



Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y
BIOCIENCIAS**

***NEKAZARITZAKO INGENIARITZAKO ETA BIOZIENTZIETAKO GOI MAILAKO
ESKOLA TEKNIKOA***

Análisis del impacto de la intervención de la policía municipal en los eventos de parada cardio-respiratoria mediante modelos de simulación.

presentado por

MIGUEL BAIGORRI IGUZQUIAGUIRRE
(e)k

aurkeztua

GRADO EN CIENCIA DE DATOS
GRADUA DATUEN ZIENTZIETAN

Mayo, 2022

Resumen

En este trabajo se desarrolla una aplicación para analizar el impacto que tiene dotar a los agentes de policía de desfibriladores externos automáticos (DEA), y se compara su efectividad frente al uso de DEAs públicos por parte de transeúntes en casos de paradas cardíacas. Se describe el proceso de desarrollo de la aplicación y un caso práctico en la ciudad de Pamplona. La metodología de análisis se basa en el empleo de la simulación computacional, que permite generar ubicaciones de paradas cardíacas y reproducir el proceso de atención por parte de la policía y de los peatones, para comparar su eficacia a través del análisis de datos. Los resultados del caso práctico muestran que equipar a la policía tiene un impacto muy positivo sobre la probabilidad de supervivencia de los pacientes.

Palabras clave

Aplicación informática, Desfibrilador externo automático, DEA, Emergencia extra-hospitalaria, Parada cardio-respiratoria, Simulación, Supervivencia.

Abstract

An application is developed in this project, with the aim of analyzing the impact of equipping local police with Automated External Defibrillators (AEDs) in comparison to the use of public AEDs by pedestrians in cases of out of hospital cardiac arrests (OHCAs). The development of the computer application and the conduction of a case of study in the city of Pamplona are described. The main analysis tool is computational simulation, which allows to generate locations of cardiac arrests and to reproduce the process of attention by the police and the pedestrians, in order to compare their efficiency with data analysis tools. The results of the case of study show that equipping the police has a very positive impact on the survival probability of the patients.

Key Words

Computer application, Automated External Defibrillator, AED, Out of Hospital Cardiac Arrest, OH-CA, Simulation, Survival.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis directores de TFG Fermín Franciso Mallor Gimenez y Marta Cildo Esquiroz, todo el apoyo durante estos meses de trabajo. Me he sentido muy bien acogido en su equipo y contagiado por su ilusión y sed de conocimiento. He disfrutado mucho realizando este proyecto y especialmente de las horas en el despacho de Fermín debatiendo sobre los mil y un problemas que iban surgiendo conforme avanzaba el trabajo.

Por otro lado, agradezco a Clint Jean Louis y a Diego Reyero Diez, del departamento de emergencias externas del gobierno de Navarra y a Ismael Zabalza Barangua, de la policía municipal, por todas las críticas constructivas, mensajes de ánimo y reuniones a las que han asistido para guiarme en el proceso.

En tercer lugar, me gustaría agradecer a mis compañeros de clase Javier Aguirre y Nahia Iriarte por todos los consejos, soluciones alternativas y ratos de descanso que me han dado. Además, me gustaría mencionar a los compañeros del departamento, que tan bien me han acogido los viernes, cuando iba a hacer el TFG.

Por último, agradecer a mis padres, a mi hermana y a María, por todas las veces que han tenido que soportar mis quejas porque nada funcionaba y por todas las alegrías cuando al final todo avanzaba poquito a poco. De todo corazón, muchas gracias.

Índice

1. Introducción	8
2. Objetivos	10
3. Metodología	11
3.1. Desarrollo de aplicaciones	11
3.2. Mapas interactivos	12
3.3. Coordenadas geográficas y cálculo de distancias	12
3.4. Mapas de calor	14
3.5. Simulación	15
3.5.1. Generación uniforme de puntos en una región convexa de forma aleatoria	16
4. Implementación	24
4.1. Modelado matemático	24
4.2. Diseño de la aplicación e interfaz de usuario	28
4.3. Control de errores	34
5. Caso de estudio	37
6. Conclusiones	43

Índice de figuras

1. Coordenadas geográficas de un punto P (Fernández-Coppel, 2010),	13
2. Ejemplo Mapa de calor	15
3. Ilustración del método de aceptación rechazo	17
4. Experimento uniformidad I	20
5. Experimento uniformidad II círculo	22
6. Experimento uniformidad II cuadrado	23

7.	Descripción de los eventos a simular	26
8.	Interfaz de usuario dividida por secciones	28
9.	Ilustración de un mapa de cubrimiento	29
10.	Definición de regiones de patrullaje	30
11.	Ilustración de una simulación del proceso	31
12.	Resultados de una simulación del proceso	31
13.	Panel de Simulación de la aplicación	33
14.	Zona en la que se van a simular emergencias	34
15.	Ejemplo de los resultados tras ejecutar 200 simulaciones	35
16.	Descripción de conjunto convexo mínimo.	36
17.	Distribución de los desfibriladores en Pamplona	37
18.	Sectores de patrullaje de la policía municipal de Pamplona	38
19.	Distribución del tiempo que tarda la policía en llegar al lugar de la parada. En el escenario del testigo.	41
20.	Distribución de la diferencia entre el tiempo que tarda la policía y el tiempo que tarda el peatón en llegar al lugar de la parada. En el escenario del testigo.	41
21.	Distribución de la diferencia de probabilidad de supervivencia entre una parada atendida por una persona a pie y la policía. En el escenario del testigo.	41
22.	Distribución del tiempo que tarda la policía en llegar al lugar de la parada. En el escenario del voluntario.	42
23.	Distribución de la diferencia entre el tiempo que tarda la policía y el tiempo que tarda el peatón en llegar al lugar de la parada. En el escenario del voluntario.	42
24.	Distribución de la diferencia de probabilidad de supervivencia entre una parada atendida por una persona a pie y la policía. En el escenario del voluntario.	42

Índice de cuadros

1.	Resultados de los experimentos de generación uniforme en el círculo	21
2.	Resultados de los experimentos de generación uniforme en el cuadrado	21
3.	Tiempo que tardan en ejecutarse X simulaciones (<i>con un procesador de 8 núcleos de 1.8GHz</i>)	32

4.	Parámetros empleados en el estudio del caso real en Pamplona	39
5.	Resultados numéricos del caso de estudio	40

1. Introducción

Las paradas cardiorespiratorias en entornos públicos extrahospitalarios (PCR-EH) han sido fuente de interés para muchos investigadores y organismos durante los últimos años. Una parada cardiorespiratoria consiste en el cese brusco y potencialmente reversible de la actividad cardíaca y pulmonar, acompañada de una inconsciencia del paciente, que de no ser tratada con rapidez lleva rápidamente a la muerte (Asociación Española de Enfermería en Cardiología, 2018).

Según la asociación española de enfermería en cardiología en España tienen lugar al año una media de 30000 paradas (2018), con una tasa de supervivencia del 5 %. Es por ello, que se trata de un tema de interés en el que existe mucho margen de mejora.

Diversos estudios (Ko et al., 2020) muestran que el tiempo de reacción hasta la llamada a la ambulancia y el inicio de la reanimación cardiopulmonar por parte del testigo son vitales para la supervivencia del paciente. En concreto (Ko et al., 2020) concluyen con su análisis que cada minuto transcurrido desde la parada hasta el inicio de la reanimación supone una reducción del 9 % en la correcta recuperación neuronal del paciente, es más, transcurridos 10 minutos el paciente es altamente probable que haya muerto (Larsen et al., 1993). Además, se demuestra que en pacientes con fibrilación ventricular (ritmo cardíaco anormal que impide que el corazón bombee sangre al resto del cuerpo) el tiempo hasta la desfibrilación es el principal factor de supervivencia (Eisenberg et al., 1979, Roth et al., 1984).

Las primeras guías de actuación ante paradas cardiorespiratorias fueron publicadas el año 1966 por parte de la Academia Americana y en 1976 por parte de la American Heart Association (American Heart Association, 2020), a partir de entonces, se han ido revisando constantemente. A principios de los 90 la preocupación por las paradas extrahospitalarias llevó a la American Heart Association a promover la compra de desfibriladores públicos que pudiesen ser usados por viandantes. Fueron los resultados positivos de experimentos como los de Hallstrom et al. (2004) los que favorecieron la colocación masiva de desfibriladores públicos en ciudades por todo el mundo, que pudiesen ser usados por cualquier persona y que contuvieran en si mismos las instrucciones de uso para que no fuera necesario un conocimiento experto. Es importante tener en cuenta, que el uso de los desfibriladores siempre es el tercer paso en el protocolo de atención a una parada cardiorespiratoria, precedido por la llamada al servicio de urgencias y la reanimación cardiopulmonar, en ese orden.

Sin embargo, el escaso conocimiento de la población no sanitaria sobre paradas cardiorespiratorias y protocolos de actuación degenera en un uso poco frecuente de estos desfibriladores, tal y como indican Yoon et al. (2016). En su estudio denuncian que en la ciudad coreana de Busan (aprox. 3 millones de habitantes) solo se han usado 15 desfibriladores desde la instalación de 206 dispositivos en el 2007, esto implica un ratio de uso de una vez cada 26.3 años. Esto supone un problema, tanto desde un punto de vista sanitario, porque no se están empleando para salvar vidas, como desde un punto de vista económico, porque supone mantener unos dispositivos que no están siendo empleados. Por tanto, aunque ha sido demostrado que el uso de los desfibriladores favorece la tasa de supervivencia, lo que no está claro es si realmente son empleados. Una encuesta llevada a cabo en Reino Unido (Brooks et al., 2015) reveló que solo un 2.1 % de los encuestados intentarían usar un desfibrilador si se encontrasen ante una parada, mientras que el 79 % sí se atreverían a intentar una reanimación cardiopulmonar. Este resultado es, en parte, esperanzador, ya que la reanimación siempre es el primer paso en el protocolo de actuación, pero, por otra parte, pone de manifiesto la necesidad de formar y concienciar a la población sobre el uso de los desfibriladores.

Otro problema existente con los DEAs (Desfibrilador Externo Automático) es su localización (Aeby et al., 2020), ya que en muchas ocasiones da lugar a zonas que quedan cubiertas por más de un desfibrilador y zonas que quedan sin cubrir. Una zona se considera cubierta si está a menos de 100 metros del desfibrilador, ya que el tiempo andando es de 90 segundos y permite el empleo del desfibrilador entre 3 y 7 minutos después del inicio de la parada, que es lo recomendado por la American Heart Association.

Diferentes propuestas han sido realizadas para mejorar el uso de los desfibriladores, como por ejemplo entrenar un grupo de voluntarios (Derkenne et al., 2020) que sean alertados por el servicio de urgencias cuando ocurra una parada cardiorespiratoria y acudan, en primer lugar, a realizar la RCP (Reanimación Cardio-Pulmonar) y, en segundo, (si responden dos voluntarios) a buscar un DEA. El estudio demuestra que el método es efectivo y que mejora la probabilidad de supervivencia.

Otra propuesta diferente es equipar los coches de policía con DEAs y entrenar a los policías para su uso. Este método tiene dos ventajas; por un lado, es necesario entrenar a un número más reducido de personas, que además se puede asegurar que vayan a estar entrenadas y por otro, siempre hay policías de servicio y con capacidad de llegar al lugar de la parada con relativa velocidad. Varios estudios (White et al., 1994, Blom et al., 2014) han demostrado que equipar coches de policía mejora significativamente la probabilidad de supervivencia de los pacientes que sufren una PCR-EH. En concreto Blom et al. (2014) demuestran que la probabilidad de recuperación aumenta de un 29.1 % a un 41.4 %; los estudios se condujeron en una ciudad de 100.000 habitantes (Rochester) y pueden no ser extrapolables a ciudades mucho más grandes o a entornos rurales (Groh et al., 2001). Otros estudios han demostrado que la policía llega significativamente más rápido que las ambulancias al lugar de la parada, con el consiguiente aumento de la probabilidad de supervivencia (Mosesso et al., 1998).

Los estudios anteriormente mencionados demuestran el impacto positivo de dotar a la policía con desfibriladores, sin embargo, hasta donde sabemos, no hay estudios que comparen el impacto de tener policía dotada de DEAs frente a DEAs públicos dispuestos por la ciudad. Este será el enfoque de este trabajo, comparar ambas alternativas y estudiar el impacto que cada una de ellas tiene sobre la salud de los ciudadanos. Para ello se propone una metodología de análisis basada en simulación y su implementación en una aplicación computacional, que facilite la visualización de los resultados. Los análisis se aplicarán a un caso real: la distribución de desfibriladores y de patrullas de la policía municipal, equipadas con DEA, en la ciudad de Pamplona.

El resto del trabajo se organiza en cinco secciones. En la sección 2, se comentan los objetivos principales que se buscan alcanzar y la motivación del proyecto. La tercera sección constituye una descripción de las principales herramientas metodológicas empleadas. A continuación, en la sección 4 se expone el desarrollo de la aplicación, junto con el modelado matemático previo. En la siguiente sección se realiza un caso de estudio considerando la situación actual de Pamplona y por último, las conclusiones del trabajo se presentan en la sección 6.

2. Objetivos

El principal objetivo de este estudio es la implementación de una aplicación interactiva, que permita mediante el empleo de técnicas de simulación analizar el impacto de la presencia de desfibriladores en coches de policía en la Comunidad Foral de Navarra. Para valorar este impacto, la aplicación deberá permitir la definición de sectores de patrullaje de policía en los diferentes municipios de la comunidad foral y, a partir de ellas, devolver un análisis estadístico de su impacto en caso de ocurrencia de una parada cardio-respiratoria. Con el objetivo de aportar un enfoque innovador, el estudio se realizará comparando el tiempo que tarda en acudir al lugar de la parada un coche de policía equipado con un desfibrilador, frente a un testigo ocular que acuda a pie a por el desfibrilador más cercano, este tiempo se traducirá a probabilidad de supervivencia. Comparando los resultados de las simulaciones con la cobertura del estudio preliminar, se podrá tener una idea inicial de en qué zonas es necesario colocar más desfibriladores y en cuáles sería preferible equipar a la policía con desfibriladores.

En segundo lugar, se busca realizar un análisis de la distribución actual de los desfibriladores en Navarra y de la cobertura que estos dan a la población. Los datos sobre la ubicación de los aparatos se obtendrán de la aplicación RÁPIDA (Gobierno de Navarra, 2019) desarrollada y mantenida por el Gobierno Foral. Esta aplicación muestra un mapa con información sobre la ubicación de todos los dispositivos registrados en Navarra y es de acceso público. El objetivo de este análisis es, teniendo en cuenta únicamente los desfibriladores distribuidos (es decir, ignorando el impacto de ambulancias o coches de policía), identificar zonas que requieren de mayor cobertura y zonas que se encuentren sobrecubiertas porque dispongan de desfibriladores muy cercanos entre sí.

Se requiere de un modelo de aplicación muy flexible, en el que todos los parámetros sean definibles por parte del usuario, de esta forma se evita que la falta de conocimientos específicos sobre el campo de aplicación den lugar a sesgos en el desarrollo. Además, se tratará de hacer la interfaz de usuario muy visual y fácilmente utilizable, garantizando de esta forma que pueda ser utilizada sin necesidad de un gran conocimiento técnico.

En última instancia, el objetivo de la aplicación es generar un impacto social, que se traduzca en una herramienta útil para el departamento de emergencias externas del Gobierno Foral y la policía local, que pueda ser empleada para mejorar la atención de PCR-EHs en Navarra. Demostrando, de paso, la importancia de la colaboración con instituciones y administraciones públicas y el empleo de datos reales a la hora de generar trabajos que puedan reportar un beneficio social.

3. Metodología

En esta sección se explicarán los conceptos teóricos y las herramientas empleadas para llevar a cabo este trabajo de fin de estudios.

3.1. Desarrollo de aplicaciones

Una aplicación es un "programa preparado para una utilización específica"(Real Academia Española, s.f., definición 4), en el caso de este proyecto dicha utilización específica es evaluar el impacto positivo, que sobre la probabilidad de supervivencia, tiene formar a la policía municipal en reanimación cardio-pulmonar y dotar a los coches patrulla con DEAs, en una ciudad con DEAs públicos. Se decide elaborar una aplicación, y no realizar simplemente un estudio teórico, para permitir comparar diferentes escenarios de forma dinámica y rápida. De este modo, el diseño de escenarios, la obtención de resultados, el análisis de los mismos y la extracción de las conclusiones las puede realizar el tomador de las decisiones al respecto de la implicación de la policía municipal en la atención de las paradas cardiorespiratorias de los ciudadanos.

