



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Plan de evacuación de Ceuta

Milagros Cabellos Cortés

Director: Dr. Antonio García y Garmendia

Madrid

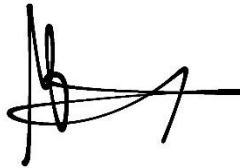
PLAN DE EVACUACIÓN DE CEUTA

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Plan de Evacuación de Ceuta

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2023/24 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido



Fdo.: Milagros Cabellos Cortés

Fecha: 05/ 08/ 2024

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Dr. Antonio García y Garmendia

Fecha: 05/ 08/ 2024

PLAN DE EVACUACIÓN DE CEUTA



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

Plan de evacuación de Ceuta

Milagros Cabellos Cortés

Director: Dr. Antonio García y Garmendia

Madrid

PLAN DE EVACUACIÓN DE CEUTA

Agradecimientos

A Dios y a mis padres, por su apoyo incondicional.

Gracias.

PLAN DE EVACUACIÓN DE CEUTA

PLAN DE EVACUACIÓN DE CEUTA

Autor: Cabellos Cortés, Milagros.

Director: Dr. García y Garmendia, Antonio.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto se centra en el diseño y evaluación de una red de evacuación optimizada para la ciudad de Ceuta en caso de un ataque desde Marruecos a través de la frontera de Benzú. Utilizando un modelo de flujo contraflujo, se realizaron simulaciones para comparar la eficiencia del sistema de evacuación en su configuración original frente a una versión optimizada que minimiza el número total de kilómetros recorridos. La investigación incluyó un análisis detallado del flujo de personas basado en la densidad poblacional y la capacidad de cada arco en la red de transporte. Los resultados mostraron una reducción significativa en la distancia total recorrida y una mejora en la eficiencia general del sistema de evacuación, destacando la importancia del contraflujo en situaciones de emergencia. La implementación del modelo optimizado permitió identificar y aliviar cuellos de botella en las carreteras críticas, mejorando así la seguridad y rapidez de la evacuación hacia la zona del puerto, desde donde se realizaría la evacuación marítima hacia la península.

Palabras clave: Ceuta, ataque, evacuación, contraflujo, Nguyen-Dupuis, optimización.

1.Introducción

En situaciones de emergencia, como un ataque a la ciudad de Ceuta desde Marruecos a través de la frontera de Benzú, la rapidez y eficiencia en la evacuación de personas son cruciales para salvar vidas. Este estudio se enfoca en la optimización de rutas de evacuación con el objetivo de minimizar el número total de kilómetros recorridos, permitiendo una evacuación eficiente hacia la zona del puerto para una posterior evacuación marítima hacia la península. Ceuta, debido a su alta densidad poblacional y su compleja logística urbana, se enfrenta a desafíos únicos en la planificación de evacuaciones. La falta de un plan específico de evacuación que aborde estas particularidades resalta una brecha significativa en la gestión de emergencias.

Este proyecto surge de la necesidad de desarrollar un sistema de evacuación efectivo y eficiente, adaptado a las condiciones específicas de Ceuta. La capacidad de interconectar sistemas y manejar grandes volúmenes de datos en tiempo real ofrece una oportunidad crítica para mejorar la gestión de emergencias. La integración de

datos desde múltiples fuentes permite la implementación de sistemas de alerta temprana y comunicación automatizada. Estos sistemas pueden informar eficazmente a los ciudadanos sobre las rutas de evacuación seguras y proporcionar alertas oportunas que pueden salvar vidas.

Además, el análisis predictivo y el modelado de riesgos son fundamentales para anticipar posibles desastres y preparar respuestas adecuadas. La aplicación de estas tecnologías puede transformar cómo las ciudades responden a emergencias, permitiendo simulaciones detalladas y evaluaciones de estrategias de evacuación bajo diversos escenarios. Este trabajo se centra en la optimización del número de kilómetros recorridos durante la evacuación, utilizando el método Nguyen-Dupuis para modelar la red vial de Ceuta y aplicar contraflujo en las principales carreteras para mejorar la eficiencia.

2. Definición del proyecto

El objetivo principal del proyecto es diseñar y evaluar un modelo de evacuación optimizado para Ceuta en caso de un ataque desde Marruecos a través de la frontera de Benzú. La importancia de este proyecto radica en la necesidad de contar con un plan de evacuación eficiente que pueda ser activado de manera rápida y efectiva, minimizando los riesgos para la población. Para alcanzar este objetivo, se desarrollaron simulaciones que comparan el comportamiento de la red de transporte de Ceuta bajo dos escenarios distintos: el modelo estándar, que representa el plan de evacuación en condiciones típicas de la carretera, y el modelo con contraflujo, una estrategia que invierte el sentido de ciertas vías para mejorar el flujo de tráfico hacia las zonas seguras. La optimización se centra en reducir el número total de kilómetros recorridos durante la evacuación, lo que se traduce en una menor congestión y una evacuación más rápida y segura.

El proceso de simulación incluyó varios pasos críticos. Primero, se utilizó el método Nguyen-Dupuis para crear un modelo detallado de la red vial de Ceuta, incorporando datos sobre la densidad poblacional y la capacidad de cada arco (tramos de carretera) en la red. Esto permitió identificar los puntos críticos y posibles cuellos de botella. En el modelo con contraflujo, se simularon escenarios donde el sentido de algunas vías principales se invertía para facilitar una evacuación más rápida. Esto involucró la reconfiguración dinámica de la red vial basada en el flujo de tráfico real y las condiciones de emergencia. Posteriormente, se realizaron múltiples simulaciones para comparar ambos modelos. Los indicadores clave de rendimiento incluyeron el número total de kilómetros recorridos y la identificación de cuellos de botella. Finalmente, los resultados de las simulaciones proporcionaron datos cuantitativos

sobre la eficiencia de cada modelo. Estos datos fueron utilizados para realizar un análisis detallado de las mejoras logradas con el contraflujo, así como para proponer ajustes específicos en la red vial de Ceuta.

La implementación de este modelo optimizado no solo busca mejorar la eficiencia de la evacuación, sino también proporcionar una base sólida para futuras mejoras en la planificación de emergencias en Ceuta. La capacidad de minimizar el número total de kilómetros recorridos tiene un impacto directo en la reducción de la congestión y el estrés en las infraestructuras viales durante una emergencia, contribuyendo significativamente a la seguridad y bienestar de la población.

