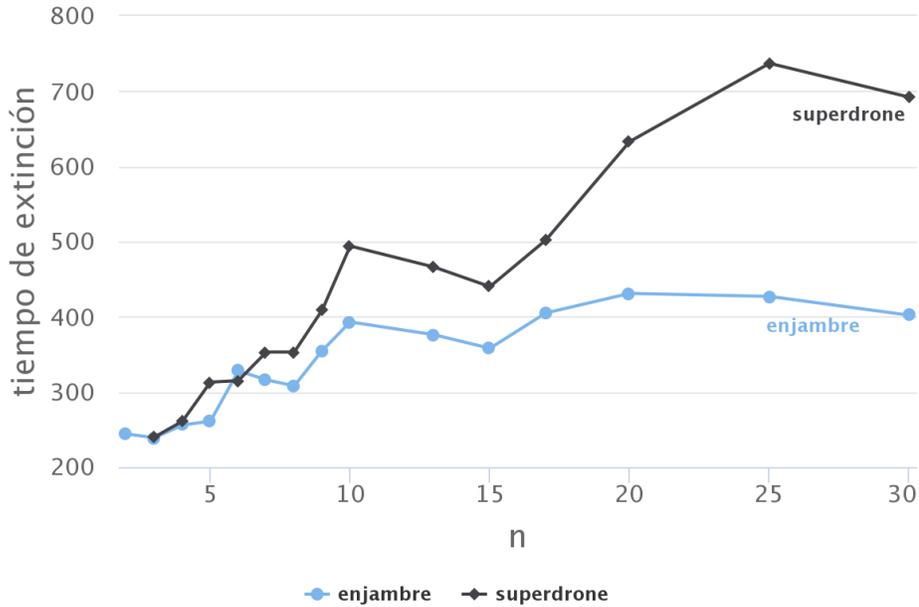


Figura 4.5: Tiempo de Extinción: Resultados de comparar el tiempo de extinción del enjambre con el de un superdrone variando la capacidad de ambos en función de n .

analizar el resultado de todas las simulaciones.

En la figura 4.6 se toman dos casos extremos, uno con un $n = 3$ como un valor bajo y $n = 30$ como uno alto. En el primer caso, las curvas de temperaturas son muy parecidas y esto se debe a que mientras más chico sea el n más similitud habrá con el comportamiento al de un superdrone, que tiene el mismo comportamiento que cualquier otro drone. Otra razón de esta similitud es que al haber menos drones en el sistema se producen menos interacciones entre los mismos, que más adelante se verá su importancia en la coordinación y cooperación para mejorar el objetivo global, que es extinguir los fuegos.

Cuando la cantidad del enjambre se vuelve más grande la curva térmica del sistema decrece más rápido que con un superdrone. Los retrasos se pueden ver en la figura 4.6 en la serie del superdrone como intervalos constantes. Hay varias razones que explican este fenómeno.

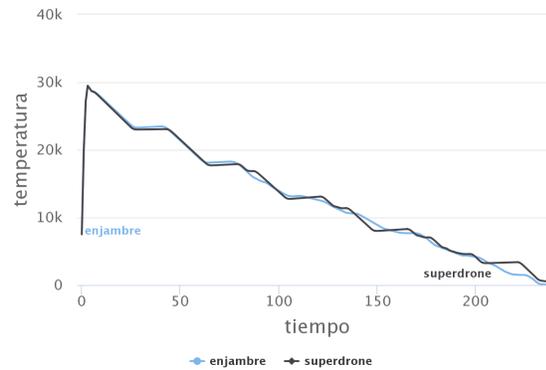
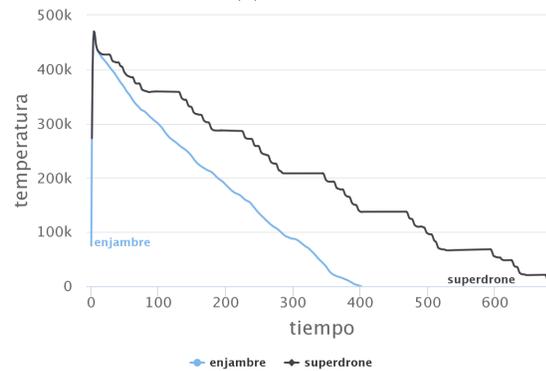
(a) $n = 3$ (b) $n = 30$

Figura 4.6: Temperatura: el enjambre y el superdrone tienen una curva térmica similar cuando n es pequeño (a), pero con un n grande el enjambre logra bajar la temperatura mucho más rápido (b).

La primera involucra al ciclo de carga del superdrone. Mientras el enjambre hace una distribución eficiente de sus drones para la carga y descarga, lo que mantiene el nivel promedio de carga estable, el superdrone favorece la recuperación de los fuegos debido a los tiempos de traslado para su recarga. Mientras el superdrone no descarga debido a que necesita recargar su recurso, usa su tiempo en trasladarse al tanque más cercano (y no el más óptimo porque todos están libres), esperar que se complete toda la carga (lo que es equivalente a que se carguen todos los drones del enjambre) y trasladarse al fuego que elija. Este tiempo es usado por el enjambre para seguir apagando los distintos fuegos.

Una segunda y última razón para el retraso del superdrone, es el abandono de un fuego por otro que genere más calor en sus posiciones vecinas. Mientras este comportamiento debido al algoritmo de máximos locales es beneficioso para el enjambre, porque permite distribuir los esfuerzos y acaparar la máxima cantidad de fuegos, bajando la temperatura en varios puntos; para el superdrone solo representa dejar varias tareas inconclusas. Es decir que cuando un superdrone retoma el fuego que había abandonado este ya ha recuperado temperatura. Trabaja en forma cooperativa cuando no hay nadie que pueda cooperar con él.

Otro aspecto a analizar en este experimento es la velocidad con la que se extinguen los fuegos. Para las simulaciones corridas se observó que en todos los casos el enjambre apagaba el total de fuegos antes que el superdrone, y esta diferencia se intensifica a medida que se incrementa el valor de n . De nuevo los retrasos en los tiempos del superdrone tienen que ver con el ciclo de carga y la falta de interacción que internamente espera.

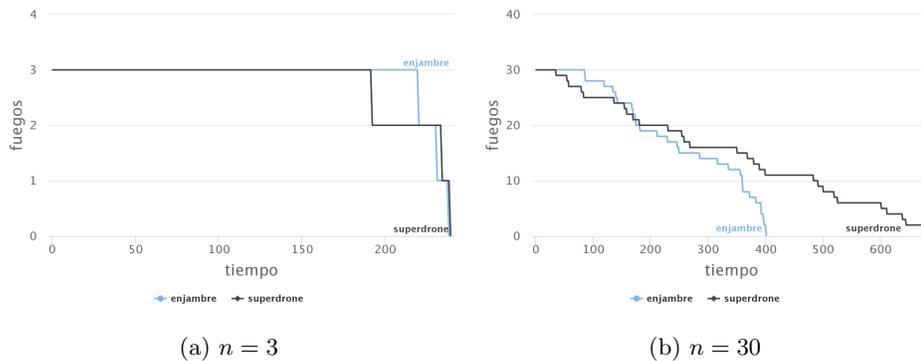


Figura 4.7: Extinción de fuegos: a medida que n crece, más grande es la diferencia en el tiempo de apagado de focos a favor del enjambre.

El comportamiento a lo largo del tiempo durante la extinción de cada uno de los fuegos entre el superdrone y el enjambre exhibe un patrón de tres etapas. En la primera fase el superdrone toma ventaja apagando rápidamente más fuegos. Luego en la segunda y más breve, empatan pero en la última el enjambre supera y acelera el ritmo de extinción.

En la Figura 4.7 se pueden ver las tres etapas para dos casos extremos en cuanto al tamaño de n .

En conclusión, el enjambre en contraste con un superdrone, extingue más

rápido el incendio, baja la temperatura con mayor velocidad. Inclusive el enjambre muestra mayor eficiencia en la velocidad de extinción de fuegos.

4.3.2. Optimizando el tiempo de extinción

En esta sección se analizan aspectos relacionados al tiempo de extinción de un incendio (t_e , ecuación 4.1). Particularmente la relación que tienen la cantidad de fuegos, drones y tanques con el tiempo que lleva apagar un incendio.

Para ello se lleva a cabo una serie de experimentos haciendo variar la cantidad de fuegos, drones y tanques. El orden de estos experimentos es el siguiente: primero se eligen los valores para los fuegos, después en función de estos últimos se hace variar la cantidad de drones. Y por último, se repiten estos experimentos incrementando la cantidad de tanques.

Para la cantidad de fuegos f se toma un valor mayor pero cercano a 1 porque es importante analizar el escenario con una cantidad de fuegos mayor al de drones. Una cantidad de 5 fuegos es apropiada para armar un caso base. El otro valor a utilizar para f es el de 10 fuegos. Se han hecho experimentos con otros valores pero se eligen estos dos por lo representativo de los resultados y para no hacer innecesariamente extenso el análisis.

En base a los experimentos se descubrió que es cómodo elegir la cantidad de drones n en función de la cantidad de fuegos f . Un buen valor para la cantidad mínima de drones es el siguiente.

$$n_{min} = \left\lceil \frac{f}{2} \right\rceil$$

Un valor más pequeño difícilmente puede lograr extinguir el incendio, este se apagaría debido a que la combustión consumiese todo el material combustible y no por la ayuda de los drones.

El tamaño del paso, para los valores de drones, que van entre n_{min} y aquellos menores a f se incrementan lentamente porque es en donde el tiempo de extinción baja con mayor rapidez. Para los n mayores a f se puede definir un paso igual al valor de n_{min} , en este tramo el tiempo de

extinción disminuye con más lentitud. En otras palabras, es deseable para observar la curva de tiempo de extinción tener más muestras para los n menores a f y menos para los que la superen.

Por último se elige un número de tanques t que se utiliza para cada una de las simulaciones. El valor mínimo de t es 1 y se va incrementando en forma unitaria.