Existen múltiples formas de construir aplicaciones en diferentes lenguajes de programación. Para este proyecto en particular, se decide emplear la librería *Shiny* de R, debido a que, tal y como se indica en Alonso et al. (2019), su uso es sencillo y muy flexible. *Shiny* permite personalizar la aplicación web a todos los niveles, desde la estética hasta la forma de pedir información al usuario, permite modificar de forma dinámica la propia aplicación en función de las opciones marcadas por el usuario y está perfectamente integrada con el resto de librerías de R. Además, su uso es muy intuitivo y presenta abundante documentación en internet. Aunque la parte visual se haya realizado en R, los cálculos y la simulación se han realizado en Python, esto ha sido gracias a la librería *Reticulate* (RStudio, 2019). Se trata de una librería que permite ejecutar funciones de Python (no solo nativas sino también definidas por el usuario) en un script de R directamente, realizando las conversiones necesarias (por ejemplo de tipos de datos) para comunicar ambos lenguajes.

Varios aspectos se tienen que tener en cuenta a la hora de diseñar una aplicación, que más adelante vaya a ser empleada por usuarios, que no necesariamente tengan conocimientos sobre su desarrollo. En particular se destacan dos, la facilidad de uso y el control de errores. La aplicación debe resultar intuitiva y sencilla de navegar para cualquier potencial usuario y, tal y como se indica en el capítulo 3 de Lowdermilk (2013), una buena forma de lograr esto es escuchando a los futuros usuarios. Es por ello que se han realizado reuniones periódicas con la policía municipal, para asegurar que el trabajo realizado se adecúa a la situación real y que el diseño de la aplicación es fácilmente comprensible por los propios policías. En segundo lugar, es importante establecer un fuerte control de errores en la aplicación, es decir, no suponer en ningún momento que el usuario va a hacer lo que se espera que haga y programar advertencias o bloqueos, que impidan que el usuario haga un uso indebido (generalmente por desconocimiento) de la aplicación y permitir así, que esta siga funcionando con normalidad. Por ejemplo, si se dispone de una calculadora y el usuario presiona el símbolo "=" (que calcula el resultado) sin haber introducido una operación previamente, esto es un uso indebido del programa, no obstante la calculadora está correctamente programada y no se bloquea.

3.2. Mapas interactivos

La pregunta técnica sobre qué es realmente un mapa interactivo y qué tipo de representaciones geográficas pueden englobarse en esta categoría ha suscitado numerosos debates, tal y como expone Roth (2013), que se llega a preguntar "¿Importa siquiera la duda existencial sobre qué es un "mapa interactivo"?". A modo de simplificación, se va a suponer que un mapa interactivo es aquel que el usuario puede manejar de forma dinámica y que se actualiza de forma suficientemente rápida como para que no resulte significativamente apreciable.

En este proyecto se ha empleado la librería *Leaflet* de R para el diseño de mapas. Se trata de una librería que permite diseñar mapas de todo el mundo, que pueden ser movidos, ampliados y consultados por el usuario. Además, admite añadir cualquier tipo de información geográfica sobre los mapas, como por ejemplo, punteros para señalar la localización de los desfibriladores. El hecho de emplear mapas interactivos facilita la flexibilización de la aplicación, permitiendo al usuario no solo entender la información sino generar sus propios casos de estudio. Por último, comentar que es perfectamente compatible con *Shiny*.

Los mapas interactivos tienen una gran variedad de aplicaciones. Como, por ejemplo, en el campo de educación (Linn, 1997) o del tráfico (Petrovska, 2015). Recientemente se han realizado estudios para tratar de acercar esta herramienta a las personas con discapacidad visual (Kaklanis et al., 2013).

3.3. Coordenadas geográficas y cálculo de distancias

Dado que en este trabajo se van a utilizar mapas terrestres, se considera adecuada una breve introducción a la representación de puntos en un mapa. Atendiendo a Fernández-Coppel (2010) existen dos formas principales de representar un punto, o bien se realiza a través de las coordenadas geográficas en formato (latitud-longitud), o bien se representan a través de coordenadas (x,y) con la proyección UTM (Universal Transversa Mercator). En este trabajo se empleará la primera representación.

Las coordenadas geográficas definen cada punto en base a dos valores expresados como grados sexagesimales, la latitud y la longitud. Para poder realizar esta representación, es necesario establecer un sistema de referencia. Se considera como eje de la tierra la recta que une el polo norte con el polo sur. A continuación, se definen los meridianos como las intersecciones de los infinitos planos que pasan por el eje de la tierra con la superficie de la misma, se toma como meridiano de referencia (0°) el meridiano de Greenwich (aquel que pasa por la homónima ciudad británica). Por último, se definen los paralelos como las líneas de intersección de la superficie terrestre con los planos perpendiculares al eje de la tierra, como referencia se toma el ecuador, que es el paralelo más alejado del centro de la tierra. Partiendo de estas referencias la figura 1 muestra cómo calcular las coordenadas del punto P, siendo λ su longitud y ω su latitud.

El siguiente paso, tras haber representado los puntos en el mapa, es calcular las distancias entre ellos. Una primera aproximación es considerar distancias euclídeas. La distancia euclídea entre dos puntos (x_1, y_1) y (x_2, y_2) viene dada por $\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$; esta distancia mide la longitud de la línea entre los dos puntos. Es importante tener en cuenta que, en el caso de emplear coordenadas geográficas, el valor de la distancia también está medido en grados. A priori, esta distancia no es una buena forma de medir distancias entre puntos de la superficie terrestre, ya que al considerar la línea recta entre los

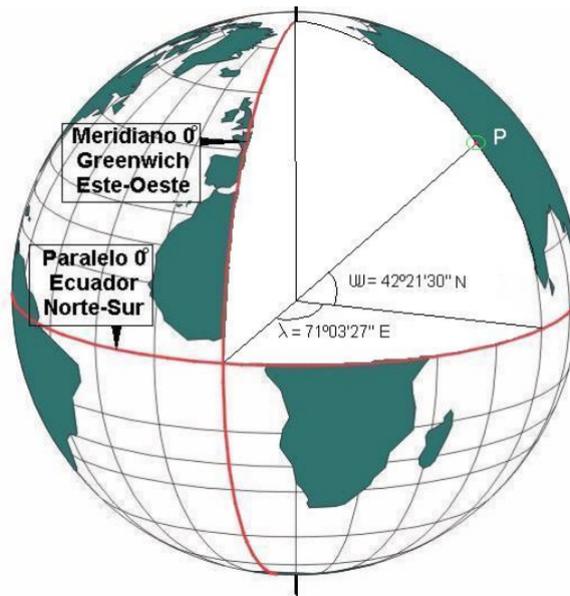


Figura 1: Coordenadas geográficas de un punto P (Fernández-Coppel, 2010),

puntos ignora la curvatura de la Tierra. Sin embargo, si la región estudiada es pequeña (en comparación a la superficie terrestre) entonces se puede asumir que dicha superficie es plana y que el cálculo euclídeo es aceptable. En este caso, dado que la superficie estudiada es un municipio navarro, la aproximación es buena.

En ocasiones va a ser necesario traducir diferencias en grados a diferencias en kilómetros, debido, por ejemplo, a que muchos resultados sobre supervivencia se dan en base a la distancia en metros a una parada cardiaca. Es importante tener en cuenta que, por la definición de meridianos y paralelos, un desplazamiento de un grado de longitud en el ecuador es mucho mayor (en términos de kilómetros) que cerca del polo norte, por otro lado, los cambios de un grado de latitud son iguales en cualquier punto de la tierra (siempre se considera su superficie lisa). Las ecuaciones de equivalencia entre grados y kilómetros son las siguientes:

$$\textit{Latitud} : 1^\circ = 111.111 \textit{ km} \quad (1)$$

$$\textit{Longitud} : 1^\circ = 111.320 * \cos(\textit{latitud}) \textit{ km} \quad (2)$$

La ecuación 1 se calcula dividiendo la distancia entre el polo norte y el ecuador (aprox. 10000 km) entre 90°, el resultado es que cada grado representa 111.111 km. La ecuación 2 se obtiene dividiendo la circunferencia de la Tierra en el ecuador (aprox. 40075 km) entre 360°, el resultado es que cada grado en el ecuador supone 111.320 km; como ya se ha comentado, este dato debe corregirse por la latitud y de ahí proviene el coseno.

Al margen de las consideraciones geográficas, la distancia euclídea no siempre es la más adecuada. En el proyecto se van a calcular distancias tanto de peatones como de coches de policía entre diferentes puntos de un mapa. Es sencillo ver que la distancia euclídea supone una mala elección, especialmente en el caso del coche, ya que las carreteras no unen puntos mediante líneas rectas. Una aproximación más adecuada es emplear redes de carreteras y de esta forma calcular las distancias reales tanto andando

como en coche. A pesar de que existan estudios como Boscoe et al. (2012) que demuestran que en los casos de no emergencia la diferencia entre ambos enfoques no es significativa, se considera que en el estudio de emergencias, en el que cada minuto tiene un impacto real sobre la probabilidad de supervivencia del paciente, sí merece la pena hacer esta consideración. Para calcular las distancias a través de red de carreteras existen múltiples opciones, de todas ellas se emplearán los servidores de OSM (Open Street Maps) dado su carácter gratuito y de software libre. Se accederá a estos servidores a través de la librería *pandana* en Python y *osmr* en R.

Por último, se mencionan las limitaciones del enfoque de emplear una distancia basada en una red de carreteras. El principal inconveniente es que, si son necesarios los cálculos de muchas distancias, los cálculos pueden ser muy lentos, debido a que hay que realizar muchas peticiones al servidor o a que hay que realizar muchas comparaciones entre el punto estudiado y los puntos de la red. En este proyecto, para solventar este problema, se ha empleado *pandana*, que emplea una red de nodos simplificada, que solo es necesaria descargar una vez por ejecución. Esto permite realizar un gran número de cálculos en poco tiempo, pero implica una pérdida de precisión al tener menos nodos la red. Los nodos de la red representan los puntos en los que se considera que puede haber un coche; por lo tanto, si se solicita la distancia entre dos puntos, se calcula para cada uno de ellos su nodo más cercano y se calcula la distancia entre ellos a través de la red. Naturalmente, existen redes diferentes para los coches y para los peatones. El paquete *osmr* de R es mucho más preciso y por tanto más lento, se empleará para cálculos puntuales.

3.4. Mapas de calor

Otra de las herramientas que se van a emplear en el trabajo van a ser los mapas de calor. Según el blog de geo desarrolladores de Google (*Google's Geo Developers Blog*), un mapa de calor es una herramienta que representa datos geospaciales mediante el uso de diferentes colores para representar áreas con diferentes concentraciones de puntos, mostrando así una imagen global de la distribución y concentración de esta característica en el mapa (Yeap, E. y Uy, I., 2014). A estos mapas también se les llama mapas de intensidad. Habitualmente se emplean con una escala de colores blanco-amarillo-naranja-rojo, de ahí el nombre de mapa de calor (DeBoer, 2015), aunque se pueden emplear otras escalas cromáticas, según cual sea el objetivo del mapa. En la figura 2 se puede ver un ejemplo de mapa de calor.

Para construir este tipo de mapa, una estrategia que se puede seguir (que es la que se va a utilizar) es la siguiente: primero se discretiza el mapa (suponiendo que es rectangular) en rectángulos del mismo tamaño, a continuación se mide para cada rectángulo el número de puntos que están dentro de él o el valor que toma la característica estudiada en esa región, por último, se le asigna a cada rectángulo un color en función de su valor calculado y de lo que se quiera representar. Naturalmente, cuanto mayor sea el número de rectángulos más precisa es la representación, pero también más costosa (computacionalmente) de realizar, por ello se debe alcanzar un equilibrio entre discretización y complejidad. Existen otros métodos para construir estos mapas, pero dado que no se van a emplear se decide no profundizar en ellos.

La principal ventaja de esta herramienta es su facilidad de ser comprendida y la cantidad de información que se muestra en una sola imagen, ya que al mismo tiempo aporta información geoespacial y categórica. La principal desventaja es la discretización, que puede llevar a una simplificación excesiva de



En gris las zonas que tienen valor 0, en verde las que tienen valor 1 y en rojo las que tienen valor mayor que 1.

Figura 2: Ejemplo Mapa de calor

la realidad. Otros métodos de construcción también tienen sus desventajas (DeBoer, 2015). Al margen de los aspectos negativos, este tipo de mapas tienen infinidad de aplicaciones, en este trabajo se van a emplear para representar el cubrimiento de una región por parte de los desfibriladores. Por ejemplo, la figura 2 muestra qué áreas de una zona de Pamplona están cubiertas (verde), cuales no (gris) y cuales sobrecubiertas (rojo), asumiendo que todo punto a 200 metros de un desfibrilador está cubierto y caracterizando cada rectángulo por su centro.

3.5. Simulación

La simulación es una herramienta que permite trabajar con modelos matemáticos complejos, que no pueden ser abordados de forma analítica, y que consiste en ejecutar el modelo (que es una simplificación del sistema real) con los datos de entrada estudiados para observar cómo afectan estos a las medidas de rendimiento (Law et al. 2017). Es habitual emplear esta herramienta en modelos que recogen elementos estocásticos o de incertidumbre. En el caso de este trabajo su uso queda justificado ya que se busca obtener resultados generalizables sobre la influencia de la policía municipal en casos de paradas cardíacas y, por tanto, es necesario simular de forma aleatoria estos casos, es decir, la localización de la parada cardíaca, de los coches de policía y de los peatones.

Dos de los componentes principales de toda simulación son las variables de estado y los eventos. Las variables de estado son un conjunto de variables que describen de forma completa el sistema. Es decir, si se conocen los valores de estas variables en cualquier instante t entonces se conoce el estado del sistema sin ninguna ambigüedad. En este trabajo se emplea un tipo concreto de simulación que es la simulación de eventos dinámicos, discretos y estocásticos. Dinámicos, hace referencia a que el sistema cambia con el tiempo; estocásticos, a que el sistema incluye elementos aleatorios; y discretos, a que las variables de estado cambian de valor en momentos puntuales del tiempo. Los momentos que producen un cambio en las variables de estado se conocen como eventos, es importante identificarlos y analizar cómo modifican las variables.

Además de los eventos y las variables de estado, existen otros dos elementos de vital importancia en toda simulación: el reloj de la simulación y el calendario de eventos. El reloj de la simulación muestra

el tiempo que ha sido simulado desde el inicio hasta el instante actual y es, por tanto, el encargado de hacer avanzar la simulación. El calendario de eventos es una lista de dimensión igual al número de tipos de eventos diferentes que existen y muestra, para cada evento, el siguiente instante de tiempo en el que ocurrirá. En cada instante el reloj de la simulación avanza hasta el evento más próximo en el calendario de eventos, se actualizan las variables de estado y los contadores estadísticos (según el tipo de evento), se actualiza el calendario de eventos y se repite el proceso. Los contadores estadísticos, previamente mencionados, son un conjunto de variables pasivas (que no intervienen en el sistema) que recogen datos sobre lo que ocurre de acuerdo a los objetivos de la simulación.

Por otro lado, se pueden identificar dos grandes tipos de simulaciones. Las simulaciones con punto de finalización y las que carecen de él. En las primeras, existe un evento natural que provoca el fin de la simulación, este evento puede ser de muy diversa índole, como por ejemplo el cierre de un supermercado. El segundo grupo de simulaciones engloba aquellas en las que no existe un evento que determine cuándo finaliza el proceso, se emplean cuando lo que interesa es el comportamiento del sistema a largo plazo. En este trabajo emplearemos simulaciones del primer tipo.

El análisis de los resultados de la simulación es complejo, ya que los resultados obtenidos de una única ejecución no son independientes ni idénticamente distribuidos y esto impide emplear los estadísticos habituales. Para solventarlo se realizan múltiples ejecuciones, ya que las observaciones de diferentes ejecuciones sí son independientes entre sí. De esta forma, se pueden emplear estas observaciones para obtener resultados estadísticos de interés, al ser una muestra aleatoria simple de la característica estudiada.

Por último, mencionar que la simulación permite modelar una gran cantidad de situaciones reales. Se ponen como ejemplos ilustrativos la simulación de la evacuación de una ciudad (Sinuany-Stern y Stern, 1993), la simulación de la recuperación socioeconómica tras el confinamiento causado por la pandemia del COVID 19 (Spelta, 2020) y la predicción de camas de hospital durante la COVID con simulación (García-Vicuña et al., 2022).

