



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CONTADURÍA, ADMINISTRACIÓN E INFORMÁTICA
MAESTRÍA EN OPTIMIZACIÓN Y CÓMPUTO APLICADO

**Simulación de un Sistema de Evacuación Seguro en Casos de
Incendio en Edificios Mediante una Comparativa de
Metaheurísticas Bioinspiradas y Heurísticas en Multitudes
heterogéneas**

T E S I S

Que para obtener el Grado de MAESTRO EN OPTIMIZACIÓN Y CÓMPUTO
APLICADO

Presenta

PETER SAVIER OROPEZA MARTÍNEZ

Director de Tesis

DR. JOSÉ ALBERTO HERNÁNDEZ AGUILAR

Revisores:

DRA. NURIA PELECHANO GÓMEZ

DR. FEDERICO ALONSO PECINA

DR. CRISPÍN ZAVALA DÍAZ

DR. GUILLERMO SANTAMARÍA BONFIL



CUERNAVACA, MORELOS

DICIEMBRE, 2020

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerle principalmente a Dios por permitirme llegar a este punto de mi carrera y de mi vida.

También quiero agradecerle a mi mamá por ser siempre esa ala de apoyo y de impulso en seguir adelante sin importar las circunstancias, siempre y cuando sea el objetivo principal.

A mi abuelo Enrique que de igual manera, nunca me ha orientado a ser alguien conformista, sino que me impulsa a llegar cada vez más lejos en lo profesional y cuidando lo más importante, la familia.

A mi director de tesis, por no solo ser un cuerpo académico que me instruye y me guía en mi proceso de formación, sino por ser ese gran ser humano y amigo.

Quiero agradecerle a todo el cuerpo académico que apoyó en realizar mi estancia internacional en Barcelona y la estancia nacional en el INEEL y así poder crecer en conocimientos referente a mi proyecto de tesis a primer nivel.

También quiero agradecerle a la Dra. Nuria Pelechano y al Dr. Guillermo Santamaría por abrirme las puertas de sus centros de investigación y poder fortalecer mis conocimientos.

“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber”.

Albert Einstein
Premio Nobel de Física

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE GENERAL	3
RESUMEN	6
Capítulo I	9
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 Planteamiento del problema	10
1.2 Hipótesis	10
1.3 Objetivos.....	10
1.3.1 Objetivo general.....	10
1.3.2 Objetivos particulares	11
1.4 Descripción metodológica	12
1.5 Justificación	14
1.6 Alcances y limitaciones	15
1.6.1 Alcances.....	15
1.6.2 Limitaciones	15
1.7 Estructura del documento	16
Capítulo II.....	19
2. MARCO TEÓRICO	19
2.2 TSP	20
2.3 Planificación de la Misión de Evacuación	23
2.4 Metaheurísticas	23
2.5 Algoritmo de colonia de hormigas (ACO)	26
2.6 Algoritmos Culturales Basados en Programación Evolutiva.....	31
2.7 Algoritmo A*	33
2.8 Modelo OCEAN	35
2.8.1 Tecnología de Unity 3D.....	37
2.8.2 Entorno de Unity 3D.....	37
2.8.3 Objetos en Unity 3D	38
2.8.4 Tecnología integrada MonoDevelop en Unity 3D.....	40
2.9 Autómatas Celulares en la propagación de incendios	40
2.9.1 Modelo básico.....	41
2.9.2 Modelo Karafyllidis–Thanailakis	44
2.9.3 Modelo Hernández Encinas et. al	44
2.10 Estado del Arte	45
Capítulo III.....	53

3. DISEÑO DE LA SOLUCIÓN	53
3.1. Módulo de entradas.....	53
3.2. Módulo de sectorización.....	53
3.3. Módulo de procesos estocásticos.....	54
3.3.1 Punto de ignición.....	54
3.3.2 Distribución de agentes.....	55
3.4. Módulo del modelo inteligente de rutas de evacuación y población heterogénea	56
3.4.1 Fases del modelo inteligente.....	56
3.5 CA (Cellular Automata, por sus siglas en inglés) en propagación de incendios para interiores	61
3.5.1 Matriz de resistencia	61
3.5.2 Matriz de paso de tiempo a combustión	61
3.5.3 Matriz de incineración	62
3.5.4 Función de transición.....	62
3.5.5 Función de dimensión.....	63
3.6 Ψ^*	64
3.6.1 Búsqueda en Anchura	66
Capítulo IV	69
4. DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y EXPERIMENTOS.....	69
4.1. Experimentos de comparativa entre metaheurísticas.....	69
4.2. Validación de modelo Ψ^*	72
4.2.1 Primera fase	72
4.2.2 Segunda fase	75
4.3. Experimentos de comparativas entre el algoritmo propuesto y A^*	93
Capítulo V.....	95
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	95
5.1 Comparativa entre metaheurísticas y heurísticas.....	95
Evidencia de pruebas de hipótesis	96
5.2 Comparativa entre algoritmos en tiempos de evacuación	96
5.3 Comparativa entre A^* y Ψ^*	97
CONCLUSIONES	99
TRABAJOS FUTUROS	100
REFERENCIAS	103
APÉNDICE A	108
Distancia en función de cantidad de agentes	111
Heridos en función de la cantidad de agentes.....	114
Fallecidos en función de la cantidad de agentes.....	117
Tiempo en función de tasa de incendio	120

Distancia en función de tasa de incendio.....	122
Heridos en función de tasa de incendio	125
Fallecidos en función de tasa de incendio	127
Tiempo en función de tasa del algoritmo	129
Distancia en función de tasa del algoritmo.....	132
Heridos en función de tasa del algoritmo	135
Fallecidos en función de tasa del algoritmo	137

RESUMEN

La presente investigación es enfocada a la simulación de un incendio dentro de diferentes tipos de estructuras de edificios, cada uno con alturas mayores a tres pisos. Para llevar a cabo dicha simulación, es necesario modelar mediante un sistema multi-agentes heterogéneo la evacuación segura de las personas encontradas en los edificios. Dichas rutas de evacuación son calculadas mediante la propuesta de un algoritmo que derive del mejor entre el algoritmo de optimización de colonia de hormigas o conocido como (*ACO* por sus siglas en inglés), algoritmos culturales basados en programación evolutiva o conocido como (*CAEP* por sus siglas en inglés), los cuales son metaheurísticas encargadas de resolver problemas de tipo *NP-Duro* o *NP-Complejo*, y así poder emitir un resultado factible o en ocasiones incluso emitir el resultado óptimo en un tiempo polinomial. Así como también las rutas de evacuación son calculadas mediante el algoritmo *A** (A estrella), el cual es una modificación del algoritmo de Dijkstra para encontrar rutas con base a un menor costo de trayectoria.

ACO y *CAEP* son algoritmos enfocados a la implementación de un grafo completo en la problemática del agente viajero o conocido como (*TSP*, por sus siglas en inglés), por lo que fue necesario adaptarlo a un modelo de grafo no completo derivado del problema del múltiple agente viajero o (*mTSP* por sus siglas en inglés), debido a que las trayectorias de los agentes no pueden ser lineales, ya que, estarían expuestos a colisiones con las paredes de los edificios. Con lo anteriormente expuesto, se define una problemática que satisfaga las condiciones necesarias para llevar a cabo la investigación y es denominada como la planeación de la misión de evacuación o (*EMP - Evacuation Mission Planning* por sus siglas en inglés).

La heterogeneidad de los agentes se puede manifestar bajo diferentes factores. En esta investigación se ocupa el modelo *OCEAN*, el cual parte de factores de personalidades diferentes en las multitudes e incluso se pretende incorporar un modelo que integre los factores heterogéneos de personalidades en la población junto con factores de emociones en grandes densidades de simulación de multitudes.

Posteriormente, los algoritmos de optimización son puestos a prueba mediante una serie de experimentos, los cuales involucran un escenario en el que se encuentran obstáculos, un solo piso, diferentes densidades de población y un sistema multi-agentes y para terminar, los experimentos anteriores son analizados y mediante una técnica estadística denominada *ANOVA* de una vía, se verifica la similitud del comportamiento de las variables independientes para posteriormente concluir si se cumple o no la hipótesis.

De los resultados más relevantes podemos resaltar que, A* siempre arroja la ruta óptima de evacuación y que dicho algoritmo fue modificado para simular rutas que pierdan la optimalidad pero que se aproximen a posibles rutas que tomaría una persona con determinado tipo de personalidad. De las cuales, se plantean inicialmente 10 diferentes tipos de personalidades y en base a un test de percepciones aplicado a participantes en internet, podemos deducir que se redujeron las posibles simulaciones de personalidades a cuatro solamente, debido a las relaciones que hallaron los participantes entre dichas definiciones y rutas similares arrojadas por el sistema.

Palabras Claves: Incendios, Obstáculo, Modelo OCEAN, Sistema Multi-Agentes, ACO, CAEP, A*, TSP, mTSP, EMP, Metaheurísticas, Heurísticas, ANOVA.

Capítulo I. Introducción.

La optimización en el tema de logística es un área de la inteligencia artificial de gran importancia en las ciencias de la computación. La optimización está inmersa en muchos campos de aplicación. Abordando una aplicación referente a logística de evacuación, es necesario contar con una herramienta que permita visualizar posibles comportamientos como medio de predicción debido a una serie de factores involucrados.

Capítulo I

1. INTRODUCCIÓN

El enfoque de esta investigación está encaminado a realizar una contribución de aplicación en el *Problema del Agente Viajero o Travelling Salesman Problem (TSP)* por sus siglas en inglés) para casos de evacuación, partiendo de un tiempo promedio de evacuación y analizar cómo son afectados dichos tiempos con una multitud heterogénea, estudiando los diferentes tipos de casos de comportamiento de las multitudes con base a los escenarios presentados. El problema del agente viajero se resuelve con una comparación entre las metaheurísticas de colonia de hormigas y algoritmos culturales y la heurística de A^* .

El desarrollo de la investigación tiene como base diversos factores de obstáculos, pisos, áreas con mayor influencia de propagación de incendio, según el edificio donde estén ubicados los agentes, así como la construcción del modelo 3D de cada edificio.

El *Problema del Agente Viajero (TSP)* es un problema de optimización combinatoria estudiado en el siglo XVIII por el matemático irlandés Sir William Rowan Hamilton y por el matemático británico Thomas Penyngton Kirkman. La discusión detallada del trabajo de Hamilton y Kirkman se puede encontrar en el libro titulado *Teoría de Grafos (Biggs, 1976)*. Se cree que la forma general del TSP fue primeramente estudiado por Kalr Menger en Viena y Harvard. El problema fue posteriormente contribuido por Hassler Whitney y Merrill en Princeton (**Hassler, 1934**).

Una descripción detallada acerca de la conexión entre Menger y Whitney y el desarrollo del *TSP*, se puede encontrar en (**Yesodha, 2015**).

El *Problema del Agente Viajero Múltiple (mTSP)* es un tipo especial más complejo que el *TSP* general, ya que son n agentes viajeros y m ciudades a recorrer. Las restricciones referentes a la optimización son:

- Cada agente viajero regresa al punto inicial de partida al final del recorrido.
- Cada agente tiene un grupo de ciudades por donde debe viajar.
- Cada ciudad es visitada exactamente por un agente, excepto la primera ciudad.

Del *mTSP* se desprende una variable conocida como *Mission Planning*, donde existen n robots y m metas u objetivos, los cuales deben ser visitados por algunos robots en el menor tiempo posible, y una ciudad base donde deben regresar eventualmente todos los robots (**Brummi, 1996**).

En esta investigación se propone utilizar el *Mission Planning* (**Belkas, 2006**), con una variación donde la diferencia es que, en vez de ser robots autónomos, son personas (con fines de simulación), destacando que ya no se regresaría a la ciudad base, sino que permanecen en el objetivo final o punto de reunión. A esta variación se le denominará *Evacuation Mission Planning* (*EMP*).

1.1 Planteamiento del problema

Considerando la creciente cantidad de edificios altos que están apareciendo o existen en las ciudades modernas, y las amenazas a las que están sujetos: incendios, sismos, amenazas terroristas, entre otros, se desea conocer cómo se puede simular de la mejor manera la evacuación de edificios altos en casos de incendio, tomando en cuenta las posibles reacciones que pueden llegar a tener las multitudes en dicho siniestro, con base a sus factores de personalidad y estado emocional.

1.2 Hipótesis

H1. Con un sistema de simulación y un algoritmo de optimización basado en A^* , es posible predecir el tiempo de evacuación y distancia de recorrido de los agentes en función de su personalidad en incendios de edificios de una planta.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema simulador de evacuaciones, contemplando diversas metaheurísticas para la correcta toma de decisiones, y la selección de la mejor opción para utilizar un modelo de comportamiento en la búsqueda de una ruta de evacuación adecuada.

1.3.2 Objetivos particulares

- Construir el modelo 3D de los edificios de forma rectangular, hemiciclos y espiral.
- Diseñar los escenarios de grafo dentro de los edificios para ocupar los algoritmos de optimización.
- Establecer los límites en el espacio donde pueda existir el sistema multiagentes y la ignición del incendio.
- Establecer el *NavMesh* (navegación para los agentes en el escenario) donde los agentes puedan transitar en el espacio.
- Determinar las áreas en donde son los puntos de reunión u objetivos a alcanzar por cada uno de los agentes.
- Instanciar agentes heterogéneos con base a sus factores de personalidad y estado emocional.
- Adaptar los algoritmos: colonia de hormigas, culturales y A^* a la implementación del grafo en el mundo virtual para determinar las rutas de evacuación de cada uno de los agentes.
- Diseñar una alteración al algoritmo A^* , de tal modo que la personalidad influya en la toma de decisiones
- Realizar las simulaciones necesarias del programa Evacuation Mission Planning (*EMP*, por sus siglas en inglés) y todas las variables correspondientes.
- Analizar los resultados de la simulación.

1.4 Descripción metodológica

La metodología que se realizó para el desarrollo de la investigación puede observarse en la Figura 1.1 y es la siguiente:

1. *Planteamiento del problema:*

Una vez que es detectada alguna problemática en nuestro entorno, se prosigue a documentarlo y describir lo que se desea abordar, lo que se piensa pudiera suceder después de experimentar, así como también su justificación.

2. *Revisión de la literatura:*

En el momento que se presenta un problema, se prosigue a investigar trabajos relacionados a problemáticas similares y poder identificar aquellos que se adapten a la investigación planteada.

3. *Selección de herramientas para el desarrollo del tema de investigación e implementación de las técnicas:*

El siguiente paso en la metodología, es ubicar las herramientas para poder llevar a cabo el proyecto o investigación. La presente investigación se encuentra enfocada al desarrollo de software, por lo que es necesario seleccionar editores de texto, para la implementación del código fuente, selección de software para crear los escenarios 3D, entre otros.

4. *Selección del mejor algoritmo:*

Una vez implementadas las técnicas revisadas en la literatura, bajo ciertas condiciones en el mundo virtual, se prosigue a poner a los algoritmos a competir y así determinar cuál de ellos tiene mejor rendimiento. Posteriormente, el mejor es seleccionado para elaborar una variación de dicho algoritmo y puedan representarse las multitudes heterogéneas.

5. *Propuesta de Ψ^* (algoritmo propuesto para evacuaciones en función de las personalidades):*

El presente módulo metodológico va orientado a la propuesta del algoritmo que involucre la toma de decisiones para encontrar un camino de evacuación tomando en cuenta los

factores de personalidad de cada agente. El símbolo Ψ (*psi*) proviene de la relación que tiene con la ciencia que estudia los procesos mentales, las sensaciones, las percepciones y el comportamiento del ser humano, en relación con el medio ambiente físico y social que lo rodea (Psicología).

6. *Diseño del simulador:*

En el presente módulo se diseña el mundo virtual donde el sistema multiagentes será desplegado y serán ejecutadas las simulaciones.

7. *Aplicación del instrumento:*

Una vez propuesto Ψ^* se prosigue a aplicar un instrumento de percepción y así poder tener información relevante por parte de participantes referente a la toma de decisiones del algoritmo con base a los factores de personalidad.

8. *Análisis correlacional de Pearson:*

En el presente módulo de acuerdo con el instrumento aplicado en el módulo previo, se calcula el factor correlacional de Pearson entre la respuesta de percepción por parte de los participantes con respecto al valor real de personalidad que ocupa el algoritmo en dicha simulación.

9. *Validación del modelo:*

En el momento que se haya calculado el factor correlacional de Pearson, se determina si el valor resultante representa una relación relevante entre las percepciones con la realidad de la ejecución. En caso de no ser así, se regresa al módulo de diseño del simulador (paso 6).

10. *Análisis de resultados:*

Una vez que el sistema genera las salidas para cada uno de los agentes, se analizan los resultados para poder determinar ciertos comportamientos de la distribución muestral.

11. *Conclusiones y trabajos futuros:*

En la formulación de conclusiones se toman en cuenta los análisis de resultados y a partir de ellos, se puede determinar si la hipótesis planteada se cumple o no, así como también el

resaltar datos relevantes para concluir y detallar posibles trabajos futuros de la investigación.



Figura 1.1. Diagrama metodológico de la investigación (Fuente propia).

1.5 Justificación

Las empresas son el núcleo del sector económico de un país, desde pequeñas y medianas, hasta las grandes compañías nacionales y transnacionales, que impactan directamente en la generación de

empleos y en el poder adquisitivo de la población. Un sector importante de estas empresas en un país es el sector constructor.

Con base en lo anterior, a medida que una empresa va creciendo, existen más focos de atención por parte de instituciones públicas, protección civil, entre otros, que demandan el mejoramiento de las condiciones de seguridad de las obras realizadas.

Por tal motivo, se considera importante contar con un software que simule los espacios de los diseños de edificios a construir, en casos de incendio bajo instancias estocásticas, tanto del punto de ignición, como de la ubicación de las personas en el interior de la infraestructura y tener una aproximación del comportamiento real de las personas en este tipo de siniestros y poder contemplar una mejor estructura en el momento de diseño de la construcción.

1.6 Alcances y limitaciones

A continuación, se detallan los alcances y las limitaciones de la presente investigación.

1.6.1 Alcances

- La implementación del código fuente del sistema es implementado en C# en el motor de juegos Unity 3D.
- El sistema sólo será funcional para los edificios diseñados en el proyecto, debido a que es el entorno encontrado en el escenario de simulación.
- Los algoritmos de optimización sólo tienen la función de generar las rutas para los puntos de reunión.
- La heterogeneidad del comportamiento de los agentes solamente abarca hasta los factores de personalidad y emocionales.

1.6.2 Limitaciones

La simulación tiene como limitante la aparición tanto de los agentes como el punto de ignición, en los modelos 3D de los edificios diseñados.

Al momento de modelar una persona herida durante el incendio, sólo se tomará en cuenta el caso de que exista un contacto físico entre las flamas del incendio y un agente. Casos de personas heridas por humo, estampidas humanas, entre otros, no se modelarán en esta investigación.

Otra limitante de la investigación será la simulación bajo instancias de la multitud, debido a que el simulador se desarrolló de manera estocástica. Así como también la limitante de no tener un guía de evacuación, el cual tiene la función de evacuar de la manera correcta a cierto grupo de agentes en determinada área.

1.7 Estructura del documento

La investigación está dividida en cinco capítulos: El primer capítulo muestra el planteamiento del problema, la hipótesis, los objetivos generales y particulares; la descripción metodológica, la justificación de la investigación y la descripción de sus alcances y limitaciones.

El capítulo 2 se sumerge al marco teórico donde se introduce al tema del modelo *OCEAN*; posteriormente se realiza la descripción del *TSP* y las variantes según sus características, indicando la propuesta que será ocupada para propósitos de evacuación; igualmente se presenta una breve reseña de las metaheurísticas más utilizadas para la resolución de este problema, posteriormente la selección de la *Metaheurística de Colonia de Hormigas (ACO)* por sus siglas en inglés), Algoritmos culturales basados de programación evolutiva (*CAEP* por sus siglas en inglés) y *A**, y la explicación de su funcionamiento. Luego vienen detalles de la tecnología ocupada para el desarrollo del proyecto, Posteriormente viene la descripción de los autómatas celulares en la simulación de incendios, y concluyendo con el estado del arte.

El capítulo 3 trata de la metodología en extenso de solución a la problemática, abarcando y caracterizando los módulos de entradas, sectorización de áreas, procesos estocásticos, la propuesta del modelo Ψ^* para toma de decisiones en multitudes heterogéneas, el módulo del modelo inteligente de rutas de evacuación, la propuesto de un modelo de propagación de incendios para interiores, y por último, el diseño de un autómata que represente los cambios de estado emocionales en función del tiempo y el entorno dinámico.

El capítulo 4 se realiza el diseño de experimentos a ocupar y contiene los experimentos de ejecución, los cuales se encuentran conformados por ejecuciones clasificadas por grupos y cantidades de agentes en la escena.

En el capítulo 5 se analizan los resultados obtenidos y los datos de tiempo y distancias de evacuación, de forma estadística. Así como también, el análisis del comportamiento de los agentes según las características poblacionales.

En la sección de las conclusiones, se muestran los resultados y se verifica si se cumplen las hipótesis, así como también se mencionan los trabajos futuros.

En la sección de anexos existen un conjunto de figuras relacionadas al simulador, las cuales son referenciadas en espacios relevantes a lo largo del presente documento.

Capítulo II. Marco Teórico.

El capítulo dos muestra trabajos previamente realizados en problemáticas y técnicas algorítmicas similares, para posteriormente planificar una estrategia de adaptación a la problemática presente en esta investigación.

Capítulo II

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección, se abordarán los temas ocupados en el proyecto, tales como *TSP*, Metaheurísticas, *ACO*, *CAEP*, *A**, autómatas celulares, el modelo *OCEAN*, Unity 3D, MonoDevelop, al final se incluye el estado del arte. En la Figura 2.1 se puede visualizar la clasificación de los módulos por los cuales el sistema realiza su procesamiento y que es retomada dicha figura en el capítulo tres. En la Figura 2.1.1 se puede visualizar la manera en que se dividen las dos principales problemáticas de la presente investigación.



Figura 2.1. Módulos de en el sistema. (Fuente propia).



Figura 2.1.1. División de la problemática tratada en la investigación. (Fuente propia).

2.2 TSP

El *Problema del Agente Viajero* o *Travel Salesman Problem* (*TSP*, por sus siglas en inglés) es uno de los temas de optimización combinatoria más estudiados; el *TSP* plantea un vendedor que tiene que encontrar la ruta óptima para recorrer varios clientes una sola vez (sin repetir alguno) y regresar al mismo punto de partida, minimizando el costo de la distancia del recorrido efectuado.

El planteamiento del *TSP* es aparentemente sencillo, pero se torna complejo al momento de realizar la búsqueda de todas las combinaciones posibles, esto dado por el factorial del número de ciudades a recorrer (*NP* o problema no resuelto en un tiempo polinomial).

El problema es *NP-duro*, y la versión del problema de decisión (“dado el costo y un número x , decidir cuál es la ruta de viaje más barata que x ”) es *NP-completo* (Garey y Jhonson, 1979).

En el momento del cálculo entre un nodo y otro para determinar la heurística que se ocupe dentro de un *TSP*, existen varios métodos para calcularlo y en esta investigación es ocupada la distancia entre dos puntos o distancia Euclidiana, la cual obtiene las coordenadas de ambos puntos y es aplicada la ecuación 1 para determinar la distancia.

$$D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (1)$$

2.2.1 Clasificación de TSP

En general, el *TSP* es clasificado como *TSP* simétrico (*sTSP*), *TSP* asimétrico (*aTSP*), y *TSP* múltiple agente viajero (*mTSP*) (Yesodha, 2015). Esta sección contiene información respecto a las clasificaciones del *TSP* mencionadas.

sTSP: Definiendo $V = \{ v_1, \dots, v_n \}$ como el conjunto de ciudades, $A = \{ (r, s) : r, s \in V \}$ el conjunto de aristas, y $d_{rs} = d_{sr}$ sea el costo asociado a una arista $(r, s) \in A$.

EL *sTSP* es el problema de encontrar la menor distancia del recorrido, pasando una sola vez por cada ciudad. En este caso, las ciudades se les conoce su heurística de sus coordenadas x e y , y d_{rs} es la distancia euclidiana entre r y s , y así tener un *TSP* euclidiano.

aTSP: Si $d_{rs} \neq d_{sr}$ para al menos una arista (r, s) , entonces el *TSP* se convierte en un *aTSP*.

mTSP: Es definido como se detalla a continuación: Teniendo un grupo de nodos, existen m viajeros localizados en un nodo depósito. Los nodos restantes que no se han visitado, son nodos intermediarios.

Posteriormente, el *mTSP* consiste en encontrar recorridos para los m agentes viajeros, los cuales todos parten y culminan en el mismo nodo, de modo tal que cada nodo intermediario es visitado estrictamente una sola vez y el costo total de haber visitado todos los nodos, es minimizado. Las métricas del coste pueden estar basadas en distancia, tiempo, entre otras.

Del *mTSP* surgen algunas variaciones como las siguientes (**Belkas, 2006**):

- *Uno contra múltiples depósitos*. En el que contiene un solo depósito, todos los agentes viajeros terminan sus recorridos en el mismo nodo, mientras que en la problemática en que se encuentran múltiples depósitos el agente viajero puede retornar a su depósito inicial como punto de partida, o puede retornar a cualquier otro depósito siempre y cuando se mantenga el número inicial de agentes viajeros en cada depósito.
- *Número de agentes viajeros*. El número de agentes viajeros puede ser modificado o ser una variable limitada.
- *Costo*. Cuando el número de agentes viajeros no es fijo, entonces cada viajero generalmente incurre en un costo fijo asociado cada vez que se utiliza el agente viajero. En este caso, la minimización de los requisitos del viajero también se convierte en un objetivo.
- *Ventanas de Tiempo*. En esta variación, los nodos deberán ser visitados en un periodo de tiempo particular, esta problemática se le puede conocer bajo el nombre de *mTSPTW* (*TW*,

por sus siglas en inglés, que hacen referencia a ventana de tiempo). La aplicación de *mTSPTW* se puede apreciar a gran escala en los problemas de programación de aeronaves.

- *Otras restricciones.* Las restricciones pueden ser el número de nodos que cada agente viajero pueda visitar, así como la distancia máxima o mínima que un agente viajero pueda recorrer, o cualquier otra restricción.

El *mTSP* es generalmente tratado como problema de ruteo vehicular (*VRP*, por sus siglas en inglés), donde no existan restricciones de capacidad. Por consiguiente, las metodologías que se puedan ocupar para resolver un *VRP* tradicional, también se pueden ocupar en un *mTSP*. No obstante, cuando existe solamente un agente viajero, el *mTSP* se reduce a un *TSP* (**Belkas, 2006**).

La problemática de la presente investigación requiere de muchos agentes simulando a una multitud de personas en un edificio. Por lo anterior, se ocupa el *mTSP*.

A partir de las aplicaciones en las que se pueda ocupar el *mTSP* y su relación con otros problemas, la definición de la problemática que más se asemeja a esta investigación, es una denominada como el problema de planificador de misiones o como originariamente se escribe en inglés: *Mission Planning Problem*.

El *Mission Planning Problem* consiste en determinar un camino óptimo para cada soldado (o planificador) para concretar los objetivos de la misión en el menor tiempo posible. El *Mission Planner* ocupa una variación del *mTSP* donde existen n planificadores, m metas los cuales deben ser visitados por algunos planificadores, y una ciudad o nodo base en la que eventualmente todos los planificadores deben de regresar (**Belkas, 2006**).

La aplicación de *mTSP* en *Mission Planning* es reportado por (Brummi, 1996), (**Brummi, 1998**) y (**Yu et. al, 2002**). De manera similar, en la planificación de rutas o recorridos de aeronaves no tripuladas, investigado en (**Bailey et. al, 1998**), también puede ser modelado como *mTSP*.

Sin embargo, debido a que todavía *Mission Planning* no es la definición de un problema de acuerdo con el planteamiento de problemática de esta investigación, se realizó una búsqueda de problemas relacionados de *mTSP* con evacuaciones y no se pudo apreciar un resultado en la

literatura. Por lo cual, además de analizar los resultados de simulación en escenarios de incendio en edificios con multitudes heterogéneas, se va a realizar un aporte a la literatura en cuanto a la definición de una nueva variante de *mTSP* o variante de *Mission Planning Problem*, denominado Planificación de la Misión de Evacuación o *Evacuation Mission Planning (EMP)*, por sus siglas en inglés).

2.3 Planificación de la Misión de Evacuación

La planificación de la misión de evacuación o *EMP* (por sus siglas en inglés), es una variante de *mTSP*, la cual es propuesta en la presente investigación y su definición es la siguiente:

La variante es conformada de m agentes (con fines de simulación), $V = \{ v_1, \dots, v_n \}$ como el conjunto de nodos por donde puede transitar el agente para poder evacuar, $X = \{ x_1, \dots, x_n \} / X \subset V$ como el conjunto de nodos que representan los puntos de reunión, $A = \{ (r, s) : r, s \in V \}$ el conjunto de aristas, y $d_{rs} = d_{sr}$ sea el costo asociado a una arista $(r, s) \in A$, y sus restricciones se definen de la siguiente manera:

- Existen m agentes que pueden partir del nodo más cercano a cada uno de ellos en el espacio, donde han sido instanciados de manera estocástica.
- Existirán x nodos destinos o puntos de reunión a los cuales los agentes deberán de llegar.
- Cada agente deberá dirigirse a su nodo X más cercano, siempre y cuando la trayectoria para llegar a él sea segura (no exista propagación de incendio).
- Si la propagación del incendio llega a alcanzar a tocar un nodo $\subseteq V$, ese nodo es eliminado durante la simulación y no podrá ser tomado en cuenta para el cálculo de la ruta de evacuación de cualquier agente.
- No existirán rutas predeterminadas. El cálculo del *tour o ruta* de evacuación para cada agente será calculado en la instancia de tiempo en donde inicia la evacuación.

El grafo del espacio de búsqueda no es un grafo completo.

2.4 Metaheurísticas

En el transcurso de la historia han surgido diferentes tipos de problemas a los humanos. Es por ello por lo que se ensamblaron las computadoras como herramientas para agilizar procesos, como

por ejemplo contar cantidades numéricas muy grandes en poco tiempo. Ejemplos como el expuesto son problemas que se pueden resolver en tiempos polinomiales. A medida que fue transcurriendo el tiempo fueron surgiendo problemas combinatorios en los cuales ya los algoritmos no pueden resolver el problema en un tiempo polinomial, creciendo su complejidad debido a la mayor cantidad de variables, identificados éstos como NP-Duros o NP-Complejos.

Posteriormente empezaron a tener auge las metaheurísticas, la palabra meta significa más allá y heurísticas, significa encontrar. Un algoritmo metaheurístico es aquel que simula procesos naturales o biológicos y tiende a conseguir resultados óptimos o aproximados al óptimo, en el espacio de búsqueda en un tiempo polinomial, abriendo puertas a su vez a la inteligencia artificial (Zavala et. al, 2014).

Las metaheurísticas más utilizadas para resolver el *mTSP* según (Yesodha, 2015) son: los algoritmos genéticos, recocido simulado, búsqueda tabú, búsqueda de vecindades, algoritmo de colonia de abejas, algoritmo de murciélago y el algoritmo de colonia de hormigas (*ACO*).

A continuación, se presenta la Tabla 1 donde muestran diferentes metaheurísticas ocupadas para problemas de *mTSP*.

Tabla 1. Metaheurísticas de aplicación para *mTSP* según (Zavala et. al, 2014)

Nombre	Particularidad
Recocido Simulado (Simulated Annealing)	Se basa en el proceso de la fabricación de productos de metal como el acero, el hierro, etc.
Búsqueda tabú (Tabu Search)	Se realiza como en el recocido simulado, pero con la particularidad de que el siguiente proceso se realizará hacia el mejor vecino de la solución Z_t .
Algoritmos genéticos (Genetic Algorithms, GA)	Son técnicas de búsqueda para resolver problemas basándose en procesos observados de la evolución natural.

Optimización por colonia de hormigas (Ant Colony Optimization Algorithm, ACO)

Se basa en la naturaleza, principalmente en la observación de las hormigas, en cómo estos insectos recolectan su comida a grandes distancias y regresan a su nido sin perderse en su trayectoria. Esto es debido al rastro de feromona que les indica el camino de regreso al hormiguero.

Además de las metaheurísticas que comúnmente se ocupan para resolver el problema de *mTSP*, existe otra diversidad de algoritmos metaheurísticos que se pueden aplicar para resolverlo, entre ellos *CAEP*.

Ventajas	Desventajas	Enfoque de Aplicación
<ul style="list-style-type: none"> •Paralelismo inherente en tiempo de ejecución •Retroalimentación positiva explica el descubrimiento rápido de soluciones factibles •Eficiente para el problema del agente viajero y problemas similares •Se puede usar en aplicaciones dinámicas (se adapta a cambios como nuevas distancias, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> •El análisis teórico es difícil •Secuencias de decisiones aleatorias (no independientes) •Cambios en la distribución de probabilidad por iteración •La investigación es experimental en lugar de teórica •El tiempo de convergencia es incierto (pero la convergencia está garantizada) 	<ul style="list-style-type: none"> •Técnica de Inteligencia Artificial utilizada para desarrollar un nuevo método de resolución de problemas insolubles desde hace muchos años •ACO es un enfoque metaheurístico propuesto recientemente para resolver problemas de optimización combinatoria dura •Las hormigas artificiales implementan una heurística de construcción aleatoria que toma decisiones probabilísticas

Figura 2.2. Análisis del comportamiento de *ACO* (Shekhawat et al., 2009)

Una vez analizado cada uno de los factores representados en la Figura 2.2 que involucran las ventajas, desventajas y enfoque de aplicación respecto a *ACO*, y retomando el trabajo realizado por Ondřej (2015), donde toma en consideración e implementa las metaheurísticas más utilizadas para el problema del agente viajero *TSP* explicadas en la Tabla 1, en la que define cierta cantidad de nodos en su escenario para realizar un total de 16000 ejecuciones dentro de sus experimentos y se toma en cuenta aquellos valores de mejor solución para cada cantidad de nodos, los cuales son

51, 76, 96, 130, 159, 198, 225 y 262 nodos. Una vez culminadas las experimentaciones, acude a una librería llamada TSPLIB, la cual contiene 112 instancias de *TSP* de diferentes fuentes y tipos, siendo cada una de estas instancias, valores óptimos, y realiza una diferencia entre su mejor resultado y el valor óptimo de la librería, el cual se puede apreciar el resultado en la Figura 2.3 (Ondřej, 2015).