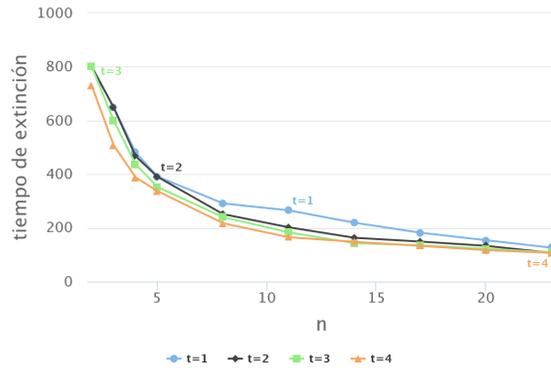
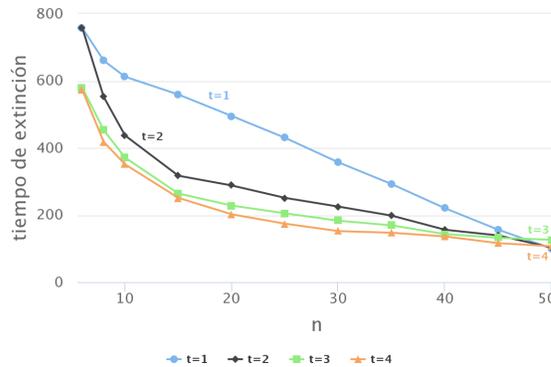
(a) $f = 5$ (b) $f = 10$

Figura 4.8: Tiempo de extinción y cantidad de tanques: Las series con tanques t más grandes dibujan una exponencial negativa, logrando así terminar más rápido. El tiempo de extinción disminuye al crecer la cantidad de drones n y tanques t tal como se ve en las imágenes (a) y (b) que tienen valores fijos de fuegos f para cada caso.

Los resultados de los experimentos se pueden ver en los gráficos de la Figura 4.8. Mientras más grande sea la cantidad de tanques la curva de

tiempo de extinción se vuelve exponencialmente negativa, lo que indica que con unos pocos tanques en relación a la cantidad de drones n se puede acelerar el tiempo de extinción.

Otra ventaja de este resultado es que indica que al aumentar la cantidad de drones al escenario, el tiempo de extinción nunca empeora sino que baja con más lentitud o en el peor de los casos se mantiene constante.

Este resultado se debe a que el algoritmo de búsqueda de calor de los drones apunta a tenerlos en movimiento y a distribuirlos en función del calor percibido, evitando de esta manera que los drones se estorben.

En base a los experimentos realizados en esta sección, se hizo un ajuste a un modelo exponencial. Por otro lado, para hacer compatible las comparaciones de las simulaciones con distintos fuegos f , se normalizaron los resultados usando el ratio n/f en lugar de hacerlo solamente por la cantidad de drones n .

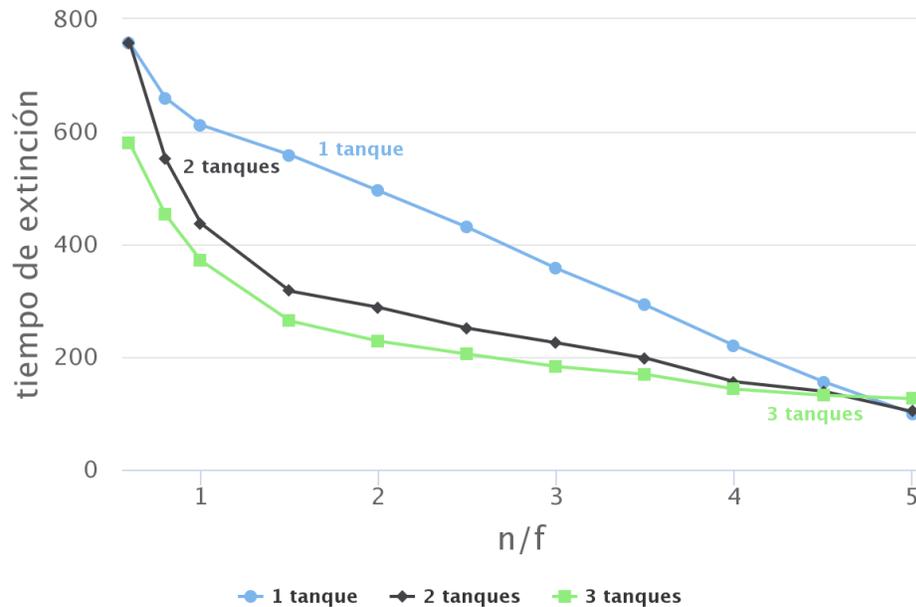


Figura 4.9: Tiempo de extinción con n/f : Con la cantidad de fuegos fija en $f = 5$ se hace variar el tiempo de extinción t_e en función del ratio n/f . Se muestran tres series con distintos valores de tanques.

La Figura 4.9 ilustra esta relación para $f = 5$. El modelo quedó de la siguiente manera:

$$t_e(f, n, t) = (-\alpha_2 t^2 + \alpha_1 t + \alpha_0) e^{-\frac{n(\beta_2 t^2 + \beta_1 t + \beta_0)}{f}} \quad (4.3)$$

La función de tiempo de extinción $t_e(f, n, t)$ es una exponencial negativa que a medida que aumenta la cantidad de drones n decrece.

La cantidad de tanques t forman dos polinomios de grado 2. El primero, formado por los tres parámetros del modelo α , es decreciente. El segundo, que forma parte del exponente y tiene de coeficientes los parámetros β , es creciente. Los parámetros α son mucho mayores a 1 y los β son menores a 1.

En conclusión, la variable t , cantidad de tanques, tiene menos incidencia en el resultado que n , cantidad de drones. Ambas mueven a la función en la misma dirección. Es decir, mientras más tanques y drones haya en el escenario, más rápido se podrá extinguir el incendio.

Por otro lado, al crecer la cantidad de fuegos f aumenta el tiempo representado por la función t_e . Una mayor cantidad de fuegos retrasa el tiempo de extinción.

4.3.3. Distancia entre fuegos y tanques

El tiempo de extinción de un fuego está relacionado con la distancia entre este último y el tanque. Mientras más cerca esté el tanque del fuego más rápido se lo podrá extinguir. Para encontrar, cuantificar y modelar esta relación se llevaron a cabo una serie de experimentos.

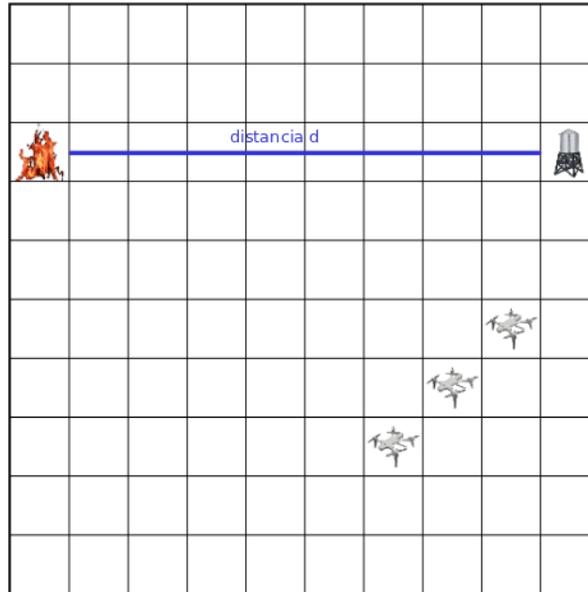


Figura 4.10: Distancia entre tanques y fuegos: $m = 1$ tanques y fuegos. $n = 3$ drones. $d = 8$

El objetivo es ver cómo influye la distancia entre drones y tanques en el tiempo de extinción de fuegos. Para esto se hacen una serie de simulaciones con una configuración determinada. Se configura una cantidad n de drones y la misma cantidad de tanques y fuegos con valor m ($t = f$). Una distancia d entre cada tanque y fuego. Se hace variar m entre 1 y 5. n también entre 1 y 5. Y d entre 1 y 41 con un paso de 5.

Al agrupar por m las simulaciones obtenemos 5 escenarios.

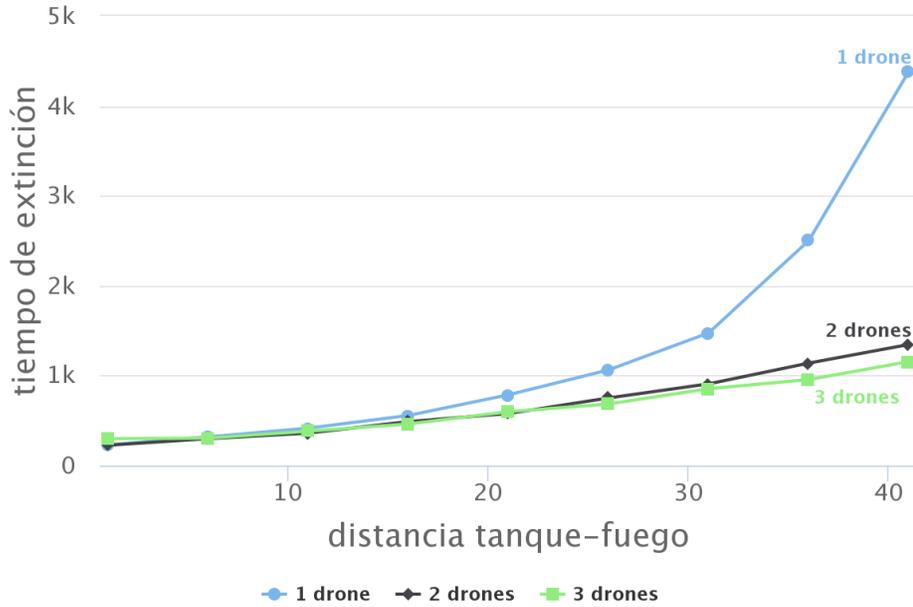


Figura 4.11: Optimizando extinción: Aca se muestran tres de las cinco series donde en cada una hay una cantidad de drones distintos.

Al hacer un ajuste exponencial se obtiene la siguiente expresión:

$$t_e(d, n) = (l_1 n + l_0) e^{k_0 \frac{d}{n^{k_1}}} \quad (4.4)$$

Donde l_0 , l_1 , k_0 y k_1 son parámetros del modelo. El tiempo de extinción t_e depende de las variables d y n . Con este modelo se puede decir que el tiempo de extinción crece en forma exponencial a la distancia entre fuegos y tanques.

Por otro lado, un mayor n ayuda a reducir el tiempo de extinción compensando la distancia entre los fuegos y los tanques. Esto se explica porque el tiempo de carga y traslado se reduce al sumar drones.

4.3.4. Distancia límite

En base al modelo de la sección anterior, un fuego puede ser extinguido, estando a una distancia determinada del tanque, con al menos un dron. ¿Pero esto es cierto para cualquier distancia?

Para responder esta pregunta, se hizo un experimento que busca ver si hay alguna distancia límite entre un tanque y un fuego que no tenga tiempo de extinción definido. Se usa la ecuación 4.4 como base del experimento, y debido a que tiene a la cantidad de drones n y distancia d como variables independientes se fija n para ir incrementando la distancia en búsqueda de algún valor que no tenga tiempo de extinción. Por cada n elegido se hizo esta búsqueda.