3.5.1. Generación uniforme de puntos en una región convexa de forma aleatoria

Uno de los problemas encontrados durante la realización de este trabajo, ha sido la necesidad de generar puntos aleatorios distribuidos uniformemente dentro de una región cualquiera (convexa o no convexa), definida por sus vértices. Una región convexa es aquella en la que, tomados dos puntos cualesquiera de la frontera, el segmento que definen siempre está dentro de la región.

Una primera opción para resolver este problema es emplear el método de aceptación rechazo. Este es un mecanismo de simulación, que consiste en generar una región en la que sea sencillo simular puntos de forma uniforme y que englobe a la región de interés, de esta forma, cada punto generado que esté dentro de la región estudiada será aceptado. Se considera que no es necesaria una definición más técnica de esta metodología para los propósitos de este trabajo, no obstante, esta puede obtenerse en capítulo 8 de Law et al. (2017).

La figura 3 servirá de apoyo para explicar el método. El primer paso consiste en generar una región simple que englobe a la original (azul), basta con encuadrar la región en un rectángulo ($A_1A_2B_1B_2$, negro). El siguiente paso es generar puntos aleatorios de forma uniforme en el rectángulo, para ello, hay que generar una observación uniforme x en el segmento A_1A_2 y otra y en el segmento B_1B_2 .

La observación deseada será (x,y) . Sea v una observación de una variable aleatoria con distribución uniforme en $(0,1)$, una observación uniforme en un segmento (c,d) viene dada por $c + (d - c) * v$.

El siguiente paso es determinar si el punto generado está dentro de la región de interés o no. Para ello, se calculan los puntos de corte de la recta vertical $X = x$, que pasa por (x,y) , con la frontera de la región y se obtienen C_1 y C_2 . Para hallar los cortes, se buscan aquellos vértices consecutivos cuyo intervalo en el eje X contenga x , sean tales vértices $\{(a_i, b_i), (a_{i+1}, b_{i+1})\}$, entonces $x \in [a_i, a_{i+1}]$. Una vez hallados los vértices, el punto de corte C_i se calcula igualando la pendiente de la recta que pasa por (x, C_i) y (a_i, b_i) con la pendiente de la recta que pasa por (a_i, b_i) y (a_{i+1}, b_{i+1}) , ambas han de ser iguales al tratarse de la misma recta. Por último, se despeja C_i :

$$\frac{C_i - b_i}{x - a_i} = \frac{b_{i+1} - b_i}{a_{i+1} - a_i} \rightarrow$$

$$C_i = b_i + (x - a_i) \frac{b_{i+1} - b_i}{a_{i+1} - a_i}$$

Una vez calculados los puntos de corte, se ordenan de menor a mayor partiendo de B_1 e incluyendo a y . Es decir, $(B_1, C_1, \dots, C_k, y, C_{k+1}, \dots, B_2)$. Por último, si la posición de y es par, el punto simulado está fuera de la región y es necesario volver a empezar, si es impar, está dentro y se admite como observación. Esta conclusión parte del algoritmo de Jordan: *toda curva cerrada divide el plano en dos regiones conexas, una acotada y la otra no* (Voitsekhovskii, 2011) y del algoritmo de Ray Casting (Roth et al., 1982), que se implementa como sigue:

Desde un punto dado se traza una semirrecta que no pase por ningún vértice del polígono. Entonces se calcula el número de intersecciones de la semirrecta con la frontera del polígono, el teorema de Jordan implica que el punto está dentro del polígono si y solo si n es impar.

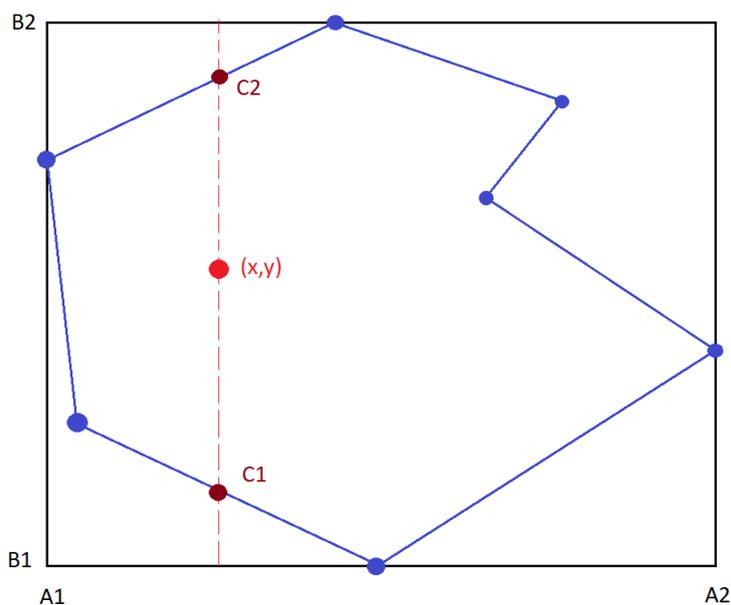


Figura 3: Ilustración del método de aceptación rechazo

Nótese, que este método es válido para regiones convexas y no convexas. La principal dificultad

de este método es el coste computacional que supone generar aquellas observaciones que luego son desechadas. Dado que el método se va a ejecutar múltiples veces y se requiere cierta velocidad en los resultados, se va a proponer otro método alternativo más rápido. Este devuelve siempre una observación válida para cada conjunto de números aleatorios generados, aunque con la desventaja de no ser completamente uniforme en la región y de imponer que esta sea convexa.

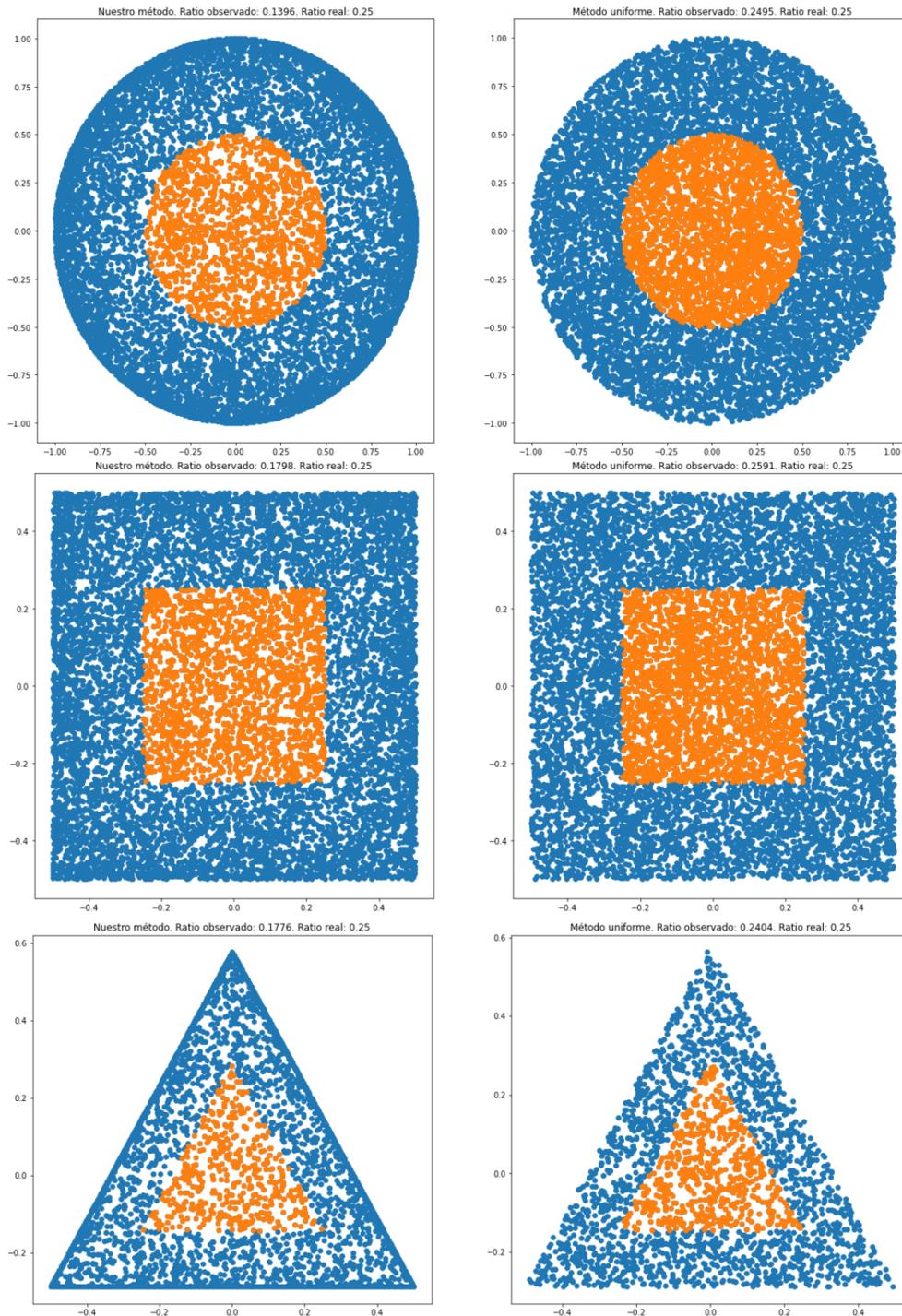
El método propuesto consiste en seleccionar al azar dos puntos de la frontera de la región convexa (en adelante Γ) y, a continuación, seleccionar un punto de forma uniforme en el segmento que definen ambos puntos. Por la definición de convexidad, estos puntos siempre van a estar dentro de Γ , además, cualquier punto de Γ va a poder ser seleccionado, ya que una consecuencia de la convexidad es que cualquier punto de la región se puede expresar como combinación lineal convexa de dos puntos de la frontera. Lo que a priori no es posible asegurar es que este método devuelva una distribución de puntos uniforme en Γ . Los primeros ensayos con este método sacan a luz un problema y es que la probabilidad de seleccionar puntos en la frontera es mucho mayor que la de seleccionarlos en el interior. Ilustramos esta situación con el caso de un cuadrado de lado 1. La probabilidad de escoger el primer punto en el lado 1 es de $1/4$ y la probabilidad de que el segundo punto esté en ese mismo lado vuelve a ser $1/4$ (son eventos independientes). De esta forma, con una probabilidad de $1/16$ los dos puntos caerán en el lado 1, si se desprecia el lado concreto, se tiene que $1/4$ de las veces los dos puntos caen en el mismo lado. Cuando dos puntos caen en el mismo lado de la frontera, el segmento generado está en la frontera y el punto generado al azar también. Este fenómeno no es deseable, ya que, desde un punto de vista teórico, para lograr una distribución uniforme la probabilidad de generar un punto en la frontera debería ser nula. Esto lleva a imponer que los dos puntos de la frontera nunca pertenezcan al mismo segmento.

Partiendo de esta situación, se ha realizado un experimento computacional con el fin de comprobar la validez del método. La fase inicial de experimento ha consistido en simular en un círculo, un cuadrado y un triángulo equilátero, puntos de forma uniforme (con métodos conocidos) y con el método propuesto. Se han generado 10000 puntos en el caso del círculo y el cuadrado y 2500 en el caso del triángulo (para facilitar la visualización). El círculo se ha construido de radio unidad y el cuadrado y el triángulo de lado uno, las regiones interiores (que se emplean para comparar la efectividad del método) son de radio 0.5 y lado 0.5 respectivamente.

Para cada figura, se ha contabilizado el número de puntos que quedan dentro de un área interior más pequeña respecto al número total de puntos generados (ratio observado). En el caso del círculo: sea R el radio y sea r el radio del área interior, desde un punto de vista teórico, si el método es correcto, el ratio observado debería aproximarse al ratio teórico ($\pi * r^2 / \pi * R^2$). De forma similar, se calculan los ratios teóricos para el cuadrado (l^2 / L^2 , con l lado del cuadrado interior) y el triángulo ($l * h / L * H$, con l el lado del triángulo interior y h su altura). Los resultados del experimento se pueden ver en la figura 4, la comparación entre los ratios reales y observados se encuentra en el título de cada figura, siendo en cada caso la figura de la izquierda la obtenida con el método propuesto y la de la derecha la obtenida con el método de control. Se observa que las frecuencias relativas muestran un menor número de observaciones generadas por el método propuesto que las esperadas calculadas teóricamente. Esto implica, que el método estudiado tiende a desplazar los puntos hacia la frontera de la región, haciendo que la distribución de los mismos no sea uniforme.

Sean (x_1, y_1) y (x_2, y_2) dos puntos generados de forma aleatoria. Para generar un punto aleatorio en el segmento que definen, se genera un punto x uniforme en el segmento $x_1, x_2 \rightarrow (x_1 + u * (x_2 - x_1))$, con $u \sim U(0, 1)$). A continuación, se proyecta el punto a través del segmento: $y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} * (x - x_1) + y_1$. El punto generado es (x, y) .

Para solventar el problema anterior, se trata de implementar la idea intuitiva de “corregir la desviación de los puntos hacia la frontera”. Para ello, se va a modificar la distribución con la que se elige el punto aleatorio de cada segmento. Se propone considerar en cada caso la mitad del segmento y alterar u con una raíz cuadrada, ya que esta función tiende a acercar los puntos a los valores pequeños (centro del segmento), es decir, $x = x_1 + \sqrt{u} * (\frac{x_1+x_2}{2} - x_1)$, con $u \sim U(0, 1)$. Sin embargo, la elección de la raíz cuadrada parece muy arbitraria, así que, considerando el caso del círculo, se plantea el siguiente problema de optimización: encontrar el valor de a , tal que los puntos (x, y) con $x = x_1 + u^a * (\frac{x_1+x_2}{2} - x_1)$ se distribuyan de la forma más uniforme posible. Para ello, se plantea como función objetivo la suma de las diferencias al cuadrado entre los ratios teóricos y los ratios observados de 10 coronas circulares concéntricas. El método de optimización empleado es un gridsearch, que consiste en ejecutar un mismo modelo con diferentes configuraciones de parámetros y una medida de evaluación, con el objetivo de encontrar los valores óptimos para los parámetros. El mejor valor de a encontrado ha sido 0.2586, para cada valor de a se han ejecutado 30 iteraciones, con 10000 puntos en cada una, y se ha tomado como rendimiento la media de los valores de la función objetivo, se ha escogido el valor de a que minimiza la función objetivo (el proceso se ha realizado de forma iterativa, aumentando la precisión de los valores de a considerados). No obstante, no es seguro que este valor sea extrapolable a otras regiones diferentes del círculo. En las figuras 5 y 6 se observa este experimento tanto en el círculo como en el cuadrado. Los cuadros 1 y 2 muestran los resultados numéricos con mayor claridad. A pesar de que el valor de a funcione mejor que 0.5 en el círculo, esta mejoría no es muy significativa y se ve que $a = 0.5$ da mejores resultados en el cuadrado. Por lo tanto, en adelante, se empleará este método para la generación aleatoria de puntos en regiones convexas con $a = 0.5$.