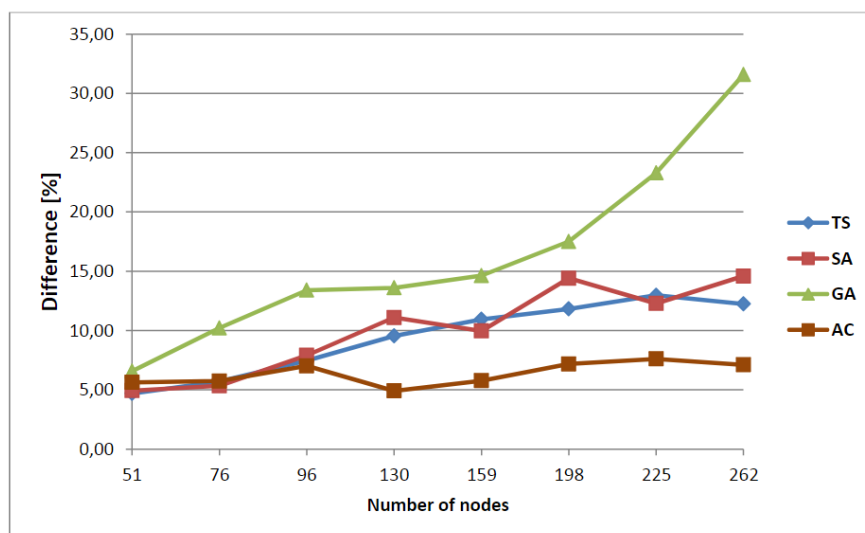


Figura 2.3. Diferencia entre mejor resultado y solución óptima, donde TS significa búsqueda tabú, SA significa recocido simulado, GA significa algoritmos genéticos y AC significa *ACO*

Fuente: (Míča, 2015)

En la Figura 2.3 se puede visualizar que la técnica de inteligencia artificial *ACO* aplicada al problema de *TSP*, mantiene un comportamiento estable ante las otras metaheurísticas en cuanto a la diferencia en porcentaje entre el promedio y la solución óptima, aunque la cantidad de nodos aumente en el escenario. Es por ello por lo que es seleccionada esta técnica como uno de los algoritmos que generan la cota inferior en tiempo de evacuación para la presente investigación. Los otros algoritmos tomados en cuenta son *CAEP* debido a que es un algoritmo relativamente nuevo en el área de las metaheurísticas (Kuo & Lin, 2013) y el algoritmo *A**.

2.5 Algoritmo de colonia de hormigas (ACO)

El algoritmo de colonia de hormigas surge en la investigación de Marco Dorigo en 1992, donde él busca imitar el comportamiento de las hormigas reales, las cuales son capaces de encontrar el

camino más corto hacia su fuente de alimento, con base en la estigmergia que utilizan para comunicarse entre ellas (**Dorigo & Stützle, 2004**). Siendo la estigmergia la colaboración a través del medio físico. En sistemas descentralizados, tales como las colonias de hormigas, los diferentes componentes colaboran a través de pautas o hitos dejados en el medio: feromonas, acumulación de objetos o cualquier otro tipo de cambio físico, como la temperatura.

Las hormigas construyen caminos invisibles con base en el depósito de feromona en el camino desde la colonia a la fuente de alimento y viceversa. Al momento en que una hormiga sigue el camino de feromona anteriormente dejado por otra, esta feromona se intensifica y hace que más hormigas sigan este camino y, por consiguiente, la feromona depositada en otros caminos se evapora y deja de utilizarse, como se muestra en la Figura 2.4:

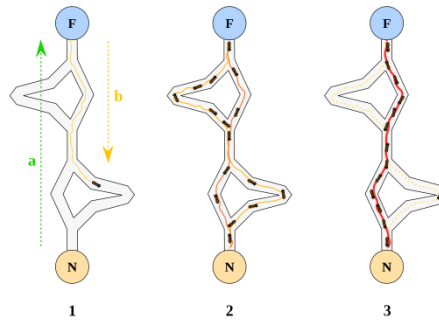


Figura 2.4. Representación gráfica de cómo la colonia de hormigas genera su ruta para el suministro alimenticio Fuente (**Dorigo & Stützle, 2004**).

ACO se visualiza por medio de un grafo en el que los nodos son los clientes que se deben visitar y los arcos son la distancia entre los clientes y el depósito. En el grafo se distribuyen un grupo de hormigas artificiales exploradoras, las cuales realizan el recorrido por los nodos y los arcos de manera estocástica, dejando por cada camino un rastro de feromona. Al terminar el recorrido, se calcula la magnitud o el costo del recorrido y se actualiza el porcentaje de feromona depositada a cada camino. Mientras más alto sea el porcentaje de feromona, mayor será la posibilidad que la hormiga artificial tome ese camino.

Para llegar a este proceso en un sistema simulado por software, es necesario trabajar con fórmulas probabilísticas de aumento y disminución de la reserva de feromonas en una matriz de datos que cambia sus valores durante la simulación, que se presenta a continuación.

2.5.1 Selección del siguiente nodo

La forma en que una hormiga selecciona el siguiente punto para alcanzar en su recorrido se basa en una ecuación probabilística. En la ecuación 2, se calcula la probabilidad de que una hormiga k alcance un punto j desde el punto i .

Es considerado que, si la hormiga k no ha inicializado su recorrido, tiene la misma probabilidad de alcanzar cada punto del grafo.

La cantidad de feromonas que existen entre los puntos i y j representa el ensayo artificial de feromonas, que es el nivel de atracción para visitar un nodo j desde i el cual está representado por ij (Dorigo y Stüttele, 2004).

$$P_{ij}^k = \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} \tau_{il}^\alpha \eta_{il}^\beta}, S_{ij} \in N_i^k \quad (2)$$

La ecuación gestiona un valor heurístico entre i y el nodo candidato j que está representado por η_{ij} , el cual es la visibilidad de la hormiga y su valor es inversamente proporcional a la distancia entre los dos nodos, y se calcula como $\eta_{ij} = 1 / d_{ij}$. Por otro lado τ_{ij} viene siendo el porcentaje de feromonas que existe en cada uno de los caminos.

Otros parámetros utilizados son α y β , el primero indica la importancia relativa de la prueba de feromonas y el segundo es la importancia relativa de la información heurística (distancia), teniendo α y β valores de $\alpha > 0$ y $\beta \geq 0$. Si α tiene valores más altos que β , significa que los puntos que tienen mayor cantidad de feromona concentrada serán seleccionados. Por otro lado, si β tiene valores más altos que α , significa que los nodos más cercanos serán seleccionados. N_i^k es un conjunto de nodos que la hormiga k aún no ha visitado y que actualmente se encuentra en el nodo i .

Este paso se repetirá hasta que cada hormiga haya viajado cada nodo del *tour*. Cuando se completa el recorrido, los siguientes dos pasos del algoritmo son la intensificación y evaporación de la feromona dependiendo de las circunstancias actuales.

2.5.2 Evaporación de feromonas

Una vez que una hormiga ha visitado todo el grafo, el siguiente paso es el proceso de evaporación. Eso consiste en evaporar la feromona concentrada en todos aquellos arcos del grafo que no son apropiados de acuerdo a la distancia entre un nodo y otro en cada una de las iteraciones, de esta manera, en la siguiente iteración las hormigas tienen cada vez menos probabilidad de transitar por caminos no deseados. Este proceso también emula cómo las hormigas reales dejan de usar caminos no deseados durante su búsqueda de alimento.

En la ecuación **3** aparece el parámetro ρ (rho), conocido como tasa de evaporación y su función es evitar la acumulación ilimitada de feromonas. Por lo tanto, ayuda a las hormigas a no tomar un camino inadecuado que tiene un mal resultado anteriormente; este valor debe estar entre cero y uno. Después de la evaporación de las feromonas, el siguiente paso es intensificar la feromona en esas vías apropiadas.

$$\tau_{ij} = (1 - \rho) * \tau_{ij}, \forall (i, j) \in L, 0 < \rho < 1 \quad (3)$$

Como resultado, este proceso también disminuye el ensayo de feromonas en un camino en aquellas rutas donde hay menos tráfico de hormigas. La fórmula utilizada para evaporar la feromona de un camino se muestra en la ecuación **3**.

2.5.3 Actualización de feromonas

Una vez disminuido el valor de la feromona en las rutas no utilizadas por las hormigas, el siguiente paso es aumentar el valor de la feromona en aquellas rutas donde las hormigas generaron buenos resultados. De esta manera, aumenta la probabilidad de preferir esos caminos por otras hormigas. También simula cómo las hormigas de la vida real segregan su feromona durante su búsqueda de alimento. Como resultado, las hormigas preferirán este camino intensificado de

feromonas y aumentarán el ensayo de feromonas. Esta actualización de feromonas se implementa mediante la ecuación 4.

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k, \forall (i, j) \in L \quad (4)$$

En la ecuación 5, se calcula el incremento de feromona aplicado en los bordes utilizados por las hormigas y su valor se define como sigue: L_k es la longitud del recorrido T_k construido por la hormiga k . Se calcula como la suma de la longitud de los bordes que pertenece al recorrido T_k . Esto significa que el incremento de feromonas es proporcional a la longitud de recorrido de la hormiga. Mientras la duración de la excursión aumenta, la feromona no aumentará como un buen resultado. $\lim_{L \rightarrow +\infty} \frac{1}{L} = 0$; Pero en caso de que la longitud de recorrido sea menor, la densidad de feromonas encontradas en los arcos del recorrido aumentará.

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{1}{L^k}, & \text{Si } (i, j) \in T^k \\ 0, & \text{Si no} \end{cases} \quad (5)$$

En la Tabla 2, se muestran los posibles valores que pueden tener los parámetros α , β y ρ .

Tabla 2. Rango de valores posibles en los parámetros de ACO

<i>Parámetro</i>	<i>Intervalo</i>
α	$\alpha \in (0, \infty)$
β	$\beta \in [0, \infty)$
ρ	$\rho \in [0, 1]$

Al finalizar el recorrido de todas las hormigas por el grafo, se repiten los pasos anteriores, pero con las ventajas de tener una información actualizada de la matriz de resultados de feromonas, hasta que el ciclo ACO principal alcance el número total de iteraciones definidas. Un ejemplo de cómo las hormigas van construyendo las rutas al pasar la cantidad de iteraciones, puede ser visualizado en la Figura 2.5.

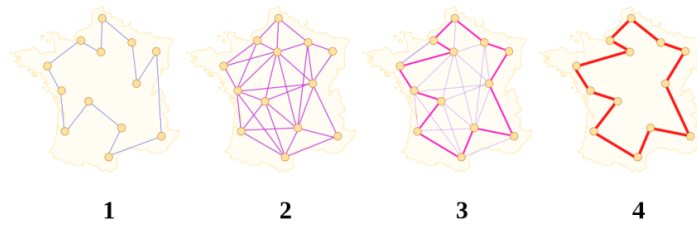


Figura 2.5. Procesamiento de selección de ruta óptima mediante ACO. Fuente (Johann Dréo, 2006).

2.6 Algoritmos Culturales Basados en Programación Evolutiva

Los algoritmos culturales es una metodología propuesta por (Reynolds, 1994) y basada en la computación evolutiva, es considerada dentro de las metaheurísticas y puede arrojar un resultado factible en un tiempo razonable de ejecución. Los algoritmos culturales se encuentran divididos en dos espacios diferentes y ambos espacios se encuentran en comunicación mediante ciertos protocolos; las iteraciones totales del algoritmo se denominan épocas.

El primer espacio es denominado el espacio de la población, dicho espacio se encuentra conformado por un conjunto de individuos, los cuales forman parte de la población en una época determinada.

El segundo espacio es denominado espacio de creencias, donde las generaciones en cada época van actualizando información relevante en dicho espacio y se genera una cultura a través del tiempo, la cual sirve como referencia del pasado e influye en futuros individuos de otras épocas a través de los protocolos de comunicación.

El espacio de creencias que ocupa esta investigación son los cinco diferentes tipos de conocimiento, los cuales son los siguientes (Reynolds, 1994):

- **Conocimiento situacional:** Este conocimiento es donde se almacena la mejor solución encontrada por un individuo a lo largo del tiempo en cada piso.
- **Conocimiento normativo:** Este conocimiento en esta investigación lo ocupamos como de que cada individuo debe ser una solución factible.

- **Conocimiento de dominio:** En la presente investigación se propone que, a partir del conocimiento situacional, este pueda influir en la población mediante cierto protocolo. La forma en la que influye es obtener un patrón de solución similar a la información encontrada en la mejor solución hallada a través del tiempo. Este conocimiento se explica más fondo en el diseño de la solución.
- **Conocimiento espacial o topográfico:** El conocimiento espacial viene dado por el piso en el que se encuentra la mejor solución de determinado piso.
- **Conocimiento histórico:** El conocimiento histórico se ocupa en el presente trabajo de forma implícita en el conocimiento situacional, debido a que estamos guardando información histórica dentro de las épocas.

Los protocolos de comunicación entre ambos espacios son los siguientes:

- **Aceptación:** Procedimiento que se ocupa para determinar cuáles individuos de la población serán aceptados para entrar en el espacio de creencias, tomando en cuenta que se respete las restricciones de cada uno de los conocimientos.
- **Influenciar:** Procedimiento que tiene la función de seleccionar ciertos individuos en la población, y que éstos puedan obtener ciertas características similares a la que se encuentra en el conocimiento situacional.

Además de los protocolos de comunicación, también existen ciertas funciones para ambos espacios. En el espacio de población, se encuentran las siguientes funciones:

- **Generar:** Procedimiento que tiene la función de generar nuevos individuos en la población a través de cierta metodología, la cual en esta investigación se ocupa ACO. Obteniendo así, un algoritmo híbrido para encontrar soluciones factibles.
- **Seleccionar:** Este procedimiento es el que se ocupa para seleccionar los individuos que se utilizan en el protocolo de comunicación *Aceptación*.
- **Objetivo:** Este procedimiento tiene la función de ordenar los individuos con base a su mejor solución.

Por otro lado, el espacio de creencias tiene el siguiente procedimiento:

- **Actualizar:** Este procedimiento se ocupa para actualizar la información del espacio de creencias, siempre y cuando exista un individuo en la población con una mejor solución de lo que cultura considera, y respetando las restricciones de los demás conocimientos.

Ambos espacios, protocolos de comunicación y procedimientos, pueden observarse en la Figura 2.6.

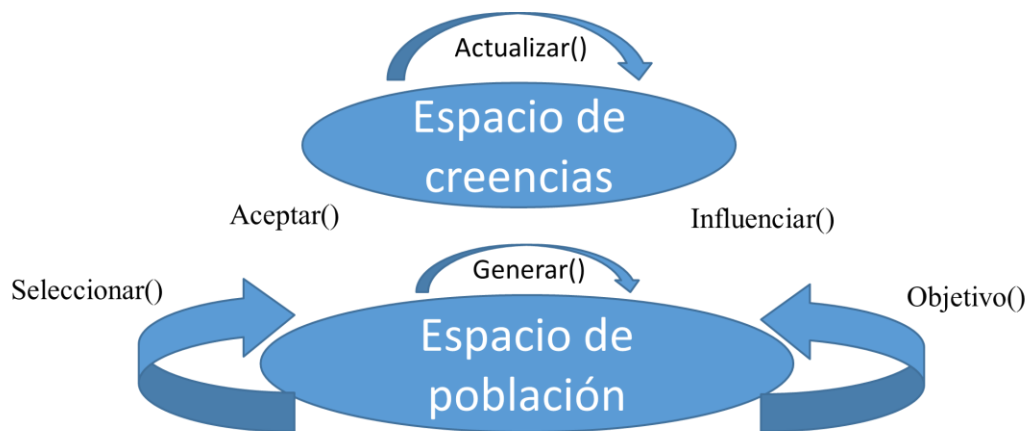


Figura 2.6. Diagrama de funcionamiento de un algoritmo cultural. (Fuente propia) basado en (Reynolds, 1994)

2.7 Algoritmo A*

El algoritmo A estrella o A*, es una heurística que fue presentada por (Hart, 1968) y su función es encontrar el camino de menor coste desde un punto a otro en el espacio, donde el punto inicial y final se conocen, resolviendo así el problema del *camino más corto* o *shortest path problem* (por su denominación en inglés), el cual se encarga de examinar en cómo identificar el camino que cumpla con ciertos criterios como que sea el camino corto, el menos costoso, el más rápido, etc. entre dos puntos en un grafo muy grande. A* es un algoritmo completo, es decir, en caso de existir una solución, siempre dará con ella.

El algoritmo tiene el siguiente funcionamiento (Hart, 1968):

- Ocupando el nodo inicial como pivote, se asigna un valor dado por la ecuación 6 a cada uno de los nodos vecinos, denominados como nodos n .

$$f(n) = g(n) + h(n) \tag{6}$$

Donde $g(n)$ es el coste del camino hasta el nodo n , $h(n)$ es la heurística del nodo, es decir, la estimación del coste del camino entre el nodo n hasta el nodo final, y $f(n)$ es la estimación del coste total de una solución óptima que pasa por el nodo n .

- Una vez teniendo los valores mencionados en el punto anterior, se selecciona el nodo n con $f(n)$ de menor coste.
- Los puntos anteriores se repiten hasta llegar al nodo final.

La complejidad computacional de A^* en esta investigación es n de ejecución lineal, debido a que tenemos una buena heurística $h(n)$, para que esto se cumpla se debe cumplir la restricción de la ecuación 7. En caso de no haber sido así, la complejidad sería exponencial. En el presente trabajo la heurística ocupada es la distancia euclidiana.

$$h(x) \leq g(y) - g(x) + h(y) \tag{7}$$

Las grandes compañías que ofrecen servicios de transportación prefieren ocupar A^* en vez de otros algoritmos, siempre y cuando lo único que importe para encontrar el camino sean las distancias. En la Figura 2.7 se puede apreciar el cálculo del algoritmo partiendo de la celda 0 hasta llegar a la celda 19, siendo ésta el punto final. De esta manera, se encontró la ruta más corta entre el nodo inicial y el final.

7	6	5	6	7	8	9	10	11		19	20	21	22
6	5	4	5	6	7	8	9	10		18	19	20	21
5	4	3	4	5	6	7	8	9		17	18	19	20
4	3	2	3	4	5	6	7	8		16	17	18	19
3	2	1	2	3	4	5	6	7		15	16	17	18
2	1	0	1	2	3	4	5	6		14	15	16	17
3	2	1	2	3	4	5	6	7		13	14	15	16
4	3	2	3	4	5	6	7	8		12	13	14	15
5	4	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
6	5	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Figura 2.7. Algoritmo A^* encontrando el camino más corto entre dos nodos. Fuente (Propia).

2.8 Modelo OCEAN

La personalidad se considera un patrón grupal de rasgos de comportamiento, temperamentales, emocionales y mentales para una persona. Hoy en día, todavía existe una gran controversia en la investigación de la personalidad sobre la cantidad de rasgos de la personalidad que existen, pero el modelo de Cinco Factores u *OCEAN* es popular; Es uno de los modelos que hemos elegido para este estudio (Pelechano et. al, 2008). El modelo *OCEAN*, tiene cinco dimensiones ortogonales del espacio de la personalidad, éstos son: apertura, conciencia, extroversión, amabilidad, y neuroticismo o estabilidad emocional, estas dimensiones se pueden apreciar en la Figura 2.8.

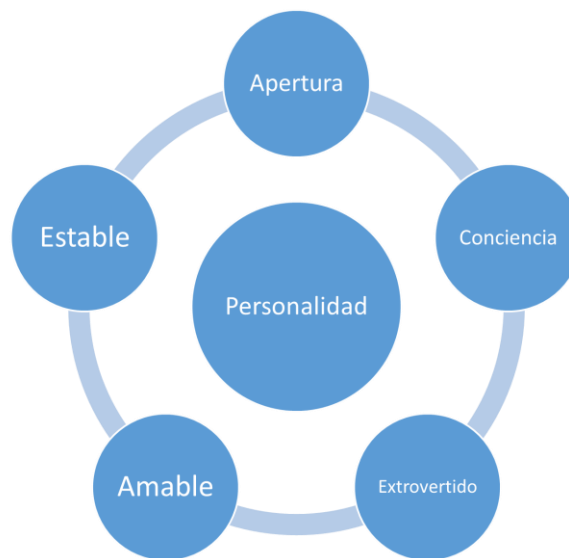


Figure 2.8. Modelo *OCEAN*. Fuente (Goldberg, 1990).

La apertura describe una dimensión de la personalidad que retrata el aspecto imaginativo y creativo del carácter humano. La conciencia determina cuánto se organiza y cuida un individuo. La extroversión está relacionada con lo extrovertida y sociable que es una persona. La amabilidad es la amistad, la generosidad y la tendencia a llevarse bien con otras personas. Finalmente, el neuroticismo se refiere a la inestabilidad emocional y la tendencia a experimentar emociones negativas. Cada factor es bipolar (valores positivos y negativos) y está compuesto de varios rasgos, que son esencialmente los adjetivos que se utilizan para describir a las personas (Smith, 1996). Algunos de los adjetivos relevantes que describen cada uno de los factores de personalidad para cada polo se muestran en la Tabla 3. Hemos asignado estos términos de rasgos al conjunto de comportamientos que contiene un sistema de simulación de multitudes existente, High Density

Autonomous Crowd (*HiDAC*, por sus siglas en inglés), o su significado en español: Multitudes Autónomas de Alta Densidad, propuesto por (**Pelechano et. al, 2008**).

HiDAC modela las diferencias individuales asignando a cada individuo diferentes características psicológicas como impaciencia, pánico, comportamientos de liderazgo y características fisiológicas como nivel de energía, velocidad, etc. (**Pelechano et. al, 2008**) combinaron los comportamientos en los diferentes factores de personalidad al sistema *HiDAC*. Nuestra investigación pretende instanciar agentes heterogéneos al igual que en *HiDAC* pero en vez de que sea a partir de movimiento local o local movement (*LM*, por sus siglas en inglés), sea a partir de la toma de decisiones al momento de elegir un ruta de evacuación, agregándole un factor emocional que pueda variar dinámicamente en tiempo de ejecución la velocidad de cada agente, de acuerdo con el estado actual del entorno. En la Tabla 3 podemos observar cómo cada sigla del modelo *OCEAN* se puede interpretar mediante adjetivos en sus estados bipolares.

Tabla 3. Adjetivos descriptivos de los factores de personalidad para cada dimensión en su estado bipolar (**Pelechano et. al, 2008**).

Factor OCEAN	Adjetivos
O+	Curioso, alerta, informado, perceptivo
O-	Simple, limitado, ignorante
C+	Persistente, ordenado, predecible, dependiente, puntual
C-	Desordenado, despreocupado, rudo, cambiante
E+	Social, activo, asertivo, dominante, energético
E-	Distante, antisocial, adormecido, sin vigor, tímido
A+	Cooperativo, tolerante, paciente, amable
A-	Autoritario, negativo, contrario, obstinado, duro
N+	Muy sensible, temeroso, dependiente, sumiso, desconfiado
N-	Calmado, independiente, confiado

2.8.1 Tecnología de Unity 3D

Unity 3D es una plataforma en la cual se puede desarrollar utilizando los lenguajes de programación C# o Javascript, la cual se encuentra orientada al desarrollo de videojuegos, simulaciones, aplicaciones móviles, entre otros, debido a su capacidad de compilar para múltiples plataformas (Yeeply, 2016).

Es considerada una de las plataformas más utilizadas para el desarrollo de videojuegos, debido a su capacidad multiplataforma, integración de módulos en cada actualización permitiendo así expandir las capacidades de desarrollo cada vez más. Entre ellas se puede destacar la integración de multi jugadores, la renderización de mayor cantidad de tipos de archivo para ser compatible con modelos 3D, mejores efectos visuales de partículas, incorporación de módulos para desarrollo en 2D, entre otros (Yeeply, 2016). Un ejemplo de un escenario en el editor de Unity 3D puede ser visualizado en la Figura 2.9.

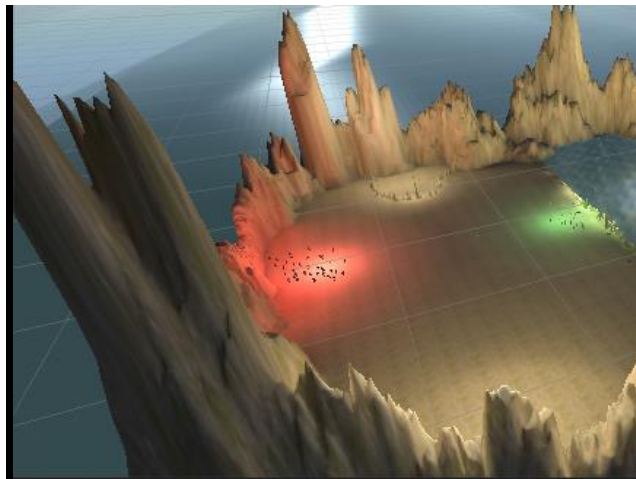


Figura 2.9. Visualización de la interfaz gráfica del editor Unity 3d (Fuente propia).

2.8.2 Entorno de Unity 3D

El editor de Unity 3D se divide esencialmente en cinco vistas principales (Yeeply, 2016):

- **Explorador.** Ventana donde se muestra cualquier tipo de archivo que contiene el proyecto dentro de la carpeta Assets.

- **Inspector.** Lista de todos los componentes agregados a un objeto seleccionado desde el editor.
- **Jerarquía.** Lista jerárquica de los elementos de tu escena.
- **Escena.** Escenario donde se visualizan todos los objetos arrastrados desde el explorador hacia la escena o a la jerarquía, o simplemente que el objeto haya sido creado desde el menú de Unity.
- **Juego.** Visualización del juego o simulación en distintas resoluciones, dependiendo de la plataforma en que el usuario se encuentre programando.

2.8.3 Objetos en Unity 3D

Un videojuego en Unity se basa en *GameObjects* (objetos), que siempre tienen una característica en común y además facilitan el desarrollo permitiendo crear *Prefabs*, que son objetos predefinidos con componentes, y es posible añadir dichos componentes las veces necesarias.

A los *GameObjects* se les puede añadir todo tipo de Componentes (efectos, audio, físicas, *render*, *scripts*, *UI*, etc.) y es con lo que compone los niveles del juego.

Algunos de los componentes que se pueden añadir a un *GameObject*, son los siguientes:

- **Sprite Renderer:** convierte un objeto en un *sprite 2D*.
- **Animator:** permite a un objeto tener distintos estados de animación.
- **Physics:** permite a un objeto colisionar con otros.
- **RigidBody:** permite a un *GameObject* interactuar con las físicas del juego.
- **Camera:** convierte un objeto en una cámara.
- **Particle System:** convierte un objeto en generador de partículas.
- **Script:** permite añadir funcionalidades y comportamientos a los objetos.

Un *GameObject* posee un atributo llamado *Transform*, el cual indica la posición, rotación y tamaño del objeto en las tres dimensiones (*X*, *Y*, *Z*), al trabajar en dos dimensiones, solo se hace

caso a X e Y . En el editor de Unity 3D se puede hacer uso de dicho atributo mediante la interfaz gráfica representada en la Figura 2.10.

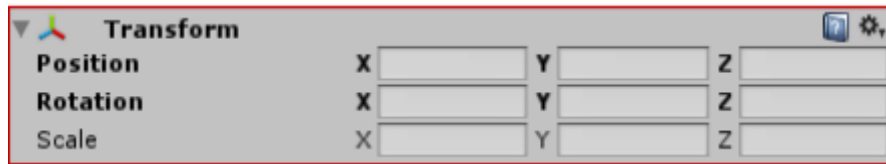


Figura 2.10. Representación de vectores 3D ocupados por un *gameObject* en Unity.

Los *scripts* implementados son aquellos que dan la funcionalidad o comportamientos a los objetos, y al funcionamiento del videojuego, a través de los componentes añadidos al *GameObject*. En la Figura 2.11 se muestra una serie de componentes que pueden ser añadidos a un *GameObject* para tener una función en específico.

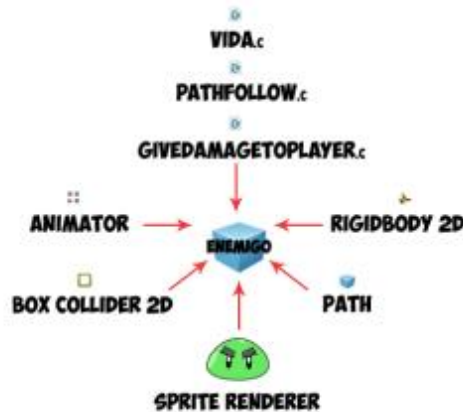


Figura 2.11. Ejemplo de diferentes componentes que puede adquirir un *GameObject*. (Yeeply, 2016)

En cada script debe programarse el código que realice la función requerida. Los scripts en Unity deben proceder de la clase *MonoBehaviour*, que es la clase principal de Unity, disponiendo de distintas funciones que siguen un ciclo de vida tales como, *Awake* el cual se ejecuta al inicializar el script, *Start*, se ejecuta una sola vez al activarse el script o *Update*, que es ejecutado una vez cada *frame*.

2.8.4 Tecnología integrada MonoDevelop en Unity 3D

Mono es un editor de textos, el cual se encuentra vinculado con Unity para la compilación de un proyecto determinado. Mono es una alternativa abierta de la plataforma de desarrollo .NET de Microsoft. Es un editor de textos gratuito y diseñado principalmente para el desarrollo en C#.

Características:

- Es multiplataforma.
- Soporta múltiples lenguajes.
- Posee un debugger (depurador) integrado que sirve para Mono y para aplicaciones nativas.
- Diseñador visual que permite crear aplicaciones GTK.
- La licencia es OpenSource. MonoDevelop Core está licenciado bajo la LGPLv2, aunque gran parte del código y los addins están registrados bajo la licencia MIT / X11.

2.9 Autómatas Celulares en la propagación de incendios

En la física se busca la comprensión de la complejidad observada fenomenológicamente en la naturaleza usando un conjunto mínimo de principios simples. Debido a este programa (reduccionista), la física estuvo concentrada históricamente en el estudio de sistemas relativamente simples (**Karafyllidis & Thanailakis, 1997**).

En términos muy generales, los autómatas celulares (CA, por sus siglas en inglés) son, básicamente, las representaciones matemáticas (es decir, modelos) más simples de una clase, mucho más amplia, de sistemas complejos (sistemas dinámicos que consisten en más que pocas partes que interactúan, en general, de manera no-lineal). Entre algunos ejemplos tenemos: fluidos, tráfico vehicular, propagación de incendios, redes de neuronas, sistemas moleculares, ecosistemas naturales, redes militares de control y mando, y sistemas económicos y sociales, entre muchos otros (**Song et. al, 2014**).

A sugerencia de Stanislaw Ulam, los autómatas celulares fueron introducidos por John Von Neumann a principios de la década de los años 1950 como modelos matemáticos simples para estudiar fenómenos de autoorganización y auto reproducción. Los autómatas celulares, en contraste con los modelos del continuo, proporcionan un enfoque alternativo que involucra coordenadas, tiempo, y variables estado que son discretos. El mayor atractivo de los autómatas

celulares es que, a pesar de su simplicidad conceptual, lo cual hace fácil su implementación computacional, así como su análisis matemático detallado, ellos son capaces de desarrollar una variedad de comportamiento complejo asombroso (**Hernández et. al, 2007**).

Numerosos sistemas físicos y de otros sistemas que contienen muchos elementos discretos que interactúan localmente pueden modelarse con autómatas celulares. Digamos: spines (Ising), propagación de incendios, flujo de fluidos, crecimiento de cristales, sistemas químicos no lineales, aspectos biológicos, económicos y sociales, y mucho más (**Song, et. al, 2014**).

No existe una definición matemática formal y aceptada de un CA; sin embargo, un CA puede describirse como una tupla, que es un conjunto ordenado de objetos caracterizados por los siguientes componentes:

- Una cuadrícula de enteros (conjunto Z) infinitamente extendida, y con dimensión $d \in Z^+$. Cada celda de la cuadrícula se conoce como celda.
- Cada celda puede tomar un valor en Z de un conjunto finito de estados k .
- Cada celda, además, se caracteriza por su proximidad, un conjunto finito de celdas en la vecindad de esta. En consecuencia, se aplica una función de transición (f) a todas las celdas de la cuadrícula que toma como argumentos los valores de la celda en cuestión y los valores de sus vecinos y devuelve el nuevo valor que tendrá la celda en la próxima etapa del tiempo. Esta función (f) se aplica, como ya se dijo, de manera homogénea a todas las celdas, para cada paso de tiempo discreto.

En la presente investigación se ocupan los CA en la propagación de incendios. Para ello, ya existen varios modelos en la literatura, los cuales son:

2.9.1 Modelo básico

Los CA se encuentran conformados por características como matrices, celdas, estados, una función de transición, la cual puede ser definida como $A = (C, S, V, f)$, donde C es el espacio celular formado por una matriz cuadrada correspondiente a la matriz de celdas, S corresponde a los estados de C y el estado de una celda en el tiempo t es denotado como $a_{ij}^{(t)}$, V corresponde a un

grupo de celdas que pertenecen al espacio celular y específicamente para cada celda existe un subconjunto de V denominado V_m^{adj} los cuales son los vecinos adyacentes y V_m^{diag} , el cual corresponde a los vecinos diagonales de la celda, y f es la función de transición la cual tiene como objetivo calcular el estado para cada celda en cada paso discreto en el tiempo. La vecindad de las celdas pueden visualizarse en la Figura 2.12.

$$V_{ij} = \{ \langle i + \alpha_1, j + \beta_1 \rangle, \dots, \langle i + \alpha_m, j + \beta_m \rangle : (\alpha_k, \beta_k) \in V \}.$$

Donde, $\alpha = \{-1, 0, 1\} \wedge \beta = \{-1, 0, 1\}$

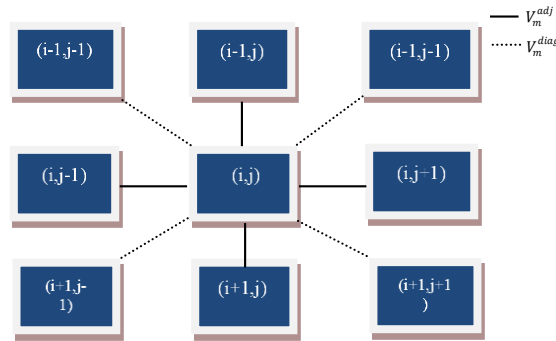


Figura 2.12. V_m vecindario para la celda $\langle i, j \rangle$. Fuente (Hernández et. al, 2007)

El modelo básico para la propagación del fuego basado en los autómatas celulares bidimensionales con vecindarios de Moore extendidos, condiciones de límite nulas y un conjunto de estados infinito se describen a continuación. Un área forestal se puede interpretar como el espacio celular de un 2D-CA simplemente dividiéndolo en una matriz bidimensional de áreas cuadradas idénticas de longitud lateral L . Luego, cada una de estas áreas corresponde a una celda del CA. El estado de una celda $\langle i, j \rangle$ en un momento t , se define en la ecuación 8:

$$a_{ij}^{(t)} = \frac{\text{área quemada de } \langle i, j \rangle}{\text{área total de } \langle i, j \rangle} \quad (8)$$

Por consiguiente, $0 \leq a_{ij}^{(t)} \leq 1$. Si $a_{ij}^{(t)} = 0$, entonces la celda $\langle i, j \rangle$ se dice que no ha sido quemada en el tiempo t ; si $0 < a_{ij}^{(t)} < 1$, entonces la celda $\langle i, j \rangle$ es llamada quemada parcialmente en el tiempo t ; y finalmente, si $a_{ij}^{(t)} = 1$, la celda se dice que se encuentra completamente quemada en el tiempo t .