Primero, hay que recordar que todos los fuegos terminan apagados, ya sea por extinción o por combustión. Pero en este caso, interesa estudiar la factibilidad de que termine por extinción. A fin de lograr diferenciar estos dos casos, se posterga el consumo de la combustión aumentando la cantidad de material combustible. Y por otro lado, al encontrar un patrón de estancamiento en la temperatura se puede asumir que para esa distancia no hay tiempo de extinción definido o posible.

Usando este método de búsqueda de distancia y con un conjunto de valores para n se obtienen las distancias límites para cada n y a continuación se desarrolla un análisis del experimento.

Una mayor distancia entre un tanque y un fuego implica que los desplazamientos en cada ciclo duren más tiempo, llevando a que la fase de ganancia de temperatura del fuego sea mayor y en consecuencia necesitando descargas adicionales para extinguirlo. En otras palabras, hasta que el dron fue a cargar agua y volvió, el fuego pudo haber recuperado la temperatura perdida por la descarga previa.

Si pasa lo anterior, la temperatura del sistema a lo largo de los ciclos muestra un comportamiento periódico. Esto es que el valor térmico oscila en un rango fijo entre mínimos y máximos mayores a cero. Para formalizarlo podemos decir que $u(n, m)$ es la distancia límite o umbral dada una cantidad n de drones y m de tanques y fuegos.

La Figura 4.12 ejemplifica esta situación, donde el umbral $u(2, 1)$ es 106. Es decir, si el escenario tiene 2 drones, un tanque y un fuego; habrá tiempo

de extinción definido si la distancia entre el tanque y el drone es menor a 106. En la figura, la serie que tiene una distancia de 72 está por debajo del umbral y por eso se ve como la curva térmica baja lentamente a cero. Por otro lado, la serie que tiene distancia umbral muestra un patrón térmico constante que señala la no finalización por extinción, pero termina por la combustión retardada.

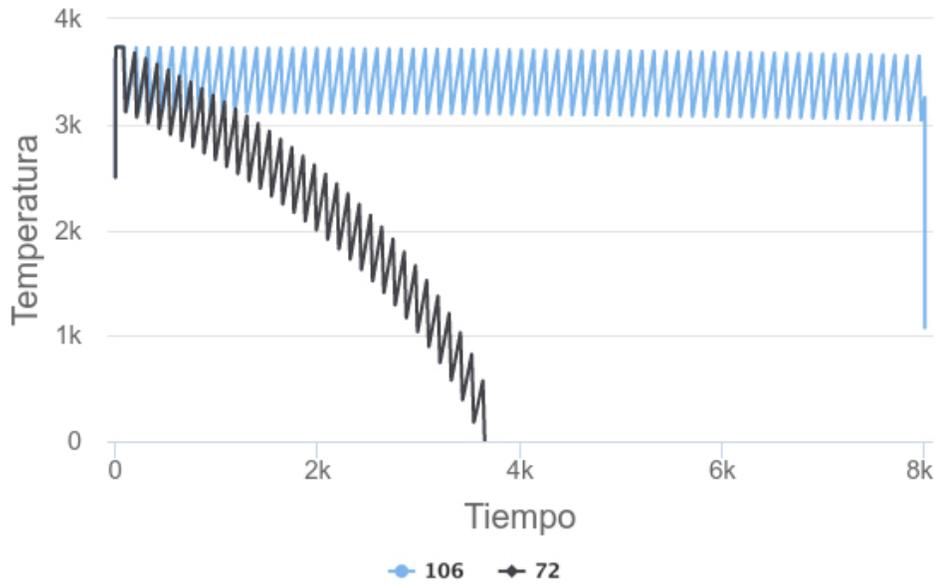


Figura 4.12: Cruzando el umbral: En la serie con distancia $d = 106$ se observa un patrón de temperatura periódico que imposibilita la extinción por descarga de agua, entonces la extinción se produce por combustión en el tiempo 8k. Distinto es el caso de la serie $d = 72$ donde el dron logra apagar el fuego.

Para entender cuál es la relación entre las distintas variables que hace a una distancia umbral, se amplía el experimento haciendo variar en esta oportunidad a m . Como se ve en la figura 4.13, hay dos series para la cantidad de fuegos y tanques m ; con valores 1 y 2.

Como primera conclusión, se puede afirmar que al aumentar m se logra alejar el umbral. Haciendo un ajuste para ambas series m , resulta en un modelo exponencial

$$u(n, m) = \exp(\alpha_0 + \alpha_1 n + \alpha_2 m), \quad \alpha_2 > \alpha_1 \quad (4.5)$$

α_0 , α_1 y α_2 son parámetros constantes, reales y positivos del modelo. De acá se expresa que dada una configuración al agregarle drones, la distancia límite aumenta exponencialmente.

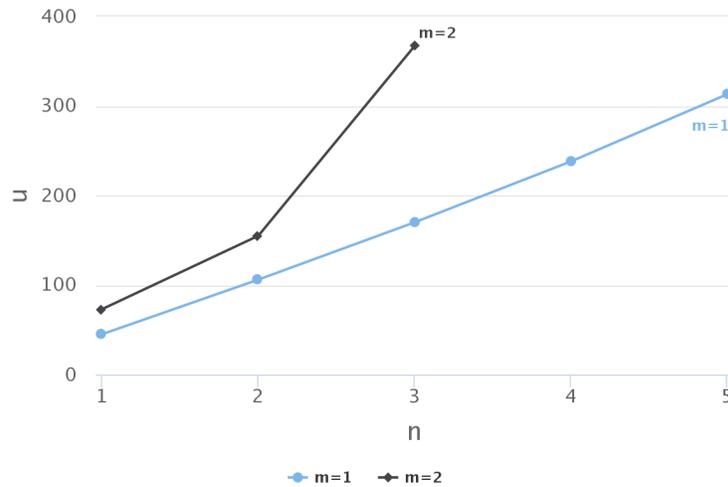


Figura 4.13: Umbral y drones: m es la cantidad de tanques y fuegos. n es la de drones. u la distancia umbral. Se ven dos series, una con $m = 1$ y otra con $m = 2$. Mientras más grande el m y el n más se aleja u .

Sin embargo, la cantidad de drones n tiene menos incidencia en la distancia límite que la cantidad de tanques y fuegos m porque $\alpha_2 > \alpha_1$. Dicha condición refleja la interacción que se produce entre los drones. Por ejemplo con $m = 2$, cuando al apagar el primer incendio, cambian las condiciones iniciales del escenario haciendo que de dos fuegos pasen a solo uno y manteniendo los dos tanques iniciales. Lo cual permite acelerar el proceso de extinción con respecto al primer fuego.

Es por este comportamiento cooperativo que obtenemos un escalamiento en eficiencia al aumentar los tanques y drones, que se traduce en una mejor distribución de recursos y consecuentemente en un umbral o distancia límite más alejada.

Capítulo 5

Comportamiento emergente de los drones

5.1. Definiciones y objetivos

Los comportamientos emergentes tienen un rol protagónico en la teoría de sistemas de organización y de integración de niveles. Se pueden encontrar en la naturaleza como en las colonias que surgen de la organización de las hormigas, o la vida que emerge de propiedades químicas. Con el desarrollo de la teoría de complejidad se tienen herramientas computacionales para entenderlo en forma científica ([61], [62] y [63]).

Se define el comportamiento emergente o emergencia como un proceso de formación de patrones no lineal donde la sinergia de las partes da lugar a la autoorganización y la formación de nuevos patrones que a su vez permiten nuevos niveles de organización que están dirigidos por una dinámica evolutiva ([64], [65] y [66]).

Como las propiedades emergentes son producto de la sinergia entre las partes no pueden ser observadas localmente en el subsistema. Es decir que estas propiedades emergentes no son la suma de las propiedades de los elementos que forman la colección tomados individualmente. Esta emergencia surge de la interacción entre los componentes más que del comportamiento individual de estos [67].

Con estas definiciones como herramientas y guías se analizarán y construirán los fundamentos que hacen que los drones, en su interacción con fuegos y tanques, logren fruto de su colaboración un comportamiento beneficioso para su objetivo común que no esta programado en cada uno de ellos.

5.2. Patrones de correlación

Los patrones son uno de los conceptos más abstractos sin embargo no significa que no se puedan definir en forma precisa. Un patrón es cualquier forma de correlación entre los estados de los elementos dentro del sistema. Todos los sistemas muestran algún patrón, ya sea en el tiempo o en el espacio. Una correlación es una relación estructural entre variables. Una combinación de correlaciones entre elementos forma un patrón regular o inteligente [67].

Si no hay correlación entre las partes entonces están asociadas aleatoriamente. La aleatoriedad se puede entender como la ausencia de organización y es lo opuesto a un patrón relacional [68].

Se pueden descubrir las correlaciones con observaciones empíricas para poder desarrollarlas como patrones. Las correlaciones se analizan en tres aspectos: positividad, fuerza y linealidad ([69] y [70]).

Existe un grupo de tres correlaciones que involucran el tiempo de extinción t_e . Estas tres se reflejan en la ecuación (4.3) involucrando tres componentes: drones, fuegos y tanques.

La correlación entre t_e y los n drones es no lineal, negativa y fuerte. Se ha visto que la cantidad de drones afectar fuertemente al enfriamiento del sistema. También la cantidad de tanques t se correlaciona con t_e en forma no lineal, negativa pero débil porque no es la principal componente que determina que baje la temperatura. Por otro lado, la correlación entre t_e y la cantidad de fuegos f es no lineal, positiva y fuerte. Lógicamente un mayor número de fuegos implica un calentamiento del sistema.

Con esta idea, el tiempo de extinción en función de la cantidad de drones, fuegos y tanques guarda un patrón robusto que permite predecir el tiempo en el que se puede apagar un incendio.

Otro patrón de correlación que surge de la ecuación 4.4, permite ver cómo afecta la distancia entre los tanques y los fuegos sobre el tiempo de extinción. Constituido por dos correlaciones. La primera entre el tiempo de extinción t_e con la distancia d , que resulta ser no lineal, positiva y fuerte. Y la segunda, entre el tiempo de extinción t_e y la cantidad de drones n que es no lineal, negativa y débil. La distancia entre los tanques y los fuegos influye con más fuerza que la cantidad de drones en el tiempo de extinción.