Comparación del método propuesto de generación de puntos en una región convexa (izq) con el método de control (der). En naranja, el área interior empleada en cada caso para calcular los ratios teóricos y observados (visibles en los títulos)

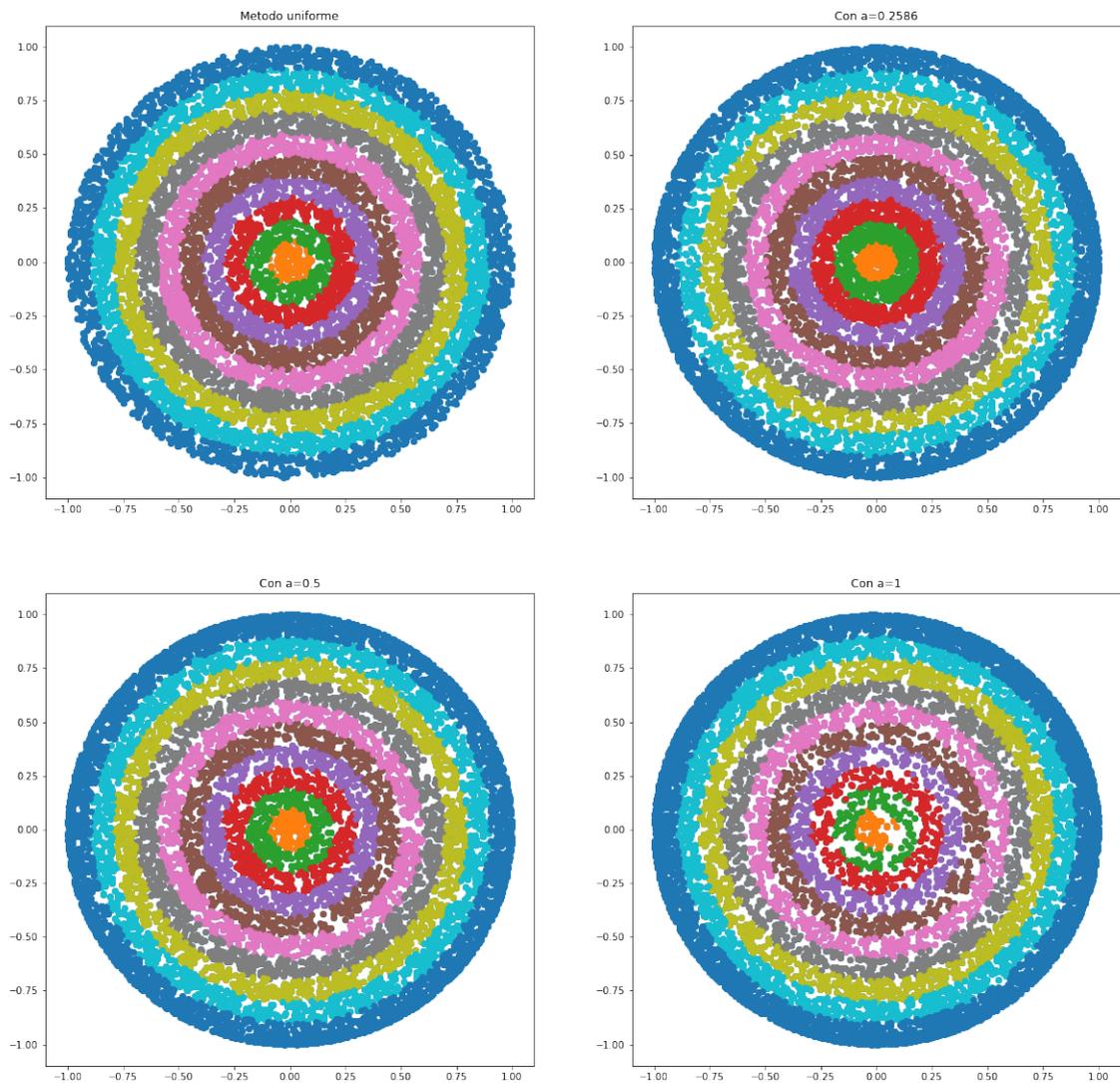
Figura 4: Experimento uniformidad I

Ratios teóricos	Ratios observados (Uniforme)	Ratios observados (a=0.2586)	Ratios observados (a=0.5)	Ratios observados (a=1)
0.01	0.0109	0.0175	0.0104	0.0058
0.03	0.0292	0.0457	0.0281	0.0138
0.05	0.0507	0.0646	0.0434	0.0277
0.07	0.0666	0.0689	0.058	0.0374
0.09	0.0921	0.0783	0.0678	0.0518
0.11	0.1117	0.0924	0.0881	0.069
0.13	0.1263	0.0953	0.104	0.0844
0.15	0.1517	0.1052	0.125	0.1171
0.17	0.174	0.1309	0.1495	0.1658
0.19	0.1868	0.3012	0.3257	0.4272
Diferencias	6.36e-5	0.018	0.021	0.0644

Cuadro 1: Resultados de los experimentos de generación uniforme en el círculo

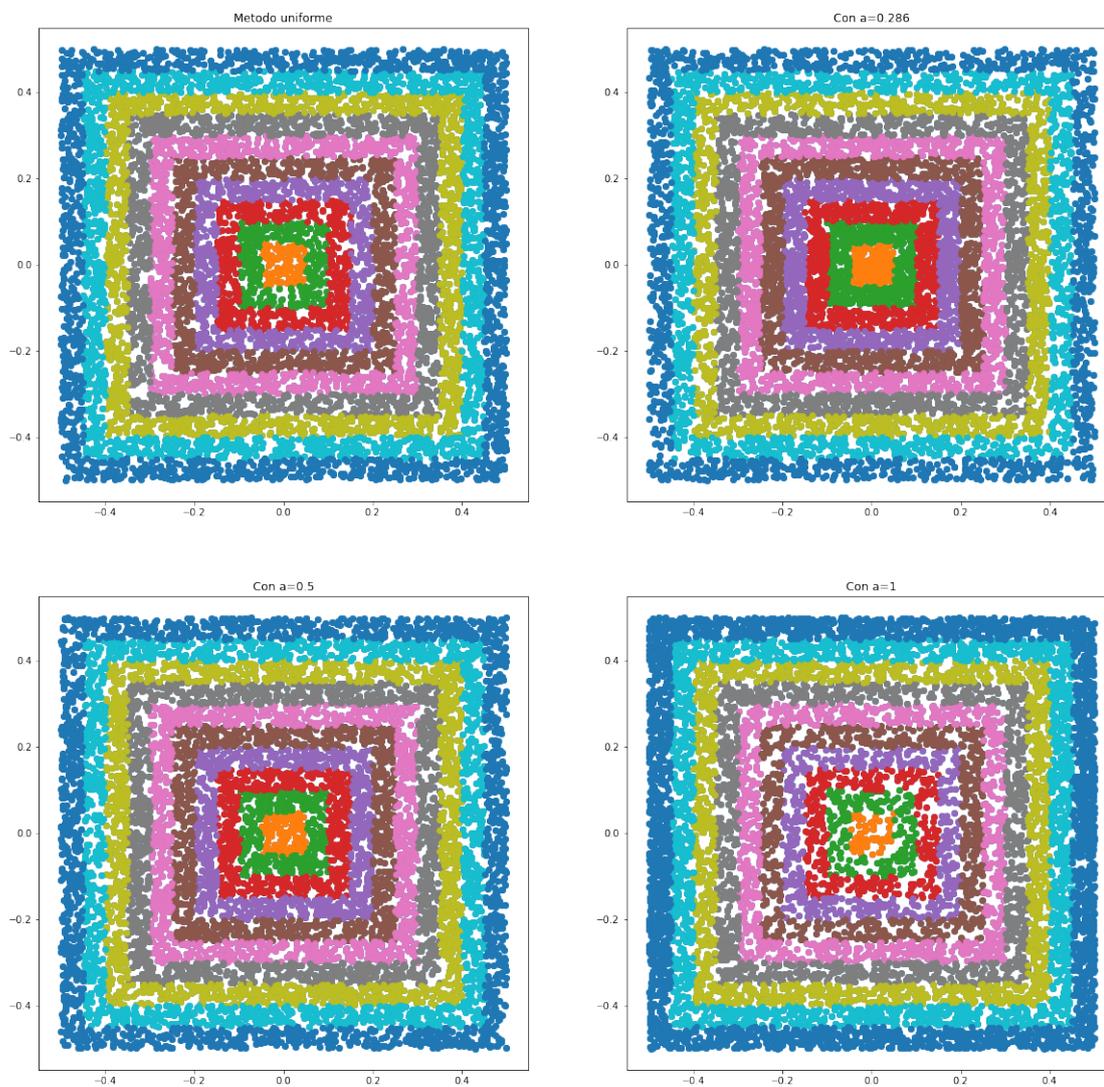
Ratios teóricos	Ratios observados (Uniforme)	Ratios observados (a=0.2586)	Ratios observados (a=0.5)	Ratios observados (a=1)
0.01	0.0114	0.021	0.0142	0.0064
0.03	0.0321	0.0504	0.0339	0.0203
0.05	0.0557	0.079	0.0578	0.0346
0.07	0.0687	0.0935	0.0733	0.0465
0.09	0.0912	0.105	0.0964	0.0686
0.11	0.1111	0.117	0.1114	0.089
0.13	0.1315	0.1233	0.1279	0.1103
0.15	0.1485	0.1283	0.1439	0.1412
0.17	0.1701	0.1388	0.1586	0.1857
0.19	0.1797	0.1472	0.1826	0.2974
Diferencias	1.53e-4	0.0054	3.73e-3	0.014

Cuadro 2: Resultados de los experimentos de generación uniforme en el cuadrado



Comparación del método de control con el método propuesto con diferentes valores de a . En cada color, una corona circular empleada para calcular los ratios teóricos y observados (de dentro a fuera)

Figura 5: Experimento uniformidad II círculo



Comparación del método de control con el método propuesto con diferentes valores de α . En cada color, una corona cuadrada empleada para calcular los ratios teóricos y observados (de dentro a fuera)

Figura 6: Experimento uniformidad II cuadrado

4. Implementación

En esta sección, se comentarán los pasos que se han llevado a cabo para desarrollar la aplicación que permita, mediante simulación, evaluar la atención a paradas cardiacas por parte de las patrullas de policía. En primer lugar, se explica el modelado matemático, es decir, la traducción del problema real a uno matemático que pueda ser resuelto y simulado. En segundo lugar, se describe la interfaz de la aplicación, es decir, las opciones que tiene el usuario para personalizar la ejecución de la simulación y la visualización de los resultados. En tercer lugar, se detallan todas las medidas que se han tomado para evitar que la introducción incorrecta de datos o un uso inadecuado de la aplicación por parte del usuario, lleven a un fallo de la misma. Por último, se explica qué técnicas se han empleado para analizar los resultados de la simulación.

4.1. Modelado matemático

La representación matemática de un problema real siempre conlleva la simplificación de la realidad, para que esta pueda ser tratada y se puedan extraer conclusiones. Este proceso de representación y simplificación de la realidad es lo que se conoce como modelado matemático. Para llevarlo a cabo se han mantenido reuniones constantes con el departamento de emergencias externas del gobierno de Navarra y con la policía municipal de Pamplona. En primer lugar, se detallan las principales simplificaciones asumidas:

- **Densidad poblacional constante:** Dentro del área delimitada para simular las emergencias cardiacas, se asume que estas tienen la misma probabilidad de ocurrir en cualquier punto de dicha área. Esto supone una simplificación de la realidad, puesto que en las zonas del área más habitadas (con mayor densidad de población) hay una mayor probabilidad de que ocurra una parada, por el simple hecho de que hay más personas. Cabe destacar que cuanto menor sea el área de simulación, más probable es que la densidad de la población sea constante y más se reduce el error derivado de esta asunción.
- **Siempre hay un coche de policía con DEA patrullando:** Se supone que en el momento de una parada cardiaca siempre hay un coche de policía provisto de un DEA patrullando en cada región de patrullaje. Por tanto, lo que se estudia es la aportación de la policía municipal con DEA a la supervivencia cuando está en activo. El tiempo en el que no está en activo no se considera.
- **No se tiene en cuenta el tráfico en tiempo real:** Debido a que la aplicación no está conectada a la red y a que la simulación tiene lugar en momentos de tiempo sin determinar, no tiene en cuenta el tráfico en tiempo real a la hora de calcular cuánto tarda un coche de policía en llegar al lugar de una parada cardiaca. Al permitir definir al usuario la velocidad del vehículo, se considera que la información del tráfico se podría incluir en este valor, aunque, se admite, que esto puede conllevar ciertas dificultades y errores de precisión.
- **Velocidad constante:** Se considera tanto la velocidad de los coches de policía como la de los peatones constante en todo el recorrido. Esto es irreal debido a la presencia de tráfico, señales o semáforos que obligarían al vehículo/peatón a reducir la velocidad o a detenerse. Aunque la velocidad se considera como la velocidad media, es cierto, que puede resultar complicado e impreciso estimarla, es por ello que debe considerarse una fuente de posible error, si no se estima

bien. Por ello, se deja como un parámetro del modelo, para permitir definir su valor y estudiar su impacto en la supervivencia.

- **No se tienen en cuenta las ambulancias:** Se omite la posibilidad de que una ambulancia llegue antes que el coche de policía y la persona andando. Estudios demuestran que en la mayoría de casos los coches de policía llegan antes al lugar de los hechos que las ambulancias (Mosesso et. al., 1998). Esto, combinado con el hecho de que el objetivo del estudio es comparar la atención policial con la atención a pie, hace que esta no sea una simplificación muy relevante (esencialmente porque incluirla, modificaría el objetivo del proyecto).
- **Región de patrullaje convexa:** En un principio, se consideró que los coches de policía siguieran una ruta fija (definida por el usuario), pero tras una conversación con el encargado del área de desfibriladores de la policía municipal de Pamplona esto se cambió, ya que comentó que los coches no tenían rutas fijas, sino regiones asignadas por las que patrullaban. Estas regiones, a priori, pueden tener cualquier forma, pero se ha supuesto que son convexas. Esta simplificación facilita la simulación aleatoria de los coches de policía en la región (por lo explicado en el apartado 3.5.1). Se considera que no es una suposición muy restrictiva ya que la mayoría de barrios y regiones tienen formas convexas o casi convexas.
- **Perímetro del municipio:** Para facilitar la visualización de cada municipio y la simulación de emergencias en ellos, se han encuadrado los municipios en rectángulos, teniendo en cuenta sus longitudes y latitudes máximas y mínimas. Se trata de una simplificación, ya que las fronteras de los municipios no son rectangulares.
- **Solo se considera un voluntario:** En el escenario en el que se considera un voluntario en el entorno del desfibrilador más cercano, en lugar de un testigo en el lugar de la parada (ver más adelante), se considera únicamente la posición del voluntario más cercano al desfibrilador, que responde a la llamada de emergencia. Esta posición se va a suponer uniforme en el entorno del desfibrilador, definido por un radio que se especifica como parámetro de entrada del modelo.

El proceso que se va a simular (reflejado en la figura 7) es el siguiente: Una parada cardiorespiratoria tiene lugar en un municipio navarro y un transeúnte es testigo de ello, este llama a la policía y se marcha a pie a buscar un desfibrilador. Es importante tener en cuenta que solo se consideran los casos en los que se llama a la policía y el peatón va a por el desfibrilador, ya que son los dos escenarios que se desean comprar. A continuación, el objetivo es determinar con fiabilidad estadística si hay diferencia de tiempos entre la llegada del peatón y la del policía (suponiendo que este lleva un DEA en el coche) y, si la hay, de cuánto es. Por sugerencia del departamento de emergencias, también se estudia la posibilidad de que emergencias contacte con un voluntario cercano al DEA y, por tanto, este solo tenga que realizar un trayecto (no ida y vuelta). Este segundo escenario se estudia, ya que es una aplicación real que se quiere implementar a futuro por medio de la aplicación móvil RÁPIDA. Ambos escenarios se estudiarán de forma independiente (no se considera que se puedan dar ambos a la vez, se supone que siempre llegaría antes el voluntario cercano al desfibrilador).