3.Descripción del modelo

El objetivo principal del proyecto es diseñar y evaluar un modelo de evacuación optimizado para Ceuta en caso de un ataque desde Marruecos a través de la frontera de Benzú. La importancia de este proyecto radica en la necesidad de contar con un plan de evacuación eficiente que pueda ser activado de manera rápida y efectiva, minimizando los riesgos para la población. Para alcanzar este objetivo, se desarrollaron simulaciones que comparan el comportamiento de la red de transporte de Ceuta bajo dos escenarios distintos: el modelo estándar, que representa el plan de evacuación actual, y el modelo con contraflujo, una estrategia que invierte el sentido de ciertas vías para mejorar el flujo de tráfico hacia las zonas seguras. La optimización se centra en reducir el número total de kilómetros recorridos durante la evacuación, lo que se traduce en una menor congestión y una evacuación más rápida y segura.

El proceso de simulación incluyó varios pasos críticos. Primero, se utilizó el método Nguyen-Dupuis para crear un modelo detallado de la red vial de Ceuta, incorporando datos sobre la densidad poblacional y la capacidad de cada arco (tramos de carretera) en la red. La red Nguyen-Dupuis consta de 20 nodos y 27 arcos, como se aprecia en la ilustración de abajo. En este modelo, algunos nodos actúan como puntos de suministro, mientras que otros son puntos de demanda, y unos pocos funcionan como nodos de paso.

La capacidad de cada arco se determinó a través de un cálculo que utiliza la longitud total de la carretera (arco), la longitud efectiva del vehículo que incluye la distancia promedio del vehículo, así como la distancia de separación entre vehículos, y el número de individuos promedio por coche. Posteriormente se hizo una corrección para conseguir la capacidad a utilizar, en función de la ubicación de dicho arco, es decir a que altura de la evacuación se encuentre, y la longitud del arco. Este análisis

detallado permitió una simulación precisa del flujo de personas durante la evacuación.

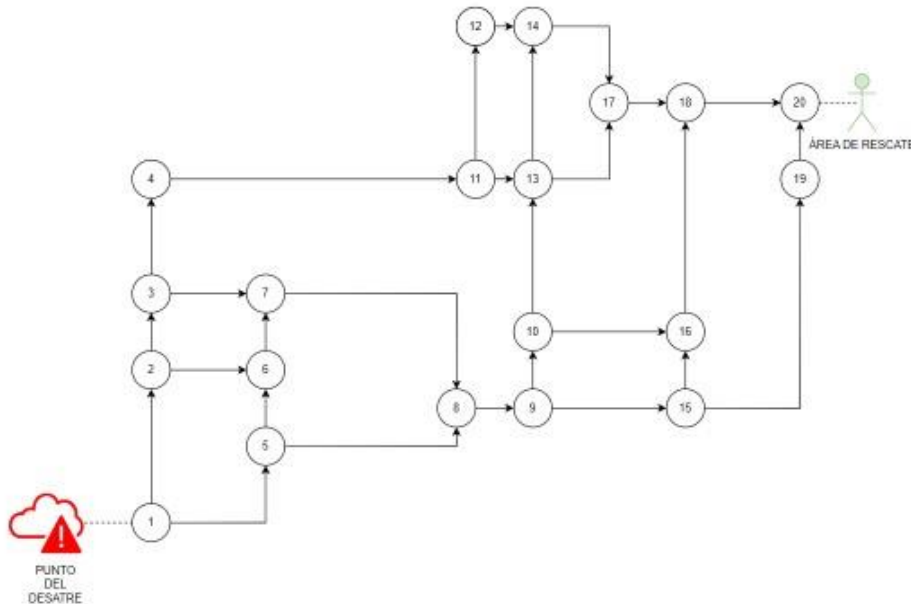


Ilustración 1 – Red Nguyen-Dupuis de la zona a evacuar de Ceuta [ELABORACIÓN PROPIA

24]

Se implementó un modelo de flujo contraflujo para mejorar la evacuación y reducir la congestión en rutas críticas. Este modelo permite revertir el sentido de una de las vías en las carreteras principales, facilitando un flujo más eficiente hacia las zonas de evacuación. Esta reconfiguración dinámica de la red vial se basa en el flujo de tráfico real y las condiciones de emergencia, proporcionando una mayor flexibilidad y adaptabilidad durante la evacuación.

Posteriormente, se realizaron múltiples simulaciones para comparar ambos modelos. Los indicadores clave de rendimiento incluyeron el número total de kilómetros recorridos y la identificación de cuellos de botella. En cada simulación, se midieron los kilómetros exactos recorridos, destacando las diferencias en eficiencia al implementar diferentes estrategias de evacuación. Los resultados de las simulaciones proporcionaron datos cuantitativos sobre la eficiencia de cada modelo, permitiendo un análisis detallado de las mejoras logradas con el contraflujo y la propuesta de ajustes específicos en la red vial de Ceuta.

La implementación de este modelo optimizado no solo busca mejorar la eficiencia, sino también proporcionar una base sólida para futuras mejoras en la planificación de emergencias en Ceuta. La capacidad de minimizar el número total de kilómetros recorridos tiene un impacto directo en la reducción de la congestión y el estrés en las infraestructuras viales durante una emergencia, contribuyendo significativamente a la seguridad y bienestar de la población.

4.Resultados

Los resultados de las simulaciones mostraron que la implementación del contraflujo redujo significativamente el número total de kilómetros recorridos en comparación con el modelo estándar. En la primera simulación, sin aplicar contraflujo, el número total de kilómetros recorridos fue de 8185,159 km. Las carreteras que estaban en su límite de capacidad eran los arcos (1,5), (2,3), (4,11), (9,15), (10,16), (11,13) y (13,17). Estos cuellos de botella fueron identificados mediante un análisis detallado del flujo de tráfico, utilizando datos de densidad poblacional y capacidad de las vías.

Para abordar estos problemas, se implementó una estrategia de contraflujo en la segunda simulación. Esto incluyó abrir contraflujos en uno de los dos carriles de sentido contrario de la Nacional 354, y en la Nacional 352 con cierta obra previa o con la ayuda de agentes para facilitar la movilidad. Estas medidas permiten una redistribución más eficiente del tráfico, reduciendo significativamente la congestión en las rutas principales.

El número de kilómetros recorridos se redujo a 7929,145 km, lo que representa una diferencia de algo más de 256 kilómetros. Esta reducción en la distancia total recorrida se traduce en una reducción del 3,178% en el número total de kilómetros recorridos. Además, la implementación del contraflujo permitió un uso más equilibrado de la capacidad vial disponible, mitigando la saturación en las rutas más críticas.