El CA usado en este modelo es lineal, es decir, dinámicamente supone que el estado de la celda $\langle i, j \rangle$ en el tiempo $t + 1$ depende linealmente de los estados de las celdas vecinas en el tiempo t , como puede verse en la ecuación 9.

$$a_{ij}^{(t+1)} = g \left(\sum_{(\alpha, \beta) \in V_m} \mu_{\alpha\beta} a_i^{(t)} + \alpha, j + \beta \right), \quad (9)$$

Donde $g : [0, \infty) \rightarrow Z_k$, debido a que $S = Z_k$,

Donde $\mu_{\alpha\beta} \in R^+$ son parámetros que involucran magnitudes físicas de las celdas: Como cada celda del CA $\langle i, j \rangle$ representa una pequeña área cuadrada del bosque, se encuentra dotada de los siguientes tres parámetros: el coeficiente de propagación de incendio (R_{ij}), la velocidad del viento (W_{ij}) y la altura del terreno (H_{ij}).

El coeficiente de propagación de incendio de $\langle i, j \rangle$, determina el tiempo necesario para que la celda pueda ser completamente quemada. Es importante tomar en cuenta que si es dado el caso que la celda $\langle i, j \rangle$ es un área no combustible, entonces $R_{ij} = 0$ y $a_{ij}^{(t)} = 0$ para cada tiempo t .

La importancia de este parámetro recae en la configuración del tamaño de paso del tiempo t . Suponiendo que el bosque sea homogéneo, es decir, el valor del coeficiente de propagación de incendio es el mismo para todas las celdas: $R_{ij} = R, 0 \leq i \leq r - 1, 0 \leq j \leq s - 1$.

Entonces, es sencillo revisar si todas las celdas vecinas de $\langle i, j \rangle$ se encuentran sin quemarse en el tiempo t excepto una sola celda del vecindario, entonces el tiempo necesario para que la celda $\langle i, j \rangle$ se quemara por completo es L/R .

En el caso de que todas las celdas vecinas de $\langle i, j \rangle$ se encuentren sin quemarse, excepto una celda vecina diagonal, el tiempo necesario para quemarse por completo es de $\sqrt{2L}/R$.

De ese modo, el paso de tiempo se calcula como $\tau = L/R$. Por consecuente, si todas las celdas vecinas de $\langle i, j \rangle$ no se encuentran quemadas en el tiempo t excepto una celda vecina adyacente, la cual se encuentre quemada por completo, entonces en el tiempo $t + 1$ la celda $\langle i, j \rangle$ se quema por

completo: $a_{ij}^{(t+1)} = 1$. Por otro lado, si fuera el mismo caso, pero con un vecino diagonal, entonces $a_{ij}^{(t+1)} = \lambda < 1$. Otros factores considerados son el viento y la altura del terreno, los cuales afectan directamente $\mu_{\alpha\beta}$.

2.9.2 Modelo Karafyllidis–Thanailakis

La investigación de (Karafyllidis & Thanailakis, 1997) es basada en el modelo básico, ellos determinaron un valor λ para la propagación diagonal del incendio con un cálculo tomando como referencia que cada paso de tiempo $\tau = L/R$, el área quemada de la celda $\langle i, j \rangle$ viene dado por $L^2 - [(\sqrt{2} - 1)L]^2$. Por lo que, si en el tiempo t todos los vecinos de la celda $\langle i, j \rangle$ no se han quemado excepto una celda diagonal, como por ejemplo $\langle i - 1, j - 1 \rangle$, entonces:

$$a_{ij}^{(t+1)} = \frac{L^2 - [(\sqrt{2} - 1)L]^2}{L^2} = 1 - (\sqrt{2} - 1)^2 \approx 0.83 = \lambda$$

Por lo tanto, el modelo propuesto se puede observar en la ecuación 10:

$$a_{ij}^{(t+1)} = a_{ij}^{(t)} + \sum_{(\alpha,\beta) \in V_m^{adj}} \mu_{\alpha\beta} a_i^{(t)} + \alpha, j + \beta + 0.83 \sum_{(\alpha,\beta) \in V_m^{diag}} \mu_{\alpha\beta} a_i^{(t)} + \alpha, j + \beta \quad (10)$$

Donde todos los parámetros fueron definidos previamente y el modelo fue modificado en la sección de calcular el siguiente estado para cada celda.

2.9.3 Modelo Hernández Encinas et. al

La investigación de (Hernández et. al, 2007) es basada en el modelo de Karafyllidis-Thanailakis, donde determinan un valor de λ más aproximado a un escenario real de propagación de incendio en direcciones diagonales. Lo más novedoso de este modelo es que la propagación del incendio en direcciones diagonales se realiza de manera circular.

Por lo tanto, después de cada paso en el tiempo, el área quemada de la celda $\langle i, j \rangle$ es $\pi L^2/4$. Es decir, si todos los vecinos de la celda $\langle i, j \rangle$ se encuentran sin quemarse en el tiempo t , excepto un vecino diagonal, por ejemplo $\langle i - 1, j - 1 \rangle$, el cual se encuentre completamente quemado $a_{i-1j-1}^{(t)} = 1$, entonces:

$$a_{ij}^{(t+1)} = \lambda = \frac{\pi L^2}{4L^2} = \frac{\pi}{4} \approx 0.785$$

Por consiguiente, la función de transición en bosques homogéneos viene dada por la ecuación 11:

$$a_{ij}^{(t+1)} = a_{ij}^{(t)} + \sum_{(\alpha,\beta) \in V_m^{adj}} \mu_{\alpha\beta} a_i^{(t)} + \alpha, j + \beta + 0.785 \sum_{(\alpha,\beta) \in V_m^{diag}} \mu_{\alpha\beta} a_i^{(t)} + \alpha, j + \beta \quad (11)$$

Por consiguiente, si la función de transición funciona para bosques homogéneos, también funciona en áreas controladas como edificios, donde cada área de cada piso es homogénea, debido a que ya no se están considerando las variables de la pendiente del terreno ni velocidades ni direcciones del viento.

Es importante mencionar que en todo el trabajo previo encontrado en la literatura la función g que tiene la función de dimensionar el valor arrojado por la función de transición, funciona con una condición de que, si el resultado es mayor a cierto valor, retorna el valor de uno y cero en el caso contrario.

2.10 Estado del Arte

La investigación de **Pelechano (2005)** ocupa *MACES* (su software de doctorado) el cual se encarga desde un alto nivel que los agentes encuentren un camino no conocido en el escenario, comunicación entre los agentes para encontrar un camino en común y la inclusión de ciertos roles para tener individualismo en la multitud y un framework *PMFserv* el cual incluye modelos de comportamientos disfuncionales durante un siniestro, agrupamientos y el comportamiento de seguir como ovejas. El framework resultante da un paso a la elaboración de un sistema de simulación validado en el comportamiento humano a través de factores psicológicos.

El trabajo de **Pelechano (2006)** implementa el sistema *HiDAC*, donde incorpora comportamientos para grandes volúmenes de agentes en escenarios dinámicos y lo agrega a *MACES*. Puede ser sintonizado para simular comportamiento de escenarios de siniestros como la evacuación de edificio debido a un incendio, como para escenarios tranquilos como evacúan los agentes de una sala de cine; estos con multitudes heterogéneas. A diferencia de modelos como un autómata o

fuerzas sociales (**Helbing y Molnár, 1995**), si se trata de escenarios hostiles en *HiDAC* no siempre los agentes van a estar empujándose entre sí para evacuar, también puede haber agentes que ceden el paso, dependiendo de su comportamiento en la simulación. Su trabajo futuro es incorporar escenarios reales al simulador y mejorar la visualización de los agentes.

Posteriormente **Pelechano (2007)** empieza a realizar experimentos con diferentes usuarios ocupando el simulador *HiDAC* y concluyen que debido a que, para sintonizar el simulador, se debe saber conocimiento de programación a bajo nivel, por lo que es necesario implementar una interfaz que ayude a sintonizar estos valores en alto nivel.

La investigación de **Pelechano (2011)** incorpora el modelo psicológico *OCEAN* o big five, donde se ocupan factores de personalidad en las multitudes y mapearlos a su sistema *HiDAC*. Además, la sintonización de *HiDAC* ya se logra iniciar desde una interfaz de alto nivel a través del modelo *OCEAN*. Sus experimentos se basaron en encuestas de lo que los usuarios esperaban visualizar antes de que iniciara el simulador con respecto a lo que pudieron observar. Además, se redujo la sintonización de los 13 tipos de comportamiento a los cinco factores de *OCEAN*. Como trabajo futuro se plantea incorporar modelos de contagio emocional a las multitudes.

Stephen Guy et. al (2011) decidieron hacer un factor de análisis de las variables más significativas de una muestra de personas a las que fueron sometidas a un cuestionario referente a factores de personalidad basados en lo que observaban en video de simulación, esto les dio la pauta para determinar seis variables más significativas, siendo éstas: Agresivo, asertivo, tímido, activo, tenso, e impulsivo. Las variables mencionadas en vez de ser mapeadas directamente a variable de bajo nivel utilizadas (Velocidad preferida, radio efectivo (a cuánta distancia permanece un agente de los demás), número máximo de vecinos afectando el comportamiento local de un agente, la máxima distancia en que afectan los vecinos a un agente, el horizonte de planeación (a cuánta distancia puede planear el agente), decidieron mapear esos adjetivos al modelo *PEN* de tres factores, debido a que en la literatura se define que las variables detectadas en su factor de análisis pueden ser utilizadas dentro del modelo *PEN*. Posteriormente, realizaron una regresión lineal para poder relacionar dichos adjetivos y entradas de simulación con comportamientos. Los resultados fueron validados mediante cuestionarios aplicados a un grupo de personas donde indicaban lo que esperaban visualizar en la simulación debido a los parámetros iniciales que se estaban colocando.

Wang en (2012) ocupa un modelo de esparcimiento de pánico en las evacuaciones y guías para evacuar, por lo que, si no existe un guía de evacuación, el pánico tiende a esparcirse más rápido. Y a pesar de que tienen buenos resultados cualitativos, desean obtener resultados cuantitativos comparándose con otras investigaciones.

Almeida (2013) muestra la importancia de video juegos o incluso algo más serio como simulación de evacuaciones realizando una investigación de los modelos más ocupados en simulaciones. El determina que el sistema multiagente es el más aproximado a un evento real ocupando un modelo *BDI* el cual incluye sensores, fuerzas sociales e interacción con otros agentes y como trabajo futuro tiene expandir el modelo y validarlo con una metodología propuesta.

Tan (2015) realiza una investigación en la cual hay un simulador que incorpora movimiento a través de celdas para los agentes y humo. En esta investigación se determina que mientras los agentes conozcan mejor el escenario, mejor comportamiento tendrán al momento de evacuar.

Prakasam & Savarimuthu en (2016) publicaron un artículo titulado “Metaheuristic algorithms and probabilistic behaviour: a comprehensive analysis of Ant Colony Optimization and its variants”, donde realizan un análisis del comportamiento de las diferentes variantes de *ACO* en problemas como *mTSP*, y pudieron observar que las implementaciones estocásticas muestran una mejor resistencia a cambios en los parámetros, y manteniendo una solución cercana al óptimo global.

Singh (2016) publica en la revista “International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)”, titulada como “A Review on Algorithms Used to Solve Multiple Travelling Salesman Problem”, donde se evaluaron las diferentes variantes de *mTSP* y los diferentes algoritmos metaheurísticos que funcionan para resolver la problemática, dándole como buenos, los resultados de la solución ocupando algoritmos genéticos y recocido simulado. Sin embargo, Ambarbir recomienda que, si se desean obtener mejores resultados, sugiere ocupar *ACO*.

Clauß, et. al en (2016) publican una investigación titulada “A Population Based ACO Algorithm for the Combined Tours TSP Problem”, donde ocuparon un *ACO* basado en una población (*PACO*, por sus siglas en inglés), para resolver una nueva problemática de *mTSP*, llamada *mTSP* con *tours* combinados (*CT-mTSP*), buscando tener dos *tours* cíclicos; a través de su

experimentación, pudieron observar que el encontrar el segundo *tour* depende mucho del primero localizado, y concluir que *ACO* también pudo resolver de manera óptima esta nueva problemática.

Asimismo, se pudo reflejar el desempeño de *ACO* en los resultados de la investigación realizada por **Bharathi y Vijayalakshmi en (2016)** titulada como “A Framework for the Design and Analysis of an Evolutionary Algorithm for Multi Travelling Salesman Problem”, donde lo ocuparon para resolver la problemática de *mTSP* y la problemática multi objetivo, con el propósito de obtener una solución óptima basada en un algoritmo bio-inspirado, en un grafo completo.

Mocholi et. al en (2016) desarrollaron "eCoology", una aplicación de entretenimiento educativo para niños en la que se toman en cuenta los aspectos emocionales y sociales para mejorar el flujo o la experiencia óptima. Particularmente, investigaron la introducción de agentes emocionales que reaccionan y se mueven dentro del entorno de realidad virtual según su estado emocional y así proponen un modelo para agentes emocionales y un mecanismo de búsqueda de ruta con backtracking que permita explorar diferentes alternativas de movimiento. De esta manera, los agentes pueden exhibir un número complejo de comportamientos de movimiento emocional dentro del mundo virtual. Los agentes en eCoology se comportan emocionalmente para mostrar felicidad cuando se alcanzan estados saludables, o para expresar diferentes formas de comportamiento agresivo e infelicidad cuando los animales detectan situaciones relacionadas con estados no saludables pasados (recuerdo emocional). Este comportamiento emocional no solo se expresa en términos de reacciones de corta duración, sino que incluso afecta el movimiento de las entidades dentro del mundo virtual. Como resultado, los agentes con sentimientos emocionales sobre otros agentes, ya sean artificiales o reales, modifican sus trayectorias de movimiento en consecuencia para estar cerca de buenos amigos y se alejan de los enemigos o entidades que podrían dañar la salud del agente.

Ramadhani et. al en (2017) publicaron un artículo con título “An Ant Colony Optimization algorithm for solving the fixed destination multi-depot multiple traveling salesman problem with non-random parameters”, donde su investigación hace referencia a un *mTSP* resuelto con *ACO*, pero ellos propusieron no solamente que su algoritmo iba a trabajar en función de las diferentes ciudades como depósitos por donde pasan los viajeros, sino que además agregaron tres parámetros no aleatorios al *mTSP*: m, K, L , los cuales representan el número de viajeros, la cantidad mínima de ciudades que puede visitar un viajero y la cantidad máxima de ciudades que puede ser visitada por

éste. Ellos en el momento de visualizar los resultados de su diseño de experimentos, observaron que su parámetro más crítico era el número de viajeros en la instancia del problema dado, ya que afecta la solución.

Wong (2017) combina el sistema multiagente para evacuaciones con un A^* para encontrar la ruta más corta para evacuar. Su trabajo futuro pretende obtener retroalimentación de videos reales de evacuación y enfocarse también más en modelos psicológicos de comportamientos.

Dixit et. al en (2019) publican una investigación titulada como “CA-DE: Hybrid Algorithm Based on Cultural Algorithm and DE”, discuten sobre la evolución diferencial (*DE*, por sus siglas en inglés) y el algoritmo cultural (*CA*), ellos agruparon las características de ambos algoritmos y proponen un nuevo algoritmo evolutivo. Esta unión monitorea la compleja amalgama de colaboración de dos algoritmos evolutivos, donde ambos se llevan a cabo de manera análoga. El nuevo procedimiento denominado *CA-DE* logra un habitante inclusivo que se agrupa de forma simultánea entre ambos algoritmos metaheurísticos. El aspecto de la acción de aprobación reciclada en el espacio de credencial es actualizar la información de los mejores individuos con la información actual. Esta colaboración colectiva surge entre ambos algoritmos y se presenta para reparar la importancia de las resoluciones, por delante del rendimiento individual de ambos algoritmos. Aplicaron el algoritmo recientemente propuesto en un conjunto de seis problemas de optimización de referencia estándar para evaluar el rendimiento. Los resultados comparativos presentados demuestran que *CA-DE* tiene un logro alentador y conductas ampliables al tiempo que se compara con nuevos algoritmos avanzados contemporáneos. Esto da pauta a la presente investigación de hibridar el algoritmo cultural y ver sus posibles resultados.

Altay y Alatas en (2019) publican una investigación titulada como “Performance Comparisons of Socially Inspired Metaheuristic Algorithms on Unconstrained Global Optimization”, presentan las comparaciones de rendimiento de los algoritmos de optimización social, es decir, el algoritmo de optimización de lluvia de ideas, el algoritmo cultural, el algoritmo duelista, el algoritmo competitivo imperialista y la optimización basada en el aprendizaje de la enseñanza. Los algoritmos se han demostrado por primera vez en problemas de optimización global sin restricciones. Estos algoritmos son relativamente interesantes y populares, y muchas versiones de ellos parecen ser utilizados de manera eficiente en muchos problemas de búsqueda y optimización complejos diferentes. Al momento de poner dichos algoritmos a competir, observaron que sus

resultados en función de la media y desviación estándar no tenían una diferencia significativa y argumentan que son algoritmos prácticamente nuevos y pueden ser mejorados e incluso que puedan ser híbridos para un mejor desempeño de acuerdo con un determinado problema.

Basak (2018) se encargó de extraer información de videos reales y mapearlos a la investigación de la Dra. Pelechano y poder posteriormente hacer simulación basados en esos factores de personalidad. También tiene como trabajo futuro optimizar su sistema de tracking en los videos de entrada y ver cómo se pueden propagar emociones de dicho evento.

Yiu et. al en (2019) publican la investigación titulada como “Evolutionary Heuristic A* Search: Pathfinding Algorithm with Self-Designed and Optimized Heuristic Function”, determinan que el rendimiento y la eficiencia del algoritmo de búsqueda A* dependen en gran medida de la calidad de la función heurística y también de la conexión entre los nodos del grafo. El objetivo de su documento es reducir la dificultad del diseño de funciones heurísticas complejas para el algoritmo de búsqueda A* y que pueda optimizarse automáticamente para lograr una búsqueda rápida con alta precisión y bajo costo computacional. Presentan un método novedoso de diseño y optimización para una función de Heurística de múltiples ponderaciones (*MWH*) denominada Heuristic Evolutionary A* search (*EHA**) para: (1) minimizar el esfuerzo en el diseño de funciones heurísticas mediante algoritmo genético (*GA*), (2) optimiza el rendimiento de la búsqueda A* y sus variantes, incluyendo, pero no limitado a *WA** y *MHA**, y (3) garantiza la integridad y la optimización. El algoritmo *EHA** permite búsquedas de alto rendimiento y simplifica significativamente el procesamiento del diseño heurístico. Aplicaron *EHA** a varios puntos de referencia de búsqueda de rutas basados en cuadrícula para evaluar el rendimiento. El resultado de su experimento muestra que *EHA** (1) es capaz de elegir una función heurística precisa que proporciona una solución óptima, (2) puede identificar y eliminar heurísticas ineficientes, (3) es capaz de diseñar automáticamente una función multi-heurística y (4) minimiza tanto la complejidad del tiempo como del espacio. Esta publicación ha sido la más reciente en cuanto a optimización con el algoritmo de A* con alto impacto y nos muestra el rendimiento y eficiencia de dicho algoritmo dependiendo de las condiciones del grafo y de su función heurística. Es por ello que se ha seleccionado para la presente investigación, debido a las condiciones del grafo dentro de los edificios, ya que son en forma de malla.

Lv et. al en (2019) publican la investigación titulada como “Crowd Behavior Evolution With Emotional Contagion in Political Rallies”, presentaron un método novedoso de evolución del comportamiento de la multitud con contagio emocional en mítines políticos. Primero analizaron en detalle las escenas de manifestación política más representativas y las modelaron en dos tipos de escenarios abstractos. Además, los factores de "extroversión" y "empatía" del modelo *OCEAN* se eligen para describir las personalidades individuales más importantes en tales escenarios. Sobre esta base, proponen un modelo mejorado de contagio emocional combinando el modelo Susceptible-Infectado-Recuperado y la personalidad individual bajo diferentes puntos de vista políticos. Finalmente, la multitud en un mitin político es movida de acuerdo con la nueva dirección de movimiento potencial generada por el contagio emocional y la dirección original de los individuos juntos. Los experimentos muestran que su método puede demostrar intuitivamente los cambios emocionales de aquellos individuos con diferentes perspectivas políticas y simular razonablemente el movimiento de la multitud en las escenas de concentración política. Esta publicación y los trabajos futuros mencionados en (**Pelechano et. al, 2008**) dan pauta a la presente investigación en agregar contagios emocionales a la distribución de la población con sus factores de personales que derivan del modelo *OCEAN*, en función del tiempo.

Pelechano (2019) investiga cómo a través de realidad virtual en escenarios sumergidos, puede alterar los niveles de estrés y obtener simulaciones más aproximadas a escenarios reales desde el punto de vista individual y cómo altera su toma de decisiones y mejorar el comportamiento en los modelos de multitudes.

Capítulo III. Diseño de la solución

En el capítulo tres, se diseña una solución para resolver la problemática presente o ver de qué forma se lleva a cabo todo lo planteado como meta u objetivo.

Capítulo III

3. DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

Para el diseño de la solución es retomada la Figura 2.1 mostrada en el capítulo dos, y es realizada la explicación a detalle de cada módulo presente en el sistema, los cuales son: el módulo de entradas, el módulo de sectorización, el módulo de procesos estocásticos y el módulo del modelo inteligente de rutas de evacuación con multitudes heterogéneas. Una vez detallados dichos módulos, posteriormente se detalla el autómata con estados emocionales que se aplicará en esta investigación.

3.1. Módulo de entradas

El módulo de entradas es un conjunto conformado por los siguientes puntos:

- Establecer la inicialización de la distribución poblacional, ya sea de manera estocástica o mediante instancias reales.
- Selección del algoritmo que determine la ruta de evacuación, ya sea la metaheurística de colonia de hormigas, los algoritmos culturales o A^* ; con sus respectivos valores de parámetros e hiper parámetros.
- Establecer el total de agentes en el escenario.
- Selección del edificio del siniestro.

3.2. Módulo de sectorización

El módulo de sectorización viene dado por los pisos de cada tipo de estructura de edificio y el perímetro de área de búsqueda. Un ejemplo de sectorización por pisos se puede visualizar en la Figura 3.1.

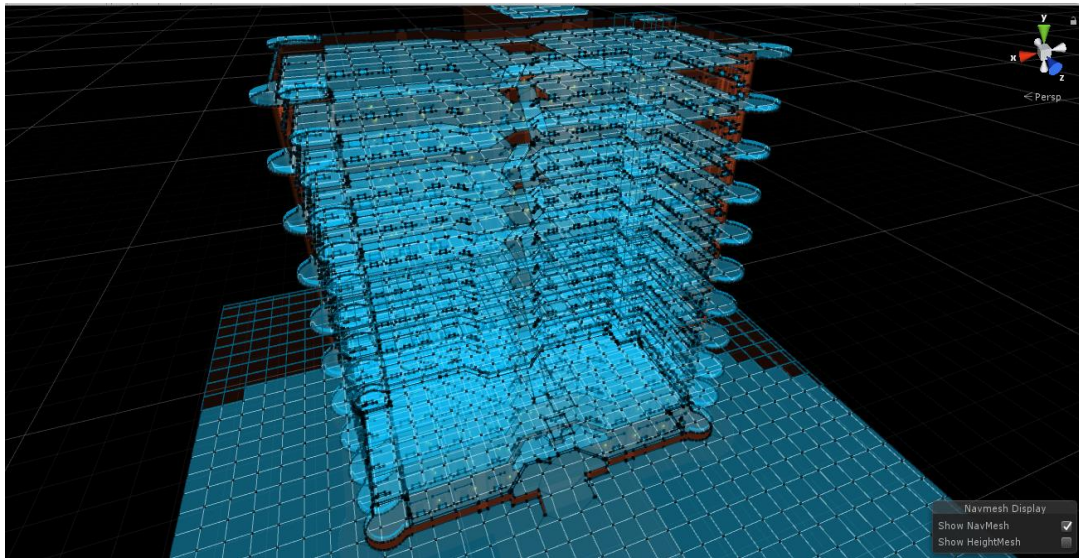


Figura 3.1. Ejemplo de sectorización por piso en un edificio y su *NavMesh*. (Fuente propia).

3.3. Módulo de procesos estocásticos

El módulo de procesos estocásticos viene dado por la ubicación en el mundo virtual donde se inicializan tanto los agentes, el incendio, y si fuese el caso de que el usuario determina una distribución heterogénea en la población de manera estocástica.

3.3.1 Punto de ignición

El punto de ignición se establece de manera aleatoria en cualquier punto que se encuentre dentro del *NavMesh* del edificio. Las coordenadas X , Y y Z son generadas bajo una función aleatoria con distribución uniforme. Una vez generado su vector de tres dimensiones para colocar el punto de ignición en el edificio. En la Figura 3.3 se puede visualizar cómo el incendio corta el área de navegación o *NavMesh* en el escenario.

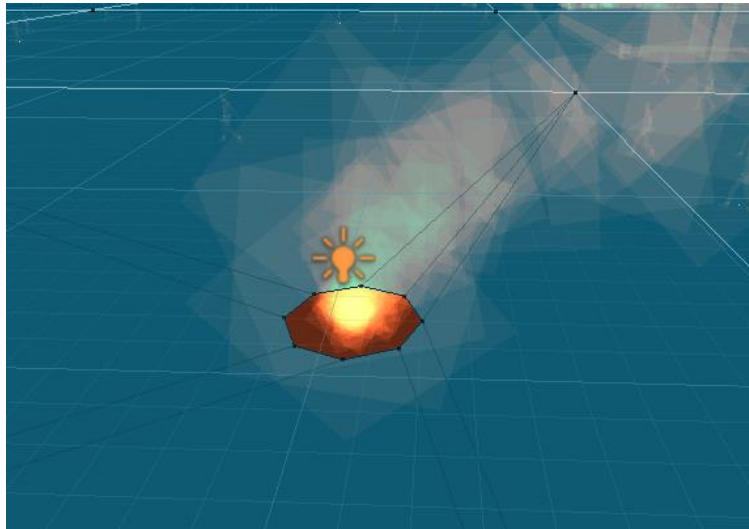


Figura 3.3. Colocación de punto de ignición en la planta y visualización de la eliminación del espacio por donde pueden caminar los agentes. (Fuente propia).

En la Figura 3.3 se puede visualizar la forma en cómo el incendio puede eliminar área de navegación para los agentes, debido a ser una zona no segura.

3.3.2 Distribución de agentes

La distribución aleatoria de posiciones (x,y,z) de los agentes en la escena, también se efectúa con una función de probabilidad uniforme dentro del edificio. Es importante recalcar que debido al componente de *RigidBody* que se les agrega a los agentes, el cual es un componente físico para detectar colisiones, dos o más agentes evaden aparecer en la escena en el mismo punto de manera automática. En la Figura 3.4 se visualiza la distribución de agentes en una escena.

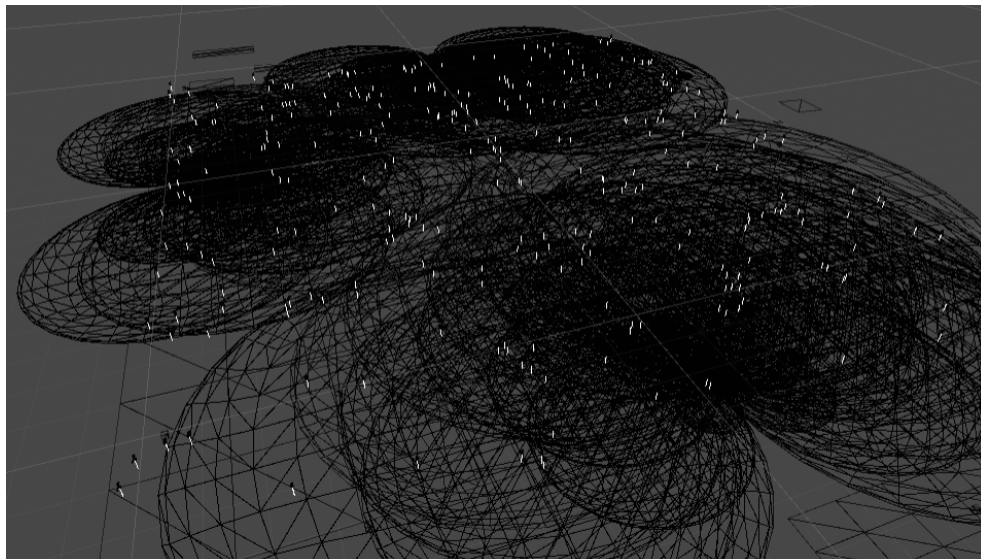


Figura 3.4. Distribución de los agentes en la escena. (Fuente propia).

3.4. Módulo del modelo inteligente de rutas de evacuación y población heterogénea

En esta sección se diseña el modelo inteligente de rutas de evacuación con multitudes heterogéneas conforme a la Figura 3.5.

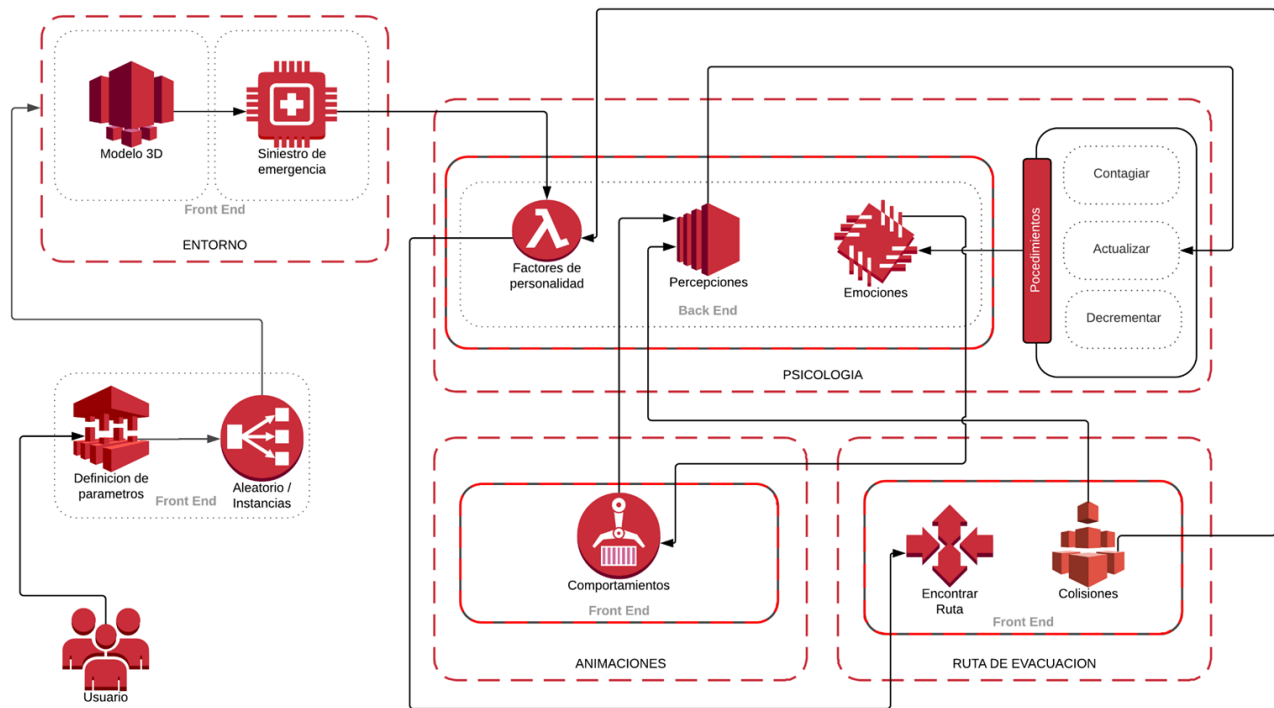


Figura 3.5. Modelo propuesto del simulador. (Fuente propia).

3.4.1 Fases del modelo inteligente

1. Definición de parámetros:

En esta fase, se establece la cantidad total de agentes en el escenario, así como también el algoritmo para encontrar la ruta de evacuación junto con sus parámetros e hiper parámetros.

2. Aleatorio / Instancias:

En esta fase se determina si la distribución de la población heterogénea viene dada por cierta instancia real, o si viene dada de forma estocástica.

3. *Modelo 3D:*

Es la fase en la que el usuario determina el tipo de estructura de edificio que se pretende simular.

4. *Siniestro de emergencia:*

Es la fase que determina el inicio de la simulación, debido a que comienza el siniestro en el escenario virtual seleccionado.

5. *Factores de personalidad:*

Es la fase que caracteriza al modelo *OCEAN* como distribución en la población heterogénea, a través de los rasgos de personalidad inicializados en los agentes.

6. *Percepciones:*

Es la habilidad que poseen los agentes inteligentes para determinar el estado del entorno dinámico y cómo puede afectar su realidad.

7. *Emociones y sus procedimientos:*

Es la fase donde los agentes poseen estados en función del tiempo denominados como estados emocionales. Dichos estados se dice que se encuentran en función del tiempo, debido al entorno dinámico que puede afectar a uno o a un grupo de agentes, y poder determinar cómo es posible un contagio de dicho estado emocional en la multitud o cómo se decrementa. Esta fase es una propuesta de la presente investigación ocupando un autómata para modelar dicho comportamiento en la simulación, el cual parte de estados emocionales como *calmado*, *alarmado*, *miedo*, *terror*, *horror* e *histeria*, siendo el estado emocional *calmado* como el estado inicial para todos los agentes. Los estados se pueden incrementar o decrementar de nivel conforme a las percepciones que posea el agente respecto a su entorno; ocupando tanto su posición respecto al siniestro, como de la multitud de agentes que lo rodean. Dichos estados influyen directamente en la velocidad que tiene un agente para evacuar el edificio, siendo la peor (*histeria*), representada como estampidas humanas. El autómata emocional se puede visualizar en la Figura 3.6 y una representación de la percepción que puede llegar a tener un agente respecto a la multitud que lo rodea, se puede visualizar en la Figura 3.7.