Se trata de un problema de simulación, por lo tanto los elementos fundamentales a definir son los eventos que hacen avanzar la simulación. La ocurrencia de cada evento y el tiempo que transcurre entre ellos se detallan en la figura 7. El principal evento es la ocurrencia de una parada cardíaca, que va a marcar el inicio de la simulación. El segundo evento es la llegada de un peatón / transeúnte al lugar de los hechos. A continuación, teniendo en cuenta el protocolo de actuación, el peatón, tras reconocer

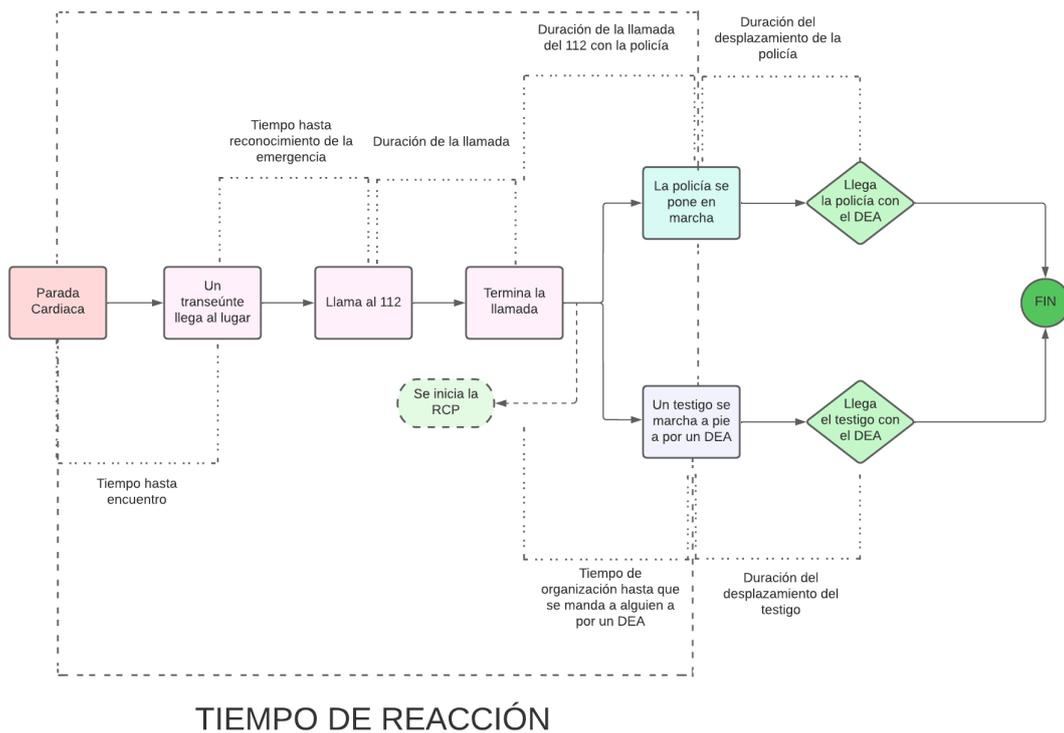


Figura 7: Descripción de los eventos a simular

una situación de emergencia, llamara al 112 (servicio de emergencias). El 112 se pone en contacto con la policía municipal y, por otro lado, los testigos se organizan para ir a buscar un DEA. Se recuerda que se supone que siempre hay un testigo que comienza a realizar la reanimación cardio-pulmonar. Los siguientes dos eventos ocurren en paralelo, y son el inicio del desplazamiento del coche de policía al lugar de los hechos y el inicio del desplazamiento de uno de los testigos hacia el DEA más cercano. Por último, tiene lugar la llegada del peatón y del policía (en cualquier orden) con los DEA. En el caso de considerar voluntarios en el entorno de un DEA, es el 112 el que los llama en paralelo a la llamada a la policía y estos se desplazan hasta el lugar de los hechos. Tras hablar con la policía municipal y el departamento de emergencias, se concluye que la diferencia de tiempos entre la llamada del 112 a la policía y el tiempo de organización de los testigos pueden considerarse similares y por ello, se pueden agrupar todos los tiempos hasta ese instante en un solo parámetro llamado *Tiempo de reacción*. Dado que este tiempo depende en gran medida de la formación del testigo que ve la parada, se propone permitir que sea un parámetro a decidir por el usuario y que pueda ser introducido en forma de intervalo, aunque en cada simulación de la atención de una parada cardíaca tome un valor distinto seleccionado aleatoriamente dentro de este intervalo. A continuación, se analiza como se van a modelar los principales eventos.

Generación de la parada cardíaca: En cada simulación se va a generar una única emergencia, esto permite dejar de considerar todo el tiempo que transcurre desde el inicio de la simulación hasta la parada cardíaca. Se realizarán múltiples simulaciones, con una parada en cada una de ellas, de forma que cada una se inicia con la parada. Desde un punto de vista de la teoría de la simulación, se trata de una simulación con punto de finalización, que viene marcado por la llegada del DEA por parte de los intervinientes. Para simular el lugar de la emergencia en un municipio, previamente escogido por el

usuario, se define cada municipio de forma rectangular con su máxima y su mínima longitud y latitud, de esta forma se simula un punto aleatorio de forma uniforme en el rectángulo. Esto consiste en generar un número aleatorio entre la longitud mínima y máxima, y lo mismo con la latitud.

Llegada del peatón: Este evento tiene lugar cuando el peatón llega con el desfibrilador hasta el lugar de la parada (puede ser anterior o posterior al evento llegada del policía). El tiempo que transcurre desde el inicio de la búsqueda del desfibrilador hasta la llegada del peatón se calcula mediante Open Street Maps a través de la librería *pandana* de Python. Esta librería devuelve la distancia que recorre el peatón a pie desde la parada hasta el desfibrilador más cercano (en realidad, se calcula la distancia a todos los del municipio y se calcula el más cercano). Para calcular el tiempo, se pide al usuario especificar una velocidad del peatón y de esta forma se puede calcular el tiempo del trayecto. En el caso que se considere que el testigo ocular se encontraba en el lugar de la parada, se multiplica el tiempo por dos (ida y vuelta), si se considera que es un voluntario cercano a un DEA, solo se tiene en cuenta el tiempo una vez y se le suma un tiempo extra de llegada al DEA. Este tiempo se calcula simulando la posición del voluntario respecto del desfibrilador más cercano, se solicita al usuario definir un radio dentro del cual se podrán llamar a voluntarios, la simulación de la distancia es un valor uniforme de 0 a dicho radio (se puede realizar de esta forma porque solo interesa la distancia, no la posición exacta, y porque se simula la posición del primer voluntario que responde situado dentro del radio de proximidad al DEA público).

Llegada del policía: Se trata de un evento similar al anterior, que tiene lugar cuando el policía más cercano, tras recibir la llamada, llega hasta el lugar de la parada. El tiempo transcurrido desde la llamada hasta la llegada se calcula con la librería *pandana* de Python, en este caso, teniendo en cuenta que se trata de un coche en el cálculo de las distancias y en la determinación de la velocidad (por parte del usuario). Para calcular este tiempo, es necesario, primero, simular la posición de cada coche de policía, ello se hace en base a unas regiones de patrullaje definidas por el usuario. En cada una de ellas, se simula un punto con el método descrito en el apartado 3.5.1. En el caso de que el punto generado no se encuentre en una vía transitable por un coche, *pandana* realiza de forma automática la aproximación a la vía más cercana.

Además, como sugerencia del departamento de policía, se añade una determinada probabilidad (fijada por el usuario) de que un coche de policía no esté disponible en el momento de la llamada. Esta probabilidad representa que el coche está atendiendo otra emergencia/situación y no puede acudir de forma inmediata al lugar de la parada. Para modelar esta situación, en primer lugar, se comprueba si el coche de policía más cercano está disponible: para ello se genera un número uniformemente distribuido en $[0,1]$ y se comprueba si es menor que la probabilidad de estar ocupado, en ese caso se considera que el coche está ocupado. A continuación, si el coche más cercano está libre se envía a este y si no se envía al segundo más cercano. La policía comenta que si la causa que mantenía la policía ocupada era de importancia menor, esta se abandona y la policía se desplaza a atender la parada cardiaca. Además, matizan que nunca se puede dejar una parada sin atender por parte de la policía. Estos dos aspectos pueden justificar la política anteriormente mencionada.

En cada simulación, tienen lugar cada uno de estos eventos una sola vez, la simulación finaliza cuando los eventos de llegada de peatón y llegada de policía han ocurrido. La información que se registra es el tiempo que ha tardado el peatón desde que tiene lugar la parada hasta su llegada y el tiempo que ha tardado el policía, así como la diferencia de ambos tiempos. Estos tiempos se emplean para calcular la probabilidad de supervivencia del paciente en cada uno de los escenarios, para ello se emplea la fórmula 3 propuesta por (Valenzuela, 1997). En ella t^* es el tiempo desde la parada hasta que comienza la RCP

(Reanimación Cardio-Pulmonar), que se va a aproximar por el *tiempo de reacción* en este modelo, y s^* es el tiempo que transcurre desde la parada hasta el inicio de la desfibrilación, que en este modelo viene dado por el *tiempo de reacción* más el tiempo de desplazamiento.

$$P(\text{supervivencia_a_una_PCR}) = \frac{1}{1 + e^{(-1.3614 + 0.3429 * t + 0.18633 * s^*)}} \quad (3)$$

En cuanto a las variables de estado, mencionar que no se considera necesario explicitarlas, puesto que se han empleado de forma implícita en la implementación de la simulación. Con esto se concluye el modelado matemático.

4.2. Diseño de la aplicación e interfaz de usuario

En esta sección se va a mostrar la interfaz de usuario diseñada y las diferentes funcionalidades que posee. La figura 8 muestra la aplicación y sus diferentes partes, cada una de ellas identificada por un número. Como se puede observar en el recuadro 1, la aplicación se encuentra dividida en dos partes llamadas “Panel principal” y “Simulación”. Se comienza describiendo la primera de ellas. El objetivo de este panel es múltiple: por un lado, permite obtener información general sobre la ubicación de los desfibriladores y sobre el cubrimiento que estos realizan de la Comunidad Foral; y por otro, permite simular de forma manual la ocurrencia de paradas cardiacas y su atención, tanto policial como peatonal. A continuación, se desgrena este panel sección por sección.

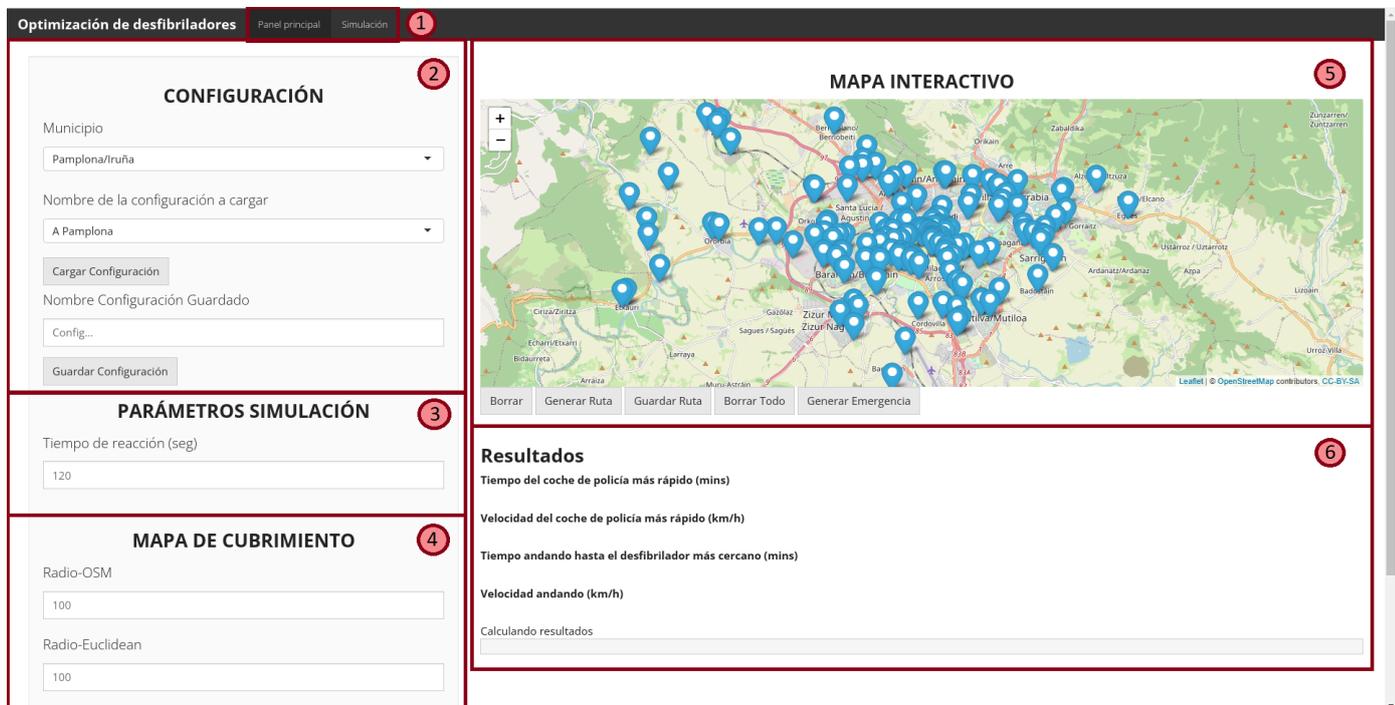


Figura 8: Interfaz de usuario dividida por secciones

El panel consta de dos mitades, fundamentalmente, en la izquierda se encuentran todos aquellos parámetros que son modificables por parte de usuario y que afectarán a los resultados que se mostrarán



a) b)
 Figura 9: Ilustración de un mapa de cubrimiento

en la derecha. El elemento de mayor importancia del panel es el mapa interactivo (recuadro 5). En primer lugar, el mapa permite ver la **disposición de los desfibriladores** en los diferentes municipios de Navarra, además, si el usuario pincha sobre ellos recibe una descripción detallada de la localización del DEA; un ejemplo de descripción es “*Universidad Pública de Navarra, Rectorado (Pamplona)*”. El mapa permite desplazarse por las diferentes partes de la comunidad arrastrando el ratón, pero, para mayor comodidad del usuario, también se pone a su disposición en el recuadro 1, un desplegable con todos los municipios, que permite navegar de uno a otro de forma cómoda.

La segunda función del mapa es mostrar **áreas de cubrimiento** en cada municipio, es decir, las zonas geográficas que se encuentran a una distancia menor que una prefijada del DEA público más cercano. Esta distancia se considera la máxima, a partir de la cual, el tiempo necesario para la recogida e inicio de utilización del DEA supera los límites que garantizan su efectividad en la recuperación cardiaca. Para poder mostrar los mapas de calor es necesario emplear el recuadro 4, detallado en la figura 9 a), en él se decide la distancia con la que se va a dibujar el mapa. Se proponen dos distancias, la distancia euclídea y la distancia OSM (Open Street Maps), es decir, la distancia en línea recta y la distancia teniendo en cuenta la red de carreteras. También, se permite decidir el radio en metros que se considera cubierto alrededor de cada desfibrilador. La construcción de los mapas de calor se ha realizado empleando los métodos de discretización comentados en el apartado 3.4. Por último, mencionar que el método mixto realiza la unión entre los cubrimientos euclídeo y OSM. La construcción del mapa tarda aproximadamente 8 minutos desde que se presiona el botón (*en un ordenador con un procesador de 8 núcleos de 1.8GHz*), para eliminar el mapa se debe presionar el botón “Borrar Todo”. En la figura 9 b) se muestra un ejemplo de mapa de calor en una zona de Pamplona.

La tercera y última de las funcionalidades del mapa es **simular una parada cardiaca**. Esto permite recrear de forma visual el proceso que después se realizará a gran escala en el panel de Simulación. Como ya se ha comentado, para llevar a cabo la simulación es necesario conocer la ubicación de los DEA y las regiones de patrullaje de la policía. Las primeras, se han considerado fijas (las disponibles en RÁPIDA), mientras que las segundas se han dejado abiertas y definibles por el usuario. Para determinar las regiones de patrullaje, el usuario deberá definir su perímetro (llamado ruta en la aplicación). Para ello, deberá clicar el botón “Generar Ruta” y especificar los vértices del perímetro. Una vez haya definido la ruta, deberá presionar el botón “Guardar Ruta”, en ese momento se unirán en primer y el último vértice y la ruta cambiará de color (para simbolizar que ha sido guardada). El proceso de definición de las

secciones se puede observar en la figura 10. Se permite que el usuario defina tantas rutas como desee. Si durante el proceso de definición de las regiones, el usuario se equivoca, tiene dos opciones: si clicla el botón “Borrar” el perímetro que está en definición se borra, pero los guardados se mantienen; si clicla el botón “Borrar Todo”, tanto los perímetros guardados como el perímetro en definición son eliminados.

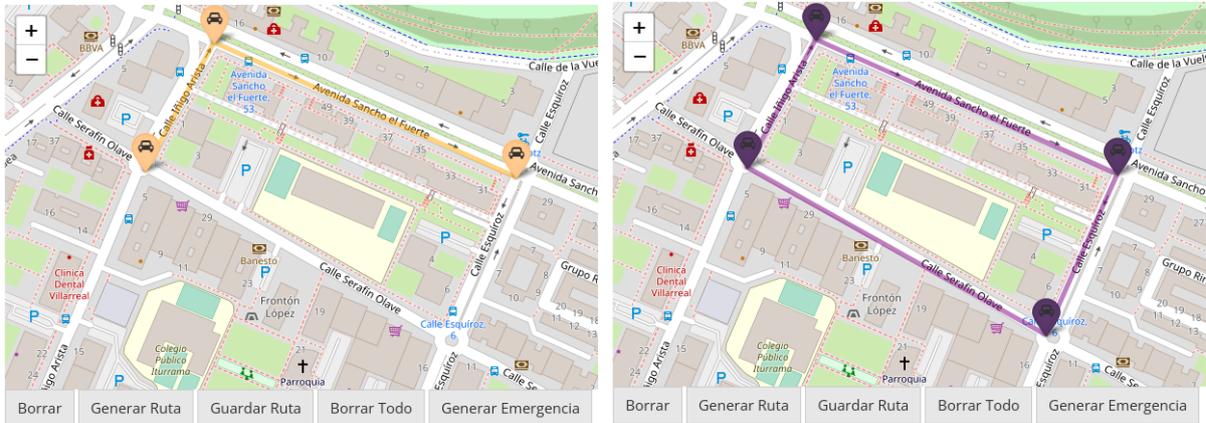


Figura 10: Definición de regiones de patrullaje

A fin de evitar que el usuario tenga que introducir las regiones cada vez que inicia la aplicación, se le permite guardar la configuración definida de forma permanente a través de las opciones del recuadro 2. En ella puede escribir el nombre de la configuración actual y guardarla y del mismo modo puede cargar configuraciones, que previamente hubiera guardado. La configuración cargada se muestra inmediatamente en el mapa.