Un tercer patrón es el que se modela con la ecuación 4.5, que sirve para determinar si los fuegos pueden ser extinguidos por los drones dependiendo de la distancia límite o umbral que los separa de los tanques. En este caso las correlaciones son dos: la cantidad de tanques y fuegos m y la de drones n , cada una se correlaciona con la distancia límite. Ambas son no lineales y positivas pero m es más fuerte que n .

Ahora hay otro patrón que es visual y no analítico como el anterior. En el mismo sentido de patrones robustos se tiene al grupo de drones que vuelan juntos, donde el estado de cada miembro se supone que está correlacionado con el de otro miembro formando un patrón fuerte que se puede fácilmente identificar.

Un grupo de drones que se dirijan a apagar fuegos, puede adoptar una dinámica de movimiento de bandada o flock. Esto último se define como un movimiento colectivo de un gran número de entidades autopropulsadas [71] y se observa en la naturaleza en muchos seres vivos como pájaros, peces, bacterias, e insectos [72]. Está demostrado en el trabajo de Reynolds [71] que el patrón de las bandadas genera un comportamiento emergente que surge de tres reglas sencillas que siguen los individuos y no conlleva ningún tipo de coordinación centralizada. Estas tres reglas se aplican entre vecinos y son: separación, cohesión y alineamiento. La separación es la repulsión de corto alcance, la cohesión la atracción de largo alcance y el alineamiento es el promedio de los vectores velocidades.

En el caso de la bandada de drones la separación se garantiza por la restricción que evita que más de un dron ocupé la misma posición. La cohesión se da como consecuencia de la ejecución del algoritmo de máximos locales que sienten la temperatura, logrando que los drones se concentren hacia donde perciben más calor y no se dispersen en otras direcciones. De una manera parecida, el algoritmo recién mencionado hace que los drones vecinos coordinen una dirección en común debido a que perciben el mismo flujo de calor por una cuestión de cercanía. Por esto último y agregado que

el módulo de velocidad de todos los drones es constante en todo momento, se puede afirmar que también se cumple la regla de alineamiento. Como se cumplen las tres reglas entonces se puede afirmar que el patrón de bandada de drones también genera un comportamiento emergente.

En la Figura 5.1 se muestra un ejemplo de bandada de drones donde se puede ver como el algoritmo de temperatura de máximos locales cumple implícitamente las reglas de cohesión y de alineamiento. La primera se observa al analizar las cuatro secuencias como los drones tienden a moverse juntos y la última en el flujo en común que siguen hacia los fuegos.

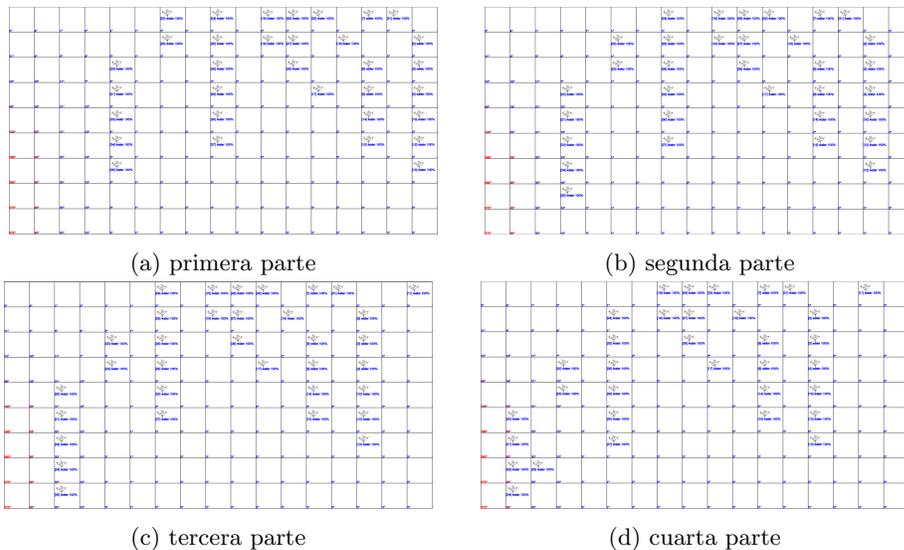


Figura 5.1: Bandada de drones: En la secuencia de imágenes se ve a un grupo de drones moviéndose coordinadamente hacia el objetivo. Formación del patrón que mantiene la formación de los drones y su dirección (cohesión y alineamiento).

5.3. Interacciones sinérgica

Según el diccionario de Oxford, se entiende a la sinergia como la interacción o cooperación de dos o más partes para producir un efecto combinado mayor que la suma de sus efectos separados [73]. En este caso la sinergia es positivas y tiene la propiedad de que sus partes diferencian

los estados y actividades entre ellos y los coordinan [67]. Si la interacción quita valor se denomina sinergia negativa [74]. Estas interacciones están formadas por dos tipos de operaciones: diferenciación e integración. La diferenciación permite que las partes se especialicen mientras que la integración les posibilita coordinar sus diferentes capacidades hacia un resultado global. La diferenciación es importante porque se asegura de que las partes trabajen juntas [75].

Hay sinergia entre los drones durante su desplazamiento por el escenario. Un drone no se va a mover a un lugar ocupado por su vecino, cada uno tiene la capacidad de diferenciar qué lugar está disponible para poder ocuparlo. De acuerdo al diagrama de estados (Figura 3.4) que rige el movimiento de los drones, estos no paran de moverse salvo en el momento de descarga. Esto último disminuye radicalmente la posibilidad de que un drone se transforme en un obstáculo para otro. Inclusive las descargas son interrumpidas si el sensor de temperatura encuentra un máximo local mayor al del fuego actual. Este comportamiento que evita que los drones se estorben es la operación de integración en esta interacción sinérgica.

La Figura 8.2 muestra el resultado de un experimento en el que se desarrollan las interacciones de diferenciación y de interacción. A través de una secuencia continua de seis imágenes se desarrollan las interacciones mencionadas. La interacción de diferenciación la produce el drone 11. Este se dirige a apagar un fuego, pero al detectar o diferenciar que la próxima posición en su ruta se encuentra ocupada por otro drone (drone 8), toma la decisión de elegir otra posición que esté disponible y lo acerque a algún fuego. La interacción de integración se presenta en un grupo de drones que se mueven coordinadamente en forma fluida y sin pausa, como si fuera una bandada de drones. Este movimiento fluido es sincronizado por la diferenciación y evita el estorbamiento entre los mismos.

Es esta sinergia descrita la que permite agregarle drones al sistema sin que se vea afectado negativamente el tiempo de extinción, como se comprobó en el experimento donde el enjambre compite contra el superdrone y no pierde tiempo de extinción al sumar drones (sección 4.3.1). También esta idea se verifica al analizar $t_e(f, n, t)$, función exponencial negativa, que decrece al incrementar n (ecuación 4.3). Por lo que se puede afirmar que es una sinergia positiva que permite una autoorganización de los drones.

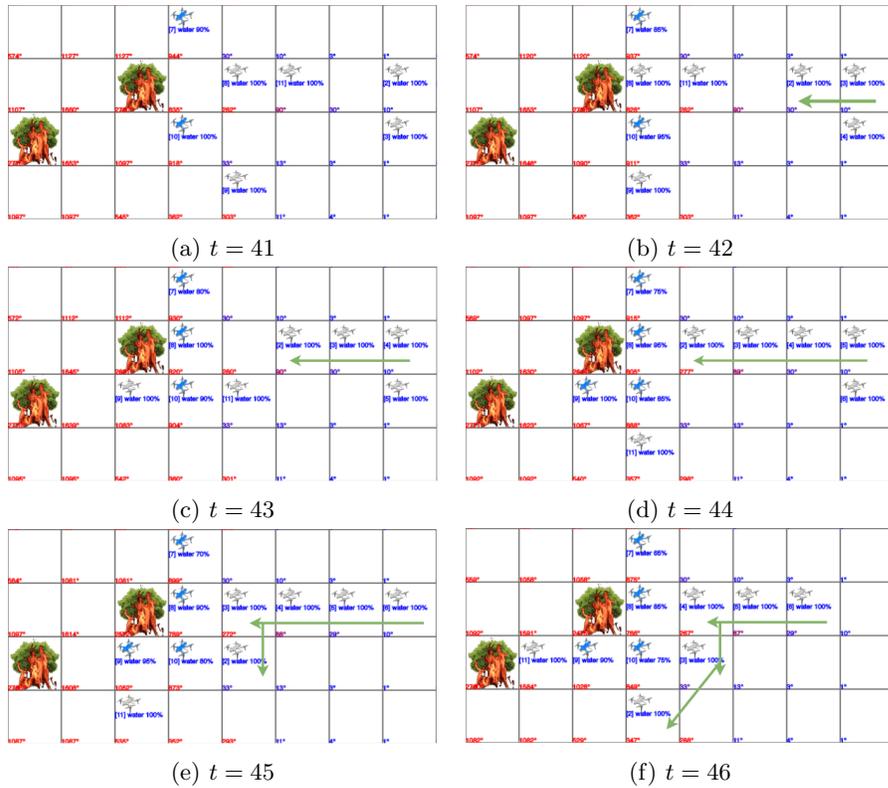


Figura 5.2: Diferenciación e Integración: De la figuras a) a la f) se muestra una secuencia continua desde el tiempo $t = 41$ al $t = 46$. El drone 11 viaja hacia un fuego ($t = [41, 42]$) hasta que diferencia que la posición a tomar está ocupada por el drone 8 y decide tomar otra que esté libre y lo acerque a algún fuego ($t = 43$). La integración se produce por el flujo de movimiento continuo de una bandada de drones ilustrado por las flechas verdes ($t = [42 - 46]$).

5.4. Formación de patrones

En esta sección se tratará la forma en que se autoorganizan las partes para sincronizar sus estados y formar un nuevo nivel de organización, esto se consigue por medio de la formación de patrones [67]. En otros términos, es el modo en que se arman los patrones y persisten durante un periodo de tiempo. Captura la esencia del autoorganizamiento y emergencia en todos los tipos de sistemas.