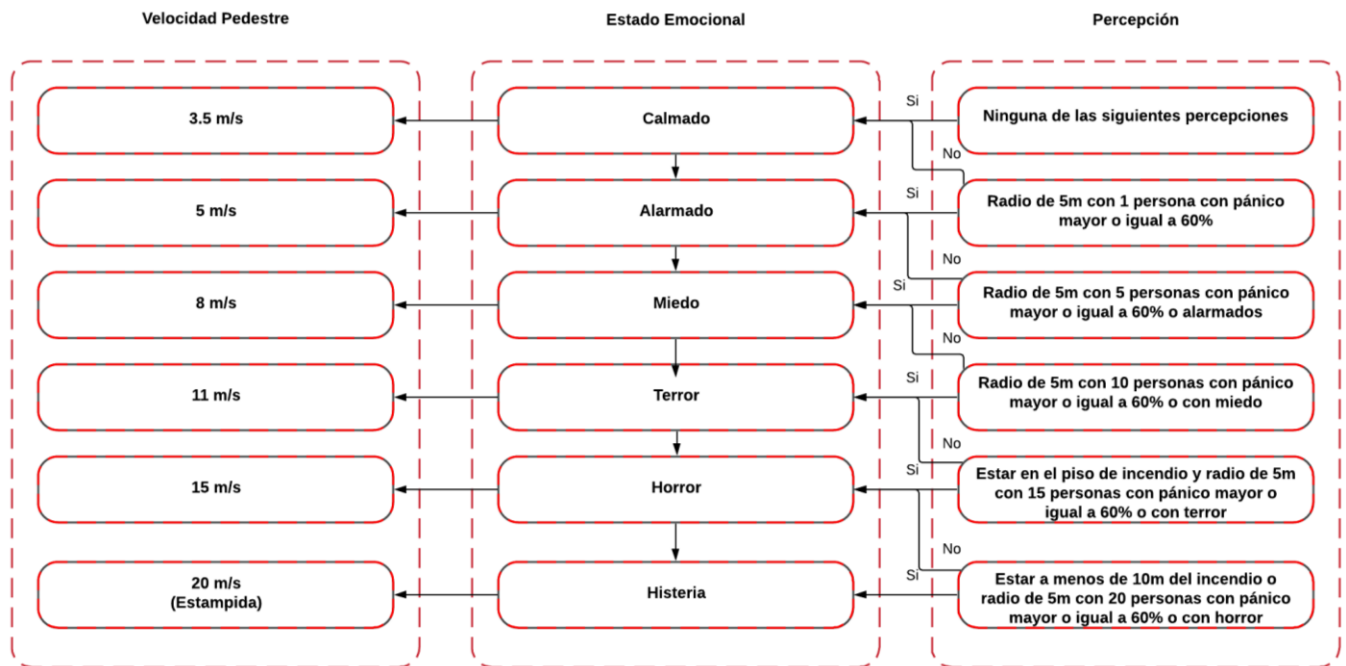


Figura 3.6. Autómata del modelo emocional. (Fuente propia).

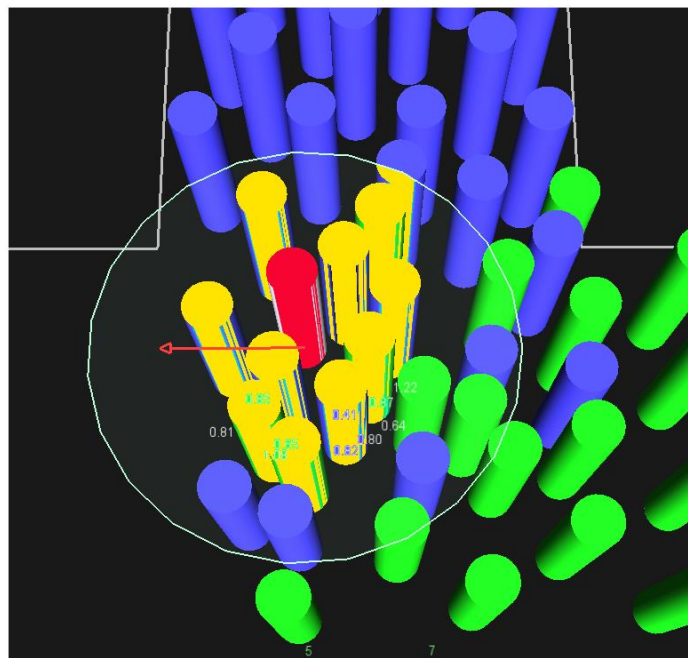


Figura 3.7. Vecindad de un agente para efectos de contagio, donde los agentes en amarillo son los vecinos del agente seleccionado de color rojo en determinado radio (Fuente propia).

8. *Encontrar ruta:*

Es la fase que viene dada por el algoritmo de Ψ^* . Dicho algoritmo tiene la función de determinar la salida correspondiente a cada agente inteligente del escenario de acuerdo con su factor de personalidad, dando así, un tiempo estimado de evacuación para dicho agente.

9. *Colisiones:*

Es cuando el agente puede detectar una posible colisión (choque/contacto) con el mundo que lo rodea y poder enviar señales a las percepciones de este.

10. *Comportamientos:*

Los comportamientos son las posibles formas de reaccionar que tienen los agentes a través de sus estados emocionales conforme pasa el tiempo de simulación.

Una vez definido el modelo inteligente de evacuación, así como el autómata del factor emocional, es importante recalcar cómo son las propiedades que deben tener los simuladores multiagentes. Dicha clasificación puede ser observada en la Figura **3.8**.

Propiedades de una Simulación de Multitudes



Figura 3.8. Propiedades de una simulación de multitudes. (Fuente propia).

3.5 CA (Cellular Automata, por sus siglas en inglés) en propagación de incendios para interiores

El modelo propuesto es basado en el trabajo previo encontrado en la literatura y presentado en el capítulo 2, pero con la modificación en la función de transición, se omite el viento y la altura del terreno, se incluyen matrices de incineración, paso del tiempo hasta quemarse y resistencia de materiales a combustión; así como también una función g innovadora basada en redes neuronales artificiales.

3.5.1 Matriz de resistencia

La matriz de resistencia R tiene valores correspondientes a la resistencia de los materiales respecto a su combustión, para cada celda en C con valor de $0 \leq R_{i,j} \leq 1$ (fuente propia).

$$\begin{matrix} R_{1,1} & , & R_{1,2} & , \dots & , & R_{1,n} \\ & & & & & \vdots \\ R_{m,1} & , & R_{m,2} & , \dots & , & R_{m,n} \end{matrix}$$

3.5.2 Matriz de paso de tiempo a combustión

El incremento de incendio en cada celda inicialmente depende de la resistencia de materiales a combustión existentes en esa área. Se define la matriz \mathcal{K} , la cual tiene información del incremento de incendio en cada celda, de acuerdo la resistencia de materiales a combustión en cada paso de tiempo. Dicha relación puede observarse en la ecuación 12.

$$\mathcal{K} = \frac{\kappa}{R} \tag{12}$$

Donde κ tiene un valor constante de 0.01. Por lo tanto, $\lim_{R_{ij} \rightarrow 1} \frac{\kappa}{R}$, $\mathcal{K} \rightarrow 0.01$ y cuando $\lim_{R_{ij} \rightarrow 0.01} \frac{\kappa}{R}$, $\mathcal{K} \rightarrow 1$ y la combustión es más rápida basado en la resistencia de materiales de determinada celda. Teniendo así, un comportamiento como el ilustrado en la Figura 3.9.

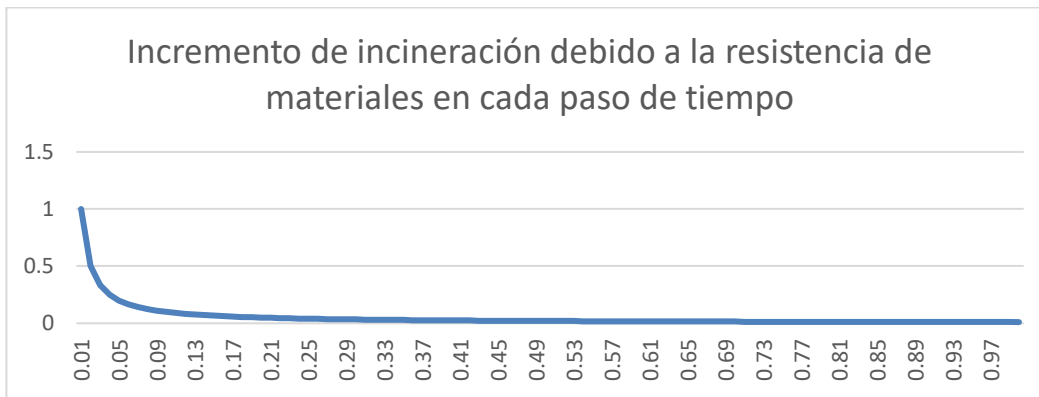


Figura 3.9. Incremento de incineración debido a la resistencia de materiales en cada paso de tiempo

$$\begin{matrix} \mathcal{K}_{1,1} & , & \mathcal{K}_{1,2}, \dots, & \mathcal{K}_{1,n} \\ & & \vdots & \\ \mathcal{K}_{m,1} & , & \mathcal{K}_{m,2}, \dots, & \mathcal{K}_{m,n} \end{matrix}$$

3.5.3 Matriz de incineración

La proporción de quemada en la que se encuentra una celda es almacenada en una matriz la cual ocupa valores en un intervalo de $0 \leq I_{ij} \leq 1$. El incremento independiente de porcentaje de incineración en una celda para cada paso en el tiempo viene dado por la ecuación 13 (fuente propia):

$$I_{ij}^{(t+1)} = I_{ij}^{(t)} + \mathcal{K}_{ij} \quad (13)$$

$$\begin{matrix} I_{1,1} & , & I_{1,2}, \dots, & I_{1,n} \\ & & \vdots & \\ I_{m,1} & , & I_{m,2}, \dots, & I_{m,n} \end{matrix}$$

El incremento independiente de incineración de una celda comienza sí y solo sí tiene una celda vecina adyacente quemándose; y cuando una celda específica I_{ij} haya alcanzado el valor de uno, lo que significa que dicha celda se encuentra quemada por completo y el incendio ya no se encuentra disponible en esa área.

3.5.4 Función de transición

La función de transición es muy similar al trabajo encontrado en la literatura (Hernández, 2007) pero con una ligera modificación. El valor de $\mu_{\alpha\beta}$ se encuentra en función del porcentaje de

incineración en las celdas adyacentes y viene dada por la ecuación 14:

$$\mu_{\alpha\beta} = I_{ij} + I_{\alpha j} + I_{i\beta} \quad , \quad (14)$$

Por lo tanto, la función de transición viene dada por la ecuación 15:

$$a_{ij}^{(t+1)} = a_{ij}^{(t)} + \sum_{(\alpha,\beta) \in V_m^{adj}} \mu_{\alpha\beta} a_{ij}^{(t)} + 0.785 \sum_{(\alpha,\beta) \in V_m^{diag}} \mu_{\alpha\beta} a_{ij}^{(t)} \quad (15)$$

Donde se generan valores en el intervalo de $[0, \infty)$.

3.5.5 Función de dimensión

La función de dimensión g propuesta en esta investigación es basada en la función de activación de redes neuronales artificiales (*ANN*, por sus siglas en inglés). Existen diferentes funciones de activación ocupadas en las *ANN* pero la ocupada en esta investigación es la función sigmoide, la cual viene dada por la ecuación 16:

$$g(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (16)$$

La cual recibe valores en el intervalo de $-\infty \leq x \leq \infty$ y retorna valores en el intervalo de $0 \leq g \leq 1$. El problema principal de nuestra función de transición propuesta es que solamente retorna valores en el rango de $(0, \infty)$, por lo que, si ocupamos esos valores como entrada en nuestra función g , nunca va a retornar un valor. Por lo tanto, es necesario escalar en cierto rango el valor retornado por la función de transición mediante la ecuación 17:

$$\eta(X_i) = \frac{X_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} * tmax - tmin + tmin \quad (17)$$

Donde X_i es el valor retornado por la función de transición, $\min(x)$ and $\max(x)$ son los valores medidos y, $tmax$ y $tmin$ son el rango deseado. Ahora es posible ajustar el valor de X_i donde g puede funcionar de tal manera que retorne un valor entre cero a uno. Los valores usados en esta investigación para dichas variables son los siguientes: $\min(X) = 0$, $\max(x) = 2300$, $tmin = -6$, $tmax = 6$. Donde $tmin$ y $tmax$ es la función acotada de g como se puede observar en la Figura 3.10.

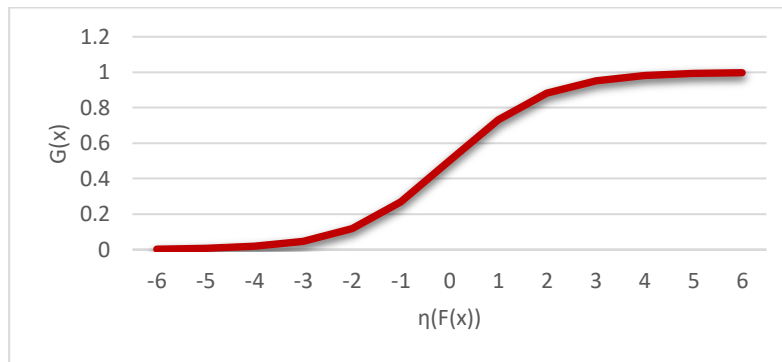


Figura 3.10. Función sigmoide acotada

De esta manera el modelo queda completo.

3.6 Ψ^*

El algoritmo Ψ^* , es un algoritmo que deriva del trabajo presentado por (Hart, 1968) y su función es encontrar el camino desde un punto a otro en el espacio, tomando en cuenta el factor de personalidad de un agente, donde el punto inicial y final se conocen, el cual se encarga de examinar en cómo identificar el camino que cumpla con ciertos criterios como que sea el camino con menos aglomeración de personas, con más aglomeración de personas, con más posibilidades de exploración de su entorno, etc. entre dos puntos en un grafo. Ψ^* al igual que A^* es un algoritmo completo, es decir, en caso de existir una solución, siempre dará con ella. La función de costo se puede observar en la ecuación 18.

- Ocupando el nodo inicial como pivote, se asigna un valor dado por la siguiente ecuación a cada uno de los nodos vecinos, denominados como nodos n .

$$f(n) = \begin{cases} \text{si } \delta(P) \in \{\text{impaciente, distante, desesperado, alterado}\}, & \frac{\alpha * g(n) + \beta * h(n)}{\omega(n)} \\ \text{sino,} & \alpha * g(n) + \beta * h(n) \end{cases}$$

(18)

Donde $\alpha, \beta \in \mathbb{R} - \{0\}$ y tendrán valores de acuerdo al factor de personalidad (valores diferentes a uno en ambos factores hacen perder la optimalidad de la ruta), $\delta(P)$ es la personalidad del agente, $\omega(n)$ es el peso correspondiente a la congestión de agentes en determinada área del nodo n , $g(n)$ es el coste del camino hasta el nodo n , $h(n)$ es la heurística del nodo, es decir, la estimación del coste del camino entre el nodo n hasta el nodo final, y $f(n)$ es la estimación del

coste total de una solución que pasa por el nodo n . Para determinar los valores de α y β se realizó una sintonización de parámetros y observar con cuáles valores se tenía un comportamiento similar a un determinado factor de personalidad, dicha sintonización exploró más de 60 combinaciones posibles y así posteriormente encontrar la relación presentada en la Tabla 4 y en la Figura 3.11 se puede observar cómo se genera la ruta OCEAN.

Tabla 4. Relación de adjetivos OCEAN con tipos de rutas (fuente propia).

<i>Adjetivos</i>	<i>Tipo de Rutas</i>
Desinformado (O-)	Alternas
Distante (E-)	
Impaciente (A-)	
Desesperado (C-)	
Alterado (N+)	
Informado (O+)	Menor Distancia
Paciente (A+)	
Calzado (N-)	
Social (E+)	
Ordenado (C+)	

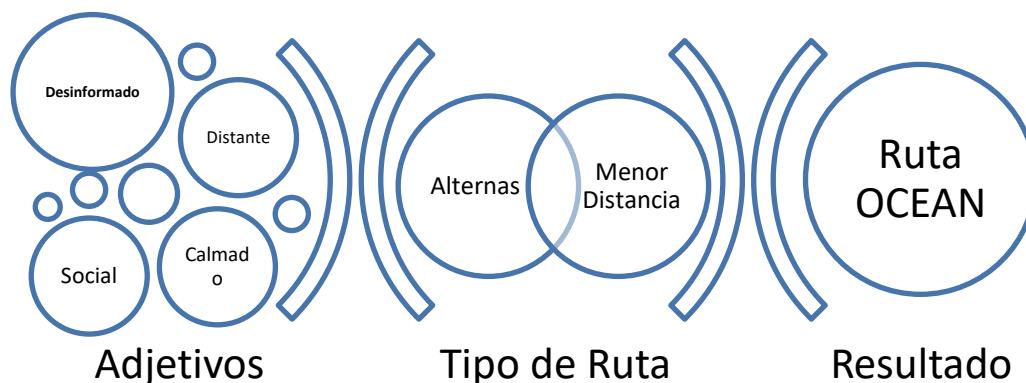


Figura 3.11. Procedimiento de generación de ruta OCEAN

- Una vez teniendo los valores mencionados en el punto anterior, se selecciona el nodo n con $f(n)$ de menor coste.

- Los puntos anteriores se repiten hasta llegar al nodo final.

Tanto el algoritmo de A^* y Ψ^* van a encontrar un camino con el destino siempre y cuando exista. Es por ello por lo que se ocupa el algoritmo de búsqueda en anchura para determinar si existe dicho camino entre el nodo inicial y el destino, o no.

3.6.1 Búsqueda en Anchura

Búsqueda en anchura (*BFS*, por sus siglas en inglés) es un algoritmo de búsqueda no informada utilizado para recorrer o buscar elementos en un grafo, usado frecuentemente sobre árboles. Intuitivamente, se comienza en la raíz eligiendo algún nodo como elemento raíz en el caso de un grafo y se exploran todos los vecinos de este nodo. A continuación, para cada uno de los vecinos se exploran sus respectivos vecinos adyacentes, y así hasta que se recorra todo el árbol (**Kurant, 2010**).

Formalmente, *BFS* es un algoritmo de búsqueda sin información, que expande y examina todos los nodos de un árbol sistemáticamente para buscar una solución. El algoritmo no usa ninguna estrategia heurística.

El procedimiento de funcionamiento de *BFS* es el siguiente (**Kurant, 2010**):

- Dado un vértice fuente s , *BFS* sistemáticamente explora los vértices de G para descubrir todos los vértices alcanzables desde s .
- Calcula la distancia (menor número de vértices) desde s a todos los vértices alcanzables.
- Después produce un árbol *BF* con raíz en s y que contiene a todos los vértices alcanzables.
- El camino desde s a cada vértice en este recorrido contiene el mínimo número de vértices. Es el camino más corto medido en número de vértices.
- Su nombre se debe a que expande uniformemente la frontera entre lo descubierto y lo no descubierto. Llega a los nodos de distancia k , sólo tras haber llegado a todos los nodos a distancia $k-1$.

- Previamente a ejecutar Ψ^* , se utiliza *BFS*, para determinar si existe algún camino entre el nodo inicial y el final; en caso de que exista un camino, Ψ^* es ejecutado y en caso contrario, se busca una salida alterna.

Capítulo IV. Diseño de Experimentos y Experimentos.

En el capítulo cuatro se realiza el diseño de experimentos y se definen los distintos tipos de valores que poseen las variables en cada uno de los experimentos, así como también la definición de los distintos escenarios a ejecutarse y la cantidad total de experimentos. Por último, se reflejan tablas de resultados de los experimentos definidos previamente.

Capítulo IV

4. DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y EXPERIMENTOS

A continuación, se presentan las dos etapas diseñadas para la experimentación, la primera orientada a validar el algoritmo más eficiente “comparativa entre metaheurísticas” en un entorno virtual. La segunda orientada a enriquecer el modelo Ψ^* , a partir de la validación en la realidad mediante una encuesta la cual llevó a cierta modificación del escenario y un segundo experimento realizado a un grupo más extenso de participantes.

4.1. Experimentos de comparativa entre metaheurísticas

Los experimentos son realizados con base al piso del incendio, el número de agentes localizados en la escena, el índice del incendio (bajo, moderado, alto), y el algoritmo de optimización (*ACO*, *CAEP*, *A**). Dichas instancias se encuentran conformadas por una cantidad de 50, 100, 200 y 300 agentes tomando en cuenta las diferentes combinaciones posibles de los otros factores mencionados previamente. Es decir, los experimentos para 50 agentes son ejecutados 9 veces (posibles combinaciones). Posteriormente, para los experimentos de 100 agentes son ejecutados en la misma cantidad de veces, así sucesivamente hasta llegar a las simulaciones de 300 agentes. La representación gráfica del Diseño de Experimentos (DOE – Design of Experiments por sus siglas en inglés) puede visualizarse en la Figura 4.1.

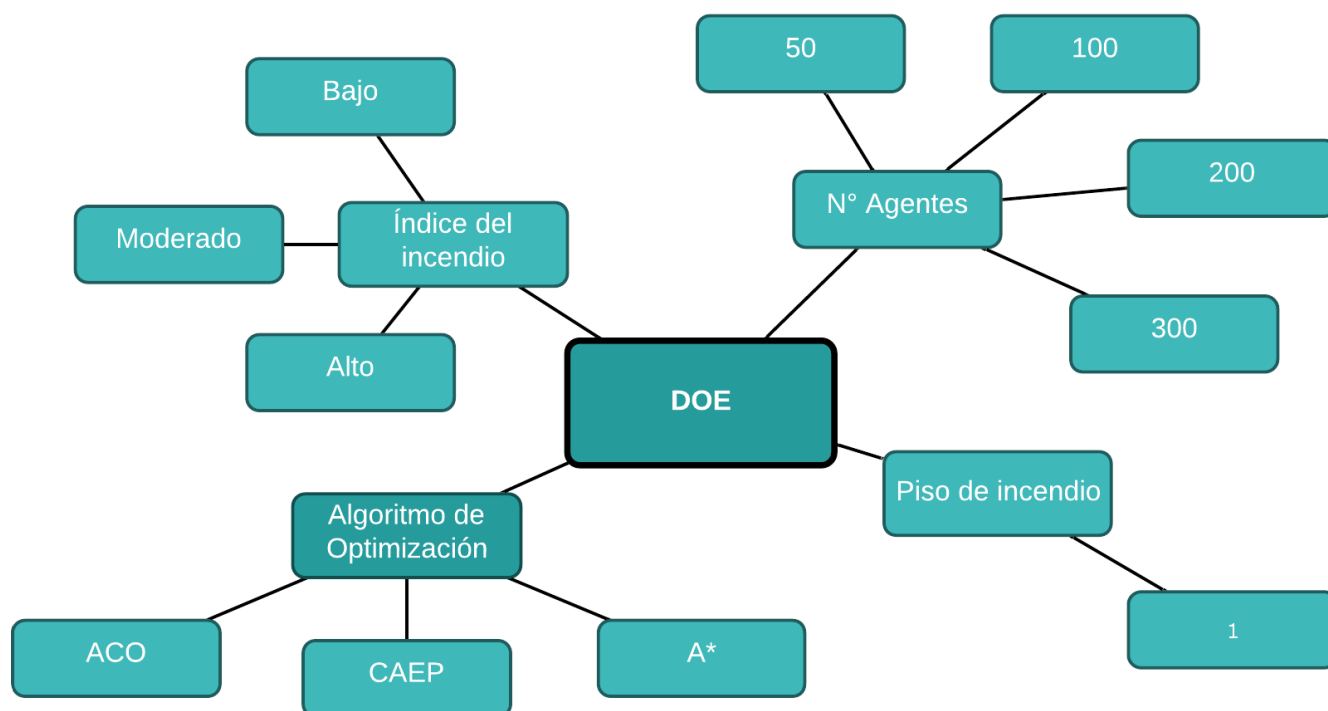


Figura 4.1. Diseño de Experimentos de la presente Investigación para comparativa entre metaheurísticas (Fuente propia).

Los hiper parámetros ocupados para *ACO* tienen valores de $\alpha=4$, $\beta=12$, $\rho=0.6$, el número de hormigas con una cantidad de 25 hormigas y el número máximo de iteraciones con un valor de 10 de acuerdo con (Gaertner & Clark, 2005). Los hiper parámetros ocupados en *CAEP* son $\alpha=0.6$, tamaño de la población = 5, total de épocas = 5, porcentaje de aceptación = 25% (Coello, 2004). Estos valores se mantuvieron constantes para todos los experimentos propuestos debido a la convergencia del algoritmo, ya que se requiere de alto procesamiento tanto de gráficos como de memoria RAM, arrojando así, tanto soluciones factibles como la ruta óptima.

El modelo inteligente de evacuación comienza con el modelo 3D, donde se colocan los nodos o puntos por dónde los agentes deben evacuar en el *NavMesh* hacia la planta baja del edificio. Posteriormente, se modifica el código fuente para determinar la instancia a ejecutar, de acuerdo con los distintos valores de las variables a considerar definidos en el DOE; y es ejecutado el algoritmo heurístico que se utilizará para determinar tanto las posiciones de un objeto, como las del nodo en el que se encuentra un agente, la heurística para determinar cierto margen en el espacio de búsquedas, posteriormente se ejecutará el algoritmo de optimización para encontrar la ruta de evacuación, así como también, en cada instancia de tiempo, el autómata de factores emocionales se encuentra corriendo.

Por último, se muestran los resultados obtenidos en la Tabla 4.1 y con ella termina el ciclo del modelo inteligente de evacuación, obteniendo una ruta final, la cual es asignada para cada uno de los agentes en la escena.

Tabla 4.1. Resultados obtenidos de la comparativa entre los algoritmos

<i>Piso del incendio</i>	<i>Número de Agentes</i>	<i>Índice de incendio</i>	<i>Algoritmo de Optimización</i>	<i>Tiempo estimado de evacuación promedio (seg)</i>	<i>Distancia de evacuación promedio (m)</i>	<i>Porcentaje de Heridos</i>	<i>Porcentaje de Fallecidos</i>
1	50	Bajo	A*	53.7689	74.20109	0	0
1	50	Bajo	ACO	127.7877	176.347	0	0
1	50	Bajo	CAEP	119.3632	164.7211	0	0
1	50	Moderado	A*	58.38651	80.5734	0	0
1	50	Moderado	ACO	135.4895	186.9755	4	0
1	50	Moderado	CAEP	103.4877	142.813	0	0
1	50	Alto	A*	61.32587	84.62971	0	0
1	50	Alto	ACO	132.4455	182.7748	4	2
1	50	Alto	CAEP	66.5022	91.77302	4	0
1	100	Bajo	A*	57.21791	78.96071	1	0
1	100	Bajo	ACO	125.6740	173.4301	2	0
1	100	Bajo	CAEP	72.05037	99.42952	1	0
1	100	Moderado	A*	61.81418	85.30357	1	0
1	100	Moderado	ACO	123.6655	170.6583	4	0
1	100	Moderado	CAEP	73.7185	101.7315	4	0
1	100	Alto	A*	68.08314	93.95473	1	0
1	100	Alto	ACO	118.7765	163.9116	1	3
1	100	Alto	CAEP	77.88848	107.4861	3	0
1	200	Bajo	A*	56.94751	78.5876	0	0
1	200	Bajo	ACO	132.5984	182.9858	3	0

1	200	Bajo	CAEP	68.5916	94.65646	6	0
1	200	Moderado	A*	56.8411	78.44074	1	0
1	200	Moderado	ACO	113.314	156.3735	3	0
1	200	Moderado	CAEP	71.55169	98.74141	4	0
1	200	Alto	A*	63.65616	87.8456	1	0
1	200	Alto	ACO	122.5544	169.1251	4	3
1	200	Alto	CAEP	69.8532	96.39748	6	0
1	300	Bajo	A*	55.34016	76.36956	0	0
1	300	Bajo	ACO	121.4758	167.6364	3	0
1	300	Bajo	CAEP	77.77329	107.3273	6	0
1	300	Moderado	A*	55.43995	76.50725	0	0
1	300	Moderado	ACO	113.3673	156.4469	0	0
1	300	Moderado	CAEP	68.6095	94.68121	4	0
1	300	Alto	A*	67.18948	92.72166	1	0
1	300	Alto	ACO	129.1755	178.2621	4	3
1	300	Alto	CAEP	68.86116	95.02851	6	0

4.2. Validación de modelo Ψ^*

A continuación, se presentan la dos fases realizadas para la validación del modelo Ψ^* .

4.2.1 Primera fase

Para la validación del modelo Ψ^* se realizó una encuesta (<https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSem6omALsPqGr9W7T--opQO6AIAzHby4JYax3CkC3CZtEyEtg/viewform>) a un grupo de 20 personas “reales” en una primera etapa, denominadas participantes donde se puede apreciar la vista del simulador véase la Figura 4.2 y se llevó a cabo de la siguiente manera:

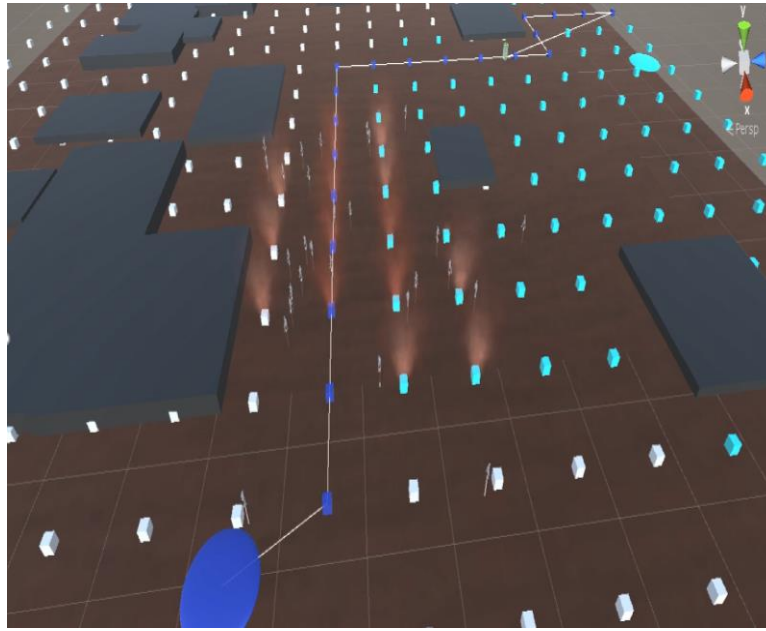


Figura 4.2. Simulador en la primera etapa de validación (fuente propia).

El participante inicia la simulación, de manera aleatoria el simulador otorga un factor de personalidad al agente, y se genera una ruta de evacuación. El participante debe elegir de acuerdo con su percepción una de las tres opciones posibles que se le muestran de factores de personalidad que exhibe el agente, donde una es la correcta y las demás no lo son. Al momento de que el administrador del simulador contesta la encuesta en una hoja de Microsoft Excel con base a lo que proporcionó el participante (véase la Figura 4.3), se termina la validación de la simulación y otro participante inicia el mismo proceso.

ENCUESTA	REALIDAD
1	1
4	9
9	9
6	3
3	3
4	10
10	10
7	6
2	4
2	2
2	2
3	3
4	4
7	4
6	6
6	6
6	6
2	3
6	6
9	9

Figura 4.3. Resultado de primera encuesta realizada. La primer columna indica el valor registrado en la encuesta por parte de la recepción del participante, y la segunda columna es el valor correspondiente a la personalidad con la que se ejecutó el simulador.

Los resultados obtenidos, dieron pauta para el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson siendo el eje X el resultado obtenido por el participante y el eje Y denominado “realidad” el dato que correspondía a dicha simulación. Para determinar qué tan fuerte es la relación entre dos variables, se debe seguir una ecuación para producir lo que se conoce como el valor del coeficiente. El valor del coeficiente puede variar entre -1.00 y 1.00. Si el valor del coeficiente está en el rango negativo, eso significa que la relación entre las variables está correlacionada negativamente, o cuando un valor aumenta, el otro disminuye. Si el valor está en el rango positivo, eso significa que la relación entre las variables está positivamente correlacionada, o ambos valores aumentan o disminuyen juntos (Asuero, 2006). Veamos la ecuación 19 para realizar el valor del coeficiente de correlación de Pearson.

$$r_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s_x} \right) \left(\frac{y_i - \bar{y}}{s_y} \right) \quad (19)$$

Donde, n es el tamaño de la muestra, X_i y Y_i son puntos individuales encontrados en la muestra indexados en i , \bar{x} y \bar{y} son las medias de la muestra, y S_x , S_y son las desviaciones estándar de la muestra.

El valor del coeficiente de correlación obtenido es de 0.714, lo cual indica que se encuentra en un intervalo de alta correlación de datos (Pearson, 1986). Dicha correlación se puede visualizar en la Figura 4.4.

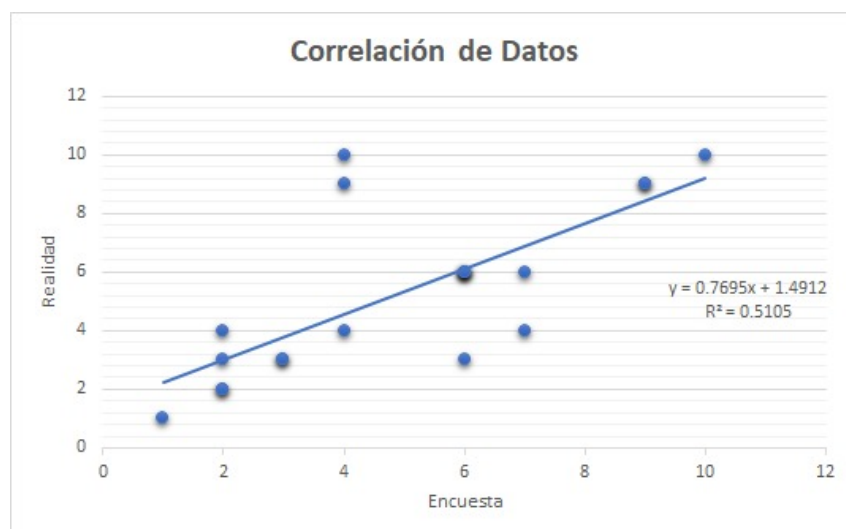


Figura 4.4 Correlación de datos de Pearson aplicado a la encuesta de percepciones en la simulación.

4.2.2 Segunda fase

Para continuar con el proceso de validación del modelo Ψ^* se consideró que este debía ser enriquecido al momento de obtener los datos, lo cual llevó a modificar el escenario en el aspecto de los espacios a recorrer, las paredes del piso, la heterogeneidad antropométrica de los agentes y velocidades heterogéneas con sus respectivas animaciones 3D; y aplicar el experimento a un grupo más extenso de participantes ($n \geq 30$), para ello se realizó una encuesta en línea del experimento en el idioma español e inglés, dicha experimentación conforma la segunda etapa de la validación, y se lleva a cabo de la siguiente manera (dicho proceso puede verse en la Figura 4.5):



Figura 4.5. Diagrama de flujo de la segunda fase de validación de modelo Ψ^* .

El participante ingresa al sitio web desarrollado en la plataforma Wix con URL (<https://peteroropeza21.wixsite.com/ocean>). Dicho sitio web lleva al participante de manera interactiva a la explicación del experimento y posteriormente una sección de links que redirigen a cada experimento correspondiente. Uno de los experimentos puede visualizarse en la Figura 4.6.



Figura 4.6. Vista del simulador en la segunda fase de validación.

El participante es redirigido a la encuesta en línea desarrollada en los formularios de Google con URL(<https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSem6omALsPqGr9W7T--opQO6AIAzHby4JYax3CkC3CZtEyEtg/viewform>). Dicho formulario inicia con la selección del idioma deseado (los cuales son español e inglés). A continuación, el formulario lleva al participante a una sección de elegibilidad (demográficos), posteriormente a la explicación del experimento y al primer video de la simulación correspondiente. Luego de mostrar el vídeo, se le solicita al usuario seleccione, con una escala de Likert de uno a siete, su percepción de lo que visualiza en el video referente al factor de personalidad del personaje en color rojo. La información obtenida en la encuesta es almacenada en una base de datos de Microsoft Excel proporcionada por Google. La encuesta en línea puede visualizarse en la Figura 4.7 y el simulador puede visualizarse con el personaje a evaluar en la Figura 4.8.