Una vez se han definido las regiones de patrullaje, se procede a especificar los valores de los parámetros de la simulación. Esta simulación se trata de una versión simplificada de la explicada en el apartado 4.1, que se realizará en el panel de Simulación, y, por tanto dispone de menos parámetros. La razón para que esta simulación sea más simple es que emplea la librería *osmr* de R y el cálculo de distancias es más lento. Por ello, como el objetivo es permitir ver resultados visuales en el mapa de forma interactiva, se ha decidido primar la velocidad frente a la complejidad. La principal simplificación es que se considera que los coches de policía siempre están disponibles (no se tiene en cuenta la probabilidad de ocupación). Por otro lado, no se estudia el caso de la llamada a voluntarios, porque se considera que visualmente es similar al caso del testigo y, por tanto, no es necesario recogerlo en esta parte de la aplicación. El parámetro que se debe fijar es el tiempo de reacción hasta que la policía recibe la llamada y el peatón comienza a andar hacia el desfibrilador (recuadro 3). En este caso no se solicita como un intervalo, al tener una finalidad meramente explicativa.

Definidos los parámetros y las regiones, se puede simular la emergencia. El usuario deberá accionar el botón “Generar Emergencia” y a continuación, cliclar el lugar del mapa en el que quiere que tenga lugar. El programa comenzará a realizar los cálculos pertinentes, que tardarán en torno a 3 minutos. Para asegurar que el usuario entienda que el proceso está en marcha se muestra el progreso mediante una barra de carga en el recuadro 6. El tiempo de ejecución depende ligeramente del número de regiones de patrullaje definidas, pero su número tiene que ser considerable para que el retraso sea significativamente diferente. Al terminar los cálculos, se muestran en el mapa los resultados, que consisten en las rutas que sigue cada coche de policía desde su posición simulada, dentro de su región, hasta el lugar de la parada y el camino que recorre el testigo desde la parada hasta el desfibrilador más cercano. El recorrido del coche de policía más cercano se muestra en verde y los del resto en rojo, el recorrido del testigo se

MAPA INTERACTIVO



Figura 11: Ilustración de una simulación del proceso

dibuja en azul. Un ejemplo de estos resultados se puede ver en la figura 11, para la que se han definido 3 regiones (Barañáin, Lezkairu y Rochapea) y se ha tomado el tiempo de reacción a 25 segundos (con motivos ilustrativos).

Además de la información gráfica del mapa, también se muestra información numérica en el recuadro 6. Esta información está compuesta por: el tiempo que tarda el coche de policía más rápido, la velocidad media a la que se ha desplazado (esta se calcula teniendo en cuenta el tiempo y la distancia devuelta por osm), el tiempo que ha tardado el testigo y su velocidad media. Es importante mencionar que, en ocasiones, las velocidades de los coches de policía son un poco bajas, llegando a mínimos de 20 km/h. A pesar de que esto no es realista, no tiene una gran importancia, porque el objetivo no es obtener resultados concluyentes, sino hacer ver de forma visual y comprensible al usuario, el proceso simulado. En el panel de “Simulación” esto no ocurre. Los resultados obtenidos para el escenario del párrafo anterior se pueden ver en la figura 12.

Resultados

Tiempo del coche de policía más rápido (mins)

5.627

Velocidad del coche de policía más rápido (km/h)

32.70633

Tiempo andando hasta el desfibrilador más cercano (mins)

9.297

Velocidad andando (km/h)

4.459459

Figura 12: Resultados de una simulación del proceso

El **panel de “Simulación”** tiene como objetivo realizar simulaciones de forma masiva y así poder obtener resultados estadísticamente concluyentes y precisos. La figura 13 nos muestra que el panel se

Iteraciones	10	100	250	500
Minutos	3.407	30.78	74.23	127.8

Cuadro 3: Tiempo que tardan en ejecutarse X simulaciones (con un procesador de 8 núcleos de 1.8GHz)

encuentra dividido en dos partes. En la izquierda se permiten decidir los valores de los parámetros de la ejecución y en la derecha se muestran los resultados.

La mayoría de los parámetros ya han sido explicados en el apartado 4.1, los parámetros añadidos son: el número de iteraciones a simular, el nivel de significación α y el número de paradas cardiacas que se estima que ocurran en un año. El primero de ellos indica el número de simulaciones que se van a realizar, se recomienda un número mayor que 30, para poder aplicar el Teorema Central del Límite y utilizar test estadísticos basados en la distribución normal del estadístico (Spiegel, 2007). En segundo parámetro es el nivel de significación empleado para calcular el intervalo de confianza sobre las diferencias de tiempos de atención entre policías y peatones. El tercer parámetro, indica cuantas paradas cardiacas se espera que tengan lugar al año en la región estudiada. Además de estos parámetros, se le solicita al usuario especificar la zona en la que se van a simular las emergencias; para ello debe hacer uso del mapa situado abajo a la izquierda. Tras clicar en el mapa surgirá un recuadro de centro el clic y altura y anchura las especificadas, tal y como se muestra en la figura 14. Nótese, que visualmente se muestra un rectángulo pese a que se imponga la misma anchura y altura, esto es debido a la conversión de grados a kilómetros explicada en el apartado 3.3.

Tras fijar todos los parámetros, se pueden ejecutar las simulaciones. Se ha decidido colocar el botón de simular al final de la pantalla para forzar al usuario a leer todos los parámetros antes de ejecutar. El proceso de la simulación es lento (tabla 3) y depende del número de iteraciones. De nuevo, se proporciona una barra para poder observar el avance. Tras calcular los resultados, se devuelven (en la derecha) los estadísticos almacenados. La figura 15 muestra los resultados que se recogen, en primer lugar se muestran el número de iteraciones y el estado de la simulación (si todo ha ido según lo previsto o no). A continuación, se muestra la media del tiempo que ha tardado el testigo en buscar el desfibrilador, la media del tiempo que ha tardado el coche de policía más cercano y la media de las diferencias. Para calcular el tercer resultado, se calcula la diferencia en cada iteración y después se hace la media. Dado que se está trabajando con observaciones pareadas, este procedimiento es adecuado (Spiegel, 2007). A continuación, se calcula el intervalo de confianza de las diferencias y la probabilidad de que el coche de policía llegue antes que el testigo a pie (proporción de iteraciones en las que ha llegado antes el policía).

Los siguientes resultados son 3 histogramas, el primero de ellos muestra la distribución de los tiempos de los coches de policía, mostrando en verde los menores que 5 y en rojo los mayores. Se ha decidido emplear este umbral, ya que fue el criterio que empleó la policía municipal de Pamplona para decidir cuántos coches de policía se deberían equipar con DEAs, es decir, el objetivo era que a una parada siempre pudiera llegar un coche en menos de 5 minutos. Es importante recordar que este umbral no tiene ninguna repercusión sobre los resultados, solamente afecta a la visualización del histograma. El segundo histograma representa las diferencias de tiempo entre el coche de policía y la persona andando. En verde los casos en los que la diferencia es negativa (llega antes la policía) y en rojo en los que es positiva. El último gráfico muestra la diferencia en la probabilidad de supervivencia del paciente si el primero en llegar es la policía frente a si lo es un peatón que busque el DEA a pie. De nuevo se dibujan en verde los casos en los que la policía representa un beneficio. La supervivencia se calcula de acuerdo a la fórmula 3. El último valor que se muestra es el número estimado de vidas salvadas al año al dotar

PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN

Configuración

Número de iteraciones a simular

Nivel de significación (alpha)

Tipo de testigo

- Testigo donde la emergencia
- Testigo en el entorno del desfibrilador

General

Tiempo de reacción (seg)

Velocidad de los coches de policía (km/h)

Velocidad de la persona andando (km/h)

Probabilidad de que el policía esté ocupado

Datos

Paradas cardiacas en un año

Escenario considerando voluntarios

Radio en metros de los voluntarios en torno al desfibrilador

Tamaño de la simulación

Anchura del área de simulación (km)

Altura del área de simulación (km)

Centro de la simulación



Latitud:

Longitud:

Simular

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Estado de la simulación:

Se debe presionar el botón de simular para obtener resultados de la simulación

Calculando resultados

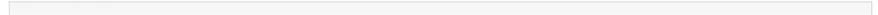


Figura 13: Panel de Simulación de la aplicación

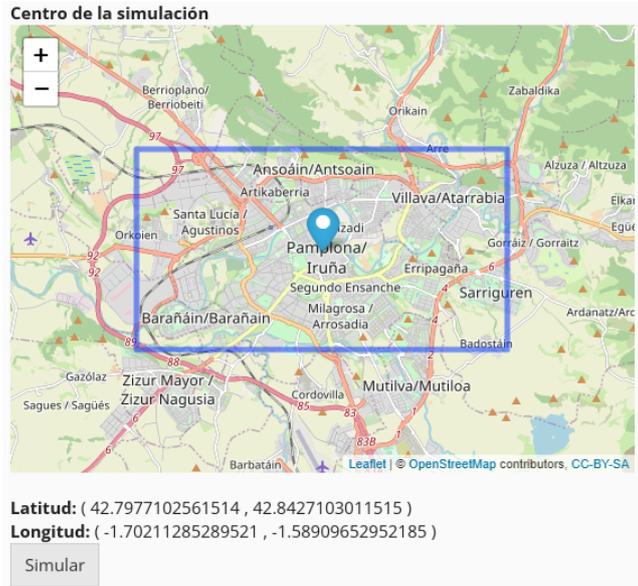


Figura 14: Zona en la que se van a simular emergencias

a la policía municipal con DEAs. Este valor se calcula multiplicando la media de las diferencias de probabilidades de supervivencia (policía - peatón) por el número de paradas estimadas en un año, que es un parámetro a definir por el usuario.

4.3. Control de errores

En este apartado, se detallan algunas de las técnicas empleadas para dar mayor robustez a la aplicación y evitar posibles fallos. En primer lugar, al solicitar valores numéricos siempre se establece un mínimo y un máximo razonables. Fijar un valor mínimo tiene especial relevancia, ya que un valor negativo daría lugar a errores significativos en la mayoría de casos. Por ejemplo, si el usuario fijase el número de iteraciones a simular menor que 1 el sistema fallaría. En segundo lugar, las variables que requieren de la introducción de textos, como el nombre de la configuración a cargar, se han sustituido por un selector de opciones. De esta forma, queda asegurado que el fichero exista.

En la selección de las regiones de coche de patrullaje por parte del usuario, se ha decidido no impedir explícitamente que este dibuje regiones no convexas, ya que la comprobación de si la zona dibujada es convexa o no conlleva un coste computacional excesivo. En su lugar, se ha optado por emplear el conjunto convexo mínimo de la región dibujada por el usuario en cada caso. El conjunto convexo mínimo de una región no convexa, es el menor (en términos de área) conjunto convexo que contiene todos los puntos de la región no convexa. La figura 16 a) muestra una región no convexa y la figura b) muestra su conjunto convexo mínimo.

Por último, se han definido un gran número de variables internas para evitar que un uso indebido de la aplicación conlleve su fallo. Por ejemplo, en el panel de simulación no se permite simular hasta que se haya definido al menos una región de patrullaje, si se intenta aparecerá un mensaje en rojo diciendo “*Hace falta al menos una ruta definida para poder simular*” en el apartado de “Estado de la simulación”. De forma similar, si se presiona el botón de simular sin haber definido una zona de

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Estado de la simulación:
Simulación completada

Iteraciones ejecutadas
25

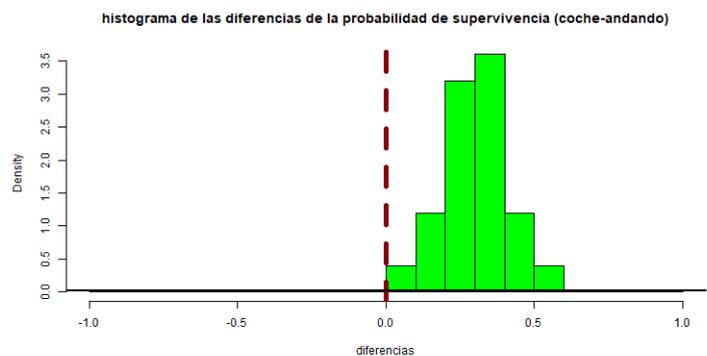
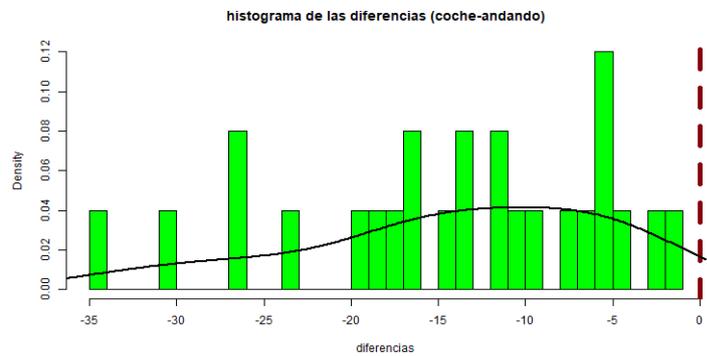
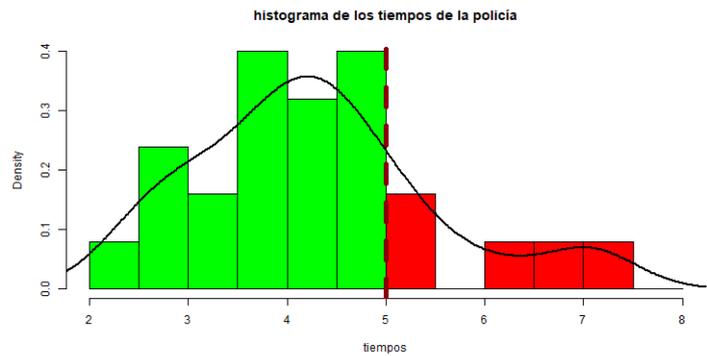
Media del tiempo andando
18.3402653866667

Media del tiempo en coche
4.27387124266667

Media de la diferencia
-14.066394144

Intervalo de confianza de la diferencia
(-17.5639245023902,-10.5688637856098)

Probabilidad (tiempo coche < tiempo andando)
1



Número de vidas extra salvadas gracias a la policía
12

Calculando resultados

Figura 15: Ejemplo de los resultados tras ejecutar 200 simulaciones

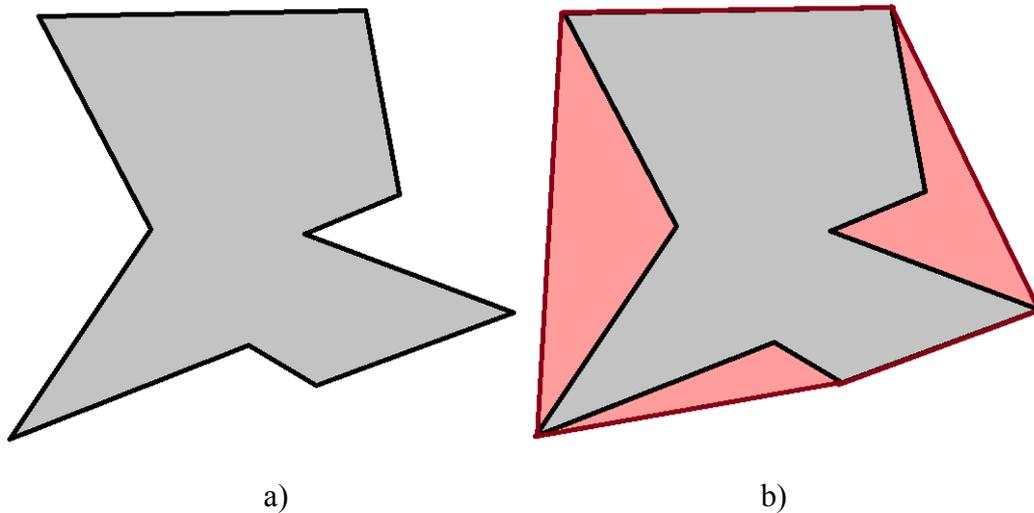


Figura 16: Descripción de conjunto convexo mínimo.

simulación aparecerá un mensaje diciendo “*Hace falta fijar el área de simulación para poder simular*”. Además, si se intenta simular cuando el perímetro de una región aún no ha sido guardado el mensaje de aviso dirá “*Termina de dibujar la ruta actual antes de ejecutar la simulación*”. El resto de parámetros, al tener valores por defecto, permiten ejecutar la simulación sin tener que darles un valor específico. Otros aspectos controlados han sido: que al presionar los botones de borrar o guardar ruta sin que haya ninguna el sistema no haga nada; que al presionar el botón de generar ruta dos veces seguidas el sistema no falle; y que si se simula una emergencia en el primer panel sin definir ninguna región policial, se devuelva la ruta a pie más corta y en el tiempo de los policías se establezca un valor por defecto de 1001 minutos.