Los resultados obtenidos también resaltan la importancia de una planificación y coordinación eficientes entre las distintas agencias involucradas en la gestión de desastres. La capacidad de ajustar dinámicamente las rutas y el flujo de tráfico en tiempo real puede ser crucial para maximizar la eficacia de los esfuerzos de evacuación. Las lecciones aprendidas de este estudio pueden aplicarse a otras ciudades con características similares, mejorando la resiliencia urbana ante eventos críticos.

En resumen, la implementación del modelo de flujo contraflujo ha demostrado ser una estrategia efectiva para optimizar las evacuaciones en situaciones de emergencia. La reducción significativa en los kilómetros recorridos y la mitigación de cuellos de botella indican que este enfoque puede mejorar considerablemente la seguridad y eficiencia de las evacuaciones masivas. Estos hallazgos proporcionan una base sólida para el desarrollo de planes de evacuación más robustos y tecnológicamente avanzados en Ceuta y otras regiones vulnerables.

5. Conclusiones

La implementación del modelo de flujo contraflujo ha demostrado ser una estrategia efectiva para la optimización de la evacuación en Ceuta, reduciendo significativamente la distancia total recorrida y aliviando los cuellos de botella en las rutas más críticas. Al comparar ambos escenarios, se evidenció que el uso del contraflujo permitió una mejora notable en la eficiencia del proceso de evacuación, con una reducción del 3,178% en los kilómetros totales recorridos.

Este estudio resalta la importancia de un plan de evacuación bien diseñado y adaptable, capaz de ajustar dinámicamente las rutas y el flujo de tráfico en tiempo real para maximizar la eficacia de los esfuerzos de evacuación. La metodología y los resultados obtenidos en este proyecto proporcionan una base sólida para el desarrollo de planes de evacuación más robustos y tecnológicamente avanzados, no solo para Ceuta, sino también para otras ciudades con características similares, como puede ser Melilla.

En definitiva, la aplicación del método Nguyen-Dupuis y el contraflujo ha mejorado significativamente la capacidad de respuesta ante emergencias, ofreciendo una solución viable para la gestión de evacuaciones masivas y mejorando la seguridad y el bienestar de la población.

6. Referencias

- [1] Liu, Z., Liu, J., Shang, X., & Li, X. (2024). Data-driven evacuation and rescue traffic optimization with rescue contraflow control. *Journal Of Safety Science And Resilience*, 5(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2023.11.002>

CEUTA EVACUATION PLAN

Author: Cabellos Cortés, Milagros

Supervisor: Dr. García y Garmendia, Antonio.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This project focuses on the design and evaluation of an optimized evacuation network for the city of Ceuta in the event of an attack from Morocco via the Benzú border. Using a counterflow model, simulations were conducted to compare the efficiency of the evacuation system in its original configuration against an optimized version that minimizes the total number of kilometers traveled. The research included a detailed analysis of the flow of people based on population density and the capacity of each arc in the transportation network. The results showed a significant reduction in the total distance traveled and an improvement in the overall efficiency of the evacuation system, highlighting the importance of counterflow in emergency situations. The implementation of the optimized model allowed for the identification and alleviation of bottlenecks on critical roads, thus improving the safety and speed of evacuation to the port area, from where maritime evacuation to the peninsula would be carried out.

Keywords: Ceuta, attack, evacuation, counterflow, Nguyen-Dupuis, optimization.

1. Introduction

In emergency situations, such as an attack on the city of Ceuta from Morocco via the Benzú border, the speed and efficiency of evacuating people are crucial to saving lives. This study focuses on optimizing evacuation routes to minimize the total distance traveled, enabling an efficient evacuation to the port area for subsequent maritime evacuation to the peninsula.

Ceuta, due to its high population density and complex urban logistics, faces unique challenges in evacuation planning. The lack of a specific evacuation plan addressing these particularities highlights a significant gap in emergency management.

This project arises from the need to develop an effective and efficient evacuation system tailored to Ceuta's specific conditions. The ability to interconnect systems and handle large volumes of data in real-time offers a critical opportunity to improve emergency management. Integrating data from multiple sources enables the implementation of early warning systems and automated communication. These

systems can effectively inform citizens about safe evacuation routes and provide timely alerts that can save lives.

Furthermore, predictive analysis and risk modeling are essential for anticipating potential disasters and preparing adequate responses. The application of these technologies can transform how cities respond to emergencies, enabling detailed simulations and evaluations of evacuation strategies under various scenarios. This work focuses on optimizing the number of kilometers traveled during evacuation, using the Nguyen-Dupuis method to model Ceuta's road network and applying counterflow on major roads to improve efficiency.

2. Definition of the project

The primary objective of this project is to design and evaluate an optimized evacuation model for Ceuta in the event of an attack from Morocco via the Benzú border. The importance of this project lies in the need for an efficient evacuation plan that can be activated quickly and effectively, minimizing risks to the population. To achieve this goal, simulations were developed that compare the behavior of Ceuta's transportation network under two different scenarios: the standard model, representing the evacuation plan under typical road conditions, and the counterflow model, a strategy that reverses the direction of certain roads to improve traffic flow towards safe areas. The optimization focuses on reducing the total number of kilometers traveled during evacuation, resulting in less congestion and a faster, safer evacuation.

The simulation process involved several critical steps. First, the Nguyen-Dupuis method was used to create a detailed model of Ceuta's road network, incorporating data on population density and the capacity of each arc (road segments) in the network. This allowed for the identification of critical points and potential bottlenecks. In the counterflow model, scenarios were simulated where the direction of some major roads was reversed to facilitate a faster evacuation. This involved the dynamic reconfiguration of the road network based on real-time traffic flow and emergency conditions. Subsequently, multiple simulations were conducted to compare both models. Key performance indicators included the total number of kilometers traveled and the identification of bottlenecks. Finally, the simulation results provided quantitative data on the efficiency of each model. This data was used to conduct a detailed analysis of the improvements achieved with counterflow, as well as to propose specific adjustments to Ceuta's road network.

The implementation of this optimized model not only aims to improve evacuation efficiency but also provides a solid foundation for future improvements in emergency planning in Ceuta. The ability to minimize the total number of kilometers traveled has

a direct impact on reducing congestion and stress on road infrastructure during an emergency, contributing significantly to the safety and well-being of the population.