Experimentos / Experiments

*Obligatorio

Idioma Preferido / Preferred Language *

Español

English

Siguiente

Figura 4.7. Vista de la encuesta encontrada en Google Forms.



Figura 4.8. Vista del personaje a evaluar en la segunda fase del simulador.

Debido a que la segunda etapa de la validación involucra todos los factores de personalidad en la encuesta, lo anterior se repite para cada una de las personalidades del modelo *OCEAN* (10 personalidades).

Una vez concluido lo anterior, se inicia el proceso de validación con los (n=30) resultados obtenidos en la encuesta en línea. Para lo cual se construyeron una matriz y gráfica de correlación, y una gráfica de frecuencia con base a la personalidad correspondiente de cada experimento. La gráfica de frecuencias de personalidad es tomada en cuenta solamente para identificar las ponderaciones de mayor peso de la encuesta, las cuales se encuentran representadas por los valores de cinco, seis y siete.

En la Figura 4.9 y 4.10 se puede apreciar la correlación que existe entre la personalidad de informado (experimento uno) con respecto a las demás, siendo paciente y ordenado las que se encuentran mayormente correlacionadas de acuerdo con las percepciones de los participantes.

Attribut...	Desinfo...	Distant...	Impacie...	Desesp...	Alterad...	Informa...	Pacient...	Calmad...	Social (...)	Ordena...
Desinfor...	1	0.746	0.611	0.413	0.653	-0.207	0.066	0.118	0.556	-0.051
Distante ...	0.746	1	0.505	0.420	0.262	-0.042	0.091	0.035	0.223	-0.177
Impacie...	0.611	0.505	1	0.714	0.821	0.101	-0.131	-0.239	0.241	-0.156
Desesp...	0.413	0.420	0.714	1	0.504	0.082	-0.232	-0.302	0.095	-0.104
Alterado ...	0.653	0.262	0.821	0.504	1	0.027	-0.126	-0.102	0.404	-0.029
Informad...	-0.207	-0.042	0.101	0.082	0.027	1	0.543	0.301	0.203	0.337
Paciente...	0.066	0.091	-0.131	-0.232	-0.126	0.543	1	0.680	0.465	0.664
Calmad...	0.118	0.035	-0.239	-0.302	-0.102	0.301	0.680	1	0.681	0.712
Social (E...	0.556	0.223	0.241	0.095	0.404	0.203	0.465	0.681	1	0.530
Ordenad...	-0.051	-0.177	-0.156	-0.104	-0.029	0.337	0.664	0.712	0.530	1

Figura 4.9. Matriz de correlación para el experimento uno (personalidad de informado).

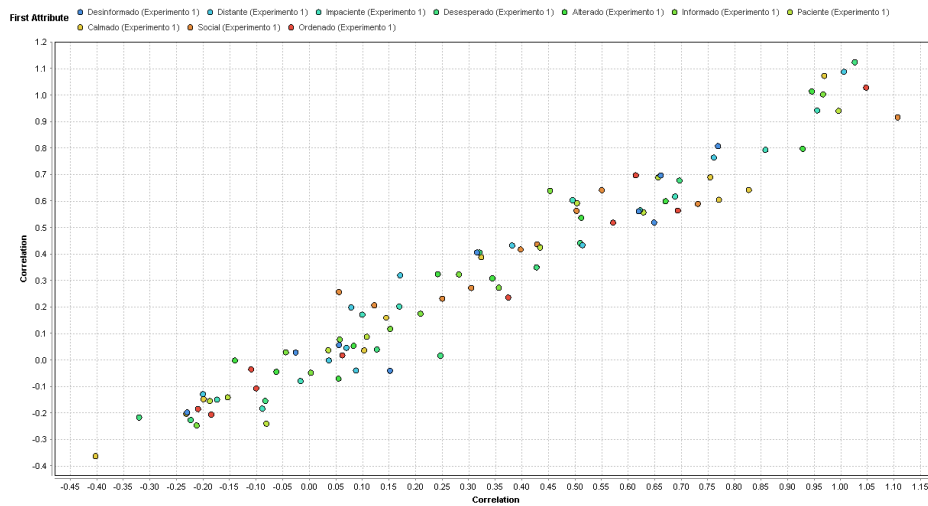


Figura 4.10. Gráfica de correlación para el experimento uno (personalidad de informado).

En la Figura 4.11 se aprecia que, entre las calificaciones más altas para la personalidad de informado, se tiene un total de 18 votos, lo cual representa un 60% de la población encuestada.



Figura 4.11. Gráfica de frecuencia para el experimento uno (personalidad de informado).

En la Figura 4.12 y 4.13 se puede apreciar la correlación que existe entre la personalidad de desinformado (experimento dos) con respecto a las demás, siendo impaciente y desesperado las que se encuentran mayormente correlacionadas de acuerdo con las percepciones de los participantes.

Attribut...	Desinfo...	Distant...	Impacie...	Desesp...	Alterad...	Informa...	Pacient...	Calmad...	Social (...)	Ordena...
Desinfor...	1	0.238	0.396	0.382	0.334	-0.144	0.073	-0.003	-0.100	-0.151
Distante ...	0.238	1	0.238	0.153	0.072	0.064	-0.116	0.147	-0.227	0.020
Impacie...	0.396	0.238	1	0.945	0.804	0.311	0.019	-0.191	0.324	0.182
Desesp...	0.382	0.153	0.945	1	0.850	0.278	0.023	-0.243	0.355	0.119
Alterado ...	0.334	0.072	0.804	0.850	1	0.343	0.186	-0.159	0.448	0.189
Informad...	-0.144	0.064	0.311	0.278	0.343	1	0.466	0.590	0.830	0.907
Paciente...	0.073	-0.116	0.019	0.023	0.186	0.466	1	0.694	0.521	0.573
Calmad...	-0.003	0.147	-0.191	-0.243	-0.159	0.590	0.694	1	0.486	0.726
Social (E...	-0.100	-0.227	0.324	0.355	0.448	0.830	0.521	0.486	1	0.816
Ordenad...	-0.151	0.020	0.182	0.119	0.189	0.907	0.573	0.726	0.816	1

Figura 4.12. Matriz de correlación para el experimento dos (personalidad de desinformado).

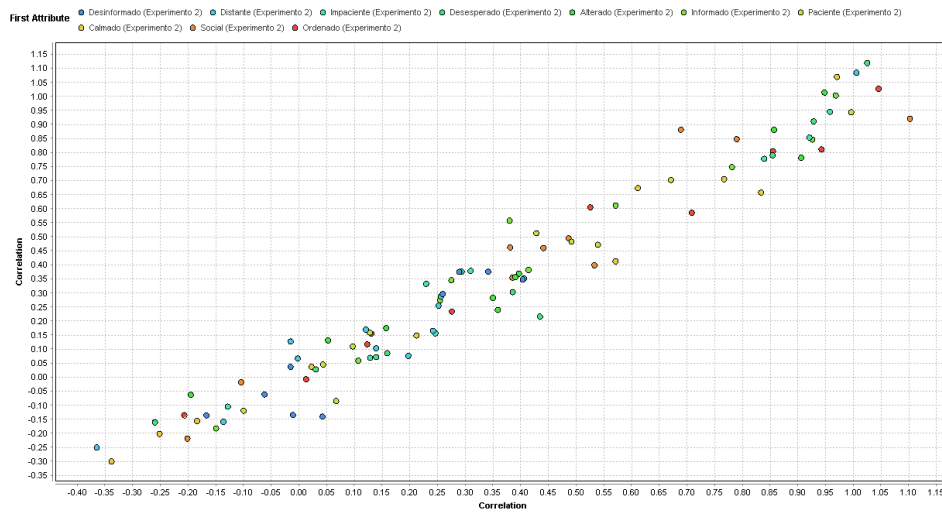


Figura 4.13. Gráfica de correlación para el experimento dos (personalidad de desinformado).

En la Figura 4.14 se aprecia que, entre las calificaciones más altas para la personalidad de desinformado, se tiene un total de 26 votos, lo cual representa un 86.66% de la población encuestada.



Figura 4.14. Gráfica de frecuencia para el experimento dos (personalidad de desinformado).

En la Figura 4.15 y 4.16 se puede apreciar la correlación que existe entre la personalidad de ordenado (experimento tres) con respecto a las demás, siendo paciente y calmado las que se encuentran mayormente correlacionadas de acuerdo con las percepciones de los participantes.

Attribut...	Desinfo...	Distant...	Impacie...	Desesp...	Alterad...	Informa...	Pacient...	Calmad...	Social (...)	Ordena...
Desinfor...	1	0.662	0.461	0.765	0.625	-0.073	-0.038	0.236	0.080	-0.158
Distante ...	0.662	1	0.244	0.583	0.472	0.221	0.216	0.511	0.119	0.327
Impacie...	0.461	0.244	1	0.658	0.740	-0.174	-0.078	-0.207	-0.169	-0.222
Desesp...	0.765	0.583	0.658	1	0.869	-0.061	-0.195	0.019	-0.093	-0.242
Alterado ...	0.625	0.472	0.740	0.869	1	0.045	-0.098	0	-0.015	-0.083
Informad...	-0.073	0.221	-0.174	-0.061	0.045	1	0.369	0.479	0.574	0.599
Paciente...	-0.038	0.216	-0.078	-0.195	-0.098	0.369	1	0.708	0.525	0.703
Calmad...	0.236	0.511	-0.207	0.019	0	0.479	0.708	1	0.506	0.718
Social (E...	0.080	0.119	-0.169	-0.093	-0.015	0.574	0.525	0.506	1	0.568
Ordenad...	-0.158	0.327	-0.222	-0.242	-0.083	0.599	0.703	0.718	0.568	1

Figura 4.15. Matriz de correlación para el experimento tres (personalidad de ordenado).

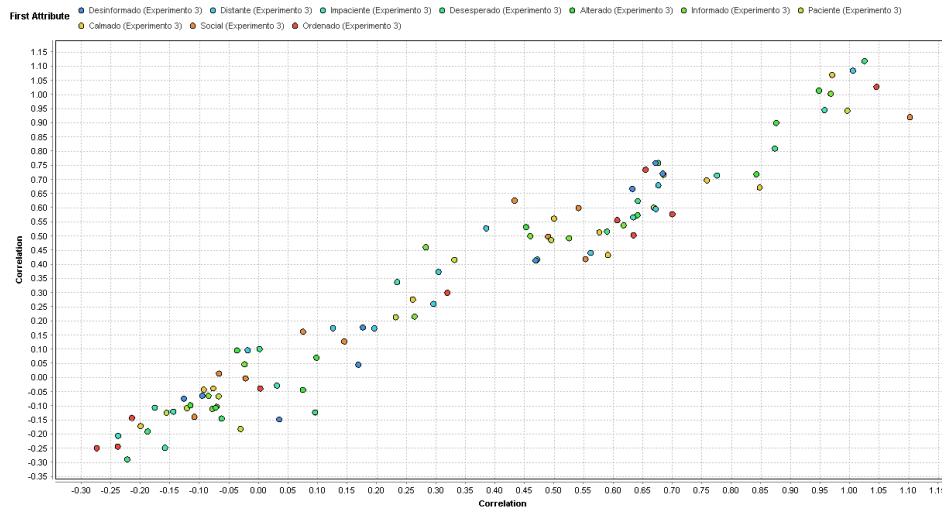


Figura 4.16. Gráfica de correlación para el experimento tres (personalidad de ordenado).

En la Figura 4.17 se aprecia que, entre las calificaciones más altas para la personalidad de ordenado, se tiene un total de 18 votos, lo cual representa un 60% de la población encuestada.



Figura 4.17. Gráfica de frecuencia para el experimento tres (personalidad de ordenado).

En la Figura 4.18 y 4.19 se puede apreciar la correlación que existe entre la personalidad de desesperado (experimento cuatro) con respecto a las demás, siendo impaciente y alterado las que se encuentran mayormente correlacionadas de acuerdo con las percepciones de los participantes.

Attribut...	Desinfo...	Distant...	Impacie...	Desesp...	Alterad...	Informa...	Pacient...	Calmad...	Social (...)	Ordena...
Desinfor...	1	0.577	0.330	0.221	0.293	-0.003	0.212	0.099	0.358	0.063
Distante ...	0.577	1	0.583	0.302	0.366	-0.078	-0.064	0.109	0.139	-0.116
Impacie...	0.330	0.583	1	0.809	0.722	0.044	-0.256	-0.252	0.057	-0.108
Desesp...	0.221	0.302	0.809	1	0.737	0.156	-0.360	-0.342	0.204	-0.020
Alterado ...	0.293	0.366	0.722	0.737	1	0.364	-0.088	-0.138	0.295	-0.219
Informad...	-0.003	-0.078	0.044	0.156	0.364	1	0.467	0.369	0.371	0.309
Paciente...	0.212	-0.064	-0.256	-0.360	-0.088	0.467	1	0.835	0.502	0.645
Calmad...	0.099	0.109	-0.252	-0.342	-0.138	0.369	0.835	1	0.495	0.540
Social (E...	0.358	0.139	0.057	0.204	0.295	0.371	0.502	0.495	1	0.423
Ordenad...	0.063	-0.116	-0.108	-0.020	-0.219	0.309	0.645	0.540	0.423	1

Figura 4.18. Matriz de correlación para el experimento cuatro (personalidad de desesperado).

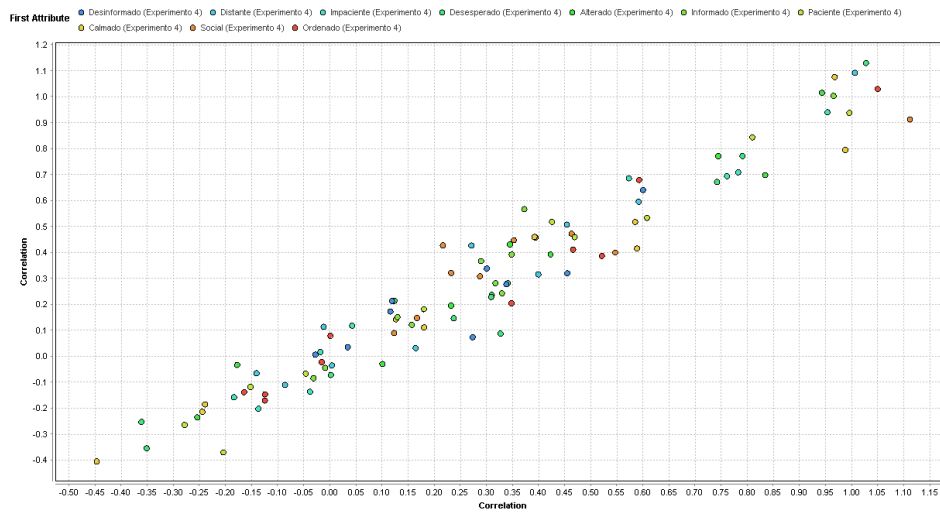


Figura 4.19. Gráfica de correlación para el experimento cuatro (personalidad de desesperado).

En la Figura 4.20 se aprecia que, entre las calificaciones más altas para la personalidad de desesperado, se tiene un total de 19 votos, lo cual representa un 63.33% de la población encuestada.



Figura 4.20. Gráfica de frecuencia para el experimento cuatro (personalidad de desesperado).

En la Figura 4.21 y 4.22 se puede apreciar la correlación que existe entre la personalidad de social (experimento cinco) con respecto a las demás, siendo ordenado y calmado las que se encuentran mayormente correlacionadas de acuerdo con las percepciones de los participantes.

Attribut...	Desinfo...	Distant...	Impacie...	Desesp...	Alterad...	Informa...	Pacient...	Calmad...	Social (...)	Ordena...
Desinfor...	1	0.710	0.803	0.634	0.707	-0.013	-0.122	-0.074	0.178	-0.029
Distante ...	0.710	1	0.582	0.528	0.480	0.314	0.318	0.311	0.336	0.319
Impacie...	0.803	0.582	1	0.669	0.841	0.012	-0.275	-0.200	0.385	-0.059
Desesp...	0.634	0.528	0.669	1	0.785	0.093	-0.107	0.027	0.238	-0.016
Alterado ...	0.707	0.480	0.841	0.785	1	-0.149	-0.355	-0.299	0.273	-0.213
Informad...	-0.013	0.314	0.012	0.093	-0.149	1	0.783	0.607	0.402	0.871
Paciente...	-0.122	0.318	-0.275	-0.107	-0.355	0.783	1	0.834	0.266	0.779
Calmad...	-0.074	0.311	-0.200	0.027	-0.299	0.607	0.834	1	0.425	0.630
Social (E...	0.178	0.336	0.385	0.238	0.273	0.402	0.266	0.425	1	0.568
Ordenad...	-0.029	0.319	-0.059	-0.016	-0.213	0.871	0.779	0.630	0.568	1

Figura 4.21. Matriz de correlación para el experimento cinco (personalidad de social).

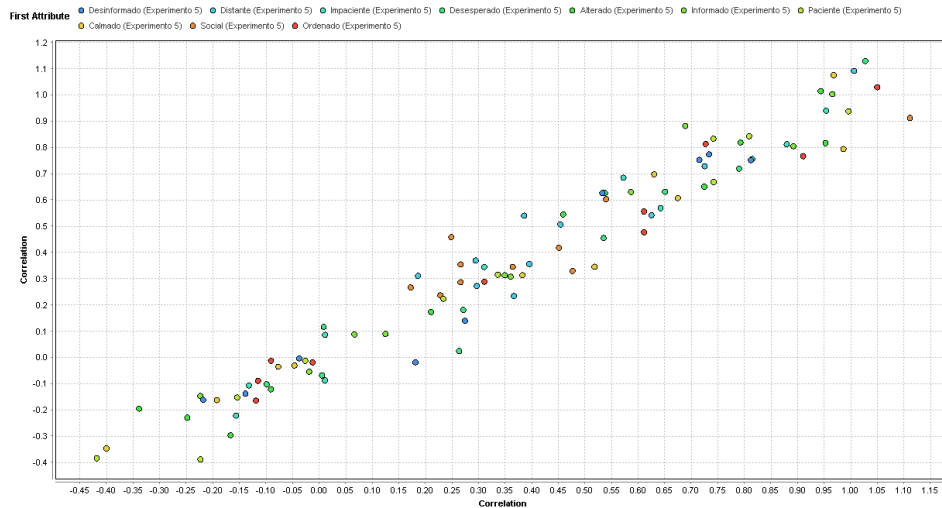


Figura 4.22. Gráfica de correlación para el experimento cinco (personalidad de social).

En la Figura 4.23 se aprecia que, entre las calificaciones más altas para la personalidad de social, se tiene un total de 21 votos, lo cual representa un 70% de la población encuestada.



Figura 4.23. Gráfica de frecuencia para el experimento cinco (personalidad de social).

En la Figura 4.24 y 4.25 se puede apreciar la correlación que existe entre la personalidad de distante (experimento seis) con respecto a las demás, siendo desinformado e impaciente las que se encuentran mayormente correlacionadas de acuerdo con las percepciones de los participantes.

Attribut...	Desinfo...	Distant...	Impacie...	Desesp...	Alterad...	Informa...	Pacient...	Calmad...	Social (...)	Ordena...
Desinfor...	1	0.552	0.488	0.566	0.446	0.127	0.190	0.457	0.387	0.107
Distante ...	0.552	1	0.382	0.324	0.164	0.276	0.135	0.364	0.040	0.009
Impacie...	0.488	0.382	1	0.888	0.863	0.154	-0.346	-0.121	0.253	-0.116
Desesp...	0.566	0.324	0.888	1	0.942	0.177	-0.352	-0.105	0.186	-0.105
Alterado ...	0.446	0.164	0.863	0.942	1	0.090	-0.351	-0.126	0.211	-0.073
Informad...	0.127	0.276	0.154	0.177	0.090	1	0.465	0.361	0.327	0.618
Paciente...	0.190	0.135	-0.346	-0.352	-0.351	0.465	1	0.763	0.525	0.757
Calmad...	0.457	0.364	-0.121	-0.105	-0.126	0.361	0.763	1	0.515	0.621
Social (E...	0.387	0.040	0.253	0.186	0.211	0.327	0.525	0.515	1	0.555
Ordenad...	0.107	0.009	-0.116	-0.105	-0.073	0.618	0.757	0.621	0.555	1

Figura 4.24. Matriz de correlación para el experimento seis (personalidad de distante).

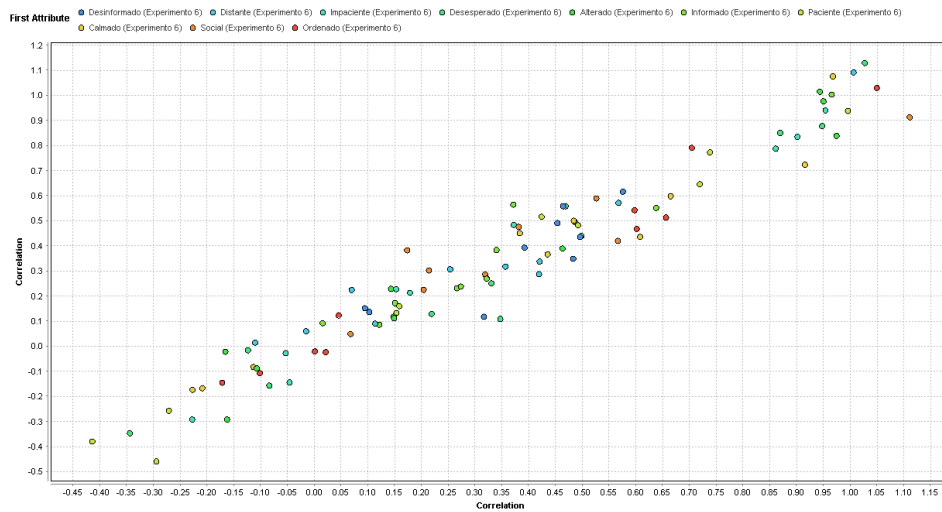


Figura 4.25. Gráfica de correlación para el experimento seis (personalidad de distante).

En la Figura 4.26 se aprecia que, entre las calificaciones más altas para la personalidad de distante, se tiene un total de 20 votos, lo cual representa un 66.66% de la población encuestada.

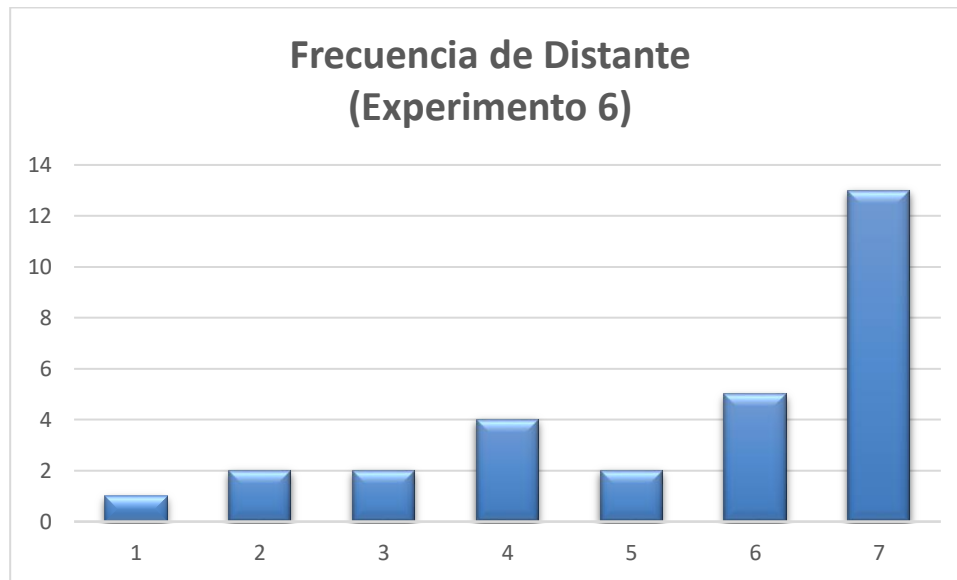


Figura 4.26. Gráfica de frecuencia para el experimento seis (personalidad de distante).

En la Figura 4.27 y 4.28 se puede apreciar la correlación que existe entre la personalidad de paciente (experimento siete) con respecto a las demás, siendo calmado y ordenado las que se encuentran mayormente correlacionadas de acuerdo con las percepciones de los participantes.

Attribut...	Desinfo...	Distant...	Impacie...	Desesp...	Alterad...	Informa...	Pacient...	Calmad...	Social (...)	Ordena...
Desinfor...	1	0.743	0.734	0.765	0.841	-0.050	-0.087	-0.142	0.081	-0.199
Distante ...	0.743	1	0.777	0.859	0.792	0.060	0.107	0.103	0.147	0.007
Impacie...	0.734	0.777	1	0.813	0.857	-0.291	-0.318	-0.295	-0.144	-0.268
Desesp...	0.765	0.859	0.813	1	0.896	0.021	-0.158	-0.191	-0.022	-0.301
Alterado ...	0.841	0.792	0.857	0.896	1	-0.099	-0.269	-0.356	0.058	-0.354
Informad...	-0.050	0.060	-0.291	0.021	-0.099	1	0.810	0.720	0.566	0.686
Paciente...	-0.087	0.107	-0.318	-0.158	-0.269	0.810	1	0.942	0.585	0.894
Calmad...	-0.142	0.103	-0.295	-0.191	-0.356	0.720	0.942	1	0.527	0.909
Social (E...	0.081	0.147	-0.144	-0.022	0.058	0.566	0.585	0.527	1	0.596
Ordenad...	-0.199	0.007	-0.268	-0.301	-0.354	0.686	0.894	0.909	0.596	1

Figura 4.27. Matriz de correlación para el experimento siete (personalidad de paciente).

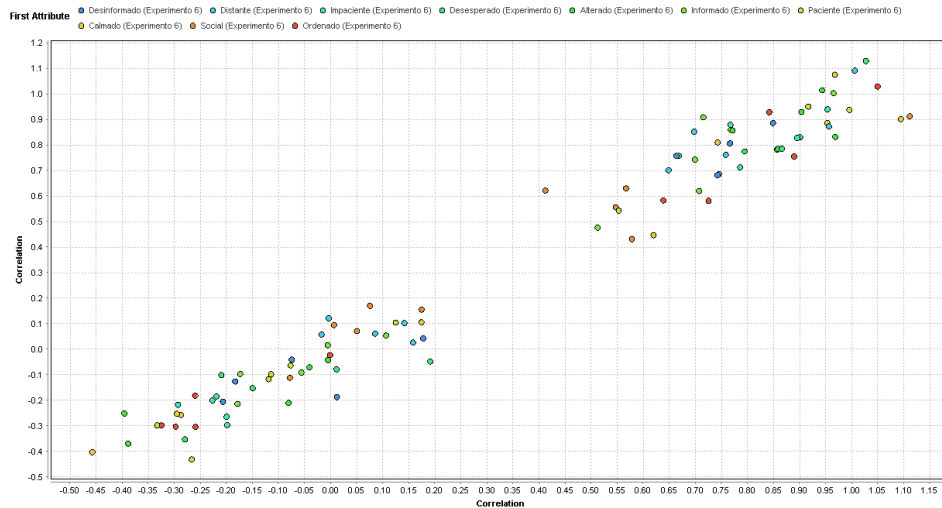


Figura 4.28. Gráfica de correlación para el experimento siete (personalidad de paciente).

En la Figura 4.29 se aprecia que, entre las calificaciones más altas para la personalidad de paciente, se tiene un total de 18 votos, lo cual representa un 60% de la población encuestada.



Figura 4.29. Gráfica de frecuencia para el experimento siete (personalidad de paciente).

En la Figura 4.30 y 4.31 se puede apreciar la correlación que existe entre la personalidad de impaciente (experimento ocho) con respecto a las demás, siendo desesperado y alterado las que se encuentran mayormente correlacionadas de acuerdo con las percepciones de los participantes.

Attribut...	Desinfo...	Distant...	Impacie...	Desesp...	Alterad...	Informa...	Pacient...	Calmad...	Social (...)	Ordena...
Desinfor...	1	0.765	0.474	0.521	0.444	-0.268	0.032	0.136	0.290	0.051
Distante ...	0.765	1	0.347	0.344	0.277	-0.225	0.029	-0.008	0.101	-0.035
Impacie...	0.474	0.347	1	0.845	0.883	-0.120	-0.343	-0.180	0.155	-0.234
Desesp...	0.521	0.344	0.845	1	0.834	-0.125	-0.353	-0.157	0.366	-0.201
Alterado ...	0.444	0.277	0.883	0.834	1	0.070	-0.265	-0.036	0.304	-0.042
Informad...	-0.268	-0.225	-0.120	-0.125	0.070	1	0.728	0.688	0.482	0.741
Paciente...	0.032	0.029	-0.343	-0.353	-0.265	0.728	1	0.793	0.503	0.755
Calmad...	0.136	-0.008	-0.180	-0.157	-0.036	0.688	0.793	1	0.518	0.958
Social (E...	0.290	0.101	0.155	0.366	0.304	0.482	0.503	0.518	1	0.511
Ordenad...	0.051	-0.035	-0.234	-0.201	-0.042	0.741	0.755	0.958	0.511	1

Figura 4.30. Matriz de correlación para el experimento ocho (personalidad de impaciente).

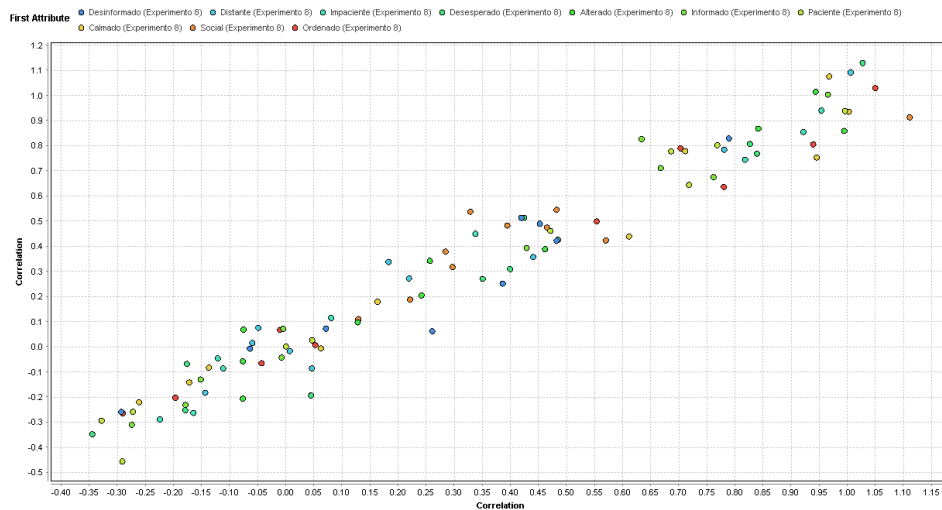


Figura 4.31. Gráfica de correlación para el experimento ocho (personalidad de impaciente).

En la Figura 4.32 se aprecia que, entre las calificaciones más altas para la personalidad de impaciente, se tiene un total de 13 votos, lo cual representa un 43.33% de la población encuestada.

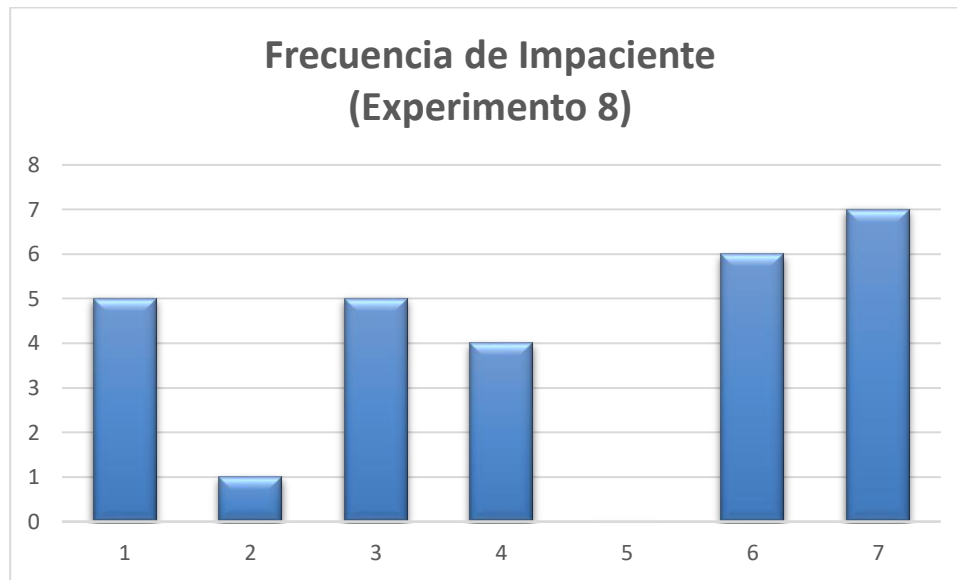


Figura 4.32. Gráfica de frecuencia para el experimento ocho (personalidad de impaciente).

En la Figura 4.33 y 4.34 se puede apreciar la correlación que existe entre la personalidad de calmado (experimento nueve) con respecto a las demás, siendo social y paciente las que se encuentran mayormente correlacionadas de acuerdo con las percepciones de los participantes.

Attribut...	Desinfo...	Distant...	Impacie...	Desesp...	Alterad...	Informa...	Pacient...	Calmad...	Social (...)	Ordena...
Desinfor...	1	0.376	-0.044	-0.066	0.181	0.064	0.505	0.623	0.701	0.302
Distante ...	0.376	1	0.296	0.069	0.241	-0.019	0.058	0.172	0.189	0.019
Impacie...	-0.044	0.296	1	0.661	0.497	-0.087	-0.202	-0.254	-0.192	-0.185
Desesp...	-0.066	0.069	0.661	1	0.555	0.029	-0.232	-0.329	-0.095	-0.178
Alterado ...	0.181	0.241	0.497	0.555	1	-0.247	0.038	-0.074	-0.005	-0.182
Informad...	0.064	-0.019	-0.087	0.029	-0.247	1	0.226	0.352	0.379	0.611
Paciente...	0.505	0.058	-0.202	-0.232	0.038	0.226	1	0.769	0.860	0.615
Calmad...	0.623	0.172	-0.254	-0.329	-0.074	0.352	0.769	1	0.844	0.698
Social (E...	0.701	0.189	-0.192	-0.095	-0.005	0.379	0.860	0.844	1	0.575
Ordenad...	0.302	0.019	-0.185	-0.178	-0.182	0.611	0.615	0.698	0.575	1

Figura 4.33. Matriz de correlación para el experimento nueve (personalidad de calmado).