Con esto se considera que los principales fallos que podría dar la aplicación por la interacción con el usuario quedan debidamente controlados.

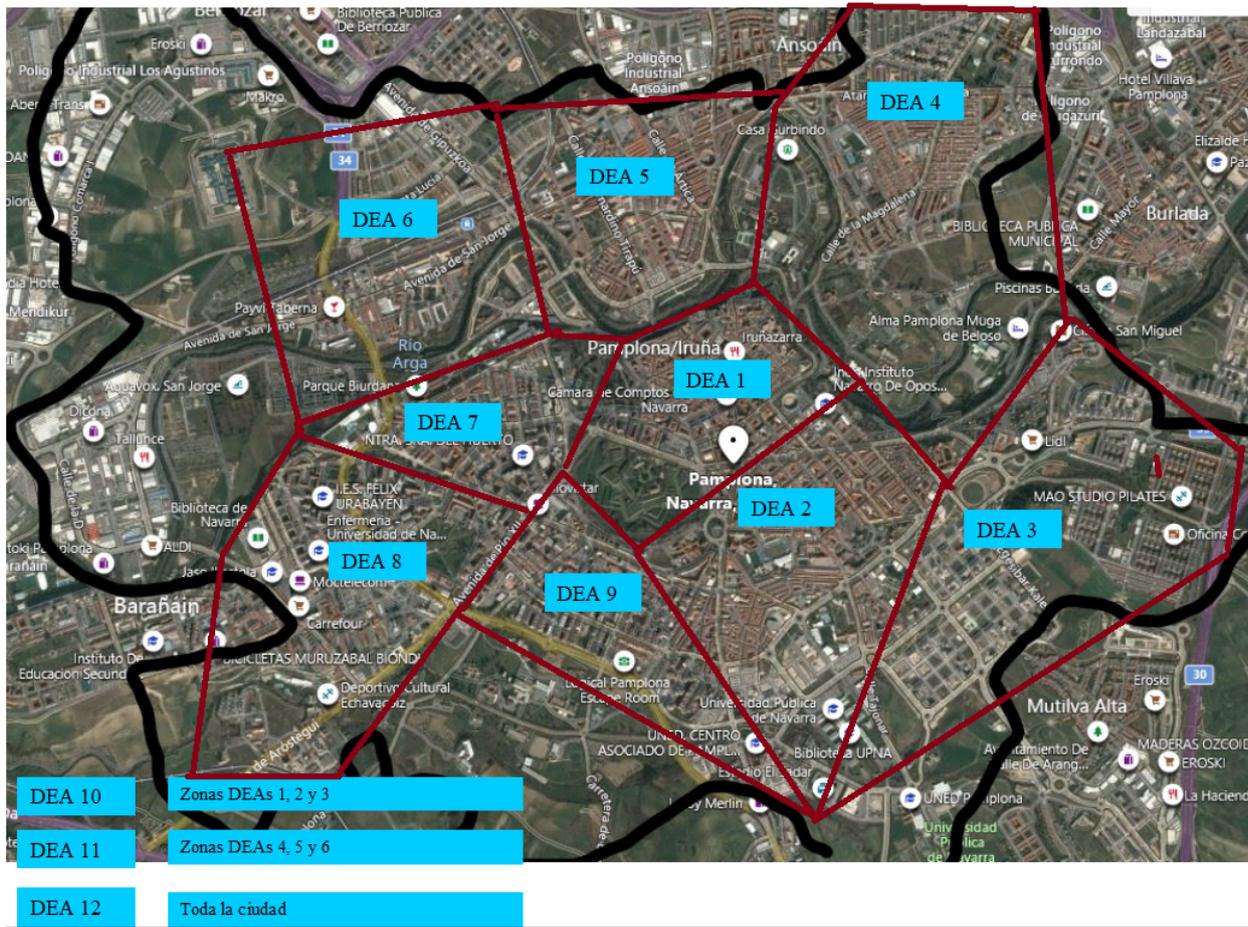


Figura 18: Sectores de patrullaje de la policía municipal de Pamplona

Escenario 1

El primer caso estudiado es aquel en el que se considera un testigo en el lugar de la parada cardiaca. En la primera columna del cuadro 5, se pueden consultar los resultados para este escenario. Destaca que el tiempo de llegada de la policía es hasta tres veces más rápido que el de la persona andando. Tal y como se puede observar en la figura 19, la distribución de los tiempos de la policía se asemeja a una normal de media 4.271 minutos. Naturalmente, la cola inferior está acotada por el tiempo de reacción (que se ha escogido entre 2 y 4 minutos), mientras que la superior no tiene límite conocido. Se considera positivo que en la mayoría de las ocasiones el tiempo sea inferior a 5 minutos, ya que era uno de los objetivos planteados por la policía municipal al equipar sus coches con DEAs.

La distribución de las diferencias entre los tiempos del peatón y la policía (figura 20) muestra que la mayoría se agrupan entre 0 y 20 minutos, en favor de la policía. Es decir, en la mayoría de casos la policía llega en un tiempo igual o superior al del testigo. Existe una cola importante hacia la izquierda, esto quiere decir que hay bastantes casos en los que la policía llega mucho antes que el testigo, con diferencias de hasta más de 40 minutos. Por otro lado, se observan algunas ocasiones en las que el testigo llega antes. Estas se podrían asociar con casos en los que la parada tenga lugar en un lugar con desfibrilador o muy cercano a uno.

Por último, como consecuencia de las importantes diferencias en los tiempos de atención, se observa

Nombre del parámetro	Valor del parámetro
Número de iteraciones	500
Nivel de significación	0.05
Tiempo de reacción	(120,240)
Velocidad de los coches de policía	60
Velocidad de la persona andando	5 (caso testigo) y 7 (caso voluntario)
Probabilidad de que el policía esté ocupado	0.2
Paradas cardiacas en un año	40
Radio en metros de voluntarios	500
Centro de zona simulación	Latitud: (42.7943105405783 , 42.8393105855784) Longitud: (-1.686962736441 , -1.60494670426784)
Anchura zona simulación	3.6 km
Altura zona simulación	5km

Cuadro 4: Parámetros empleados en el estudio del caso real en Pamplona

que la diferencia en la probabilidad de supervivencia del paciente (figura 21) es significativa y considerablemente mayor en el caso de las paras atendidas por la policía. Esto tiene como consecuencia que el número estimado de vidas salvadas en un año, si se dota a la policía de DEAs, respecto a solo considerando los DEAs públicos empleados por testigos en el lugar de los hechos, sea de **11**. El elevado tiempo medio de atención por parte de los testigos (17 minutos), puede ser una de las causas que justifiquen este resultado, ya que implica que en la mayoría de casos los testigos tardan más de 10 minutos en llegar con el DEA y por ello la probabilidad de supervivencia es cercana a 0. Esto significa que en muchas ocasiones los DEAs públicos no tienen un impacto significativo y solamente la policía es capaz de asegurar cierta probabilidad de supervivencia en el paciente.

Escenario 2

La segunda columna del cuadro 5 muestra los resultados del segundo escenario estudiado, aquel en el que se considera un voluntario en el entorno del desfibrilador. Tanto la figura 22 como la media del tiempo de policía en el cuadro muestran que la distribución de estos tiempos no ha cambiado respecto del escenario anterior. Esto es natural y esperable, ya que el comportamiento de la policía no ha sido modificado. Lo que sí cambia, es el tiempo de atención de los peatones, que se reduce significativamente. En la figura 23 se puede ver que estas diferencias se agrupan entre 3 y 9 minutos, además, el tiempo medio de atención de los voluntarios se reduce a 11 minutos (en media). Este hecho tiene un impacto sobre las diferencias en la probabilidad de supervivencia del paciente (figura 24), haciendo que se reduzcan y pasen a agruparse en torno a los valores 0.2 y 0.3. No obstante, la velocidad de la policía sigue siendo mayor y el número estimado de vidas extra salvadas por la policía es de 8 por año.

Conclusiones

Algo que puede llamar la atención es que la probabilidad de que la policía llegue antes que los peatones es menor en el primer escenario (0.984) que en el segundo (0.996), cuando en el segundo escenario

la diferencia de tiempos entre la policía y los peatones es significativamente menor (tal y como se ve en los intervalos de confianza del cuadro 5). Esto es consecuencia de la aleatoriedad. El motivo por el que se ha decidido no emplear números aleatorios comunes (i.e. simular en ambos escenarios las mismas paradas y las mismas posiciones de los coches de policía), es que la comparación de ambos escenarios entre sí no es uno de los objetivos del trabajo, sino que el objetivo es analizar en ambos escenarios el impacto de dotar a la policía con desfibriladores sobre la probabilidad de supervivencia de pacientes que sufren PCR-EH.

Se concluye que dotar a la policía municipal de Pamplona de DEAs, se traduce en un aumento significativo de la velocidad de atención en caso de paradas cardio-respiratorias en entornos extra-hospitalarios, respecto a la utilización de DEAs públicos por parte de peatones. Además, este aumento de la velocidad trae consigo un incremento en la probabilidad de supervivencia de los pacientes y por tanto del número de vidas salvadas. Una segunda conclusión es que en el caso de considerar testigos en el lugar de la parada, el tiempo de atención es muy elevado y muchas veces no se llega a tiempo para salvar al paciente. Por último, se destaca que el empleo de voluntarios tiene un impacto positivo y reduce el tiempo de atención, seguramente debido a que la distancia que deben recorrer es menor y a que conocen con exactitud el protocolo a seguir.

Variable	Caso con testigo	Caso con voluntario
Media del tiempo del peatón (minutos)	17.943	11.004
Media del tiempo de la policía (minutos)	4.271	4.304
Media de la diferencia (policía-peatón)	-13.673	-6.700
Intervalo de confianza de la diferencia	(-14.467,-12.878)	(-6.9709,-6.4294)
Probabilidad de $tiempo_policía < tiempo_peatón$	0.984	0.996
Número estimado de vidas salvadas en un año	11	8

Cuadro 5: Resultados numéricos del caso de estudio

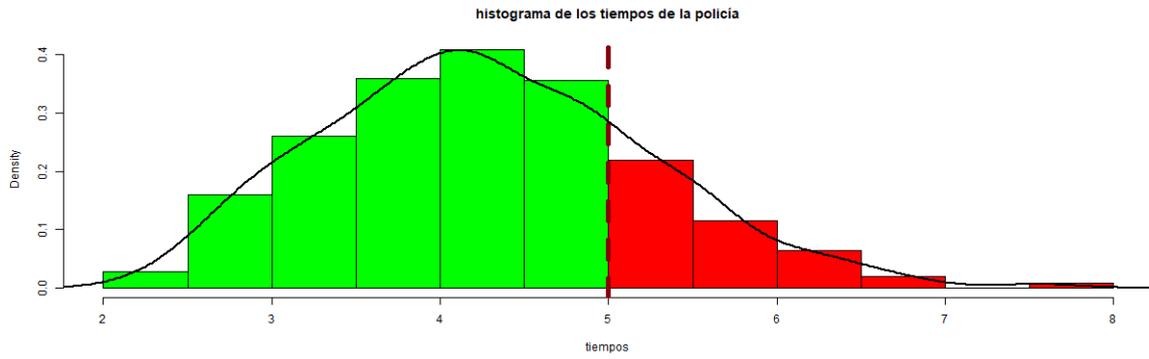


Figura 19: Distribución del tiempo que tarda la policía en llegar al lugar de la parada. En el escenario del testigo.

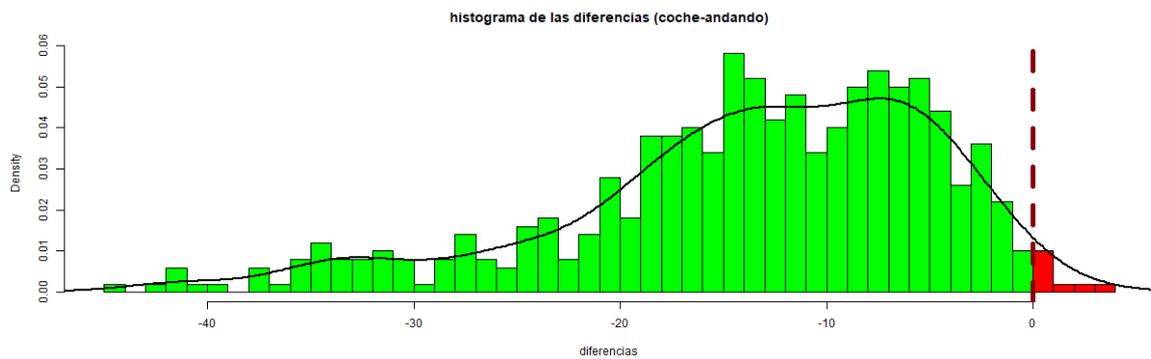


Figura 20: Distribución de la diferencia entre el tiempo que tarda la policía y el tiempo que tarda el peatón en llegar al lugar de la parada. En el escenario del testigo.

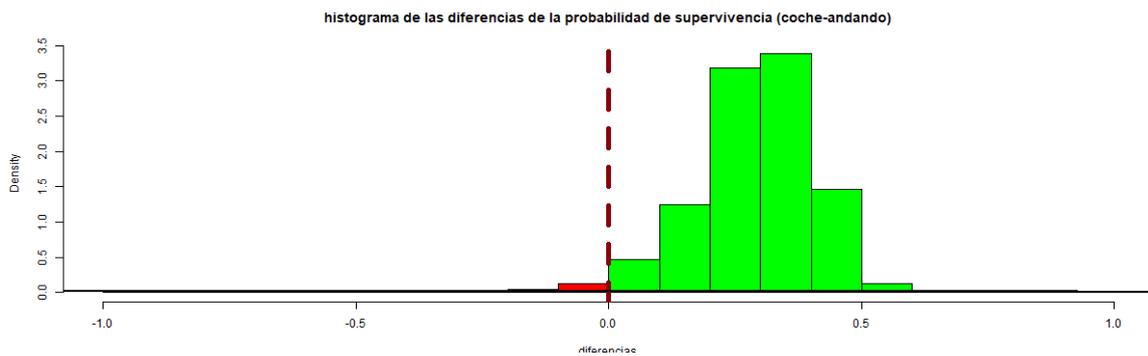


Figura 21: Distribución de la diferencia de probabilidad de supervivencia entre una parada atendida por una persona a pie y la policía. En el escenario del testigo.

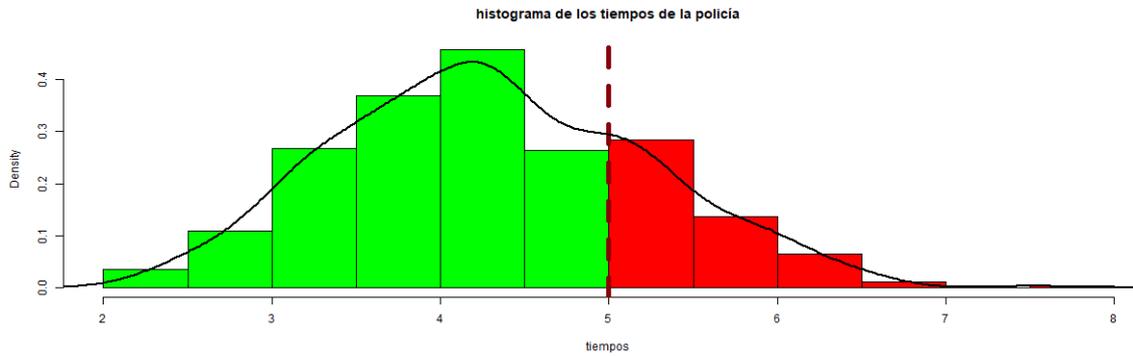


Figura 22: Distribución del tiempo que tarda la policía en llegar al lugar de la parada. En el escenario del voluntario.