3. Model description

The primary objective of this project is to design and evaluate an optimized evacuation model for Ceuta in the event of an attack from Morocco via the Benzú border. The importance of this project lies in the need for an efficient evacuation plan that can be activated quickly and effectively, minimizing risks to the population. To achieve this goal, simulations were developed that compare the behavior of Ceuta's transportation network under two different scenarios: the standard model, representing the current evacuation plan, and the counterflow model, a strategy that reverses the direction of certain roads to improve traffic flow towards safe areas. The optimization focuses on reducing the total number of kilometers traveled during evacuation, resulting in less congestion and a faster, safer evacuation.

The simulation process involved several critical steps. First, the Nguyen-Dupuis method was used to create a detailed model of Ceuta's road network, incorporating data on population density and the capacity of each arc (road segments) in the network. The Nguyen-Dupuis network consists of 20 nodes and 27 arcs, as illustrated below. In this model, some nodes act as supply points, while others are demand points, and a few function as transit nodes.

The capacity of each arc was determined through a calculation using the total length of the road (arc), the effective length of the vehicle including the average vehicle length and the separation distance between vehicles, and the average number of individuals per car. Subsequently, a correction was made to obtain the capacity to be used, depending on the location of the arc, i.e., at what stage of the evacuation it is located, and the length of the arc. This detailed analysis allowed for an accurate simulation of the flow of people during the evacuation.

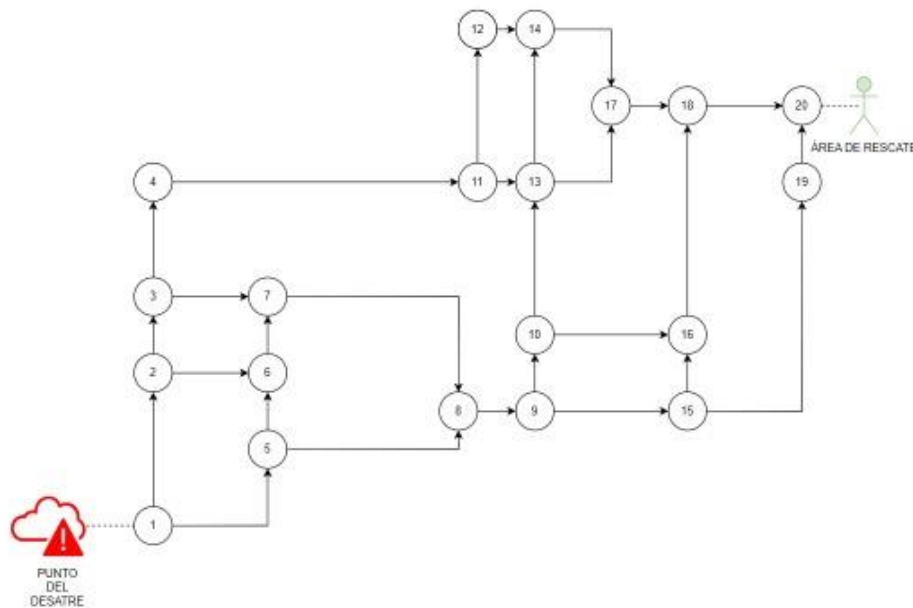


Illustration 2 - Nguyen-Dupuis Network of the evacuation area in Ceuta [ELABORACIÓN PROPIA 24]

A counterflow model was implemented to improve evacuation and reduce congestion on critical routes. This model allows for the reversal of the direction of one of the lanes on major roads, facilitating a more efficient flow towards evacuation zones. This dynamic reconfiguration of the road network is based on real-time traffic flow and emergency conditions, providing greater flexibility and adaptability during evacuation.

Subsequently, multiple simulations were conducted to compare both models. Key performance indicators included the total number of kilometers traveled and the identification of bottlenecks. In each simulation, the exact kilometers traveled were measured, highlighting the differences in efficiency when implementing different evacuation strategies. The simulation results provided quantitative data on the efficiency of each model, allowing for a detailed analysis of the improvements achieved with counterflow and the proposal of specific adjustments to Ceuta's road network.

The implementation of this optimized model not only aims to improve efficiency but also provides a solid foundation for future improvements in emergency planning in Ceuta. The ability to minimize the total number of kilometers traveled has a direct impact on reducing congestion and stress on road infrastructure during an emergency, contributing significantly to the safety and well-being of the population.

4. Results

The simulation results showed that the implementation of counterflow significantly reduced the total number of kilometers traveled compared to the standard model. In the first simulation, without applying counterflow, the total number of kilometers traveled was 8185.159 km. The roads that were at their capacity limit were arcs (1,5), (2,3), (4,11), (9,15), (10,16), (11,13), and (13,17). These bottlenecks were identified through a detailed analysis of the traffic flow, using population density data and road capacity.

To address these issues, a counterflow strategy was implemented in the second simulation. This included opening counterflows on one of the two lanes in the opposite direction of the National 354, and on the National 352 with some prior work or with the help of agents to facilitate mobility. These measures allow for a more efficient redistribution of traffic, significantly reducing congestion on major routes.

The number of kilometers traveled was reduced to 7929.145 km, representing a difference of just over 256 kilometers. This reduction in the total distance traveled translates to a 3.178% reduction in the total number of kilometers traveled. Additionally, the implementation of counterflow allowed for a more balanced use of the available road capacity, mitigating saturation on the most critical routes.

The results obtained also highlight the importance of efficient planning and coordination among the different agencies involved in disaster management. The ability to dynamically adjust routes and traffic flow in real-time can be crucial to maximizing the effectiveness of evacuation efforts. The lessons learned from this study can be applied to other cities with similar characteristics, improving urban resilience to critical events.

In summary, the implementation of the counterflow model has proven to be an effective strategy for optimizing evacuations in emergency situations. The significant reduction in kilometers traveled and the mitigation of bottlenecks indicate that this approach can significantly improve the safety and efficiency of mass evacuations. These findings provide a solid foundation for the development of more robust and technologically advanced evacuation plans in Ceuta and other vulnerable regions.

5. Conclusions

The implementation of the counterflow model has proven to be an effective strategy for optimizing evacuation in Ceuta, significantly reducing the total distance traveled and alleviating bottlenecks on the most critical routes. By comparing both scenarios, it was evident that the use of counterflow allowed for a notable improvement in the

efficiency of the evacuation process, with a 3.178% reduction in total kilometers traveled.