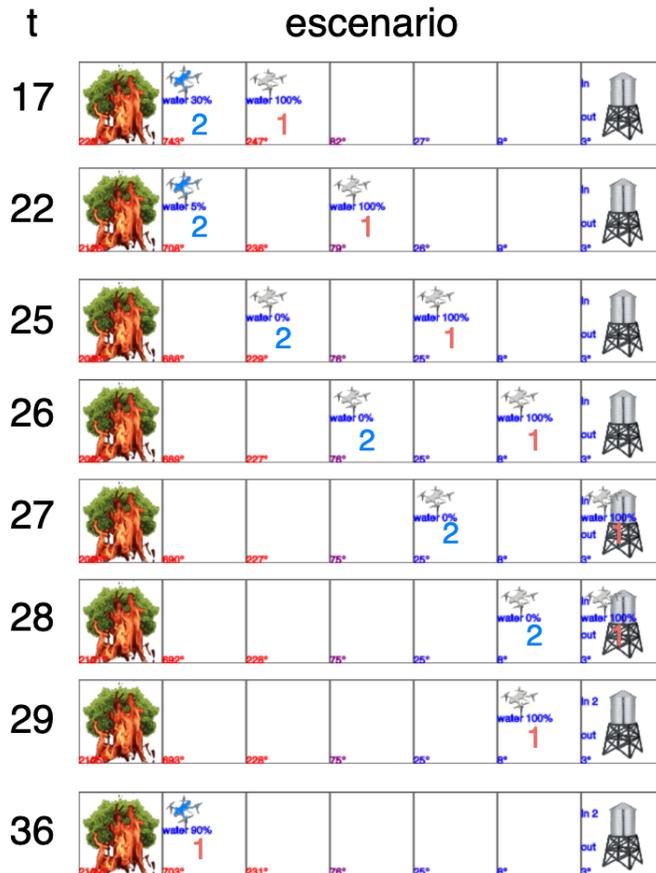


Figura 5.3: No estorbamiento: En la figura se muestra una secuencia ordenada de escenas por el tiempo t . En las primeras dos secuencias (17 y 22) el drone 1 vuela cerca del incendio que está apagando el drone 2. Una vez que el drone 2 se queda sin agua, se traslada al tanque para hacer una recarga; durante ese trayecto el drone 1 se aleja evitando entorpecer al drone 1 (25 - 28). El drone 2 entra al tanque al llevar a su vecindad y desaparece del escenario mientras dura la recarga; por su lado el drone 1 se mueve hacia el fuego (29). Mientras el drone 2 se recarga en el tanque, el drone 1 sigue apagando el fuego (36).

Lo que interesa entender es cómo se forma este patrón. Para responder esto primero hay que diferenciar entre los patrones que fueron creados por organización impuesta por una organización externa y las que fueron creadas a través de un patrón siendo internamente generado. Un aspecto

52CAPÍTULO 5. COMPORTAMIENTO EMERGENTE DE LOS DRONES

central es que no hay organización centralizada sino que se forma por la interacción entre las partes.

La autoorganización de los drones es la base para formar diversos patrones visuales como el efecto bandada (ejemplo en la Figura 5.1) o la capacidad de no estorbamiento. En la Figura 5.3 se ejemplifica un caso de no estorbamiento entre dos drones, donde el drone que necesita recargar agua no ve entorpecido su trayecto al tanque por el drone cercano, que al detectar la cercanía de su vecino se aleja permitiéndole llegar a su destino.

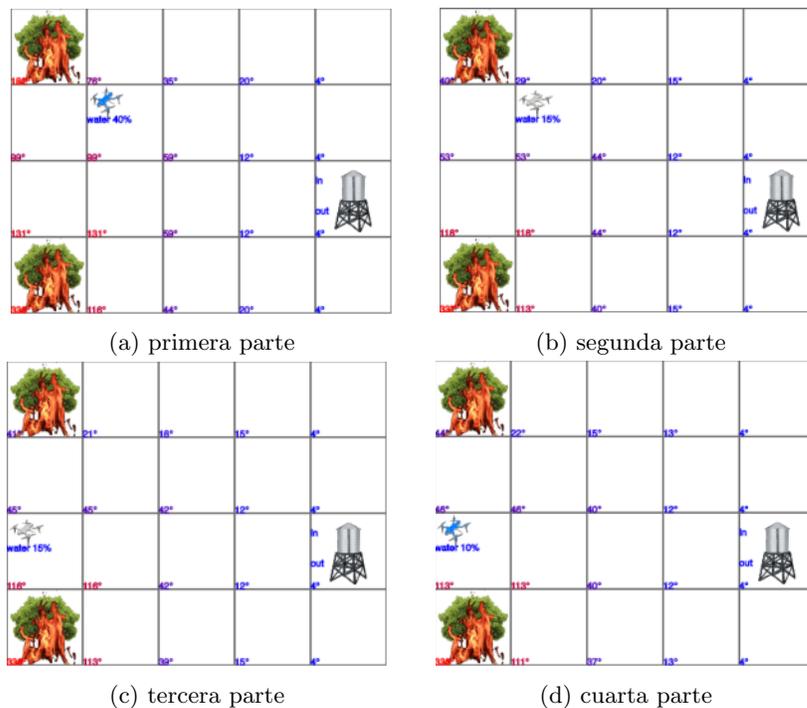


Figura 5.4: Desplazamiento entre descargas: En la secuencias de figuras se muestra cómo un drone se desplaza entre descargas de acuerdo a las temperaturas percibidas en su vecindad y decidiendo en base al algoritmo de máximos locales. (a) el drone descarga sobre el fuego de arriba y en consecuencia baja la temperatura que genera este fuego. (b) Al detectar más calor de otra dirección decide parar la descarga y dirigirse hacia el nuevo objetivo. (c) El drone se traslada hasta el fuego de abajo. (d) La descarga se hace sobre el fuego de abajo.

Principalmente surge de la lógica simple del diagrama de estados que rige el comportamiento de cada dron. Estas simples reglas le dan a cada dron la libertad de tomar sus propias decisiones pero entendiendo la responsabilidad de ser cooperativos con los demás. Esto se da por la interacción sinérgica entre las partes.

Otro factor de autoorganización se da durante el desplazamiento de los drones hacia un fuego. Por medio de sus sensores de temperatura van eligiendo posiciones con temperaturas de máximos locales que les permite encontrar el fuego que los atrae. De este modo el conjunto de drones sigue un flujo de calor hacia el fuego que ordena tanto en el desplazamiento como en la descarga. Esto último se da cuando un fuego ha perdido tanta temperatura que la de otro fuego vecino logra superarlo provocando un nuevo máximo local y en consecuencia una nueva autoorganización de los drones, que dejan de descargar sobre el fuego actual y se dirigen al otro fuego vecino. Se puede ver un ejemplo en la Figura 5.4.

Y por último se encuentra la autoorganización que forman los drones al desplazarse a los tanques para la carga. Cada dron se acerca al tanque más cercano y disponible que encuentre. Con este criterio se disminuye al máximo el efecto cuello de botella. De no estar este criterio los drones elegirían al tanque solo por su cercanía sin preocuparse por su disponibilidad llenándolo y así aumentando el tiempo de espera en sus colas de servicio perjudicando el interés global que es apagar los focos en el menor tiempo posible, cuando podría dirigirse a algún tanque más lejano pero libre. Esta situación se ejemplifica en la Figura 5.5.

En todos estos casos el orden surge de forma interna. Las acciones se coordinan como resultado de la sinergia entre las partes formando un comportamiento distribuido y no centralizado. Es por esto mismo que el sistema se vuelve tolerante a las fallas típicas de los sistemas centralizados.



Figura 5.5: Autoorganización de cargas: En la simulación, que se ve en la figura, el enjambre elige los tanques con un criterio de conveniencia, en base a una relación entre distancia y disponibilidad. El drone d1, que se traslada desde los fuegos de la izquierda, se dirige al tanque t2 porque tiene disponibilidad en comparación al tanque t1, que está más cerca en su trayecto pero está ocupado cargando un drone. El drone d1 decidió que para ese momento el tanque t2 era más conveniente que el t1.

Capítulo 6

Conclusión

La investigación tuvo como objetivo entender la efectividad y el comportamiento de un enjambre de drones bomberos junto a un conjunto de tanques proveedores de agua para extinguir incendios forestales. En base a los análisis cuantitativos y cualitativos realizados a través de los diferentes experimentos, se puede concluir que un enjambre de drones bomberos es eficiente para combatir incendios forestales con las condiciones del problema. Esto se debe a sus características cooperativas, manifestadas en la autoorganización de carga y descarga de agua, y en los comportamientos de desplazamiento que evitan congestionamientos o bloqueos de drones. Los resultados indican que un enjambre mejora su desempeño al poseer una mayor cantidad de drones.

A continuación se responde cada pregunta planteada con una explicación general que resume las perspectivas más importantes del aspecto investigado.

- ¿Cómo varía el tiempo de extinción en función de la cantidad de drones, tanques y fuegos? De acuerdo al modelo creado, en base a los resultados obtenidos, el tiempo de extinción decrece exponencialmente al aumentar la cantidad de drones y tanques. Por otro lado, el incremento de la cantidad de fuegos retrasa el tiempo de extinción.
- ¿Cómo afectan al tiempo de extinción las posiciones iniciales de las partes? La distancia entre fuegos y tanques queda definida por sus

posiciones iniciales y se mantiene constante a lo largo del tiempo. Frente a la evidencia recaudada a lo largo de diferentes escenarios, se desarrolló un modelo que indica que la distancia mencionada afecta el tiempo de extinción haciéndolo crecer en forma exponencial. Por otro lado, la posición inicial de los drones resulta invariante para el tiempo de extinción.

- ¿Qué criterios determinan que un conjunto de drones no puedan apagar un incendio? En relación a lo antes expuesto, se concluyó que existe una distancia límite entre los fuegos y los tanques para una cantidad determinada de drones, que de alcanzarse hace imposible apagar el incendio por extinción. Otro factor importante es contar con una cantidad mínima de drones, que se calcula en función de la cantidad de fuegos.
- ¿El incremento de drones se vuelve contraproducente para el tiempo de extinción en algún punto? En base a los modelos desarrollados y a las interacciones sinérgicas entre drones y tanques, se puede afirmar que al agregar drones al sistema no se aumenta el tiempo de extinción, sino que disminuye o en el peor de los casos se mantiene igual.
- ¿Se obtiene algún efecto adicional al agregar tanques y drones, en comparación al efecto de sus partes sumadas individualmente? Sí, se concluyó por medio de análisis cualitativos y cuantitativos de diversos experimentos, que existe un comportamiento emergente en el enjambre que permite la autoorganización distribuida del ciclo de carga. Esto provoca que los fuegos tengan menos tiempo de recuperación.

El proyecto tomó el enfoque de proponer una solución alternativa e innovadora al combate de los incendios forestales usando simulaciones para su representación. Las expectativas rondaban en proporcionar una solución alternativa a este tipo de problemas y en lo particular se esperaba encontrar un conjunto de comportamientos emergentes en los drones, que aumentando el volumen del enjambre, escalen la efectividad en el tiempo de extinción; y de acuerdo a los resultados obtenidos se puede afirmar que esa expectativa se alcanzó.