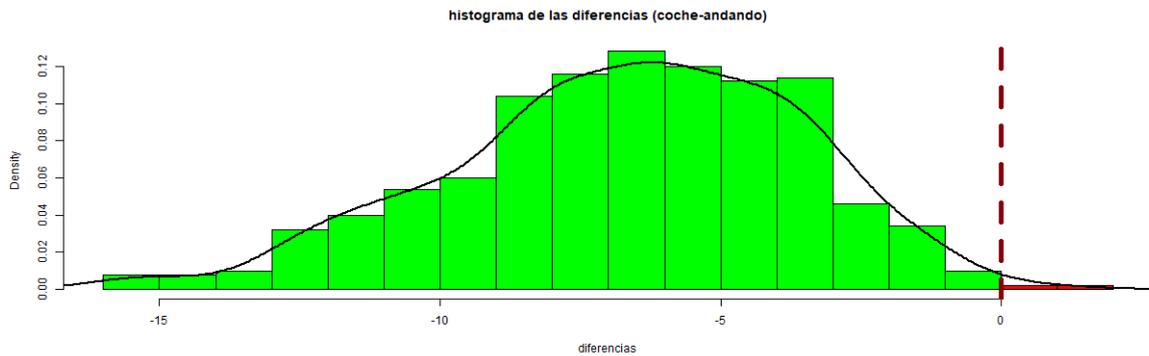


Figura 23: Distribución de la diferencia entre el tiempo que tarda la policía y el tiempo que tarda el peatón en llegar al lugar de la parada. En el escenario del voluntario.

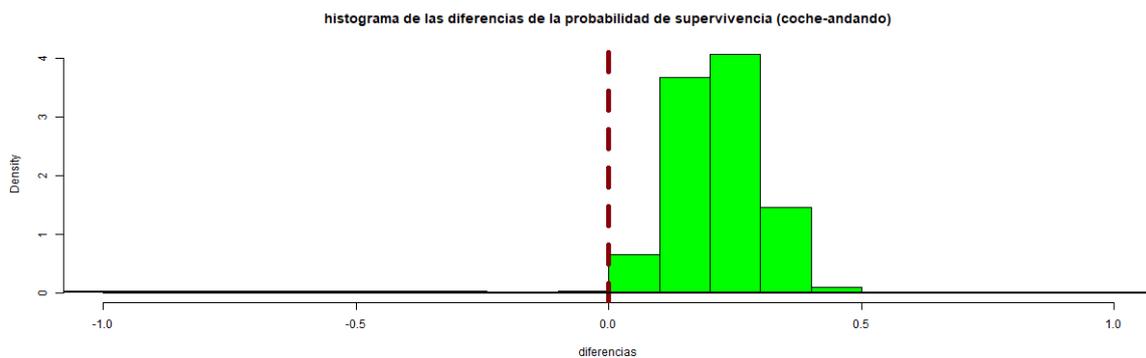


Figura 24: Distribución de la diferencia de probabilidad de supervivencia entre una parada atendida por una persona a pie y la policía. En el escenario del voluntario.

6. Conclusiones

Se ha logrado diseñar una aplicación útil y flexible, que puede ser utilizada por personas con conocimientos no expertos, para realizar análisis sobre el impacto de equipar a la policía con DEAs en Navarra. Por tanto, se considera que el objetivo principal del trabajo se ha cumplido. Además, la interacción constante con la policía municipal de Pamplona y con el departamento de emergencias externas, ha permitido realizar un caso de estudio práctico y demostrar de forma tangible que dotar a la policía de desfibriladores mejora la probabilidad de supervivencia de los pacientes que sufren paradas cardíacas. Se pone así de manifiesto la utilidad y el potencial de la aplicación diseñada.

Los resultados del caso práctico muestran que equipar a la policía municipal con DEAs supone un gran aumento de la velocidad de atención de paradas cardio-respiratorias. La policía llega antes que los peatones con probabilidad superior a 0.95 y el tiempo medio de adelanto es superior a los seis minutos, en cualquiera de los dos escenarios. La probabilidad de supervivencia de los pacientes atendidos por la policía es, generalmente, mayor en un 30-40% en el caso de los testigos y en un 20-30% en el caso de los voluntarios. Esto se traduce en 11 vidas al año salvadas de más por la policía en Pamplona, en el escenario de los testigos, y de 8, en el de los voluntarios, suponiendo un número de 40 paradas cardíacas presenciadas al año. Por tanto, el beneficio de equipar a la policía con desfibriladores frente a la presencia de DEAs públicos es claro.

Gran parte de este trabajo no hubiese sido posible sin la información aportada por los organismos colaboradores, ya que gracias a ellos se ha podido ir ajustando el modelo matemático, reunión tras reunión, a la realidad. Sin este intercambio de conocimientos, el resultado final hubiese sido muy diferente y menos útil, al no reflejar fielmente lo que realmente ocurre. Todo ello pone de manifiesto la importancia de colaborar con los actores reales a la hora de elaborar herramientas que vayan a tener un impacto social. Otro aspecto positivo de la comunicación constante es que facilita el diseño de la aplicación, al permitir comentar con los futuros usuarios qué aspectos se entienden y cuáles no.

Futuras líneas de mejora para la aplicación incluyen: modelar la posibilidad de que no siempre estén disponibles todos los coches de policía en todas las regiones, esto se podría hacer con una determinada probabilidad o dejándolo en manos del usuario; permitir actualizar de forma dinámica la base de datos de DEAs en Navarra, ya que en la versión actual es necesario actualizarlo desde un excel; permitir estudiar la interacción entre coches de policía y ambulancias, y de esta forma tener una imagen global de la situación; y dar la opción de, dada una distribución de parada cardíacas y de DEAs, optimizar la posición de los últimos para maximizar el cubrimiento.

Por último, se destaca la importancia de emplear herramientas visuales a la hora de explicar los resultados numéricos obtenidos, como el uso de histogramas, la elaboración de mapas interactivos y el uso de códigos de color, para separar los resultados positivos de los negativos. Como conclusión, para que una aplicación tenga un impacto real debe: ser fácil de usar, aportar una solución real y cercana al problema del usuario y mostrar los resultados de forma intuitiva y comprensible.

Referencias

- [1] Aeby, D., Staeger, P. y Dami, F. (2021). How to improve automated external defibrillator placement for out-of-hospital cardiac arrests: A case study. *PloS one*, 16(5), e0250591. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250591>
- [2] Alonso, R. I., Martínez, C. C., Muñoz, E. S., Lázaro, A. F. R., Tabuenca, E. I., Arrabal, C. A. y Jiménez, M. G. (2019). La enseñanza con Shiny. *Anales de ASEPUMA*, (27), 4. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7135782>
- [3] American Heart Association. (2020). *American Heart Association Guidelines for CPR and ECC*. . Recuperado en 10 de mayo de 2022, de <https://cpr.heart.org/en/resuscitation-science/cpr-and-ecc-guidelines>
- [4] Asociación Española de Enfermería en Cardiología. (2018). *Cómo actuar ante una parada cardíaca*. <https://www.enfermeriaencardiologia.com/como-actuar-ante-una-parada-cardiaca/>
- [5] Blom, M. T., Beesems, S. G., Homma, P. C., Zijlstra, J. A., Hulleman, M., Van Hoeijen, D. A., ... & Koster, R. W. (2014). Improved survival after out-of-hospital cardiac arrest and use of automated external defibrillators. *Circulation*, 130 (21), 1868-1875. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.114.010905>
- [6] Boscoe, F. P., Henry, K. A. y Zdeb, M. S. (2012). A nationwide comparison of driving distance versus straight-line distance to hospitals. *The Professional Geographer*, 64(2), 188-196. <https://doi.org/10.1080/00330124.2011.583586>
- [7] Brooks, B., Chan, S., Lander, P., Adamson, R., Hodgetts, G. A. y Deakin, C. D. (2015). Public knowledge and confidence in the use of public access defibrillation. *Heart*, 101(12), 967-971. <http://dx.doi.org/10.1136/heartjnl-2015-307624>
- [8] DeBoer, M. (2015). Understanding the heat map. *Cartographic perspectives*, (80), 39-43. <https://doi.org/10.14714/CP80.1314>
- [9] Derkenne, C., Jost, D., Roquet, F., Dardel, P., Kedzierewicz, R., Mignon, A., ... & Prunet, B. (2020). Mobile smartphone technology is associated with out-of-hospital cardiac arrest survival improvement: the first year “Greater Paris Fire Brigade” experience. *Academic Emergency Medicine*, 27(10), 951-962. <https://doi.org/10.1111/acem.13987>
- [10] Eisenberg, M., Bergner, L. y Hallstrom, A. (1979). Paramedic programs and out-of-hospital cardiac arrest: I. Factors associated with successful resuscitation. *American journal of public health*, 69(1), 30-38. <https://doi.org/10.2105/AJPH.69.1.30>
- [11] Fernández-Coppel, I. A. (2010). *Las Coordenadas Geográficas*. <https://iotsensores.com/libros/coordenadas.pdf>
- [12] Garcia-Vicuña, D., Esparza, L. y Mallor, F. Hospital preparedness during epidemics using simulation: the case of COVID-19. (2022) *Central European Journal of Operations Research*, 30 (1), pp. 213-249. <https://doi.org/10.1007/s10100-021-00779-w>

- [13] Gobierno de Navarra. (8 de octubre de 2019). *RAPIDA* (1.2) [Aplicación Móvil]. Google Play. <https://play.google.com/store/apps/details?id=es.navarra.rapida&hl=es&gl=US>
- [14] Groh, W. J., Newman, M. M., Beal, P. E., Fineberg, N. S. y Zipes, D. P. (2001). Limited response to cardiac arrest by police equipped with automated external defibrillators: lack of survival benefit in suburban and rural Indiana—the police as responder automated defibrillation evaluation (PARADE). *Academic Emergency Medicine*, 8(4), 324-330. <https://doi.org/10.1111/j.1553-2712.2001.tb02109.x>
- [15] Hallstrom, A. P., Ornato, J. P. y Weisfeldt, M. (2004). travers A, Christneson J, BcBurnie MA: Public Access Defibrillation Trial Investigators. Public-access defibrillation and survival after out-of-hospital cardiac arrest. *N Engl J Med*, 351(7), 637-46. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa040566>
- [16] Voitsekhovskii M.I. (2011). *Jordan theorem*. Encyclopedia of Mathematics. http://encyclopediaofmath.org/index.php?title=Jordan_theorem&oldid=32551
- [17] Kaklanis, N., Votis, K. y Tzovaras, D. (2013, May). *A mobile interactive maps application for a visually impaired audience*. In Proceedings of the 10th International Cross-Disciplinary Conference on Web Accessibility (pp. 1-2). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/2461121.2461152>
- [18] Ko, S. Y., Do Shin, S., Song, K. J., Park, J. H. y Lee, S. C. (2020). Effect of awareness time interval for out-of-hospital cardiac arrest on outcomes: a nationwide observational study. *Resuscitation*, 147, 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2019.12.009>
- [19] Larsen, M. P., Eisenberg, M. S., Cummins, R. O. y Hallstrom, A. P. (1993). Predicting survival from out-of-hospital cardiac arrest: a graphic model. *Annals of emergency medicine*, 22(11), 1652-1658. [https://doi.org/10.1016/S0196-0644\(05\)81302-2](https://doi.org/10.1016/S0196-0644(05)81302-2)
- [20] Law, A. M., Kelton, W. D. y Kelton, W. D. (2007). *Simulation modeling and analysis*. (Vol. 3). McGraw-hill.
- [21] Linn, S. E. (1997). The effectiveness of interactive maps in the classroom: A selected example in studying Africa. *Journal of Geography*, 96(3), 164-170. <https://doi.org/10.1080/00221349708978778>
- [22] Lowdermilk, T. (2013). *User-centered design: a developer's guide to building user-friendly applications*. O'Reilly Media, Inc.
- [23] Mosesso Jr, V. N., Davis, E. A., Auble, T. E., Paris, P. M. y Yealy, D. M. (1998). Use of automated external defibrillators by police officers for treatment of out-of-hospital cardiac arrest. *Annals of emergency medicine*, 32(2), 200-207. [https://doi.org/10.1016/S0196-0644\(98\)70137-4](https://doi.org/10.1016/S0196-0644(98)70137-4)
- [24] Petrovska, N. y Stevanovic, A. (2015, September). *Traffic congestion analysis visualisation tool*. In 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems (pp. 1489-1494). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2015.243>
- [25] Real Academia Española. (s.f.). Aplicación. En *Diccionario de la lengua española*. Recuperado en 26 de mayo de 2022, de <https://dle.rae.es/aplicación?m=form>

- [26] RStudio. (2019). *Reticulate: R interface to python*. Recuperado en 10 de abril de 2022, de <https://github.com/rstudio/reticulate>
- [27] Roth, R. E. (2013). Interactive maps: What we know and what we need to know. *Journal of Spatial Information Science*, (6), 59-115. <http://204.48.17.207/index.php/josis/article/view/35>
- [28] Roth, R., Stewart, R. D., Rogers, K. y Cannon, G. M. (1984). Out-of-hospital cardiac arrest: factors associated with survival. *Annals of emergency medicine*, 13(4), 237-243. [https://doi.org/10.1016/S0196-0644\(84\)80470-9](https://doi.org/10.1016/S0196-0644(84)80470-9)
- [29] Roth, S. D. (1982). Ray casting for modeling solids. *Computer graphics and image processing*, 18(2), 109-144. [https://doi.org/10.1016/0146-664X\(82\)90169-1](https://doi.org/10.1016/0146-664X(82)90169-1).
- [30] Sinuany-Stern, Z. y Stern, E. (1993). Simulating the evacuation of a small city: the effects of traffic factors. *Socio-Economic Planning Sciences*, 27(2), 97-108. [https://doi.org/10.1016/0038-0121\(93\)90010-G](https://doi.org/10.1016/0038-0121(93)90010-G)
- [31] Spelta, A., Flori, A., Pierri, F., Bonaccorsi, G. y Pammolli, F. (2020). After the lockdown: simulating mobility, public health and economic recovery scenarios. *Scientific reports*, 10(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73949-6>
- [32] Spiegel, M. R. y Stephens, L.J. (2007). Elementary Sampling theory en *Schaum's outline of theory and problems of statistics* (4ª ed., pp. 203-227). McGraw-Hill.
- [33] Valenzuela, T. D., Roe, D. J., Cretin, S., Spaite, D. W. y Larsen, M. P. (1997). *Estimating effectiveness of cardiac arrest interventions: a logistic regression survival model*. *Circulation*, 96(10), 3308-3313. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.96.10.3308>
- [34] Weisfeldt, M. L. y Pollack, R. A. (2017). Public access defibrillation: is this making any difference? Controversial issues in resuscitation from cardiac arrest. *Cardiac electrophysiology clinics*, 9(4), 551-557. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2017.07.006>
- [35] White, R. D., Vukov, L. F. y Bugliosi, T. F. (1994). Early defibrillation by police: initial experience with measurement of critical time intervals and patient outcome. *Annals of emergency medicine*, 23(5), 1009-1013. [https://doi.org/10.1016/S0196-0644\(94\)70095-8](https://doi.org/10.1016/S0196-0644(94)70095-8)
- [36] Yeap, E. y Uy, I. (12 de febrero de 2014). *Marker Clustering and Heatmaps: New Features in the Google Maps Android API Utility Library*. Google Geo Developers. <http://googlegeodevelopers.blogspot.com/2014/02/marker-clustering-and-heatmaps-new.html>.
- [37] Yoon, C. G., Jeong, J., Kwon, I. H. y Lee, J. H. (2016). Availability and use of public access defibrillators in Busan Metropolitan City, South Korea. *Springerplus*, 5(1), 1-5. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3201-6>