This study highlights the importance of a well-designed and adaptable evacuation plan, capable of dynamically adjusting routes and traffic flow in real-time to maximize the effectiveness of evacuation efforts. The methodology and results obtained in this project provide a solid foundation for the development of more robust and technologically advanced evacuation plans, not only for Ceuta but also for other cities with similar characteristics, such as Melilla.

Ultimately, the application of the Nguyen-Dupuis method and counterflow has significantly improved the ability to respond to emergencies, offering a viable solution for managing mass evacuations and improving the safety and well-being of the population.

6. References

- [1] Liu, Z., Liu, J., Shang, X., & Li, X. (2024). Data-driven evacuation and rescue traffic optimization with rescue contraflow control. *Journal Of Safety Science And Resilience*, 5(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2023.11.002>

ÍNDICE

1.Introducción.....	25
1.1 Motivación.....	25
1.2 Objetivos.....	26
1.3 Metodología de trabajo.....	27
1.4 Recursos utilizados.....	28
2.Revisión literaria.....	30
2.1 Teorías y modelos de evacuación.....	32
2.2 Estudios de casos comparativos.....	37
2.3 Análisis de infraestructura y logística en Ceuta.....	40
2.4 Demografía y consideraciones.....	47
2.5 Experiencias de evacuación en Ceuta.....	49
2.6 Tecnologías y herramientas de soporte para la evacuación.....	51
2.7 Desafíos y barreras.....	57
2.8 Síntesis de la literatura.....	62
3.Teoría matemática. Método Nguyen-Dupuis.....	64
3.1 Introducción al Método Nguyen-Dupuis.....	64
3.2 Principios de la Optimización del Tráfico.....	66
3.3 Estructura Topológica de la Red Nguyen-Dupuis.....	67
3.3.1 Descripción de la red.....	67
3.3.2 Nodos de intersección y carreteras.....	69
3.3.3 Clasificación de carreteras: virtuales vs. reales.....	70

3.4 Formulación matemática.....	71
3.4.1 Restricciones y condiciones.....	71
3.4.2 Función objetivo.....	72
4. Aplicación del método Nguyen – Dupuis a Ceuta.....	75
4.1 Análisis de Ceuta.....	78
4.2 Modelado de la Red Vial en Ceuta.....	83
4.3 Definición de variables y condiciones.....	92
4.4 Análisis de las carreteras.....	105
5. Análisis de coste beneficio.....	117
6. Conclusiones.....	123
Anexos.....	131
ÍNDICE DE FIGURAS.....	131
ÍNDICE DE TABLAS.....	134
SIMULACIÓN 1.....	136
SIMULACIÓN 2.....	145
BIBLIOGRAFÍA.....	154

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Ceuta y Melilla, enclaves estratégicos en la frontera entre España y Marruecos, se enfrentan a desafíos únicos en materia de gestión de emergencias. Su alta densidad poblacional, su compleja infraestructura y su ubicación geográfica las hacen especialmente vulnerables a una variedad de riesgos, desde incendios forestales hasta terremotos y tsunamis. La falta de un plan de evacuación integral y actualizado, adaptado a las particularidades de estas ciudades, representa una brecha significativa en su capacidad de respuesta ante eventos catastróficos.

Este trabajo de investigación tiene como objetivo principal desarrollar un plan de evacuación robusto y tecnológicamente avanzado para Ceuta y Melilla. A través de la implementación de modelos de simulación y el análisis de datos, se busca identificar las rutas de evacuación más eficientes, evaluar la capacidad de la infraestructura vial y proponer mejoras al plan de evacuación existente.

1.1 Motivación

Ceuta y Melilla, situadas en ubicaciones estratégicas en la frontera entre España y Marruecos, enfrentan desafíos únicos debido a su alta densidad poblacional y su compleja logística urbana. Estas características, combinadas con la falta de un plan específico de evacuación que aborde estas particularidades, resaltan una brecha significativa en la planificación de emergencias. Este proyecto surge de la necesidad de desarrollar un sistema de evacuación que no solo sea efectivo y eficiente, sino que también esté adaptado a las condiciones específicas de estas ciudades.

La capacidad emergente para interconectar sistemas y manejar grandes volúmenes de datos en tiempo real ofrece una oportunidad crítica para mejorar la gestión de emergencias en las Ciudades Autónomas. La integración de datos desde múltiples fuentes, incluyendo cámaras de seguridad y sensores urbanos, permite la implementación de sistemas de alerta temprana y comunicación automatizada. Estos sistemas pueden informar eficazmente a los ciudadanos sobre las rutas de evacuación seguras y proporcionar alertas oportunas que pueden salvar vidas.

Además, el análisis predictivo y el modelado de riesgos son fundamentales para anticipar posibles desastres y preparar respuestas adecuadas. La aplicación de estas tecnologías puede transformar cómo las ciudades responden a emergencias, permitiendo simulaciones detalladas y evaluaciones de estrategias de evacuación bajo diversos escenarios. Esto no solo mejora la preparación, sino que también minimiza el impacto potencial de los desastres.

Este Trabajo de Fin de Grado no es solo un proyecto académico; es una contribución tangible hacia la creación de entornos urbanos más seguros y resilientes en Ceuta y Melilla. Al abordar estas necesidades críticas y prácticas, el proyecto pretende establecer un nuevo estándar en la planificación de evacuaciones urbanas, integrando tecnología avanzada y enfoques innovadores para mejorar significativamente la seguridad y eficiencia de las respuestas a emergencias.

1.2 Objetivos

Los objetivos del proyecto se dividen en un objetivo principal, y varios específicos. El objetivo principal se centra en dar respuesta a la pregunta de investigación. Es decir, en como desarrolla un plan de evacuación integral y tecnológicamente avanzado para la ciudad de Ceuta que mejore la capacidad de respuesta ante emergencias, minimice los riesgos para la población y contribuya a la resiliencia urbana.

Como objetivos específicos:

- Evaluación de las posibles vulnerabilidades y capacidades de la infraestructura actual. Con un diagnóstico detallado que abarcará no solo las rutas de evacuación terrestres, sino también las opciones de desalojo aéreas y marítimas. Considerando factores como la densidad poblacional, accesibilidad, y posibles cuellos de botella, con el fin de fortalecer las áreas más vulnerables.
- Valoración de la integración de Tecnologías Emergentes en la Planificación de Evacuación. Se trata de explorar y adaptar tecnologías emergentes (como la simulación de evacuación, o el análisis de datos), y distintas, para optimizar los procesos actuales. Todo ellos para crear un sistema de evacuación que sea dinámico, adaptable y capaz de proporcionar información en tiempo real a los evacuados.
- Desarrollo de Estrategias de Evacuación Basadas en Simulación. Utilizar modelos de simulación para evaluar y optimizar diferentes estrategias de evacuación, adaptándolas a diversos escenarios de emergencia a través de Excel.