Capítulo 7

Trabajos futuros

El presente trabajo tiene una gran diversidad de aspectos sobre los que se puede indagar y expandir. Principalmente desde el punto de vista del comportamiento emergente del enjambre en un escenario más complejo y cercano a la realidad. A continuación se sugieren distintas orientaciones.

7.1. Expansión del escenario a tres dimensiones

Para poder modelar un escenario con altura hay que expandirlo a una tercera dimensión. Como los autómatas celulares son capaces de lograr esta abstracción (Sección 3.1), se podría reutilizar el modelo propuesto en este trabajo. Las vecindades se ampliarían, algunas como los drones pasarían de tener forma de cuadrado a la de un cubo y los elementos fijos y terrestres como los fuegos y los tanques tendrían algo menos que un cubo, esto se puede ver en la Figura 7.1.

Queda verificar si el mayor espacio que se obtendría le permitiría a los drones desplazarse de una forma más fluida. Este espacio ganado puede favorecer o no distintos aspectos del enjambre como la efectividad del algoritmo de máximos locales para el rastreo de fuego, la eficiencia en el ciclo de carga/descarga e inclusive una mayor acumulación de drones para descargar en un fuego.

De este último punto, surge un aspecto importante a estudiar, que es

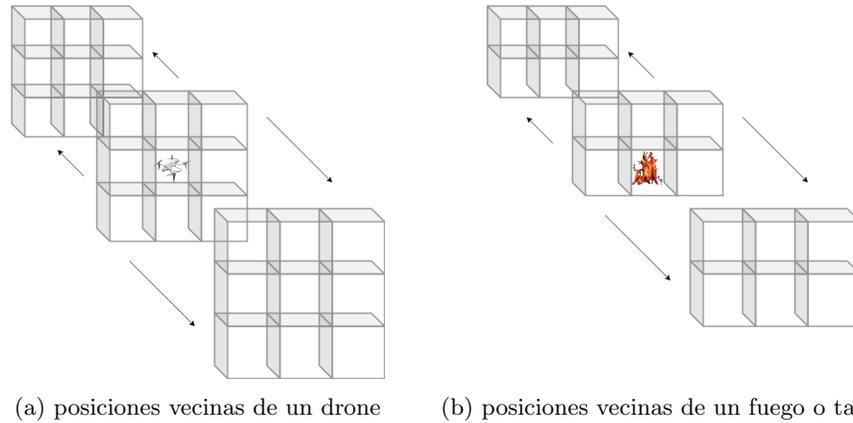


Figura 7.1: Posiciones vecinas 3D: un dron puede tener hasta 26 posiciones vecinas (a) mientras que un elemento en tierra como un fuego o un tanque hasta 17 (b).

entender y modelar cómo afecta a la precisión de la descarga la variación de altura entre un fuego y un dron. Ya que se puede intuir que mientras más sea la altura, a la que se encuentra el dron del fuego, más difícil sería que le llegue la descarga.

7.2. Propagación de fuegos

En el caso de que se quiera simular la expansión de un incendio, se puede modelar la ignición de un elemento combustible cercano a algún fuego como un evento probabilístico. Como consecuencia de un traslado, sería necesario el modelado de las tres etapas de los incendios: pre-calentamiento, incendio con llamas e incendio sin llamas (Sección 2.3.3).

La velocidad de propagación y dirección sería un aspecto interesante a estudiar frente a la presencia de diferentes elementos combustibles. En caso de implementar el viento, también se lo podría sumar a este análisis para entender cuánto influye.

Desde el punto de vista de los drones, habrá que analizar la necesidad de cambiar la lógica de acción para adaptarse a este nuevo escenario. Estos

cambios impactan sobre el diagrama de estados y el algoritmo de detección de máximos locales.

7.3. Implementación del viento

Como se describió previamente (Sección 2.3.2), la presencia del viento hace que la propagación de calor por convección pase a superar a la radiación (que es la que se modela en este trabajo). Con este aditamento se podría analizar la distribución del calor en el escenario y el impacto en el algoritmo de detección de incendio que tienen los drones.

Además, el viento puede influir en el movimiento de los drones, ofreciendo aceleración, resistencia y turbulencia. Un inconveniente que puede plantearse es qué tanto interfiere el viento en la descarga.

7.4. Drones con energía eléctrica limitada

Simular el agotamiento de la carga eléctrica de los drones es un acercamiento importante a la realidad. Se puede optar una estrategia análoga a la de recarga de agua de los tanques que mostró un beneficio en el tiempo de extinción de los fuegos.

Otro aspecto a definir es la unidad de carga, un cargador de drones, que puede coincidir o no con la posición de los tanques.

Será necesario investigar y modelar las velocidades de carga y descarga de energía eléctrica. Como también analizar los eventos o escenarios que pueden influir en el desgaste energético, como una cantidad innecesaria de desplazamientos, la elección de una ruta demasiado larga o, en el caso de incluir al viento, entender como una resistencia o turbulencia aérea pueda influir en descargas adicionales.

El llevar el sistema de una composición de tres partes (fuegos, tanques y drones) a uno de cuatro (se agregan los cargadores de drones) puede influir en los modelos desarrollados en este trabajo y será importante revisarlos y adaptarlos.

Capítulo 8

Anexo

En el presente anexo se documentan las funcionalidades, los detalles de diseño e implementación más relevantes de la aplicación web “drones bomberos web”.

Esta herramienta fue desarrollada en forma íntegra y total para el presente trabajo por su mismo autor.

Además se puede descargar el código del proyecto del siguiente repositorio GIT:

<https://scamisay-itba@bitbucket.org/scamisay-itba/pf-drones-bomberos.git>

8.1. Casos de uso

Como se muestra en la Figura 8.1, la aplicación cuenta con los siguientes casos de uso:

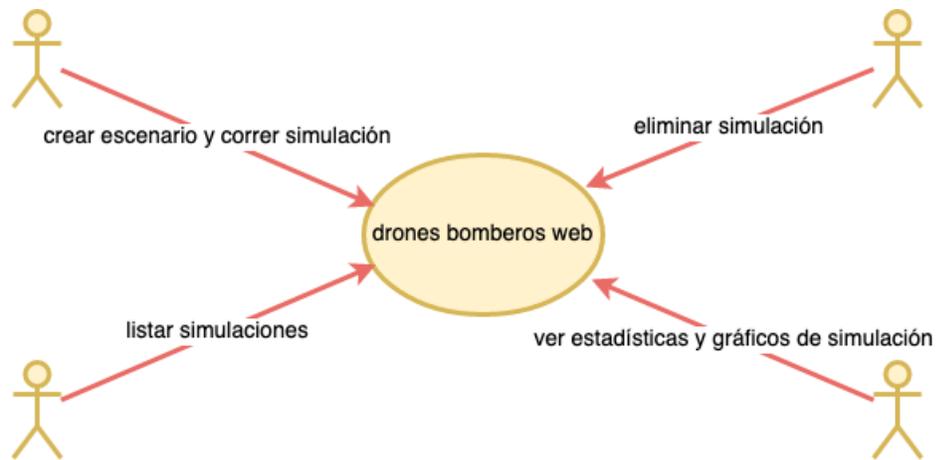
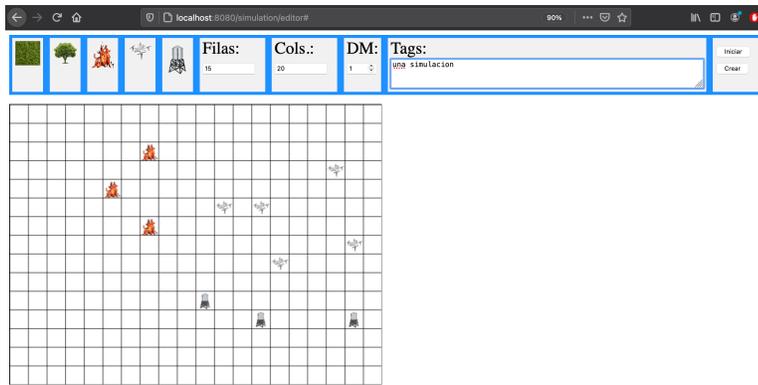


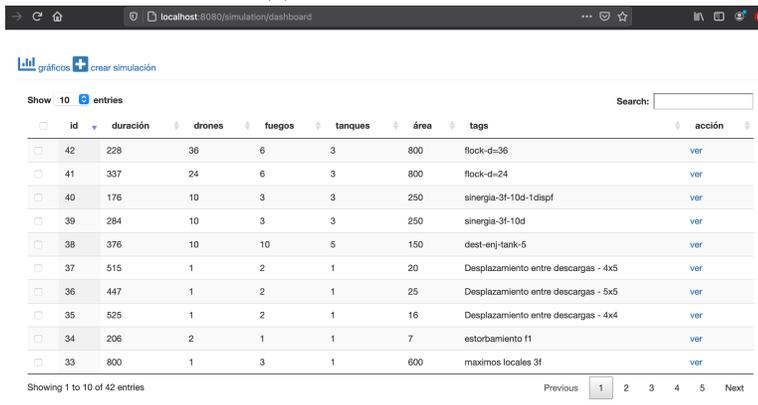
Figura 8.1: Diagrama de casos de uso: El sistema ofrece estas funcionalidades.

1. Creación de escenarios: a través de un editor de mapas, cargado en el browser, se puede diseñar un escenario para posicionar los fuegos, drones y tanques deseados. Cada escenario se puede rotular con un nombre para poder distinguirlo del resto. Una vez creado el escenario se inicia la simulación.
2. Listado: se puede obtener un listado de las simulaciones corridas. Permite filtrar y ordenar por dimensiones del escenario, cantidades de drones, fuego o tanques y también por duración de la simulación.
3. Eliminar simulación: se selecciona del listado y se elimina.
4. Ver estadísticas: a través del listado de simulaciones se puede tener acceso a un conjunto de estadísticas y gráficos interactivos relacionados a distintos aspectos de la simulación: variación de la temperatura del sistema, evolución del nivel de carga de los drones. También permite comparar varias simulaciones en relación a su rendimiento en tiempo de extinción.