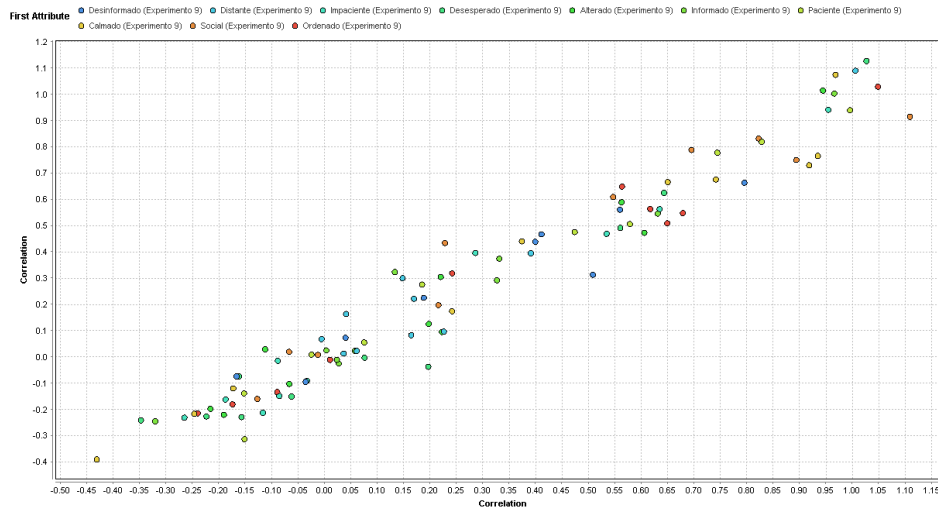


Figura 4.34. Gráfica de correlación para el experimento nueve (personalidad de calmado).

En la Figura 4.35 se aprecia que, entre las calificaciones más altas para la personalidad de calmado, se tiene un total de 10 votos, lo cual representa un 33.33% de la población encuestada.

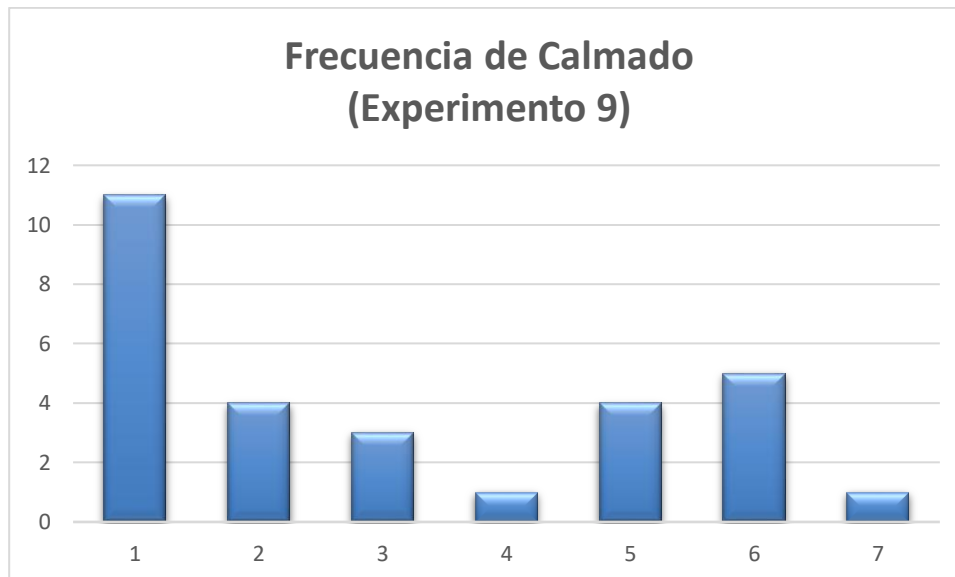


Figura 4.35. Gráfica de frecuencia para el experimento nueve (personalidad de calmado).

En la Figura 4.36 y 4.37 se puede apreciar la correlación que existe entre la personalidad de alterado (experimento diez) con respecto a las demás, siendo impaciente y desesperado las que se encuentran mayormente correlacionadas de acuerdo con las percepciones de los participantes.

Attribut...	Desinfo...	Distant...	Impacie...	Desesp...	Alterad...	Informa...	Pacient...	Calmad...	Social (...)	Ordena...
Desinfor...	1	0.614	0.642	0.549	0.568	-0.308	-0.237	-0.432	-0.365	-0.543
Distante ...	0.614	1	0.545	0.554	0.546	0.209	-0.051	-0.197	-0.249	-0.249
Impacie...	0.642	0.545	1	0.779	0.931	0.076	-0.263	-0.346	-0.199	-0.433
Desesp...	0.549	0.554	0.779	1	0.813	-0.027	-0.188	-0.321	-0.160	-0.367
Alterado ...	0.568	0.546	0.931	0.813	1	0.099	-0.173	-0.294	-0.127	-0.341
Informad...	-0.308	0.209	0.076	-0.027	0.099	1	0.508	0.575	0.512	0.564
Paciente...	-0.237	-0.051	-0.263	-0.188	-0.173	0.508	1	0.917	0.572	0.849
Calmad...	-0.432	-0.197	-0.346	-0.321	-0.294	0.575	0.917	1	0.632	0.839
Social (E...	-0.365	-0.249	-0.199	-0.160	-0.127	0.512	0.572	0.632	1	0.652
Ordenad...	-0.543	-0.249	-0.433	-0.367	-0.341	0.564	0.849	0.839	0.652	1

Figura 4.36. Matriz de correlación para el experimento diez (personalidad de alterado).

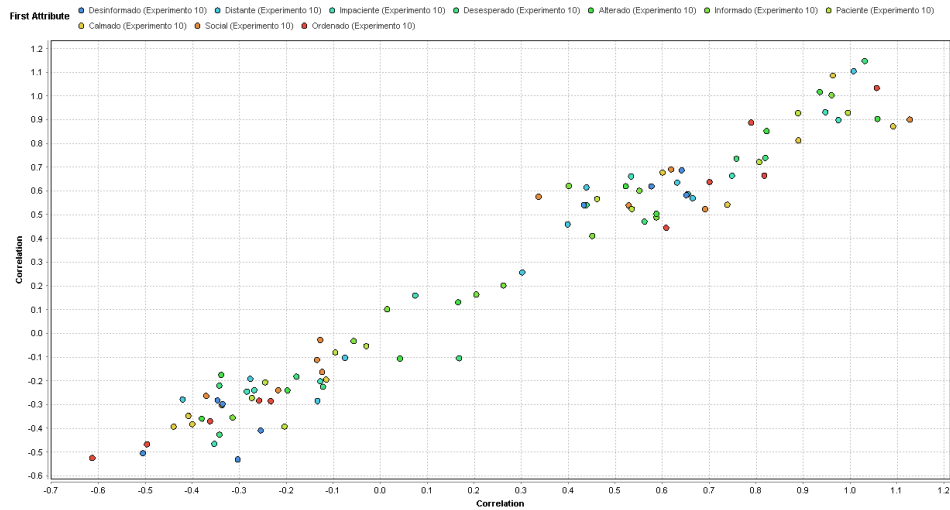


Figura 4.37. Gráfica de correlación para el experimento diez (personalidad de alterado).

En la Figura 4.38 se aprecia que, entre las calificaciones más altas para la personalidad de alterado, se tiene un total de 14 votos, lo cual representa un 46.66% de la población encuestada.

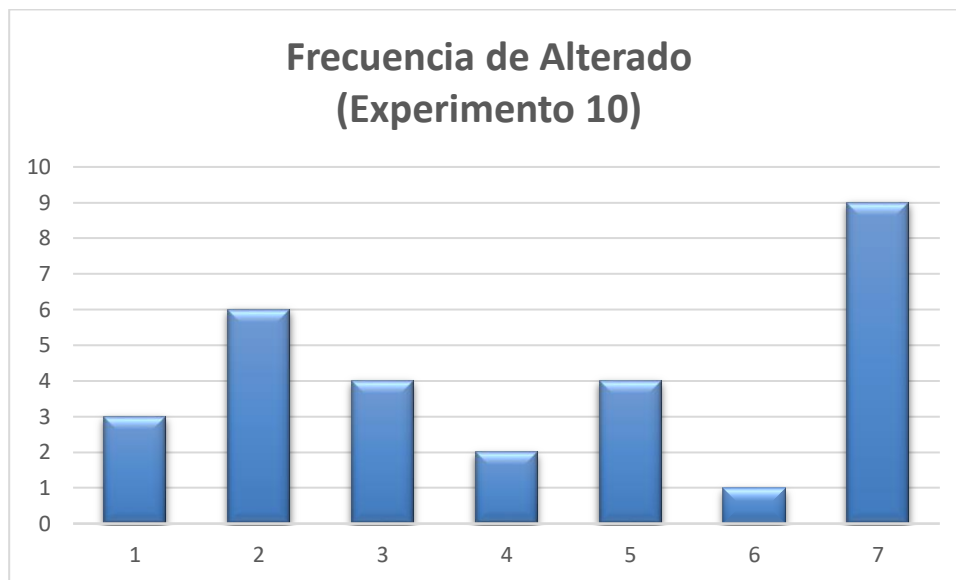


Figura 4.38. Gráfica de frecuencia para el experimento diez (personalidad de alterado).

Al analizar las posibles combinaciones de relaciones existentes producto de las correlaciones expuestas previamente, la personalidad de informado y desinformado quedan como grupos independientes de las demás personalidades, debido a que no tuvieron un coeficiente de correlación alto en comparación con otras personalidades ($\alpha \geq 0.7$). Quedando así, el primer grupo conformado por: desinformado; el segundo grupo conformado por: distante; el tercer grupo conformado por: informado, ordenado, calmado, social y paciente; y, por último, el cuarto grupo se encuentra conformado por: impaciente, desesperado y alterado. Los clústeres se pueden apreciar en la Tabla 4.2 con un umbral de correlación de 0.55 y en la Tabla 4.3 de igual manera, pero con un umbral de 0.7 (altamente correlacionado), la cual es la seleccionada para validar dicho modelo. Por consiguiente, el modelo queda validado con base a las percepciones de los participantes.

Tabla 4.2. Matriz de correlación con coeficiente de correlación aceptado de 0.55

Atributo	Desinformado	Distante	Impaciente	Desesperado	Alterado	Informado	Paciente	Calmado	Social	Ordenado
Desinformado	1	0.238	0.396	0.382	0.334	-0.144	0.073	-0.003	-0.100	-0.151
Distante	0.552	1	0.382	0.324	0.164	0.276	0.135	0.634	0.040	0.009
Impaciente	0.474	0.347	1	0.845	0.883	-0.120	-0.343	-0.180	0.155	-0.234
Desesperado	0.221	0.302	0.809	1	0.737	0.156	-0.360	-0.342	0.204	-0.020
Alterado	0.568	0.546	0.931	0.813	1	0.099	-0.173	-0.294	-0.127	-0.341
Informado	-0.207	-0.042	0.101	0.082	0.027	1	0.543	0.301	0.203	0.337
Paciente	-0.087	0.107	-0.318	-0.158	-0.269	0.810	1	0.942	0.585	0.894
Calmado	0.623	0.172	-0.254	-0.329	-0.074	0.352	0.769	1	0.844	0.698
Social	0.178	0.336	0.385	0.238	0.273	0.402	0.266	0.425	1	0.568
Ordenado	-0.158	0.327	-0.222	-0.242	-0.083	0.599	0.703	0.718	0.568	1

Tabla 4.3. Matriz de correlación con coeficiente de correlación aceptado de 0.7

Atributo	Desinformado	Distante	Impaciente	Desesperado	Alterado	Informado	Paciente	Calmado	Social	Ordenado
Desinformado	1	0.238	0.396	0.382	0.334	-0.144	0.073	-0.003	-0.100	-0.151
Distante	0.552	1	0.382	0.324	0.164	0.276	0.135	0.634	0.040	0.009
Impaciente	0.474	0.347	1	0.845	0.883	-0.120	-0.343	-0.180	0.155	-0.234
Desesperado	0.221	0.302	0.809	1	0.737	0.156	-0.360	-0.342	0.204	-0.020
Alterado	0.568	0.546	0.931	0.813	1	0.099	-0.173	-0.294	-0.127	-0.341
Informado	-0.207	-0.042	0.101	0.082	0.027	1	0.543	0.301	0.203	0.337
Paciente	-0.087	0.107	-0.318	-0.158	-0.269	0.810	1	0.942	0.585	0.894
Calmado	0.623	0.172	-0.254	-0.329	-0.074	0.352	0.769	1	0.844	0.698
Social	0.178	0.336	0.385	0.238	0.273	0.402	0.266	0.425	1	0.568
Ordenado	-0.158	0.327	-0.222	-0.242	-0.083	0.599	0.703	0.718	0.568	1

4.3. Experimentos de comparativas entre el algoritmo propuesto y A*

Los experimentos son realizados tomando en cuenta los k valores correspondientes al resultado de los clústeres, donde cada clúster representa un conjunto de factores de personalidad provenientes del modelo *OCEAN*. Cada experimento se ocupa 30 simulaciones para cada clúster y valores fijos como semilla en la posición inicial del agente. Se tienen las cinco dimensiones de *OCEAN*, las combinaciones que arroja esta técnica incluyen combinaciones entre las variables como se puede observar en la Tabla 4.4. Debido a que se considera en Ψ^* solamente una variable a la vez, las combinaciones de experimentos se reducirían solamente cuando se encuentra una de las variables activa en el experimento.

Tabla 4.4. DOE OCEAN

Prueba	Personalidad (clúster)	A* distancia promedio	Ψ^* distancia promedio	A* tiempo promedio	Ψ^* tiempo promedio
1	0 (Desesperado)	174.611	1955.314	126.5297	1416.894
2	1 (distante)	174.611	240.098	126.5297	173.984
3	2 (informado, ordenado, calmado, social y paciente)	174.611	205.1717	126.5297	148.6751333
4	3 (impaciente, desesperado y alterado)	174.611	236.3657333	126.5297	171.2795

Capítulo V. Análisis de resultados

En el capítulo cinco se analizan los resultados obtenidos de los diferentes experimentos planteados en el capítulo cuatro y así poder ver el comportamiento o tendencia de la calidad de las soluciones construidas por el simulador

Capítulo V

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos son analizados referentes a los experimentos realizados, con base en las diferentes instancias tomadas en cuenta en el capítulo previo y a partir de estos, se realiza un análisis estadístico en la sección 5.1 y en la sección 5.2. La sección 5.1 siendo referente al tiempo y distancia de evacuación, el porcentaje de heridos y fallecidos con base a la comparativa entre las metaheurísticas y heurísticas, la tasa de propagación de incendio y la cantidad de agentes en el escenario; y la sección 5.2, conformada por los resultados obtenidos entre la comparativa entre A^* y el algoritmo propuesto Ψ^* .

5.1 Comparativa entre metaheurísticas y heurísticas

El análisis de los datos se llevó a cabo en el software estadístico NCSS 2020 (**PASS, 2020**). La técnica ocupada para determinar si los datos muestrales tienen una distribución normal, fue la técnica de *Skewness*, con un parámetro de $\alpha = 0.20$. En caso de que las distribuciones del tiempo de recorrido, distancia del recorrido, el porcentaje de heridos y el porcentaje de fallecidos, cumplieren con una distribución normal, se realiza la prueba paramétrica estadística de análisis de varianza (*ANOVA*) de una vía y prueba *F*, debido a que la variable independiente es policotómica, la variable dependiente es cuantitativa y no existe relación entre las muestras (resultado de solución de acuerdo a la cantidad de agentes, a la tasa de propagación de incendio y al algoritmo de optimización ocupado). El valor seleccionado para el nivel de significancia es de $\alpha = 0.05$ por ser el valor más convencional (**Wasserstein, 2016**). Una vez analizados los datos, se verifica si el valor de *p* es menor al nivel de significancia.

En caso de que la muestra no posea una distribución normal, se realiza la prueba no paramétrica estadística de *Kruskal-Wallis*, debido a que la variable independiente es policotómica, la variable dependiente es cuantitativa y tampoco hay relación entre las muestras, con un valor de significancia de $\alpha = 0.05$.

En ambos casos expuestos previamente, se prosigue a realizar la comparación múltiple de *TukeyKramer* y poder visualizar la diferencia estadística entre las medias de las variables

independientes (cantidad de agentes en la escena, tasa de propagación de incendio y algoritmo de optimización). Los datos arrojaron un nivel de confiabilidad del 95%.

Evidencia de pruebas de hipótesis

En la presente sección son mostradas las pruebas de hipótesis realizadas para las diferentes cantidades de agentes, tasas de propagación de incendio y algoritmo de optimización ocupado, emitido por el software estadístico NCSS 2020, donde la mayoría se encuentran en la sección de anexos del documento. A continuación, se muestran los resultados más significativos para la comprobación de las hipótesis planteadas.

5.2 Comparativa entre algoritmos en tiempos de evacuación

En la Figura 5.1 se puede visualizar las medias según el algoritmo de optimización (A^* , ACO y CAEP) siendo los valores de las medias 57.8, 124.7 y 71.8 respectivamente, mostrando como resultado que el tiempo de evacuación es estadísticamente diferente de cada grupo conformado por los algoritmos de optimización. Por otro lado, se pueden apreciar datos atípicos en la Figura 5.1.

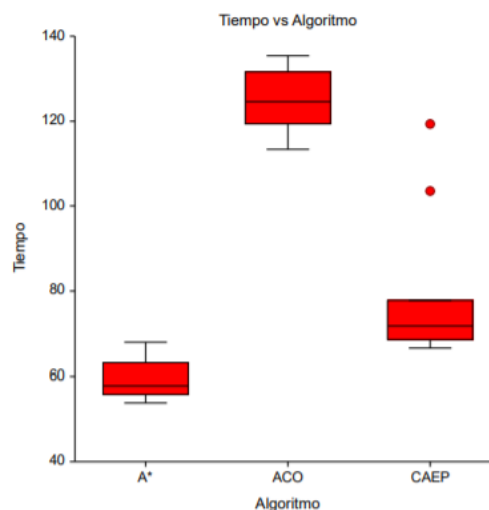


Figura 5.1. Media del tiempo de evacuación en función del algoritmo de optimización.

5.3 Comparativa entre A^* y Ψ^*

En la Figura 5.2 se puede visualizar las medias según el algoritmo de optimización (A^* y Ψ^*) siendo los valores de las medias 126.5 y 182.7 respectivamente para el clúster uno y, 126.5 y 182.5 respectivamente para el clúster tres, mostrando como resultado que el tiempo de evacuación es estadísticamente diferente de cada grupo conformado por los algoritmos de optimización. Por otro lado, se pueden apreciar datos atípicos en la Figura 5.2.

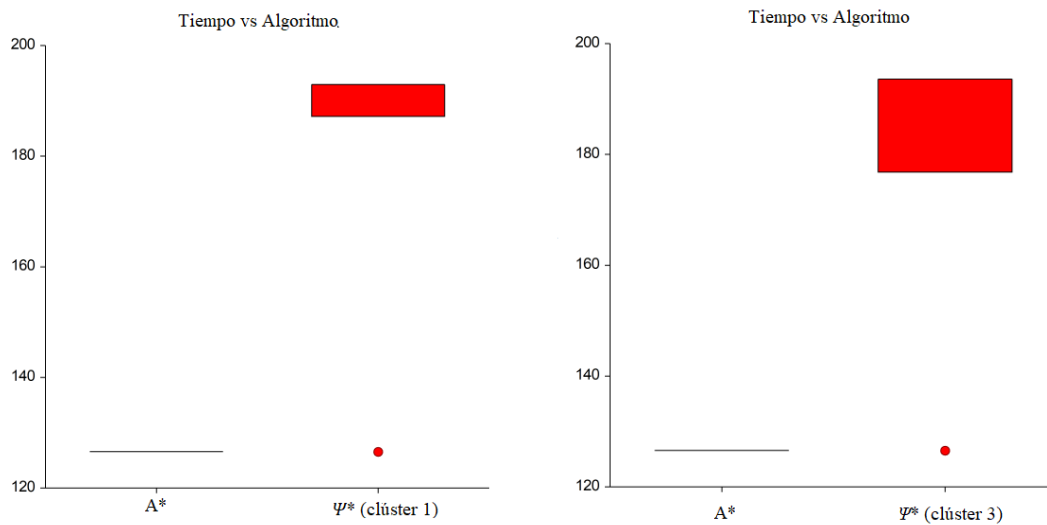


Figura 5.2. Media del tiempo de evacuación en función del algoritmo de optimización.

Conclusiones y trabajo futuro

En la presente sección son contempladas las observaciones respecto a la problemática, retomando el análisis de resultados. Por consiguiente, se determina si las hipótesis se cumplen y al mismo tiempo poder definir posibles trabajos futuros para extender el alcance de esta investigación.

CONCLUSIONES

Se puede concluir que, mientras más grande sea la cantidad de personas encontradas en la planta baja de un edificio, que en promedio serían alrededor de 150 personas conviviendo al mismo tiempo, es mayor la tendencia de que se incremente el porcentaje de personas heridas, debido a que el espacio físico que ocupan dentro del piso es más poblado, y esto tiene como consecuencia que aumente la probabilidad de tener personas cercanas al punto de ignición, colocadas de manera estocástica en la escena. Expuesto esto, se puede concluir que, al no tener las suficientes salidas de evacuación, es un problema potencial que se deber atender, en virtud de que no son suficientes para garantizar la seguridad de las personas, y por tanto deben implementarse las medidas necesarias para evitar cuellos de botellas que retrasen la evacuación de personas en caso de un siniestro.

Por otro lado, mediante la Figura 5.1 se pudo observar que, indiferentemente de la cantidad de agentes en la escena y tomando en cuenta los diferentes tipos de variables independientes como son el resultado de solución de acuerdo a la cantidad de agentes, la tasa de propagación de incendio y al algoritmo de optimización ocupado, el algoritmo ocupado A^* satisface la condición de que siempre fue superior a los algoritmos ACO y $CAEP$, ya que, estadísticamente sus medias fueron diferentes y dicha diferencia detectada a través del método de Tukey-Kramer es significativa, siendo la media de A^* en tiempos estimados de evacuación con al menos un 20% de mejor solución que ACO y $CAEP$. Esto puede indicar mayores distancias para evacuar en un escenario donde se ocupe ACO o $CAEP$ debido a la aleatoriedad combinatorial utilizada en el grafo y que además se podrían realizar trayectorias no convenientes al momento de evacuar, por lo que tanto su distancia como el tiempo estimado de dicha evacuación tiende a aumentar. Se puede determinar que, el algoritmo A^* es más eficiente en incendios de edificios de una planta, debido a que es al menos 19% más rápido en comparación con ACO y algoritmos culturales, y da la solución óptima.

Por otro lado, en la Figura 5.2 se puede observar que, A^* siempre se encuentra calculando la ruta óptima de evacuación, por lo que la ruta arrojada siempre es la misma, debido a que se ocupa una semilla para el experimento (considerando una ubicación inicial dentro del escenario virtual). Por otro lado, el algoritmo Ψ^* efectivamente se encuentra perdiendo la optimalidad de la ruta, pero los valores de los hiper parámetros del modelo se encuentran validados y relacionados con los

factores de personalidad planteados, en base a la encuesta de percepciones realizada en línea. También es importante recalcar que, de las 10 personalidades que se pretendieron simular en un inicio correspondientes a los factores bipolares de las cinco dimensiones del modelo *OCEAN*, el sistema solo puede simular cuatro diferentes personalidades, ya que, con base a las percepciones obtenidas en la encuesta en línea, se formaron de forma natural clústeres o grupos debido a las semejanzas entre los adjetivos de los factores de personalidad mostrados en el simulador. Retomando la hipótesis dos, de que el tiempo estimado de evacuación resultante de un algoritmo de optimización basado en A^* , se ven afectados en al menos un 10% del tiempo total de recorrido, por multitudes heterogéneas de personalidad distante e impaciente en incendios de edificios de una planta, a través de los resultados mostrados en la Figura 5.2, se ven afectados los tiempos de recorrido en un 27% y 26.13% respectivamente para ambos clústeres. Por lo que, queda comprobada la hipótesis uno con lo anteriormente expuesto y los objetivos planteados fueron exitosamente logrados.

TRABAJOS FUTUROS

Una vez analizado el comportamiento del algoritmo, se puede realizar en trabajos futuros, la entrada de datos de factores de personalidad mediante un mapeo que involucre los 10 tipos de adjetivos de personalidad propuestos en el presente en el trabajo, pero sin ser booleanos, y posiblemente definir una ecuación estructural que pueda involucrar dichos factores en un intervalo normalizado, y que dichos factores de personalidad puedan ser percibidos de manera independiente con base a una encuesta aplicada a participantes en línea.

Otro trabajo futuro tomado en cuenta es la incorporación de agentes guía de evacuación, quienes tengan la posibilidad de guiar el recorrido a los puntos de reunión a ciertos agentes encontrados en determinada área cercana a éstos. Así como también, la inclusión de un modelo donde los agentes puedan perder la memoria a partir del pánico que contengan en determinada instancia de tiempo, a partir de una función de decaimiento como, por ejemplo, utilizar la metaheurística de *Recocido Simulado*.

Para terminar, también se propone como trabajo futuro que a partir de un sistema de tracking, se tenga como entrada al sistema, un video de caminantes en un siniestro y dependiendo de las rutas que ocupan para evacuar, éstas se puedan mapear a los adjetivos de personalidad encontrados en el

algoritmo Ψ^* y así, categorizar la población en un sistema de video vigilancia en tiempo real de lugares públicos utilizando redes convolucionales artificiales.

Anexos y referencias bibliográficas.

A continuación, se presentan una serie de anexos complementarios de la simulación implementada, junto con las referencias bibliográficas fundamentales para llevar a cabo este proyecto.

REFERENCIAS

Almeida, João & Rossetti, Rosaldo & Coelho, António. (2013). Crowd Simulation Modeling Applied to Emergency and Evacuation Simulations using Multi-Agent Systems.

Altay E.V., Alatas B. (2019) Performance Comparisons of Socially Inspired Metaheuristic Algorithms on Unconstrained Global Optimization. In: Bhatia S., Tiwari S., Mishra K., Trivedi M. (eds) Advances in Computer Communication and Computational Sciences. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 759. Springer, Singapore

Amarbir Singh. (2016). A Review on Algorithms Used to Solve Multiple Travelling Salesman Problem. International Research Journal of Engineering and Technology(IRJET).

Anandkumar Prakasam, Nickolas Savarimuthu. (2016). Metaheuristic algorithms and probabilistic behaviour: a comprehensive analysis of Ant Colony Optimization and its variants. Artif. Intell. Rev. 45(1): 97-130.

Asuero, A. G., Sayago, A., & González, A. G. (2006). The Correlation Coefficient: An Overview. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 36(1), 41–59. doi:10.1080/10408340500526766

Başak, A. E., Güdükbay, U., & Durupınar, F. (2018). Using real life incidents for creating realistic virtual crowds with data-driven emotion contagion. Computers & Graphics, 72, 70–81. doi:10.1016/j.cag.2018.02.004

Brummi, Stentz. (1996). Dynamic Mission Planning for Multiple Mobile Robots. Conference Paper, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation 3:2396 – 2401.

Brummi, Stentz. (1998). GRAMMPS: A Generalized Mission Planner for Multiple Mobile Robots In Unstructured Environments. Conference Paper, Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation 2:1564 - 1571

Coello Coello, C. A., & Becterra, R. L. (2004). Efficient evolutionary optimization through the use of a cultural algorithm. *Engineering Optimization*, 36(2), 219–236. doi:10.1080/03052150410001647966

Coloni, Alberto & Dorigo, Marco & Maniezzo, Vittorio. (1991). Distributed Optimization by Ant Colonies. *Proceedings of the First European Conference on Artificial Life*.

Crispín Zavala Díaz, José Alberto Hernández Aguilar, Nodari Vakhania. (2014). Aplicaciones modernas de optimización, la experiencia entre cuerpos académicos.

Dixit A., Kumar S., Pant M., Bansal R. (2019). CA-DE: Hybrid Algorithm Based on Cultural Algorithm and DE. In: Tanveer M., Pachori R. (eds) *Machine Intelligence and Signal Analysis. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 748. Springer, Singapore.

Dorigo, M y Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. Massachusetts: MIT Press.

Durupinar, Funda & Allbeck, Jan & Pelechano, Nuria & Badler, Norman. (2008). Creating crowd variation with the OCEAN personality model. 2. 1217-1220. 10.1145/1402821.1402835.

Fu, L., Song, W., Lv, W., & Lo, S. (2014). Simulation of emotional contagion using modified SIR model: A cellular automaton approach. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 405, 380–391. doi:10.1016/j.physa.2014.03.043

G. Gutin, A. Yeo, and A. Zverovich. (2002). Traveling salesman should not be greedy: domination analysis of TSP greedy-type heuristics. *Discrete Appl. Math.*, to appear. 117:1-3.

G. Gutin. (1988). On the efficiency of a local algorithm for solving the travelling salesman problem. *Autom. Remote Control*, 49(11):1514–1519.

Gaertner, D., & Clark, K.L. (2005). On Optimal Parameters for Ant Colony Optimization Algorithms. *IC-AI*.

Garey, M. and D. Johnson. 1979. A Guide to the Theory of NP-Completeness. Computers and Intractability. ISBN 0-7167-1045-5

Goldberg, L. R. (1990). An alternative “description of personality”: The Big-Five factor structure. *Journal of Personality and Social Psychology*, 59(6), 1216–1229. doi:10.1037/0022-3514.59.6.1216

Hart, P. E.; Nilsson, N. J.; Raphael, B. (1968). "A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths". *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*. SSC4. 4 (2): 100–107. doi:10.1109/TSSC.1968.300136

Helbing, D., & Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51(5), 4282–4286. doi:10.1103/physreve.51.4282

Hernández Encinas, A., Hernández Encinas, L., Hoya White, S., Martín del Rey, A., & Rodríguez Sánchez, G. (2007). Simulation of forest fire fronts using cellular automata. *Advances in Engineering Software*, 38(6), 372–378. doi:10.1016/j.advengsoft.2006.09.002

K Bharathi, C Vijayalakshmi. (2016). A Framework for the Design and Analysis of an Evolutionary Algorithm for Multi Travelling Salesman Problem. *Indian Journal of Science and Technology* 9:48.

Kapadia, Mubbasir & Pelechano, Nuria & Allbeck, Jan & Badler, Norman. (2015). Virtual Crowds: Steps Toward Behavioral Realism. 10.2200/S00673ED1V01Y201509CGR020.

Karafyllidis, I., & Thanailakis, A. (1997). A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling*, 99(1), 87–97. doi:10.1016/s0304-3800(96)01942-4

Kuo, H. C., & Lin, C. H. (2013). Cultural Evolution Algorithm for Global Optimizations and its Applications. *Journal of Applied Research and Technology*, 11(4), 510–522. doi:10.1016/s1665-6423(13)71558-x

Kurant, M., Markopoulou, A., & Thiran, P. (2010). On the bias of BFS (Breadth First Search). 2010 22nd International Teletraffic Congress (ITC 22). doi:10.1109/itc.2010.5608727

Lu Tan & Mingyuan Hu, & Hui Lin. (2015). Agent-based simulation of building evacuation: Combining human behavior with predictable spatial accessibility in a fire emergency. *Information Sciences*. 295. 10.1016/j.ins.2014.09.029.

Mannor, S., Jin, X., Han, J., Jin, X., Han, J., Jin, X., ... Zhang, X. (2011). K-Means Clustering. *Encyclopedia of Machine Learning*, 563–564. doi:10.1007/978-0-387-30164-8_425

Matteo Fischetti, Juan-José Salazar-Gonzalez, Paolo Toth. (2006). The Generalized Traveling Salesman and Orienteering Problems. *The Traveling Salesman Problem and Its Variations*, pp.609-662 3011.

Norman L. Biggs, E. Keith Lloyd, and Robin J. Wilson. (1976). *Graph Theory 1736-1936*. ISBN: 9780198539162

Ondřej Míča (2015). Comparison of metaheuristic methods by solving travelling salesman problem. *The International Scientific Conference INPROFORUM*.

PASS 2020 Power Analysis and Sample Size Software (2020). NCSS, LLC. Kaysville, Utah, USA, ncss.com/software/pass.

Pearson, R. G. (1986). Absolute electronegativity and hardness correlated with molecular orbital theory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 83(22), 8440–8441. doi:10.1073/pnas.83.22.8440

Pelechano, Nuria & Allbeck, Jan & Badler, Norman. (2007). Controlling Individual Agents in High-Density Crowd Simulation. *Proc. Symp. Computer Animation*. 2007. 99-108. 10.1145/1272690.1272705.

Pelechano, Nuria & Badler, Norman. (2006). Improving the Realism of Agent Movement for High Density Crowd Simulation.

Pelechano, N., O'Brien, K., Silverman, B., Badler, N.: Crowd simulation incorporating agent psychological models, roles and communication. First International Workshop on Crowd Simulation. 21–30 (2005)

Pelechano, Nuria & Slater, Mel. (2019). Realistic Responses to Virtual Crowds.

Smith DR, Snell WE Jr. (1996). Goldberg's bipolar measure of the big-five personality dimensions: reliability and validity. *European Journal of Personality* 10: 283-299.

Richard C. Rothermel. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels.

Richard C. Rothermel. (1983). How to predict the spread and intensity of forest and range fires.

Robert G. Reynolds, William Sverdluk. 1994. Problem Solving Using Cultural Algorithms. *International Conference on Evolutionary Computation* 645-650

Ronald L. Wasserstein & Nicole A. Lazar. (2016) The ASA's Statement on p-Values: Context, Process, and Purpose, *The American Statistician*, 70:2, 129-133, DOI: 10.1080/00031305.2016.1154108

Ryan, J.L., Bailey, T.G., Moore, J.T., and Carlton, W.B. (1998). Reactive tabu search in unmanned aerial reconnaissance simulations. In *Proceedings of the 30th conference on Winter simulation*, 873–880. IEEE Computer Society Press.

Shekhawat, A., Poddar, P., & Boswal, D. (2009). Ant colony Optimization Algorithms: Introduction and Beyond. Retrieved from Indian Institute of Technology Bombay website: http://mat.uab.cat/~alseda/MasterOpt/ACO_Intro.pdf

Smith R., Deborah & Snell, William. (1996). Goldberg's bipolar measure of the Big-Five personality dimensions: Reliability and validity. *European Journal of Personality*. 10. 283 - 299.

T. Belkas. (2006). The multiple traveling salesman problem: An overview of formulations and solution procedures. *Omega* 34(3):209-219.

T. Ramadhani, G. F. Hertono, and B. D. Handari. (2017). An Ant Colony Optimization algorithm for solving the fixed destination multi-depot multiple traveling salesman problem with non-random parameters. *AIP Conference Proceedings* 1862, 030123.

Wang, J., Lo, S., Sun, J., Wang, Q., & Mu, H. (2012). Qualitative simulation of the panic spread in large-scale evacuation. *SIMULATION*, 88(12), 1465–1474.

Wong, Sai Keung & Wang, Yu-Shuen & Tang, Pao-Kun & Tsai, Tsung-Yu. (2017). Optimized evacuation route based on crowd simulation. *Computational Visual Media*. 3. 1-19. 10.1007/s41095-017-0081-9.

Yeeply. (2016). El desarrollo de juegos con la herramienta Unity 3D. website: <https://www.yeeply.com/blog/desarrollo-de-juegos-con-unity-3d/>.

Yesodha, Amudha. (2015). A Study on Bio-Inspired Metaheuristics for Solving Vehicle Routing Problem. *Indian Journal of Science and Technology* 8(25).