Al alcanzar estos objetivos, el proyecto aspira a establecer un modelo replicable para la gestión de evacuaciones en áreas urbanas complejas, contribuyendo significativamente a la seguridad y la resiliencia de las ciudades frente a emergencias.

Además, este proyecto se alinea con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, contribuyendo de manera significativa a su consecución:

Cumple con el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 9, Industria, Innovación e Infraestructura. Al integrar tecnologías avanzadas y soluciones innovadoras en la planificación de evacuaciones urbanas. La aplicación de simulaciones basadas en

datos y el uso de tecnologías de comunicación emergentes mejoran la resiliencia de las infraestructuras críticas y promueven la innovación en la gestión de emergencias y desastres.

También enlaza con el objetivo número 11, Ciudades y Comunidades Sostenibles; al centrarse en Ceuta, el proyecto aborda directamente el desafío de hacer que las ciudades sean más seguras, resilientes y sostenibles. Mediante la mejora de los planes de evacuación, se busca proteger a las comunidades urbanas de los impactos de desastres naturales y antrópicos, contribuyendo a la sostenibilidad urbana a largo plazo

1.3 Metodología de trabajo

A continuación, se presenta la metodología detallada de la investigación, la cual ha sido diseñada para garantizar una ejecución eficiente y oportuna del proyecto. Esta planificación temporal considera las interdependencias entre las diferentes etapas del estudio, desde la revisión bibliográfica inicial hasta la elaboración del plan de evacuación final.

1) Introducción. En este primer apartado, se establecerá un marco contextual sólido para el estudio, enfatizando la vulnerabilidad de la ciudad de Ceuta ante eventos catastróficos. Se detallarán los riesgos específicos a los que se enfrentan estas localidades, como incendios forestales, inundaciones o terremotos, y se argumentará la necesidad imperiosa de contar con un plan de evacuación eficaz y actualizado. Además, se definirán los objetivos generales de la investigación, los cuales abarcarán desde la evaluación de los planes de evacuación existentes hasta el desarrollo de propuestas de mejora basadas en modelos de simulación y análisis de datos.

2) Revisión crítica de la literatura. La revisión bibliográfica constituirá la base teórica del estudio. Se realizará una exploración exhaustiva de la literatura científica, centrándose en investigaciones previas sobre planificación de evacuaciones en entornos urbanos complejos, así como en el desarrollo y aplicación de modelos de simulación. Se prestará especial atención a los estudios que hayan utilizado tecnologías emergentes y análisis de big data, para mejorar la gestión de emergencias. Además, se analizarán casos de estudio de ciudades con características similares a Ceuta, identificando las mejores prácticas y las lecciones aprendidas.

3) Planteamiento del modelo teórico. A partir de la revisión bibliográfica, se desarrollará un marco teórico que integre los diferentes elementos clave para la simulación de evacuaciones. Este marco teórico incluirá la selección de un modelo

de simulación adecuado, la definición de los parámetros a considerar (densidad de población, capacidad de las vías, longitud de las carreteras, ...).

4) Simulación práctica de Ceuta. Utilizando herramientas de simulación como el Solver de Excel, se llevarán a cabo múltiples simulaciones de evacuación para Ceuta. Se construirán modelos detallados de la red vial de la ciudad, incluyendo información sobre la capacidad de cada vía, los puntos de congestión y las posibles rutas alternativas. Los resultados de estas simulaciones proporcionarán una visión detallada del comportamiento de la población durante una evacuación y permitirán identificar las principales limitaciones de los planes existentes.

5) Análisis de resultados. Los datos obtenidos de las simulaciones serán analizados mediante técnicas estadísticas y de visualización de datos. Además, se realizarán análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de diferentes variables en los resultados de las simulaciones. Los resultados del análisis permitirán identificar las áreas de mejora de los planes de evacuación existentes y proponer recomendaciones específicas.

6) Viabilidad económica. La implementación de un plan de evacuación actualizado implica una inversión económica significativa. En esta etapa, se realizará un análisis de coste-beneficio para evaluar la viabilidad económica de las diferentes propuestas. Se estimarán los costos asociados a la implementación del plan, como la adquisición de software, la capacitación del personal y la señalización de las rutas de evacuación. Además, se cuantificarán los beneficios económicos y sociales derivados de la reducción de pérdidas humanas y materiales en caso de desastre.

7) Elaboración de conclusiones y desarrollos futuros. Finalmente, se sintetizarán los hallazgos más relevantes del estudio y se presentarán las conclusiones principales. Se propondrán recomendaciones específicas para mejorar los planes de evacuación existentes en Ceuta, así como para futuras investigaciones en este campo. Se discutirán las limitaciones del estudio y se identificarán las áreas que requieren mayor investigación. Además, se explorarán las posibilidades de aplicar los resultados obtenidos a otras ciudades con características similares, contribuyendo así al desarrollo de un marco general para la planificación de evacuaciones en entornos urbanos complejos.

1.4 Recursos utilizados

Para asegurar la implementación exitosa de las técnicas descritas en la metodología de este TFG sobre el plan de evacuación para Ceuta, es esencial disponer de los recursos y herramientas adecuados. A continuación, se detallan los recursos clave

que se emplearán en el proyecto, evaluando su disponibilidad y cómo facilitarán la realización de las técnicas propuestas.

Datos y Estadísticas Oficiales: Acceso a datos demográficos, urbanísticos y de infraestructuras de Ceuta. Esto podría incluir mapas detallados a través de Google Maps, datos de tráfico y población, y registros de emergencias pasadas.

Microsoft Office Suite: Se utilizará el paquete completo de Microsoft Office, incluyendo Excel, Word y PowerPoint. Excel será fundamental para el análisis de datos, la creación de modelos de simulación y la generación de gráficos. Word se empleará para la redacción del informe final y PowerPoint para la presentación de los resultados.

Software de Simulación: Herramientas como el Solver de Excel para llevar a cabo las optimizaciones o similares para realizar simulaciones de evacuación. Estas herramientas te permitirán modelar diferentes escenarios de evacuación y analizar la eficacia de diversas estrategias.