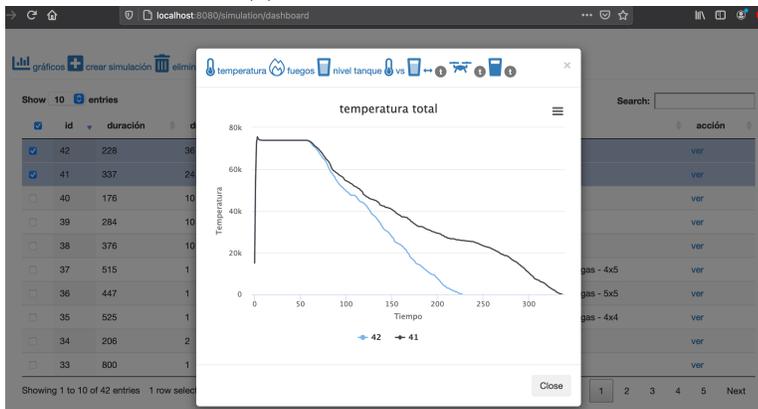
En la Figura 8.2 se muestran algunas capturas de las funcionalidades descritas en los casos de uso.



(a) editor de escenarios



(b) listado de simulaciones



(c) gráficos

Figura 8.2: Frontend de la aplicación: distintas pantallas de la herramienta web.

8.2. Arquitectura y diseño

El sistema es una aplicación web desarrollada en Java con el framework Spring Boot y deployada con Maven. Desde cualquier host con acceso al server se puede usar la aplicación a través de un browser por el puerto 8080. La Figura 8.3 muestra la arquitectura del sistema. El sistema está constituido por un webservice que implementa el patrón de arquitectura MVC. El simulador desarrollado dentro de este proyecto está integrado en un sistema por capas. Las simulaciones y su metadata se persisten en una base de datos MongoDB.

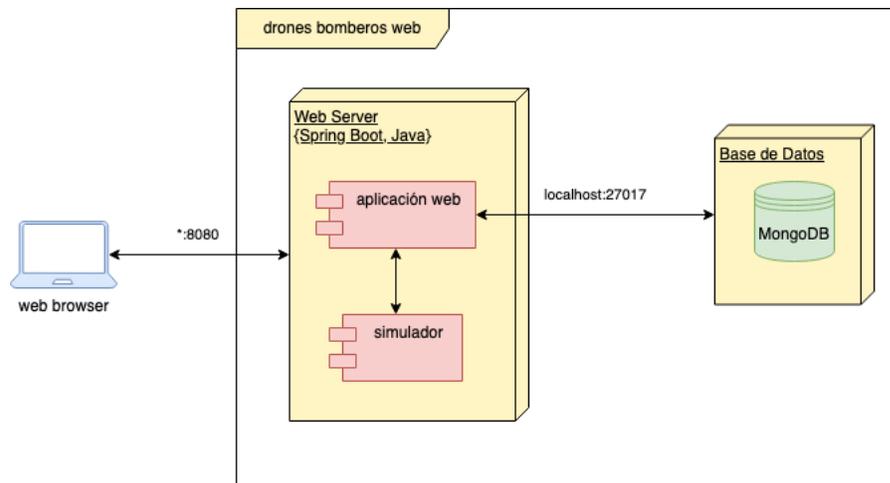


Figura 8.3: Diagrama de arquitectura del sistema: El sistema tiene una arquitectura cliente-servidor.

La aplicación web se diseñó con un desacoplamiento de tres capas: presentación, negocio y persistencia. En la Figura 8.4 se ven las clases que componen cada una de las capas junto a sus correspondientes dependencias inyectadas.

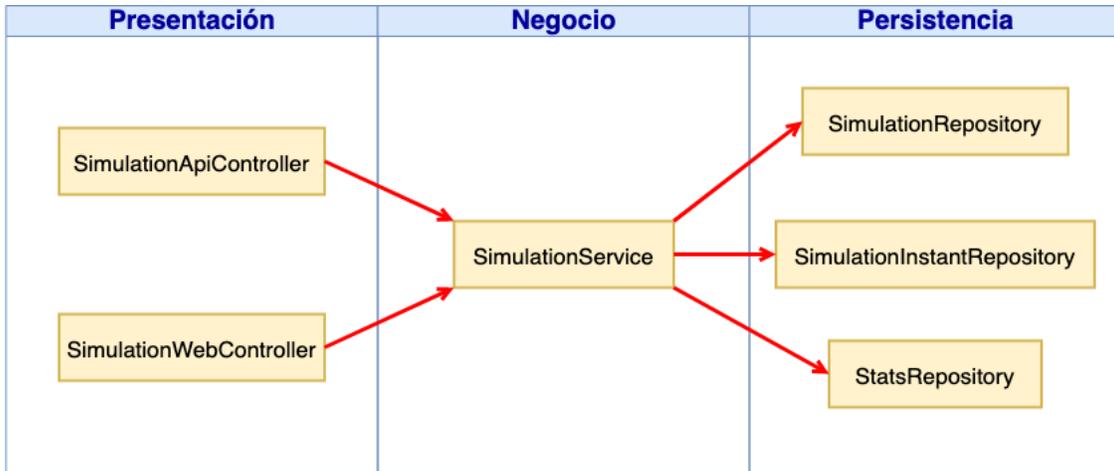


Figura 8.4: Diagrama de capas de la aplicación web: modelo de tres capas.

8.3. Implementación

En la Figura 8.5 se presentan las relaciones y dependencias entre los distintos objetos de dominio que componen a una simulación. El paradigma de desarrollo es la programación orientada a objetos y las especializaciones se implementan a través de herencias e interfaces. La evolución de los objetos de dominio se realiza en forma polimórfica.

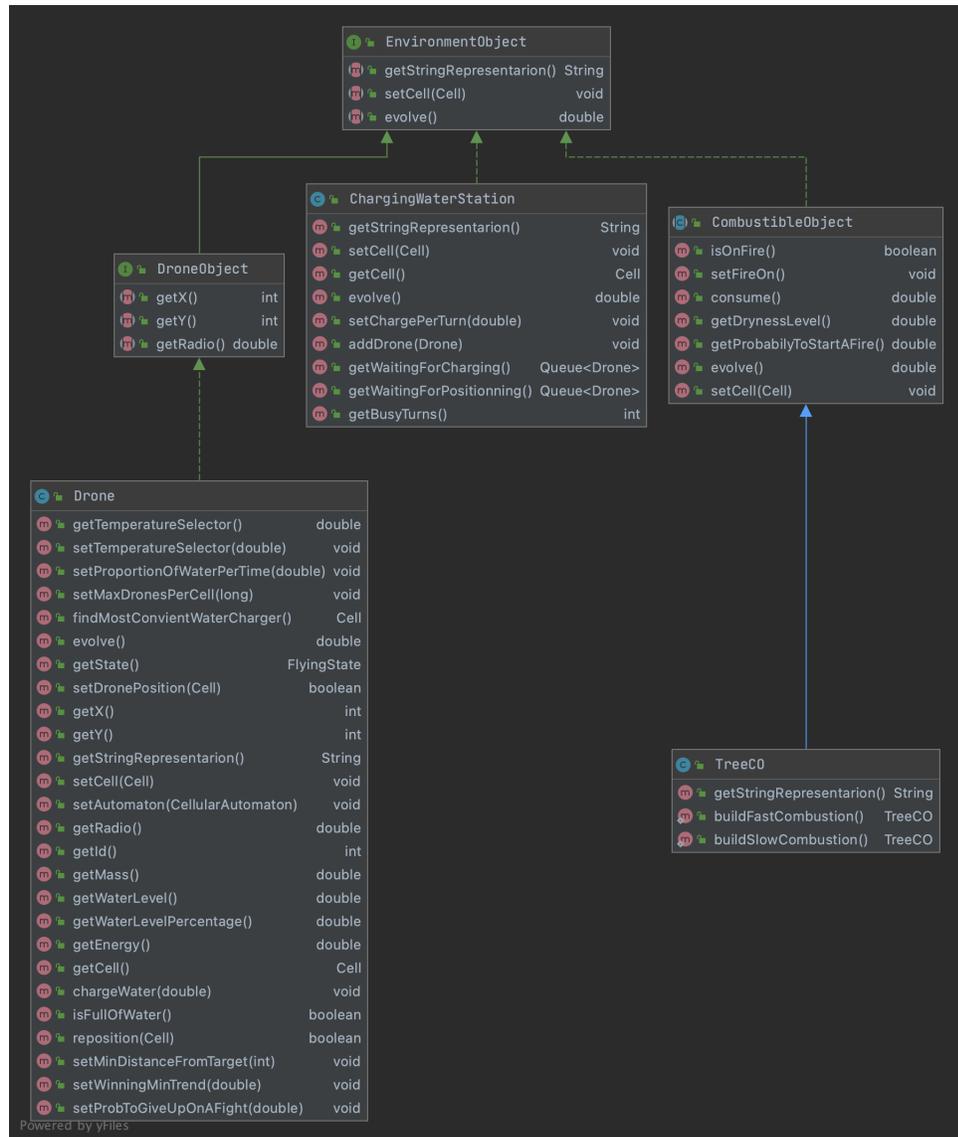


Figura 8.5: Diagrama de clases de dominio: Los objetos de dominio heredan de una clase común.

A través de la Figura 8.6 se grafica la relaciones de dependencia y cardinalidad que existen entre las simulaciones, los instantes que la componen, el escenario compuesto por células e implementado por un

autómata celular y un motor de evolución de simulaciones.

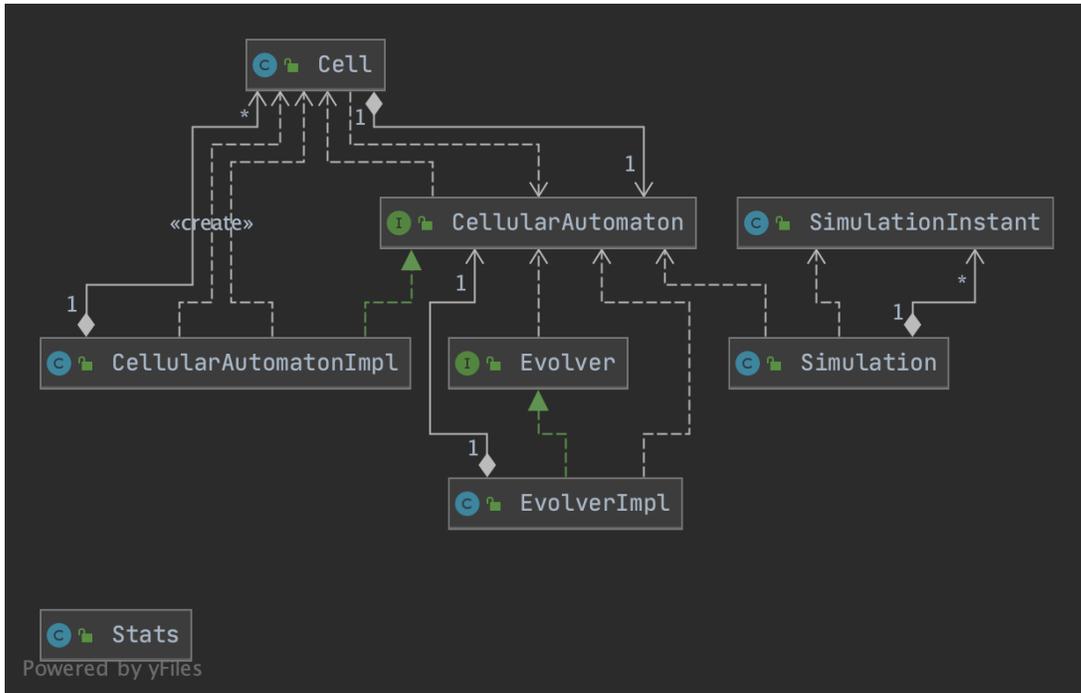


Figura 8.6: Diagrama de clases de la simulación: Relación entre el motor de evolución, una simulación y el escenario.