Yu, Z., Jinhai, L., Guochang, G., Rubo, Z., Haiyan, Y. 2002. An implementation of evolutionary computation for path planning of cooperative mobile robots. *Proceedings of the fourth world congress on intelligent control and automation*. 3, 1798-1802.

APÉNDICE A

Tests of the Normality of Residuals Assumption

Normality Attributes	Test Value	Prob Level	Reject Normality? ($\alpha=0.20$)
Skewness	1.0208	0.30733	No
Kurtosis	-4.5534	0.00001	Yes
Skewness and Kurtosis (Omnibus)	21.7753	0.00002	Yes

Tests of the Equality of Group Variances Assumption

Test Name	Test Value	Prob Level	Reject Equal Variances? ($\alpha=0.20$)
Brown-Forsythe (Data - Medians)	0.4081	0.74825	No
Levene (Data - Means)	0.7717	0.51841	No
Conover (Ranks of Deviations)	2.3801	0.49735	No
Bartlett (Likelihood Ratio)	0.4672	0.92604	No

En la Figura A.1 y A.2 se pueden visualizar las medias según cantidad de agentes (50, 100, 200 y 300), mostrando como resultado que el tiempo de evacuación es estadísticamente igual, indiferentemente la cantidad de agentes en la escena, debido a que poseen estadísticamente la misma media, lo que los hace similares.

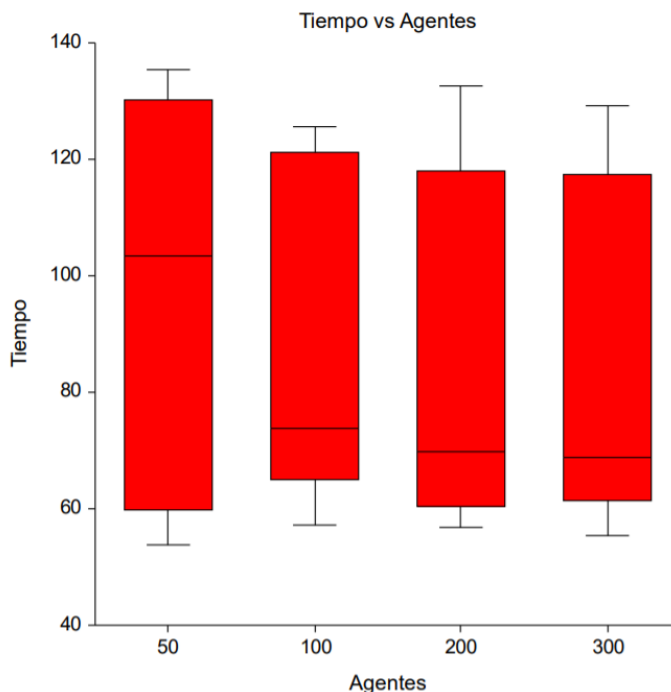


Figura A.1. Media de tiempo en función de cantidad de agentes

Analysis of Variance Table and F-Test

Model Term	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob Level	Reject Equal Means? ($\alpha=0.05$)	Power ($\alpha=0.05$)
Between (Agentes)	3	781.9304	260.6435	0.2790	0.84012	No	0.09754
Within (Error)	32	29892.78	934.1492				
Adjusted Total	35	30674.71					
Total	36						

Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks

Hypotheses

H0: All medians are equal.

H1: At least two medians are different.

Test Results

Method	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.05$)
Not Corrected for Ties	3	0.4895	0.92119	No
Corrected for Ties	3	0.4895	0.92119	No
Number Sets of Ties	0			
Multiplicity Factor	0			

Group Detail

Group	Count	Sum of Ranks	Mean Rank	Z-Value	Median
50	9	179.00	19.89	0.4567	103.4877
100	9	176.00	19.56	0.3471	73.7185
200	9	156.00	17.33	-0.3836	69.8532
300	9	155.00	17.22	-0.4201	68.86116

Normal Scores Tests

Hypotheses

H0: All group data distributions are the same.

H1: At least one group has observations that tend to be greater than those of the other groups.

Results

Test	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.20$)
Terry-Hoeffding - Expected Normal Scores	3	0.5289	0.91249	No
Van der Waerden - Normal Quantiles	3	0.5313	0.91196	No

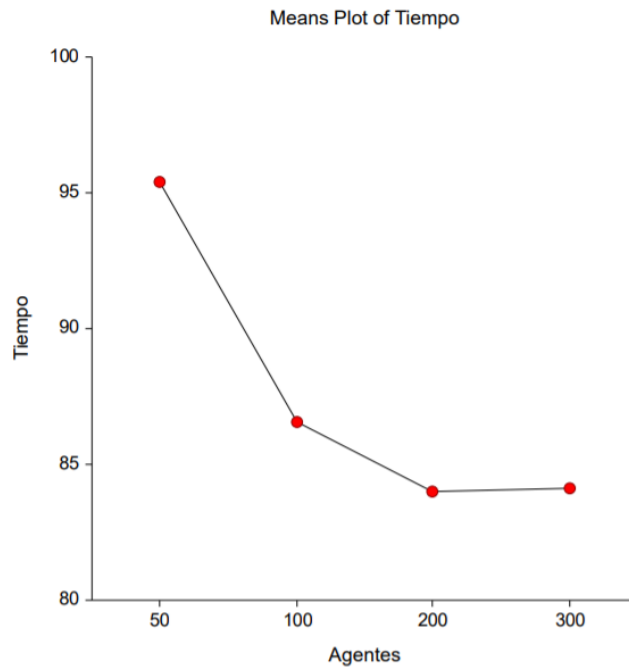


Figura A.2. Media de tiempo en función de cantidad de agentes

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: Tiempo
Term A: Agentes

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=32 MSE=934.1492 Critical Value=3.8316

Group	Count	Mean	Different From Groups
50	9	95.39523	
100	9	86.54317	
200	9	83.98978	
300	9	84.1369	

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

Distancia en función de cantidad de agentes

Tests of the Normality of Residuals Assumption

Normality Attributes	Test Value	Prob Level	Reject Normality? ($\alpha=0.20$)
Skewness	1.0208	0.30733	No
Kurtosis	-4.5534	0.00001	Yes
Skewness and Kurtosis (Omnibus)	21.7754	0.00002	Yes

Tests of the Equality of Group Variances Assumption

Test Name	Test Value	Prob Level	Reject Equal Variances? ($\alpha=0.20$)
Brown-Forsythe (Data - Medians)	0.4081	0.74825	No
Levene (Data - Means)	0.7717	0.51840	No
Conover (Ranks of Deviations)	2.3801	0.49735	No
Bartlett (Likelihood Ratio)	0.4672	0.92604	No

En la Figura A.3 y A.4 se pueden visualizar las medias según cantidad de agentes (50, 100, 200 y 300), mostrando como resultado que la distancia de evacuación es estadísticamente igual, indiferentemente la cantidad de agentes en la escena, debido a que poseen estadísticamente la misma media, lo que los hace similares.

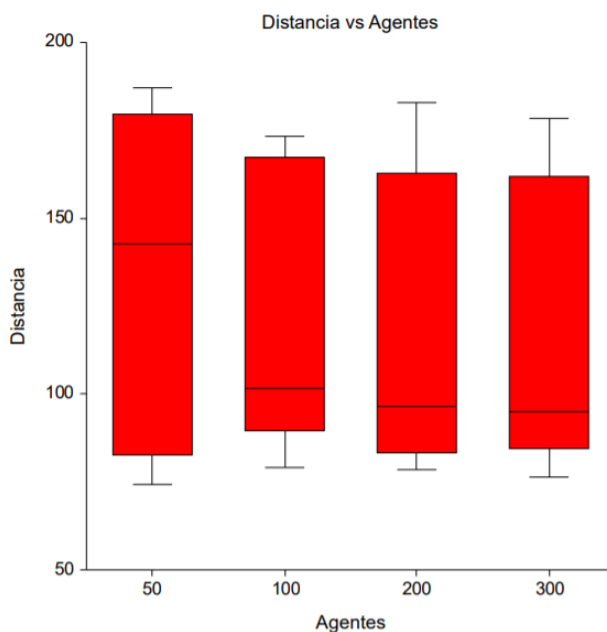


Figura A.3. Media de distancia en función de cantidad de agentes

Analysis of Variance Table and F-Test

Model Term	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob Level	Reject Equal Means? ($\alpha=0.05$)	Power ($\alpha=0.05$)
Between (Agentes)	3	1489.095	496.3649	0.2790	0.84012	No	0.09754
Within (Error)	32	56927.71	1778.991				
Adjusted Total	35	58416.81					
Total	36						

Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks

Hypotheses

H0: All medians are equal.

H1: At least two medians are different.

Test Results

Method	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.05$)
Not Corrected for Ties	3	0.4895	0.92119	No
Corrected for Ties	3	0.4895	0.92119	No
Number Sets of Ties	0			
Multiplicity Factor	0			

Group Detail

Group	Count	Sum of Ranks	Mean Rank	Z-Value	Median
50	9	179.00	19.89	0.4567	142.813
100	9	176.00	19.56	0.3471	101.7315
200	9	156.00	17.33	-0.3836	96.39748
300	9	155.00	17.22	-0.4201	95.02851

Normal Scores Tests

Hypotheses

H0: All group data distributions are the same.

H1: At least one group has observations that tend to be greater than those of the other groups.

Results

Test	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.20$)
Terry-Hoeffding - Expected Normal Scores	3	0.5289	0.91249	No
Van der Waerden - Normal Quantiles	3	0.5313	0.91196	No

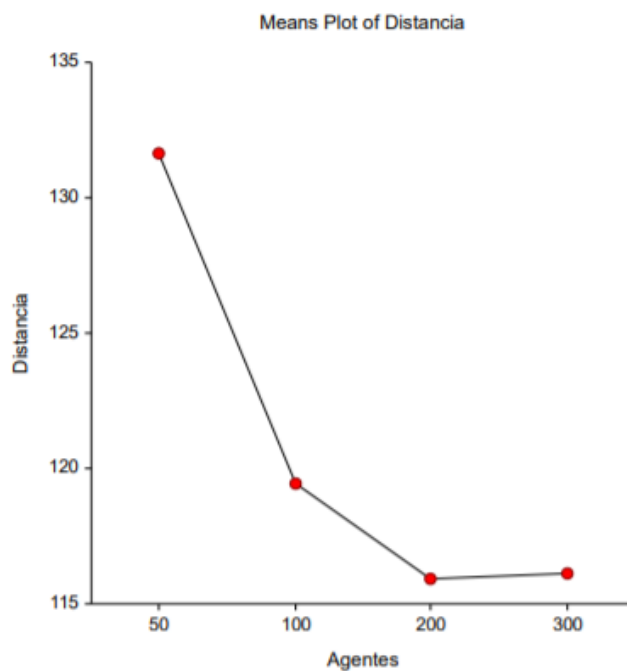


Figura A.4. Media de distancia en función de cantidad de agentes

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: Distancia
Term A: Agentes

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=32 MSE=1778.991 Critical Value=3.8316

Group	Count	Mean	Different From Groups
50	9	131.6454	
100	9	119.4296	
200	9	115.906	
300	9	116.109	

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

Heridos en función de la cantidad de agentes

Tests of the Normality of Residuals Assumption

Normality Attributes	Test Value	Prob Level	Reject Normality? ($\alpha=0.20$)
Skewness	0.7920	0.42836	No
Kurtosis	-2.5427	0.01100	Yes
Skewness and Kurtosis (Omnibus)	7.0923	0.02883	Yes

Tests of the Equality of Group Variances Assumption

Test Name	Test Value	Prob Level	Reject Equal Variances? ($\alpha=0.20$)
Brown-Forsythe (Data - Medians)	0.9419	0.43190	No
Levene (Data - Means)	2.0062	0.13285	Yes
Conover (Ranks of Deviations)	6.9066	0.07493	Yes
Bartlett (Likelihood Ratio)	2.9515	0.39917	No

En la Figura A.5 y A.6 se pueden visualizar las medias según cantidad de agentes (50, 100, 200 y 300), mostrando como resultado que el porcentaje de heridos es estadísticamente igual, indiferentemente la cantidad de agentes en la escena, debido a que poseen estadísticamente la misma media, lo que los hace similares.

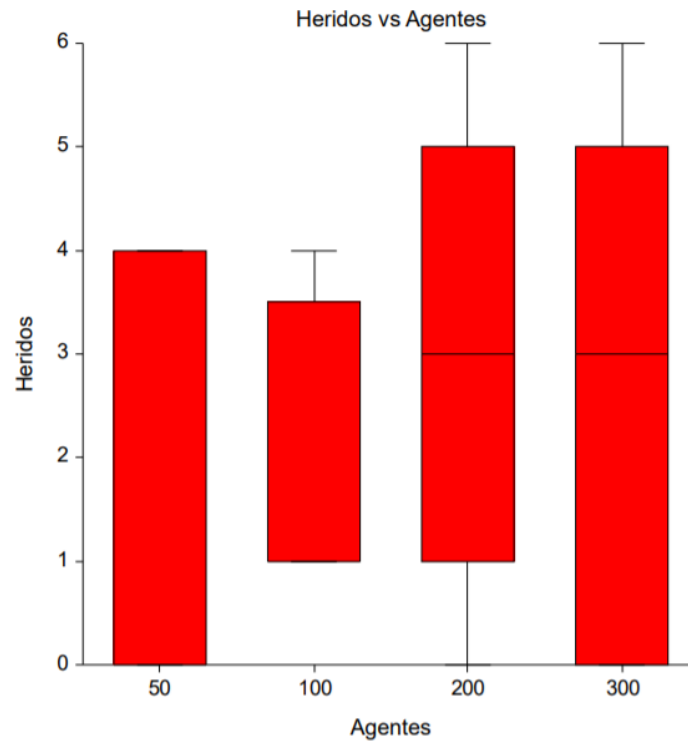


Figura A.5. Media de porcentaje de heridos en función de la cantidad de agentes

Analysis of Variance Table and F-Test

Model Term	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob Level	Reject Equal Means? ($\alpha=0.05$)	Power ($\alpha=0.05$)
Between (Agentes)	3	16.33333	5.444445	1.3110	0.28784	No	0.31556
Within (Error)	32	132.8889	4.152778				
Adjusted Total	35	149.2222					
Total	36						

Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks

Hypotheses

H0: All medians are equal.

H1: At least two medians are different.

Test Results

Method	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.05$)
Not Corrected for Ties	3	3.8774	0.27501	No
Corrected for Ties	3	4.0817	0.25277	No

Number Sets of Ties 5
 Multiplicity Factor 2334

Group Detail

Group	Count	Sum of Ranks	Mean Rank	Z-Value	Median
50	9	117.00	13.00	-1.8084	0
100	9	169.00	18.78	0.0913	1
200	9	202.50	22.50	1.3152	3
300	9	177.50	19.72	0.4019	3

Normal Scores Tests

Hypotheses

H0: All group data distributions are the same.

H1: At least one group has observations that tend to be greater than those of the other groups.

Results

Test	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.20$)
Terry-Hoeffding - Expected Normal Scores	3	4.7155	0.19386	No
Van der Waerden - Normal Quantiles	3	4.6456	0.19967	No

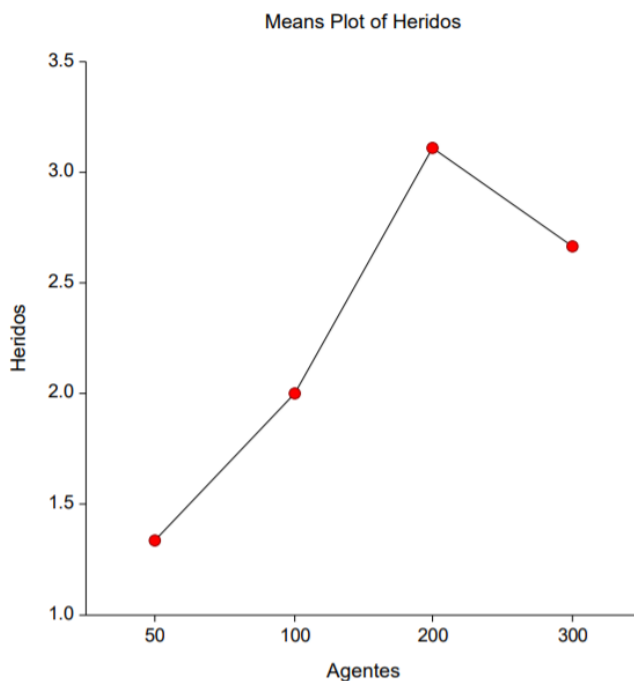


Figura A.6. Media de porcentaje de heridos en función de la cantidad de agentes

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: Heridos
Term A: Agentes

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=32 MSE=4.152778 Critical Value=3.8316

Group	Count	Mean	Different From Groups
50	9	1.333333	
100	9	2	
200	9	3.111111	
300	9	2.666667	

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

Fallecidos en función de la cantidad de agentes

Tests of the Normality of Residuals Assumption

Normality Attributes	Test Value	Prob Level	Reject Normality? ($\alpha=0.20$)
Skewness	4.8234	0.00000	Yes
Kurtosis	3.3535	0.00080	Yes
Skewness and Kurtosis (Omnibus)	34.5112	0.00000	Yes

Tests of the Equality of Group Variances Assumption

Test Name	Test Value	Prob Level	Reject Equal Variances? ($\alpha=0.20$)
Brown-Forsythe (Data - Medians)	0.0323	0.99206	No
Levene (Data - Means)	0.1685	0.91683	No
Conover (Ranks of Deviations)	8.8452	0.03142	Yes
Bartlett (Likelihood Ratio)	1.6181	0.65528	No

En la Figura A.7 y A.8 se pueden visualizar las medias según cantidad de agentes (50, 100, 200 y 300), mostrando como resultado que el porcentaje de fallecidos es estadísticamente igual, indiferentemente la cantidad de agentes en la escena, debido a que poseen estadísticamente la misma media, lo que los hace similares.

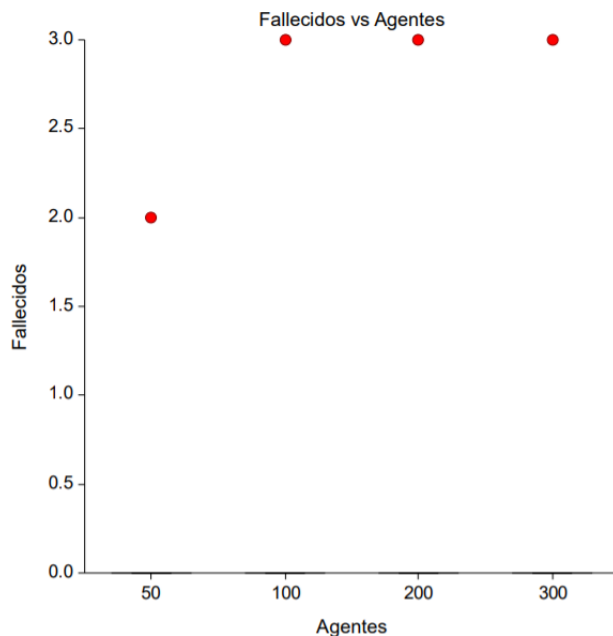


Figura A.7. Media de porcentaje de fallecidos en función de la cantidad de agentes

Analysis of Variance Table and F-Test

Model Term	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob Level	Reject Equal Means? ($\alpha=0.05$)	Power ($\alpha=0.05$)
Between (Agentes)	3	0.08333334	0.02777778	0.0323	0.99206	No	0.05508
Within (Error)	32	27.55556	0.8611111				
Adjusted Total	35	27.63889					
Total	36						

Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks

Hypotheses

H0: All medians are equal.

H1: At least two medians are different.

Test Results

Method	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.05$)
Not Corrected for Ties	3	0.0030	0.99996	No
Corrected for Ties	3	0.0101	0.99973	No
Number Sets of Ties	2			
Multiplicity Factor	32760			

Group Detail

Group	Count	Sum of Ranks	Mean Rank	Z-Value	Median
50	9	165.00	18.33	-0.0548	0
100	9	167.00	18.56	0.0183	0
200	9	167.00	18.56	0.0183	0
300	9	167.00	18.56	0.0183	0

Normal Scores Tests

Hypotheses

H0: All group data distributions are the same.

H1: At least one group has observations that tend to be greater than those of the other groups.

Results

Test	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.20$)
Terry-Hoeffding - Expected Normal Scores	3	0.0539	0.99673	No
Van der Waerden - Normal Quantiles	3	0.0446	0.99752	No

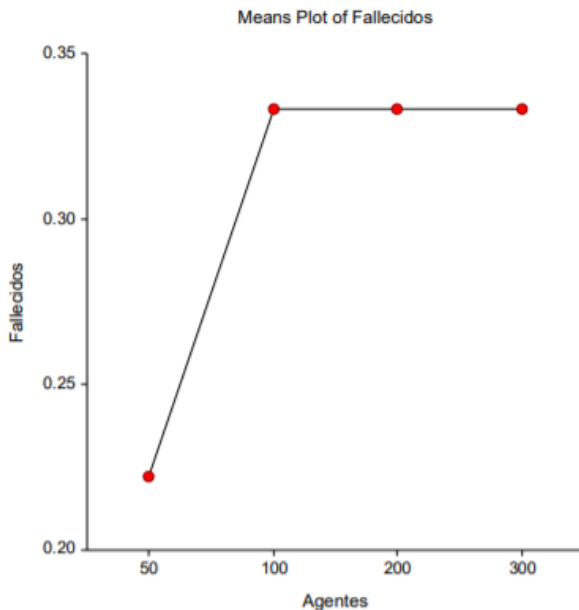


Figura A.8. Media de porcentaje de fallecidos en función de la cantidad de agentes

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: Fallecidos

Term A: Agentes

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=32 MSE=0.8611111 Critical Value=3.8316

Group	Count	Mean	Different From Groups
50	9	0.222222	
100	9	0.333333	
200	9	0.333333	
300	9	0.333333	

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

Tiempo en función de tasa de incendio

Tests of the Normality of Residuals Assumption

Normality Attributes	Test Value	Prob Level	Reject Normality? ($\alpha=0.20$)
Skewness	1.1641	0.24438	No
Kurtosis	-5.2180	0.00000	Yes
Skewness and Kurtosis (Omnibus)	28.5831	0.00000	Yes

Tests of the Equality of Group Variances Assumption

Test Name	Test Value	Prob Level	Reject Equal Variances? ($\alpha=0.20$)
Brown-Forsythe (Data - Medians)	0.3006	0.74236	No
Levene (Data - Means)	0.7200	0.49426	No
Conover (Ranks of Deviations)	2.1990	0.33304	No
Bartlett (Likelihood Ratio)	0.2264	0.89298	No

En la Figura A.9 y A.10 se pueden visualizar las medias según la tasa de incendio (bajo, medio y alto), mostrando como resultado que el tiempo es estadísticamente igual, indiferentemente la tasa de propagación de incendio en la escena, debido a que poseen estadísticamente la misma media, lo que los hace similares.

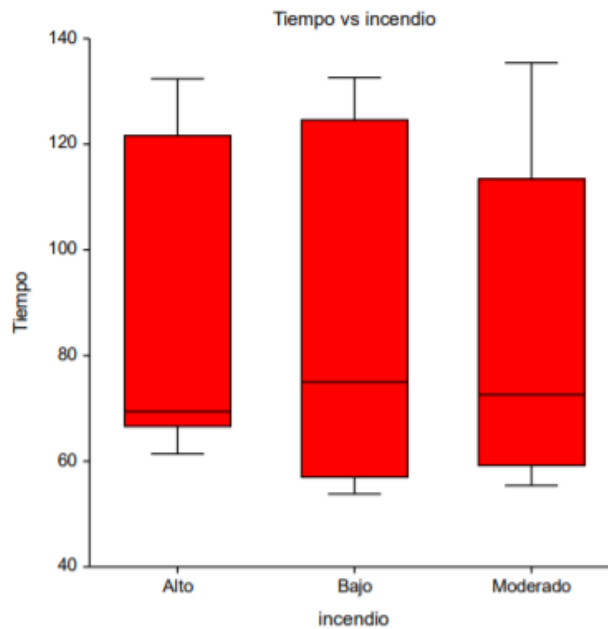


Figura A.9. Media de tiempo en función de la tasa de propagación de incendio

Analysis of Variance Table and F-Test

Model Term	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob Level	Reject Equal Means? ($\alpha=0.05$)	Power ($\alpha=0.05$)
Between (incendio)	2	46.99516	23.49758	0.0253	0.97502	No	0.05349
Within (Error)	33	30627.71	928.1124				
Adjusted Total	35	30674.71					
Total	36						

Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks

Hypotheses

H0: All medians are equal.

H1: At least two medians are different.

Test Results

Method	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.05$)
Not Corrected for Ties	2	0.1096	0.94667	No
Corrected for Ties	2	0.1096	0.94667	No
Number Sets of Ties	0			
Multiplicity Factor	0			

Group Detail

Group	Count	Sum of Ranks	Mean Rank	Z-Value	Median
Alto	12	231.00	19.25	0.3020	69.35718
Bajo	12	221.00	18.42	-0.0336	74.91183
Moderado	12	214.00	17.83	-0.2685	72.63509

Normal Scores Tests

Hypotheses

H0: All group data distributions are the same.

H1: At least one group has observations that tend to be greater than those of the other groups.

Results

Test	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.20$)
Terry-Hoeffding - Expected Normal Scores	2	0.2103	0.90018	No
Van der Waerden - Normal Quantiles	2	0.1974	0.90601	No

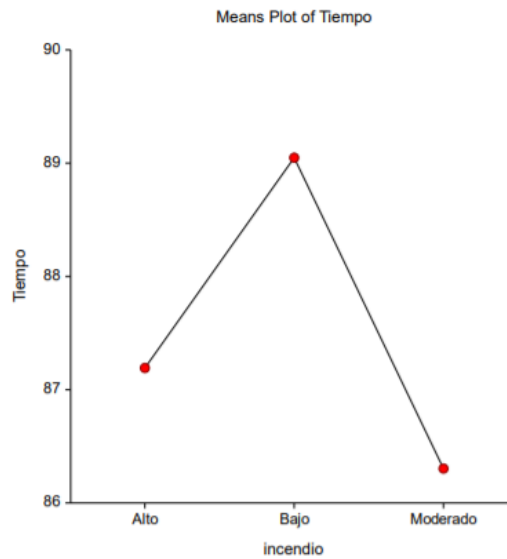


Figura A.10. Media de tiempo en función de la tasa de propagación de incendio

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: Tiempo
Term A: incendio

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=33 MSE=928.1124 Critical Value=3.4703

Group	Count	Mean	Different From Groups
Alto	12	87.19263	
Bajo	12	89.04907	
Moderado	12	86.30712	

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

Distancia en función de tasa de incendio

Tests of the Normality of Residuals Assumption

Normality Attributes	Test Value	Prob Level	Reject Normality? ($\alpha=0.20$)
Skewness	1.1641	0.24438	No
Kurtosis	-5.2180	0.00000	Yes
Skewness and Kurtosis (Omnibus)	28.5831	0.00000	Yes

Tests of the Equality of Group Variances Assumption

Test Name	Test Value	Prob Level	Reject Equal Variances? ($\alpha=0.20$)
Brown-Forsythe (Data - Medians)	0.3006	0.74236	No
Levene (Data - Means)	0.7200	0.49426	No
Conover (Ranks of Deviations)	2.1990	0.33304	No
Bartlett (Likelihood Ratio)	0.2264	0.89298	No

En la Figura A.11 y A.12 se pueden visualizar las medias según la tasa de incendio (bajo, medio y alto), mostrando como resultado que la distancia del recorrido de evacuación es estadísticamente igual, indiferentemente la tasa de propagación de incendio en la escena, debido a que poseen estadísticamente la misma media, lo que los hace similares.

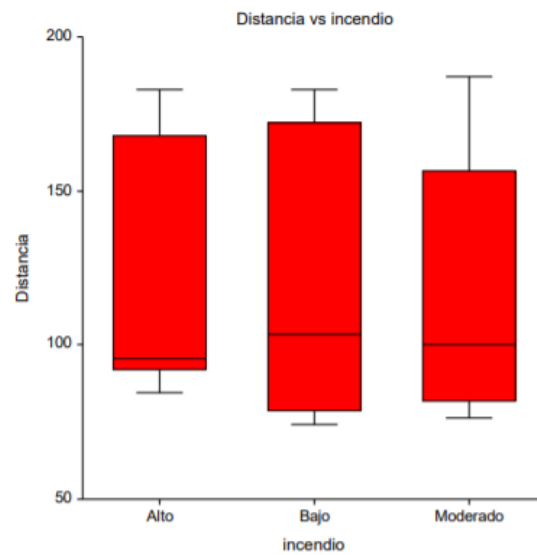


Figura A.11. Media de distancia en función de la tasa de propagación de incendio

Analysis of Variance Table and F-Test

Model Term	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob Level	Reject Equal Means? ($\alpha=0.05$)	Power ($\alpha=0.05$)
Between (incendio)	2	89.49608	44.74804	0.0253	0.97502	No	0.05349
Within (Error)	33	58327.31	1767.494				
Adjusted Total	35	58416.81					
Total	36						

Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks

Hypotheses

H0: All medians are equal.

H1: At least two medians are different.

Test Results

Method	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.05$)
Not Corrected for Ties	2	0.1096	0.94667	No
Corrected for Ties	2	0.1096	0.94667	No
Number Sets of Ties	0			
Multiplicity Factor	0			

Group Detail

Group	Count	Sum of Ranks	Mean Rank	Z-Value	Median
Alto	12	231.00	19.25	0.3020	95.713
Bajo	12	221.00	18.42	-0.0336	103.3784
Moderado	12	214.00	17.83	-0.2685	100.2365

Normal Scores Tests

Hypotheses

H0: All group data distributions are the same.

H1: At least one group has observations that tend to be greater than those of the other groups.

Results

Test	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.20$)
Terry-Hoeffding - Expected Normal Scores	2	0.2103	0.90018	No
Van der Waerden - Normal Quantiles	2	0.1974	0.90601	No

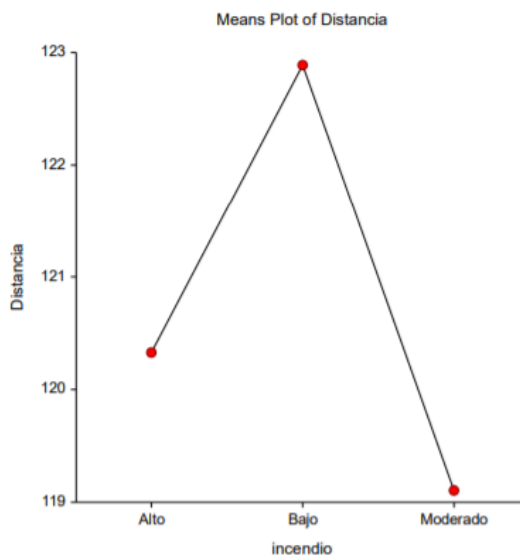


Figura A.12. Media de distancia en función de la tasa de propagación de incendio

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: Distancia
Term A: incendio

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=33 MSE=1767.494 Critical Value=3.4703

Group	Count	Mean	Different From Groups
Alto	12	120.3259	
Bajo	12	122.8877	
Moderado	12	119.1039	

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

Heridos en función de tasa de incendio

Tests of the Normality of Residuals Assumption

Normality Attributes	Test Value	Prob Level	Reject Normality? ($\alpha=0.20$)
Skewness	1.2098	0.22636	No
Kurtosis	-1.7342	0.08289	Yes
Skewness and Kurtosis (Omnibus)	4.4709	0.10694	Yes

Tests of the Equality of Group Variances Assumption

Test Name	Test Value	Prob Level	Reject Equal Variances? ($\alpha=0.20$)
Brown-Forsythe (Data - Medians)	0.0194	0.98076	No
Levene (Data - Means)	0.0117	0.98837	No
Conover (Ranks of Deviations)	1.3061	0.52045	No
Bartlett (Likelihood Ratio)	0.3371	0.84488	No

En la Figura A.13 y A.14 se pueden visualizar las medias según la tasa de incendio (bajo, medio y alto), mostrando como resultado que el porcentaje de heridos es estadísticamente igual, indiferentemente la tasa de propagación de incendio en la escena, debido a que poseen estadísticamente la misma media, lo que los hace similares.

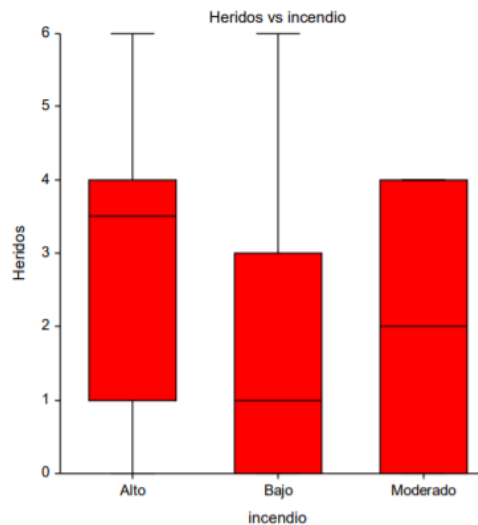


Figura A.13. Media de porcentaje de heridos en función de la tasa de propagación de incendio

Analysis of Variance Table and F-Test

Model Term	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob Level	Reject Equal Means? ($\alpha=0.05$)	Power ($\alpha=0.05$)
Between (incendio)	2	7.722222	3.861111	0.9005	0.41613	No	0.19196
Within (Error)	33	141.5	4.287879				
Adjusted Total	35	149.2222					
Total	36						

Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks

Hypotheses

H0: All medians are equal.

H1: At least two medians are different.

Test Results

Method	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.05$)
Not Corrected for Ties	2	2.4148	0.29898	No
Corrected for Ties	2	2.5421	0.28054	No
Number Sets of Ties	5			
Multiplicity Factor	2334			

Group Detail

Group	Count	Sum of Ranks	Mean Rank	Z-Value	Median
Alto	12	266.00	22.17	1.4765	3.5
Bajo	12	187.50	15.63	-1.1577	1
Moderado	12	212.50	17.71	-0.3188	2

Normal Scores Tests

Hypotheses

H0: All group data distributions are the same.

H1: At least one group has observations that tend to be greater than those of the other groups.