Bibliografía: Para respaldar y legitimar los argumentos presentados, mostrando la base teórica y empírica sobre la cual se construye el estudio.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN LITERARIA

La revisión literaria de este Trabajo de Fin de Grado (TFG) tiene como propósito fundamental proporcionar una base sólida y comprensiva sobre las mejores prácticas, teorías, modelos y tecnologías aplicadas a la planificación de evacuaciones en entornos urbanos complejos. En particular, se enfoca en la evaluación de las infraestructuras, la integración de tecnologías emergentes, y el desarrollo de estrategias efectivas para la evacuación de la ciudad autónoma de Ceuta. La bibliografía revisada es la base de nuestro trabajo, proporcionando los conocimientos necesarios para el desarrollo de un plan de evacuación integral y tecnológicamente avanzado.

La planificación de evacuaciones en Ceuta es particularmente relevante debido a su ubicación geográfica estratégica, su alta densidad de población y su importancia política y cultural. Estas ciudades autónomas enfrentan una serie de riesgos potenciales, tanto naturales como antrópicos, que podrían requerir la evacuación de sus habitantes. Sin embargo, actualmente no existe una literatura específica que aborde directamente la planificación de evacuaciones para estas localidades. Por ello, este TFG busca llenar este vacío, proporcionando un marco teórico y práctico que pueda ser aplicado en cualquiera de las ciudades autónomas, y potencialmente en otras ciudades con características similares. Al desarrollar y optimizar planes de evacuación que sean eficaces y eficientes, este estudio aspira a mejorar la seguridad y la resiliencia urbana de estas ciudades, contribuyendo significativamente a la literatura existente sobre gestión de emergencias y evacuaciones urbanas.

La revisión abarca una serie de temas y áreas clave que son fundamentales para la planificación de evacuaciones. Antes de nada, se analizan distintas teorías y modelos de evacuación. Se revisarán los principios generales de la planificación de evacuaciones y los modelos teóricos empleados. Esto incluye estudios sobre patrones de evacuación y simulaciones, sobre modelos de planificación basados en patrones para áreas urbanas¹, y el uso de sistemas avanzados de simulación como EURASIM para evaluar estrategias de evacuación.

Posteriormente se pasa al estudio de casos comparativos, donde se lleva a cabo un análisis sobre evacuaciones exitosas en otras regiones geográficas similares. Por ejemplo, el estudio sobre la evacuación de emergencia de Fort McMurray² y el impacto de ciclones tropicales en infraestructuras urbanas.

¹ Bretschneider ,(2012)

² Woo et al., (2017)

En el análisis de infraestructura y logística en Ceuta, se describe y evalúa la infraestructura crítica, así como la capacidad de las rutas de acceso y salida existentes para manejar flujos de evacuación. Este análisis se basará en estudios como el marco integrado de planificación de evacuaciones urbanas³.

En el apartado de demografía y consideraciones sociales, se abordan las características demográficas relevantes para la planificación de evacuaciones, incluyendo consideraciones especiales para grupos vulnerables y necesidades de la población. Por ejemplo, es crucial comprender la composición demográfica, como la distribución por edades y niveles de ingresos, y prestar atención a grupos vulnerables como personas mayores, niños y migrantes.

Las experiencias de evacuación en Ceuta revisan incidentes pasados donde se requirieron evacuaciones en y las respuestas y preparaciones existentes frente a emergencias. Un ejemplo es el simulacro de emergencia realizado en el Helipuerto de Ceuta⁴ para analizar la coordinación y los tiempos de respuesta ante un accidente.

En cuanto a las tecnologías y herramientas de soporte para la evacuación, se destaca la integración de innovaciones tecnológicas como esencial para mejorar la gestión de evacuaciones. Este apartado examina herramientas como sistemas de navegación inteligentes y aplicaciones de realidad aumentada⁵. Por ejemplo, el uso de datos de GPS⁶ puede modelar decisiones de evacuación, y la realidad aumentada puede proporcionar indicaciones visuales en tiempo real.

Los desafíos y barreras identifican los principales obstáculos para implementar planes de evacuación efectivos, incluyendo aspectos infraestructurales, logísticos y sociopolíticos. Se destaca la importancia de desarrollar modelos de evacuación robustos frente a las incertidumbres de la red urbana⁷, y se subraya cómo las vulnerabilidades sociales afectan las evacuaciones⁸.

La síntesis de la literatura y direcciones futuras integra los hallazgos clave de la revisión y sugiere direcciones para investigaciones futuras. Por ejemplo, se sugiere explorar más a fondo la efectividad de la colaboración interagencial y las estrategias para mejorar la preparación comunitaria en la ciudad de Ceuta.

³Wei et al., (2008).

⁴ (El Helipuerto de Ceuta Realiza un Simulacro de Emergencia Para Analizar la Coordinación y los Tiempos de Respuesta Ante un Accidente, s. f.-b).

⁵ Lovreglio, (2018).

⁶ Görbil et al., (2011).

⁷ Maiwald, (2017).

⁸ Eriksen y Gill, (2020).

Finalmente, las conclusiones de la revisión literaria resumen los aprendizajes más importantes e implicaciones para el diseño del plan de evacuación en la zona urbana de Ceuta. La revisión destaca la necesidad de una planificación detallada y adaptativa, incorporando tanto tecnologías avanzadas como consideraciones demográficas y sociales específicas.

Este enfoque integral y basado en evidencia permitirá que Ceuta desarrolle y optimice planes de evacuación efectivos, asegurando la seguridad y el bienestar de sus habitantes en situaciones de emergencia.

2.1. Teorías y Modelos de Evacuación

Este apartado se centra en analizar y sintetizar diferentes teorías y modelos de evacuación empleados en la planificación y gestión de emergencias. La revisión incluye tanto principios generales de la planificación de evacuaciones como modelos teóricos y metodológicos específicos utilizados para diseñar estrategias de evacuación eficaces. La finalidad es proporcionar una base sólida que guíe el desarrollo de un plan de evacuación adaptado a las necesidades y características específicas de Ceuta.

La planificación de evacuaciones implica la integración de múltiples disciplinas para asegurar la salida rápida y segura de las personas en situaciones de emergencia. Los principios generales incluyen la identificación de rutas seguras, la preparación de la infraestructura necesaria, la comunicación efectiva con la población y la coordinación entre las agencias de respuesta. Estos principios son esenciales para desarrollar estrategias de evacuación que minimicen el riesgo y maximicen la seguridad de los evacuados.