Bibliografía

- [1] WWF. Forests ablaze: causes and effects of global forest fires. 2017.
- [2] K. Shannon D. Jimenez D. Frankman Bret Butler, J. Forthofer. The effect of terrain slope on firefighter safety zone effectiveness. 2010.
- [3] Jason Moore. Uav fire-fighting system. 2011.
- [4] Yumiko Sekino Motohiko Nomi. Cable-connected drone swarm. 2016.
- [5] A multi- purpose fire fighting drone. 2015.
- [6] Unmanned plane for fire reconnaissance and fire-fighters. 2014.
- [7] Li Liang Tang Jiequan. Forest fire detection based on unmanned plane and preventing control method. 2014.
- [8] Louis B. Rosenberg. Methods and systems for collaborative control of a remote vehicle. 2018.
- [9] Search and reconnaissance method by multiple drones using particle swarm algorithm. 2017.
- [10] Ashwin S Thirunahari Michael A Jassowski. Drone swarm for increased cargo capacity. 2017.
- [11] Abolfazl Razi Shafkat Islam. A path planning algorithm for collective monitoring using autonomous drones. 2019.
- [12] Sabri Tosunoglu William Marchant. Rethinking wildfire suppression with swarm robotics. 2016.
- [13] Jian Tao Michael J. Starek Burchan Aydin, Emre Selvi. Use of fire-extinguishing balls for a conceptual system of drone-assisted wildfire fighting. 2019.

- [14] Alain Anthony Mangiat Unnikrishna Sreedharan Pillai. Method and apparatus for dynamic swarming of airborne drones for a reconfigurable array. 2015.
- [15] Jonathan Sheldon Kupferstein Alain Anthony Mangiat, Unnikrishna Sreedharan Pillai. Method for controlling and communicating with a swarm of autonomous vehicles using one-touch or one-click gestures from a mobile platform. 2012.
- [16] Li Yipeng Dai Qionghai, Li Peng. Unmanned aerial vehicle group works in coordination with the method and system following the tracks of target. 2013.
- [17] Werner Straumann Didier Rizzotti, Nikolaus C/O Patents Technology Survey Schibli. Procedimiento y dispositivo de detección de fuegos basados en el análisis de imágenes. 2003.
- [18] Jerome H. Lemelson Robert D. Pedersen. Fire detection systems using artificial intelligence. 2001.
- [19] CONAE. Desarrollar una plataforma integral y apps que prevengan incendios forestales, rurales y de interfase usando tecnologías de origen espacial. 2021.
- [20] John T. Abatzoglou R. Chelsea Nagy Jennifer K. Balch, Bethany A. Bradley. Human-started wildfires expand the fire niche across the united states. 2017.
- [21] Mike L. Goulden Randi R. Jandt Charles E. Miller Elizabeth B. Wiggins James T. Randerson Sander Veraverbeke, Brendan M. Rogers. Lightning as a major driver of recent large fire years in north american boreal forests. 2017.
- [22] JessicaMurray Robert Unsworth Christine Lee, Claire Schlemme. The cost of climate change: Ecosystem services and wildland fires. 2015.
- [23] S.E. Cornell A. Aldersley, S.J. Murray. Global and regional analysis of climate and human drivers of wildfire. 2011.
- [24] C. Carcaillet D.G. Gavin S.P. Harrison P.E. Higuera F. Joos M.J. Power I.C. Prentice J.R. Marlon, P.J. Bartlein. Climate and human influences on global biomass burning over the past two millennia. 2008.

- [25] D.T. Shindell O. Pechony. Driving forces of global wildfires over the past millennium and forthcoming century. 2010.
- [26] W. Rammer P.J. Verkerk R. Seidl, M.J. Schelhaas. Increasing forest disturbances in europe and their impact on carbon storage. 2014.
- [27] D. Vollaro J. Molinari D.M. Roms, J.T. Seeley. Projected increase in lightning strikes in the united states due to global warming. 2014.
- [28] National Interagency Fire Center (NIFC). Total wildland fires and acres. 2014.
- [29] A.L. Sullivan. A review of wildland fire spread modelling,1990-present1: Physical and quasi-physical models. 2018.
- [30] F. Beall and H. Eickner. Thermal degradation of wood components: A review ofthe literature. 1970.
- [31] V. Babrauskas. Ignition handbook. 2003.
- [32] McIntosh A. C. Ball, R. and J. (Brindley. Feedback processes in cellulose thermaldecomposition: implications for fire-retarding strategies and treatments. 2004.
- [33] C. di Blasi. Comparison of semi-global mechanisms for primary pyrolysis of lig-nocellulosic fuels. 1998.
- [34] R. Weber. Analytical models of fire spread due to radiation. 1989.
- [35] Ellis P. Knight I. Sullivan, A. A review of radiant heat flux models used in bushfire applications. 2003.
- [36] Webb B. Butler B. Jimenez D. Forthofer J. Sopko P. Shannon K. Hiers K. Ottmar R. Frankman, D. Measurements of convective and radiative heating in wildland fires. 2013.
- [37] Blanchi R. Leonard J. Opie K. Siggins A. Newnham, G. Bushfire decision support toolbox radiant heat flux modelling: Case study three. 2013.
- [38] Bilgili E. Baysal I. Kucuk, O. Fire development from a point source in surface fuels of a mature anatolian black pine stand. 2007.
- [39] Björn Karlsson. Enclosure fire dynamics. 1999.

- [40] Gruzin A. Grishin, A. and E. (Gruzina. Aerodynamics and heat exchange be-tween the front of a forest fire and the surface layer of the atmosphere. 1984.
- [41] Edward Arnold Johnson Kiyoko Miyanishi, Edward Johnson. Fores fires: behaviors and ecological effects. 2001.
- [42] Duane E. DeVecchio Edward A. Keller. Natural hazards: Earth's processes as hazards, disasters, and catastrophes. 2014.
- [43] M. Tamura M. Makia, M. Ishiahra. Estimation of leaf water status to monitor the risk of forest fires by using remotely sensed data. 2004.
- [44] Pierpaolo Duce Dennis Baldocchi Liukang Xu Kyaw ThaPaw U. Richard L.Snyder, Donatella Spano. A fuel dryness index for grassland fire-danger assessment. 2006.
- [45] Ch. G. Anagnostopoulou I. D. Mitsopoulos Alexandros P. Dimitrakopoulos, M. Vlahou. Impact of drought on wildland fires in greece: implications of climatic change? 2011.
- [46] E.G.Jobbágy M.A.Fischer, C.M.Di Bella. Influence of fuel conditions on the occurrence, propagation and duration of wildland fires: A regional approach. 2015.
- [47] WWF. Forests ablaze: causes and effects of global forest fires. 2017.
- [48] WWF. Forests ablaze: causes and effects of global forest fires. 2017.
- [49] WWF. Forests ablaze: causes and effects of global forest fires. 2017.
- [50] WWF. Forests ablaze: causes and effects of global forest fires. 2017.
- [51] Stephen Wolfram. Statistical mechanics of cellular automata. 1983.
- [52] A.L. Sullivan. A review of wildland fire spread modelling,1990-present3: Mathematical analogues and simulation models. 2013.
- [53] Chris G.Langton. Computation at the edge of chaos: Phase transitions and emergent computation. 1990.
- [54] M Gardner. The fantastic combinations of john conway's new solitary game of "life". 1970.

- [55] Stephen Wolfram. Theory and application of cellular automata. advanced series on complex systems-volume 1. 1986.
- [56] Les A. Piegł Konstantinos Dalamagkidis, Kimon P. Valavanis. *On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Airspace System*, chapter 7.7.1. 2012.
- [57] Satoshi Suzuki Wei Wang Daisuke Nakazawa Kenzo Nonami, Farid Kendoul. *Autonomous Flying Robots: Unmanned Aerial Vehicles and Micro Aerial Vehicles*, chapter 7.6. 2012.
- [58] Les A. Piegł Konstantinos Dalamagkidis, Kimon P. Valavanis. *On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Airspace System*, chapter 7.7.2. 2012.
- [59] E. F. Krause. Taxicab geometry. 1975.
- [60] Barry L. Nelson David Nicol Jerry Banks, John Carson. Discrete-event system simulation. 2004.
- [61] Jochen Fromm. The emergence of complexity. 2004.
- [62] John Rennie. How complex wholes emerge from simple parts. 2018.
- [63] Gerhard Weiss. Multiagent systems. 2016.
- [64] Hong Yu Wong Timothy O'Connor. Emergent properties. 2012.
- [65] Steven Johnson. Emergence: The connected lives of ants, brains, cities, and software. 2001.
- [66] Encyclopedia Britannica. Emergence. 2017.
- [67] Complexity Labs Publication. Emergence theory an overview.
- [68] Toru Ohira. On statistical independence and no-correlation for a pair of random variables taking two values: Classical and quantum. 2018.
- [69] Alexander Craig Aitken. 1957.
- [70] S. Klein F. E. Croxton, D. J. Cowden. Applied general statistics. 1968.
- [71] Craig W. Reynolds. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. 1987.

- [72] M. R. Evans O. J. O'Loan. Alternating steady state in one-dimensional flocking. 1998.
- [73] Diccionario de oxford.
- [74] Ida Asadi Someh. The role of synergy in achieving value from business analytics systems. 2013.
- [75] Paul R. Lawrence. Differentiation and integration in complex organizations. 1967.