Results

Test	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.20$)
Terry-Hoeffding - Expected Normal Scores	2	2.5281	0.28251	No
Van der Waerden - Normal Quantiles	2	2.5346	0.28159	No

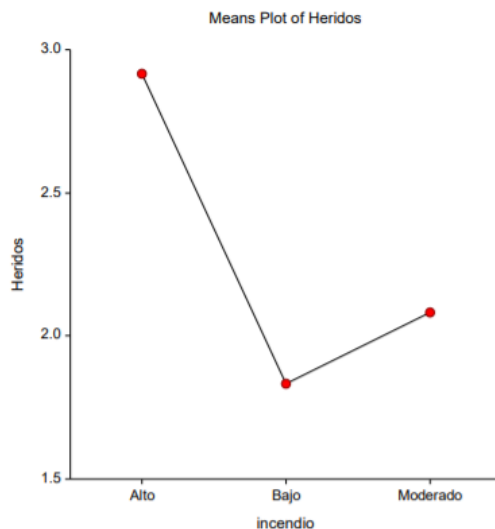


Figura A.14. Media de porcentaje de heridos en función de la tasa de propagación de incendio

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: Heridos
Term A: incendio

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=33 MSE=4.287879 Critical Value=3.4703

Group	Count	Mean	Different From Groups
Alto	12	2.916667	
Bajo	12	1.833333	
Moderado	12	2.083333	

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

Fallecidos en función de tasa de incendio

Tests of the Normality of Residuals Assumption

Normality Attributes	Test Value	Prob Level	Reject Normality? ($\alpha=0.20$)
Skewness	3.2512	0.00115	Yes
Kurtosis	2.3991	0.01643	Yes
Skewness and Kurtosis (Omnibus)	16.3263	0.00028	Yes

Tests of the Equality of Group Variances Assumption

Test Name	Test Value	Prob Level	Reject Equal Variances? ($\alpha=0.20$)
Brown-Forsythe (Data - Medians)	5.3028	0.01007	Yes
Levene (Data - Means)	65.9319	0.00000	Yes
Conover (Ranks of Deviations)	32.3781	0.00000	Yes
Bartlett (Likelihood Ratio)	-21.2570	1.00000	No

En la Figura A.15 y A.16 se pueden visualizar las medias según la tasa de incendio (bajo, medio y alto), mostrando como resultado que el porcentaje de fallecidos bajo la tasa de incendio alto es estadísticamente diferente de los grupos de tasa de propagación de incendio moderado y bajo. Por otro lado, la tasa de propagación moderado y bajo son iguales, debido a que poseen estadísticamente la misma media, lo que los hace similares.

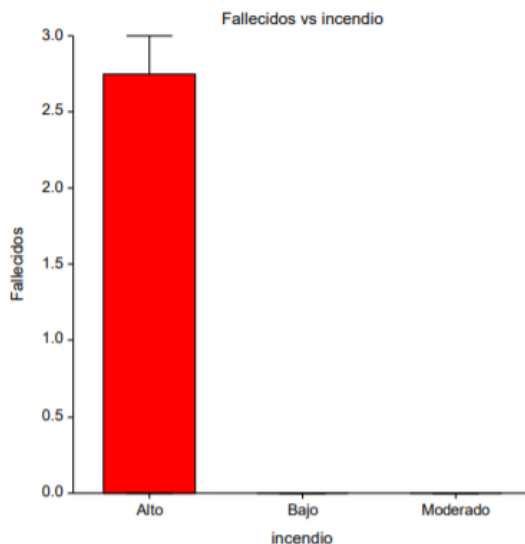


Figura A.15. Media de porcentaje de fallecidos en función de la tasa de propagación de incendio

Analysis of Variance Table and F-Test

Model Term	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob Level	Reject Equal Means? (α=0.05)	Power (α=0.05)
Between (incendio)	2	6.722222	3.361111	5.3028	0.01007	Yes	0.80158
Within (Error)	33	20.91667	0.6338384				
Adjusted Total	35	27.63889					
Total	36						

Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks

Hypotheses

H0: All medians are equal.

H1: At least two medians are different.

Test Results

Method	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? (α=0.05)
Not Corrected for Ties	2	2.5946	0.27327	No
Corrected for Ties	2	8.7273	0.01273	Yes

Number Sets of Ties 2

Multiplicity Factor 32760

Group Detail

Group	Count	Sum of Ranks	Mean Rank	Z-Value	Median
Alto	12	270.00	22.50	1.6108	0
Bajo	12	198.00	16.50	-0.8054	0
Moderado	12	198.00	16.50	-0.8054	0

Normal Scores Tests

Hypotheses

H0: All group data distributions are the same.

H1: At least one group has observations that tend to be greater than those of the other groups.

Results

Test	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.20$)
Terry-Hoeffding - Expected Normal Scores	2	8.6288	0.01337	Yes
Van der Waerden - Normal Quantiles	2	8.6496	0.01324	Yes

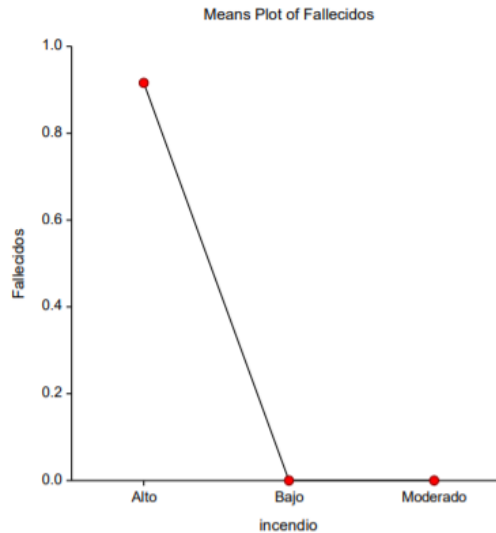


Figura A.16. Media de porcentaje de fallecidos en función de la tasa de propagación de incendio

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: Fallecidos

Term A: incendio

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=33 MSE=0.6338384 Critical Value=3.4703

Group	Count	Mean	Different From Groups
Alto	12	0.9166667	Bajo, Moderado
Bajo	12	0	Alto
Moderado	12	0	Alto

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

Tiempo en función de tasa del algoritmo

Tests of the Normality of Residuals Assumption

Normality Attributes	Test Value	Prob Level	Reject Normality? ($\alpha=0.20$)
Skewness	4.3084	0.00002	Yes
Kurtosis	3.6368	0.00028	Yes
Skewness and Kurtosis (Omnibus)	31.7881	0.00000	Yes

Tests of the Equality of Group Variances Assumption

Test Name	Test Value	Prob Level	Reject Equal Variances? ($\alpha=0.20$)
Brown-Forsythe (Data - Medians)	1.1180	0.33902	No
Levene (Data - Means)	3.2351	0.05212	Yes
Conover (Ranks of Deviations)	7.4502	0.02411	Yes
Bartlett (Likelihood Ratio)	16.3192	0.00029	Yes

En la Figura A.17 y A.18 se pueden visualizar las medias según el algoritmo de optimización (A*, ACO y CAEP), mostrando como resultado el tiempo de evacuación es estadísticamente diferente de cada grupo conformado por los algoritmos de optimización. Por otro lado, se pueden apreciar datos atípicos en la Figura A.17.

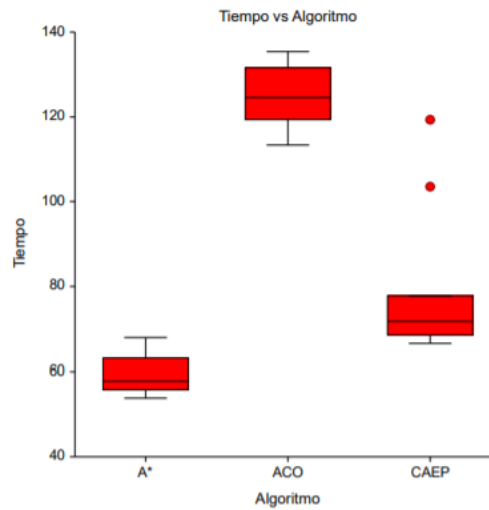


Figura A.17. Media del tiempo de evacuación en función del algoritmo de optimización.

Analysis of Variance Table and F-Test

Model Term	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob Level	Reject Equal Means? ($\alpha=0.05$)	Power ($\alpha=0.05$)
Between (Algoritmo)	2	26936.81	13468.4	118.9057	0.00000	Yes	1.00000
Within (Error)	33	3737.898	113.2697				
Adjusted Total	35	30674.71					
Total	36						

Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks

Hypotheses

H0: All medians are equal.

H1: At least two medians are different.

Test Results

Method	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.05$)
Not Corrected for Ties	2	30.0646	0.00000	Yes
Corrected for Ties	2	30.0646	0.00000	Yes
Number Sets of Ties	0			
Multiplicity Factor	0			

Group Detail

Group	Count	Sum of Ranks	Mean Rank	Z-Value	Median
A*	12	80.00	6.67	-4.7652	57.80221
ACO	12	363.00	30.25	4.7317	124.6697
CAEP	12	223.00	18.58	0.0336	71.80103

Normal Scores Tests

Hypotheses

H0: All group data distributions are the same.

H1: At least one group has observations that tend to be greater than those of the other groups.

Results

Test	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.20$)
Terry-Hoeffding - Expected Normal Scores	2	27.6138	0.00000	Yes
Van der Waerden - Normal Quantiles	2	28.0444	0.00000	Yes

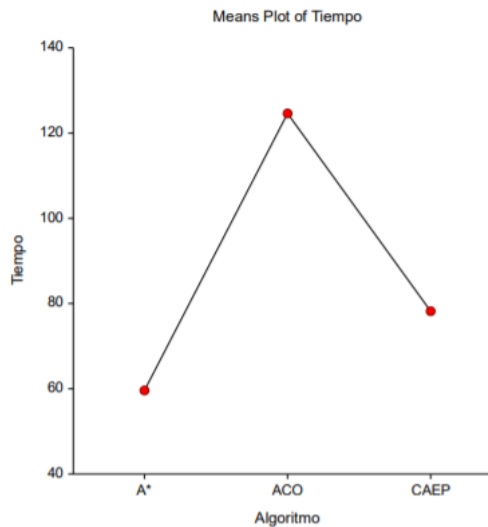


Figura A.18. Media del tiempo de evacuación en función del algoritmo de optimización.

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: Tiempo
Term A: Algoritmo

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=33 MSE=113.2697 Critical Value=3.4703

Group	Count	Mean	Different From Groups
A*	12	59.66757	ACO, CAEP
ACO	12	124.6937	A*, CAEP
CAEP	12	78.18758	A*, ACO

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

Distancia en función de tasa del algoritmo

Tests of the Normality of Residuals Assumption

Normality Attributes	Test Value	Prob Level	Reject Normality? ($\alpha=0.20$)
Skewness	4.3084	0.00002	Yes
Kurtosis	3.6368	0.00028	Yes
Skewness and Kurtosis (Omnibus)	31.7881	0.00000	Yes

Tests of the Equality of Group Variances Assumption

Test Name	Test Value	Prob Level	Reject Equal Variances? ($\alpha=0.20$)
Brown-Forsythe (Data - Medians)	1.1179	0.33902	No
Levene (Data - Means)	3.2351	0.05212	Yes
Conover (Ranks of Deviations)	7.4502	0.02411	Yes
Bartlett (Likelihood Ratio)	16.3191	0.00029	Yes

En la Figura A.19 y A.20 se pueden visualizar las medias según el algoritmo de optimización (A*, ACO y CAEP), mostrando como resultado la distancia del recorrido de evacuación es estadísticamente diferente de cada grupo conformado por los algoritmos de optimización. Por otro lado, se pueden apreciar datos atípicos en la Figura A.19.

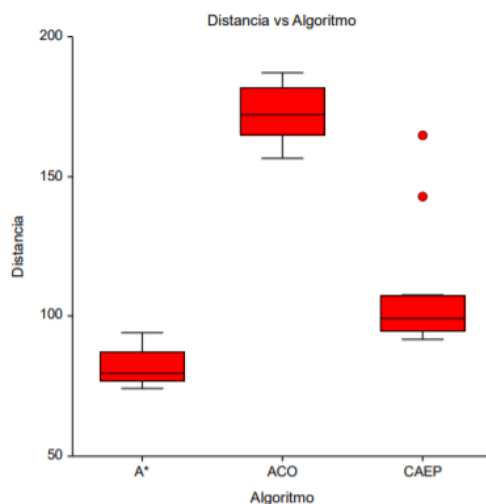


Figura A.19. Media de la distancia del recorrido de evacuación en función del algoritmo de optimización.

Analysis of Variance Table and F-Test

Model Term	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob Level	Reject Equal Means? ($\alpha=0.05$)	Power ($\alpha=0.05$)
Between (Algoritmo)	2	51298.38	25649.19	118.9060	0.00000	Yes	1.00000
Within (Error)	33	7118.424	215.7098				
Adjusted Total	35	58416.81					
Total	36						

Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks

Hypotheses

H0: All medians are equal.

H1: At least two medians are different.

Test Results

Method	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.05$)
Not Corrected for Ties	2	30.0646	0.00000	Yes
Corrected for Ties	2	30.0646	0.00000	Yes

Number Sets of Ties 0

Multiplicity Factor 0

Group Detail

Group	Count	Sum of Ranks	Mean Rank	Z-Value	Median
A*	12	80.00	6.67	-4.7652	79.76705
ACO	12	363.00	30.25	4.7317	172.0442
CAEP	12	223.00	18.58	0.0336	99.08546

Normal Scores Tests

Hypotheses

H0: All group data distributions are the same.

H1: At least one group has observations that tend to be greater than those of the other groups.

Results

Test	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.20$)
Terry-Hoeffding - Expected Normal Scores	2	27.6138	0.00000	Yes
Van der Waerden - Normal Quantiles	2	28.0444	0.00000	Yes

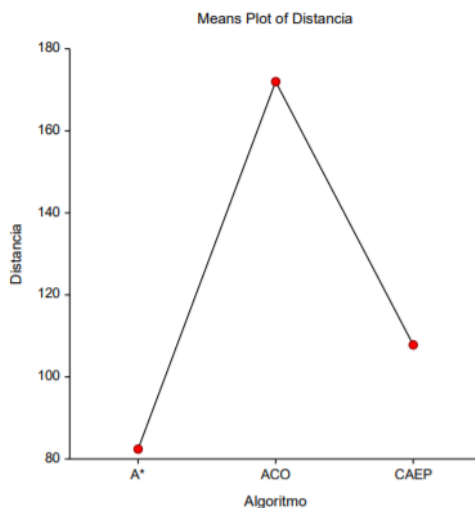


Figura A.20. Media de la distancia del recorrido de evacuación en función del algoritmo de optimización.

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: Distancia

Term A: Algoritmo

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=33 MSE=215.7098 Critical Value=3.4703

Group	Count	Mean	Different From Groups
A*	12	82.3413	ACO, CAEP
ACO	12	172.0773	A*, CAEP
CAEP	12	107.8989	A*, ACO

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

Heridos en función de tasa del algoritmo

Tests of the Normality of Residuals Assumption

Normality Attributes	Test Value	Prob Level	Reject Normality? ($\alpha=0.20$)
Skewness	-1.9238	0.05438	Yes
Kurtosis	0.7138	0.47536	No
Skewness and Kurtosis (Omnibus)	4.2104	0.12182	Yes

Tests of the Equality of Group Variances Assumption

Test Name	Test Value	Prob Level	Reject Equal Variances? ($\alpha=0.20$)
Brown-Forsythe (Data - Medians)	3.7339	0.03453	Yes
Levene (Data - Means)	6.3601	0.00461	Yes
Conover (Ranks of Deviations)	8.2428	0.01622	Yes
Bartlett (Likelihood Ratio)	17.5466	0.00015	Yes

En la Figura A.21 y A.22 se pueden visualizar las medias según el algoritmo de optimización (A^* , ACO y $CAEP$), mostrando como resultado que el porcentaje de heridos en la escena bajo el grupo conformado por A^* , es estadísticamente diferente a los otros grupos conformado por los algoritmos de optimización ACO y $CAEP$. Por otro lado, los grupos de ACO y $CAEP$ son estadísticamente iguales, debido a que poseen la misma media.

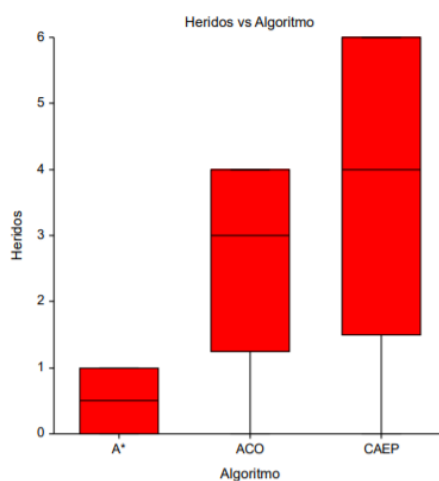


Figura A.21. Media del porcentaje de heridos en función del algoritmo de optimización.

Analysis of Variance Table and F-Test

Model Term	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob Level	Reject Equal Means? ($\alpha=0.05$)	Power ($\alpha=0.05$)
Between (Algoritmo)	2	62.88889	31.44444	12.0193	0.00012	Yes	0.99129
Within (Error)	33	86.33334	2.616162				
Adjusted Total	35	149.2222					
Total	36						

Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks

Hypotheses

H0: All medians are equal.

H1: At least two medians are different.

Test Results

Method	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.05$)
Not Corrected for Ties	2	12.5811	0.00185	Yes
Corrected for Ties	2	13.2441	0.00133	Yes
Number Sets of Ties	5			
Multiplicity Factor	2334			

Group Detail

Group	Count	Sum of Ranks	Mean Rank	Z-Value	Median
A*	12	120.00	10.00	-3.4229	0.5
ACO	12	249.00	20.75	0.9061	3
CAEP	12	297.00	24.75	2.5168	4

Normal Scores Tests

Hypotheses

H0: All group data distributions are the same.

H1: At least one group has observations that tend to be greater than those of the other groups.

Results

Test	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.20$)
Terry-Hoeffding - Expected Normal Scores	2	12.4903	0.00194	Yes
Van der Waerden - Normal Quantiles	2	12.5701	0.00186	Yes

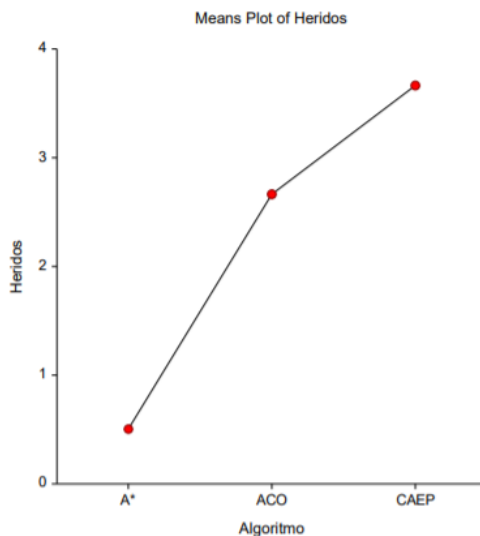


Figura A.22. Media del porcentaje de heridos en función del algoritmo de optimización.

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: Heridos
Term A: Algoritmo

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=33 MSE=2.616162 Critical Value=3.4703

Group	Count	Mean	Different From Groups
A*	12	0.5	ACO, CAEP
ACO	12	2.66667	A*
CAEP	12	3.66667	A*

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.

Fallecidos en función de tasa del algoritmo

Tests of the Normality of Residuals Assumption

Normality Attributes	Test Value	Prob Level	Reject Normality? ($\alpha=0.20$)
Skewness	3.2512	0.00115	Yes
Kurtosis	2.3991	0.01643	Yes
Skewness and Kurtosis (Omnibus)	16.3263	0.00028	Yes

Tests of the Equality of Group Variances Assumption

Test Name	Test Value	Prob Level	Reject Equal Variances? ($\alpha=0.20$)
Brown-Forsythe (Data - Medians)	5.3028	0.01007	Yes
Levene (Data - Means)	65.9319	0.00000	Yes
Conover (Ranks of Deviations)	32.3781	0.00000	Yes
Bartlett (Likelihood Ratio)	-21.2570	1.00000	No

En la Figura A.23 y A.24 se pueden visualizar las medias según el algoritmo de optimización (A*, ACO y CAEP), mostrando como resultado que el porcentaje de fallecidos en la escena bajo el grupo conformado por A* y CAEP, son estadísticamente diferente al grupo conformado por el algoritmo de optimización ACO. Por otro lado, los grupos de A* y CAEP son estadísticamente iguales, debido a que poseen la misma media.

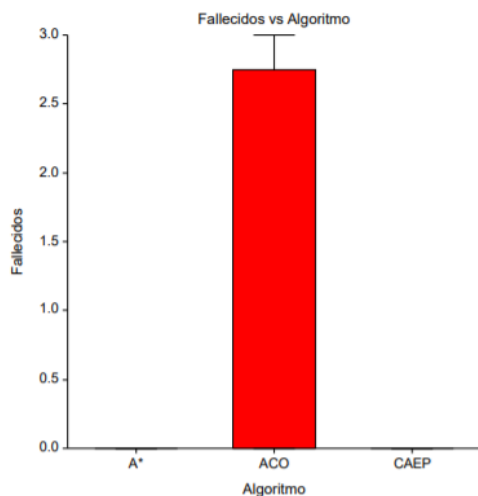


Figura A.23. Media del porcentaje de fallecidos en función del algoritmo de optimización.

Analysis of Variance Table and F-Test

Model Term	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Ratio	Prob Level	Reject Equal Means? ($\alpha=0.05$)	Power ($\alpha=0.05$)
Between (Algoritmo)	2	6.722222	3.361111	5.3028	0.01007	Yes	0.80158
Within (Error)	33	20.91667	0.6338384				
Adjusted Total	35	27.63889					
Total	36						

Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks

Hypotheses

H0: All medians are equal.

H1: At least two medians are different.

Test Results

Method	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.05$)
Not Corrected for Ties	2	2.5946	0.27327	No
Corrected for Ties	2	8.7273	0.01273	Yes

Number Sets of Ties: 2
 Multiplicity Factor: 32760

Group Detail

Group	Count	Sum of Ranks	Mean Rank	Z-Value	Median
A*	12	198.00	16.50	-0.8054	0
ACO	12	270.00	22.50	1.6108	0
CAEP	12	198.00	16.50	-0.8054	0

Normal Scores Tests

Hypotheses

H0: All group data distributions are the same.

H1: At least one group has observations that tend to be greater than those of the other groups.

Results

Test	DF	Chi-Squared (H)	Prob Level	Reject H0? ($\alpha=0.20$)
Terry-Hoeffding - Expected Normal Scores	2	8.6288	0.01337	Yes
Van der Waerden - Normal Quantiles	2	8.6496	0.01324	Yes

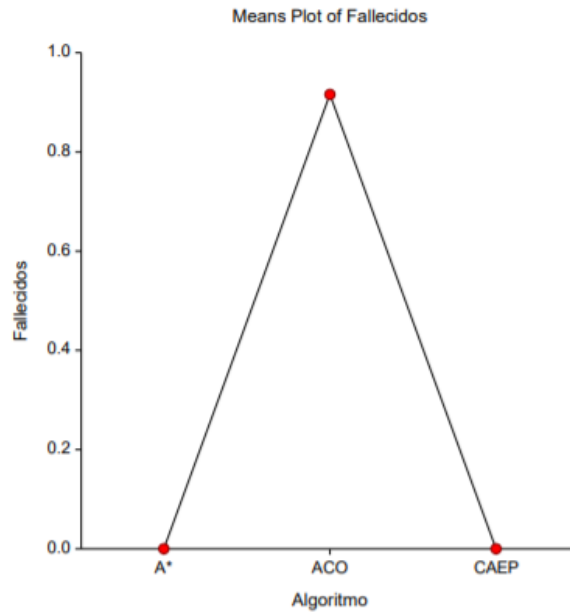


Figura A.24. Media del porcentaje de fallecidos en función del algoritmo de optimización.

Tukey-Kramer Multiple-Comparison Test

Response: Fallecidos

Term A: Algoritmo

Alpha=0.050 Error Term=S(A) DF=33 MSE=0.6338384 Critical Value=3.4703

Group	Count	Mean	Different From Groups
A*	12	0	ACO
ACO	12	0.9166667	A*, CAEP
CAEP	12	0	ACO

Notes:

This report provides multiple comparison tests for all pairwise differences between the means.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Cuernavaca, Morelos a 4 de septiembre del 2020.

DR. AUGUSTO RENATO PÉREZ MAYO
SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DE LA FCAei
PRESENTE

En mi carácter de revisor de Tesis, hago de su conocimiento que he leído con interés la tesis para obtener el grado de la Maestría en Optimización y Cómputo Aplicado, del estudiante Peter Savier Oropeza Martínez, con matrícula 10023098, con el título “Simulación de un sistema de evacuación seguro en casos de incendio en edificios mediante una comparativa de metaheurísticas bioinspiradas y heurísticas en multitudes heterogéneas” por lo cual, me permito informarle que después de una revisión cuidadosa de dicha tesis, concluyo que el trabajo se caracteriza por el establecimiento de objetivos académicos pertinentes y una metodología adecuada para su logro. Además construye una estructura coherente y bien documentada, por lo cual considero que los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento del tema tratado.

Con base en los argumentos precedentes me permito expresar mi **VOTO APROBATORIO** por lo que de mi parte no existe inconveniente para que el estudiante continúe con los trámites que esta Secretaría de Investigación y Posgrado tenga establecidos para obtener el grado mencionado.

Atentamente
Por una humanidad culta
Una universidad de excelencia

José Alberto Hernández Aguilar
Profesor - Investigador
FCAei, UAEM



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

JOSE ALBERTO HERNANDEZ AGUILAR | Fecha:2020-11-03 18:27:31 | Firmante

b89EKa7c5ERIBkC4wNeUSVlb3hkb4zaNK4u/fGG/r3m0UW/ASVbYDm6goBON3OPJadqoq8Ro2dl2f3PKZYAqggLtzl5tFt1IzH7Fhja6zISuaho1MVSgrxzAnWLWT6Pjnw+tOxT
MUVZmrZfAzqVEmyec0RHTacbfog1kcAEiPyWzoZrPDAA1Cy2LHEH1OIFLZyNPvk9ZI/FwE+f0z67ashBlkyZhiTrLCCle6vImQAx11erAwbloOlztZLQ58AN0aOdQv3v+uBMhBaeaf
ZIUTSbF7h+aTyTDaf9FxmlyEyGj6Q3bpXDSmtXG9MePFJT0DzShEMrPWztKA3G2ZYg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



MuJIBX

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/Q3hGhaXM9IDCcgUGjhbpbxcGc9MZQNqs>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Barcelona, España a 4 de septiembre del 2020.

DR. AUGUSTO RENATO PÉREZ MAYO
SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DE LA FCAei
PRESENTE

En mi carácter de revisor de Tesis, hago de su conocimiento que he leído con interés la tesis para obtener el grado de la Maestría en Optimización y Cómputo Aplicado, del estudiante Peter Savier Oropeza Martínez, con matrícula 10023098, con el título “Simulación de un sistema de evacuación seguro en casos de incendio en edificios mediante una comparativa de metaheurísticas bioinspiradas y heurísticas en multitudes heterogéneas” por lo cual, me permito informarle que después de una revisión cuidadosa de dicha tesis, concluyo que el trabajo se caracteriza por el establecimiento de objetivos académicos pertinentes y una metodología adecuada para su logro. Además construye una estructura coherente y bien documentada, por lo cual considero que los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento del tema tratado.

Con base en los argumentos precedentes me permito expresar mi **VOTO APROBATORIO** por lo que de mi parte no existe inconveniente para que el estudiante continúe con los trámites que esta Secretaría de Investigación y Posgrado tenga establecidos para obtener el grado mencionado.

Atentamente
Por una humanidad culta
Una universidad de excelencia

Nuria Pelechano Gómez
Associate Professor
CS. Dept., Universitat Politècnica de Catalunya



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

NURIA PELECHANO GOMEZ | Fecha:2020-11-19 13:26:12 | Firmante

zmoinFImhtTELi2RsOM0s+kTht0x8FngAwPvOOq+hU0OfrqCYxPvBYjtrfHlKriWOHff21q4hWsmDPAh48RdusJC1BsDccw5fngu6zAPzrCPz83OuoHkEHT06pXKu8wj+oBWSgH
RMNDC0Fcfh8h/ZxdFK+QuweH5B+J/PV9ArDS6SDhZ1XjTltWXTXWBlj5MIDxPZFsdIshrwid5p1H15qYB115veFMzuKdyz80t5jPEXKsRC7qYLMlloH2obLqyHRD/Pd5uOQnDGbe
7TxxO5/u+qV/jzDaX7vUODCX9X7ljemsWSdNkVoRCRrS1Em85mTSCU4UXby6esp56CjX32w==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[ugFr3E](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/eHcwrwrBnXVYQGjzLso5LKO7kuMj4s3e>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Cuernavaca, Morelos a 21 de septiembre del 2020.

DR. AUGUSTO RENATO PÉREZ MAYO
SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DE LA FCAei
PRESENTE

En mi carácter de revisor de Tesis, hago de su conocimiento que he leído con interés la tesis para obtener el grado de la *Maestría en: Optimización y Computo Aplicado*, del estudiante ***Peter Savier Oropeza Martínez***, con matrícula ***10023098***, con el título **SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE EVACUACIÓN SEGURO EN CASOS DE INCENDIO EN EDIFICIOS MEDIANTE UNA COMPARATIVA DE METAHEURÍSTICAS BIOINSPIRADAS Y HEURISTICAS EN MULTITUDES HETEROGÉNEAS** por lo cual, me permito informarle que después de una revisión cuidadosa de dicha tesis, concluyo que el trabajo se caracteriza por el establecimiento de objetivos académicos pertinentes y una metodología adecuada para su logro. Además, construye una estructura coherente y bien documentada, por lo cual considero que los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento del tema tratado.

Con base en los argumentos precedentes me permito expresar mi **VOTO APROBATORIO** por lo que de mi parte no existe inconveniente para que el estudiante continúe con los trámites que esta Secretaría de Investigación y Posgrado tenga establecidos para obtener el grado mencionado.

Atentamente
Por una humanidad culta
Una universidad de excelencia

DR. FEDERICO ALONSO PECINA
Profesor- investigador de tiempo completo
Facultad de Contaduría, Administración e Informática



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

FEDERICO ALONSO PECINA | Fecha:2020-09-21 21:21:16 | Firmante

Hzd3rigwZfzJD/veVOjThdDEcfO07Ry1TApRZmzfI5ojnxoEdmyENKTH+iXOkjtnltkcHlemUGhx5SWX4OtcbdzviFxicVo3+w5tRISfdLHJKgMNHiaAsTUBNkK2aGwyYEvjKBPC1+p/M2P2+mT4/KTm63SKUzK+i+fzOYYklR7Up1Eb1niF/pLxlxxmzrSfT7oq9m2umdCM+1NXZCf+ZLYR10mNfRfX38p1xwMUJQPiq/AQ8P6pQNCZdf2bAGHeXwbOKgxoaiFkb/IBbvGXcms9oHGDqA8ctXsD2PtWLdN+aoigulXrKdUpnC4ewFO8mvrHlaB0Hor756HnshAA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



6Ap7t4

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/dsdoblwFtmJRq2x4Db3g6R029quEG2fN>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Cuernavaca, Morelos a 2 de septiembre del 2020.

DR. AUGUSTO RENATO PÉREZ MAYO
SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DE LA FCAei
PRESENTE

En mi carácter de revisor de Tesis, hago de su conocimiento que he leído con interés la tesis para obtener el grado de la Maestría en Optimización y Cómputo Aplicado, del estudiante Peter Savier Oropeza Martínez, con matrícula 10023098, con el título "Simulación de un sistema de evacuación seguro en casos de incendio en edificios mediante una comparativa de metaheurísticas bioinspiradas y heurísticas en multitudes heterogéneas" por lo cual, me permito informarle que después de una revisión cuidadosa de dicha tesis, concluyo que el trabajo se caracteriza por el establecimiento de objetivos académicos pertinentes y una metodología adecuada para su logro. Además construye una estructura coherente y bien documentada, por lo cual considero que los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento del tema tratado.

Con base en los argumentos precedentes me permito expresar mi **VOTO APROBATORIO** por lo que de mi parte no existe inconveniente para que el estudiante continúe con los trámites que esta Secretaría de Investigación y Posgrado tenga establecidos para obtener el grado mencionado.

Atentamente
Por una humanidad culta
Una universidad de excelencia

Guillermo Santamaría B.

Guillermo Santamaría Bonfil
Profesor- Investigador
Gerencia de TI, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

GUILLERMO SANTAMARÍA BONFIL | Fecha:2020-11-03 20:58:40 | Firmante

dJ0mSVbtExUMhP7FdgO4hncPAbsG/6Hd/QaffTcdeqXEY7ZzXtFs111uFX9Gzf98tkTBU5Qqp5UNLq3U3fzGLCkSoTp9+gFclZnUzOBxQtG2lqskWixi0wgInUycw+Lkl66TlrRq7N
mvmcvP0EZuDQKdarBmoZMqd5Npl2JJGN5aXYZmFB/+vVJPPh1dEMCaZunt3QWn0ziNqCnB5/9hVRuoimKZ56D4G2Stq5j3xG4NnrDgHI7ig4vytlot8par93KoHl2F6WT+hIF/lh3y
XEJeEDhe52iAz2jlnImccz5vr0yoe6ZuYTQhKtVINMRAYTXWZKCEF48yq6uF9GHg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



c4BD5G

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/TVaHwSCVpa54wcrZ2wtBwTB3fVlpBDpw>



Cuernavaca, Morelos a 3 de septiembre del 2020.

DR. AUGUSTO RENATO PÉREZ MAYO
SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DE LA FCAeI
PRESENTE

En mi carácter de revisor de Tesis, hago de su conocimiento que he leído con interés la tesis para obtener el grado de la Maestría en Optimización y Cómputo Aplicado, del estudiante Peter Savier Oropeza Martínez, con matrícula 10023098, con el título “Simulación de un sistema de evacuación seguro en casos de incendio en edificios mediante una comparativa de metaheurísticas bioinspiradas y heurísticas en multitudes heterogéneas” por lo cual, me permito informarle que después de una revisión cuidadosa de dicha tesis, concluyo que el trabajo se caracteriza por el establecimiento de objetivos académicos pertinentes y una metodología adecuada para su logro. Además construye una estructura coherente y bien documentada, por lo cual considero que los resultados obtenidos contribuyen al conocimiento del tema tratado.

Con base en los argumentos precedentes me permito expresar mi **VOTO APROBATORIO** por lo que de mi parte no existe inconveniente para que el estudiante continúe con los trámites que esta Secretaría de Investigación y Posgrado tenga establecidos para obtener el grado mencionado.

Atentamente
Por una humanidad culta
Una universidad de excelencia

José Crispín Zavala Díaz
Profesor - Investigador
FCAeI, UAEM



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

JOSE CRISPIN ZAVALA DIAZ | Fecha:2020-11-03 20:15:58 | Firmante

EV+9ahuCbPTTGJVtkGckU0QLTF+W6Jryk16gXwPQNFcptHlzoqyuyggZ8Mm24WajiNPmspJ3OATQNqy8jhkxm3q1bad4X07yqHm8PKkxvvc/eR9ypNLdczDFGCtRA7opNQGg4aqYA5JRQbzc4L/H3x4kmdJaVbHmmtvJe/rkHXr/eD23uf6J5I4kXglgHgsA2qoKnAHuoJbAnQHVVQhJpGa3BRWVK0Fp3BSTx1nChkORo212bK/IVBLjYVf2D23QXRAWs007MiLB5wWIdV34NmMmtivCaDL6U2nxc0oxcf7vfdR+1/+RNDPaCC/gpcpeRRnY10KNiuHxLpI0HeMw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



x8gG0D

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/f3zAI99GShJ6W1OJp6fmpbmM3nOv2dK3>