Existen distintos modelos teóricos y metodológicos empleados en la evacuación de emergencias, por ejemplo⁹ se basa en la planificación de patrones para áreas urbanas, y optimiza los flujos de tráfico y los tiempos de evacuación mediante un enfoque estructurado. Utiliza un modelo dinámico de flujo de red que permite manejar eficazmente los desplazamientos en situaciones de emergencia, minimizando los cuellos de botella y optimizando el uso de recursos. Este enfoque es especialmente relevante para áreas urbanas densamente pobladas como Ceuta, donde la congestión del tráfico puede ser un desafío significativo durante una evacuación.

⁹ Bretschneider, S., (2012).

Este otro estudio destaca la importancia de las simulaciones para la planificación de evacuaciones¹⁰. Utilizando el sistema EURASIM, los autores pueden simular y evaluar diferentes estrategias de evacuación en tiempo real, optimizando las rutas y mejorando la eficacia de los planes de evacuación. EURASIM permite la integración de algoritmos avanzados que facilitan la planificación basada en escenarios variados, una característica crucial para responder a situaciones de emergencia impredecibles.

Se analiza además un modelo de red extendido en el tiempo se centra en la gestión de evacuaciones escalonadas¹¹. Al considerar la dinámica temporal y espacial, facilita una distribución equitativa de las cargas de tráfico y una utilización más eficiente de las infraestructuras disponibles. Esto es esencial para ciudades como Ceuta, donde la densidad poblacional y la configuración urbana pueden complicar las evacuaciones.

El estudio "Emergency Logistics in a Large-Scale Disaster Context: Achievements and Challenges"¹² ofrece una revisión detallada sobre la logística de emergencia en desastres a gran escala. Los autores destacan la importancia de desarrollar modelos teóricos que consideren la complejidad y los desafíos inherentes a estos eventos, como el gran impacto, las severas consecuencias, la participación de múltiples agencias, la presión de tiempo, la escasez de recursos, la incertidumbre y los daños a la infraestructura. Estos modelos integrados abordan todo el proceso logístico de emergencia, desde la evaluación de la demanda hasta la distribución de recursos y la evacuación de personas.

El estudio "Aplicación de un estudio de simulación para la definición de políticas de evacuación"¹³ utiliza simulaciones basadas en agentes para evaluar la efectividad de diferentes políticas de evacuación en el estadio Luna Park, Buenos Aires. Utilizando el software Anylogic, se modela un entorno en 2D para simular diversos escenarios con configuraciones variables de salidas de emergencia. Este método permite ajustar parámetros como la velocidad de los agentes y la disponibilidad de salidas de emergencia, proporcionando una visión detallada de cómo diferentes factores pueden influir en el proceso de evacuación.

El estudio "Evacuating Isolated Islands with Marine Resources: A Bowen Island Case Study"¹⁴ ofrece un marco teórico robusto para la planificación de evacuaciones en

¹⁰ Chondrogiannis, T., Bouros, P., & Emser, W. (2021).

¹¹ Li, X., Li, Q., & Claramunt, C., (2017).

¹² Jiang, Y., & Yuan, Y., (2019).

¹³ Cuello et al., (2021).

¹⁴ Krutein, K. F., McGowan, J., & Goodchild, A., (2022).

islas aisladas, destacando la importancia de los recursos marinos y la simulación de estrategias de evacuación. Utilizando herramientas de simulación, los autores evalúan la eficacia de diferentes estrategias de evacuación, subrayando la necesidad de capacitación y preparación comunitaria.

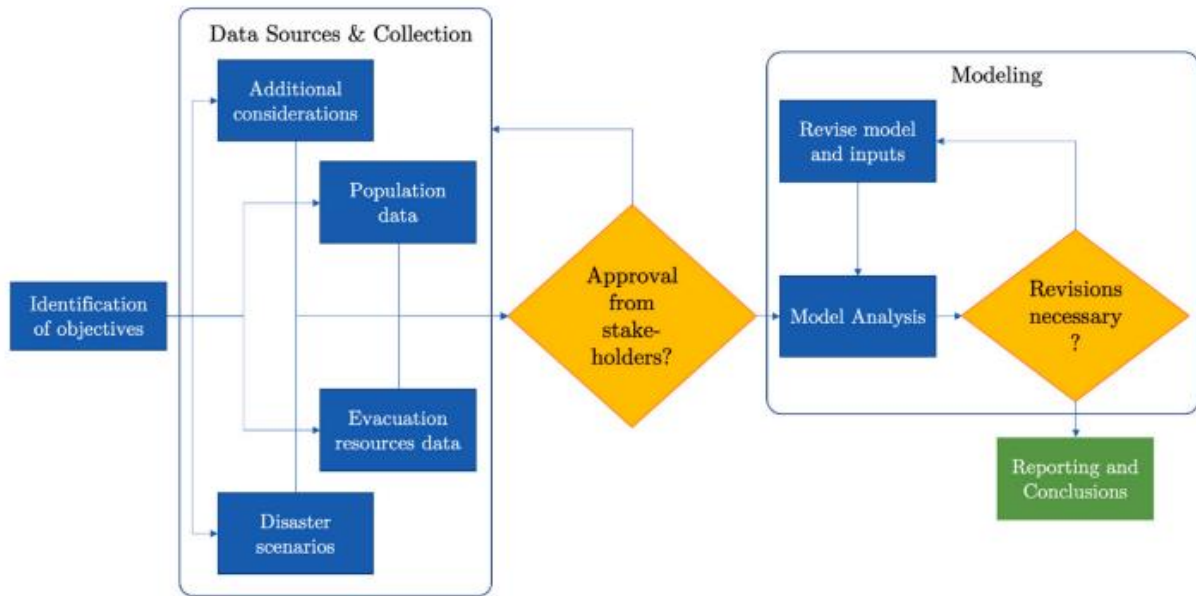


Figura 1. Plantilla del proceso de estudio de caso.¹⁵

Esta figura ilustra el proceso general utilizado para desarrollar y validar los modelos de evacuación. El proceso comienza con la identificación de objetivos y la recolección de datos relevantes, como datos de población, escenarios de desastres y recursos de evacuación. Luego, se busca la aprobación de los interesados antes de proceder al análisis del modelo. Las revisiones del modelo se realizan según sea necesario, y finalmente, se generan informes y conclusiones. Este enfoque estructurado asegura que los modelos de evacuación sean rigurosamente evaluados y ajustados para maximizar su efectividad.

¹⁵ Krutein, K. F., McGowan, J., & Goodchild, A., (2022).

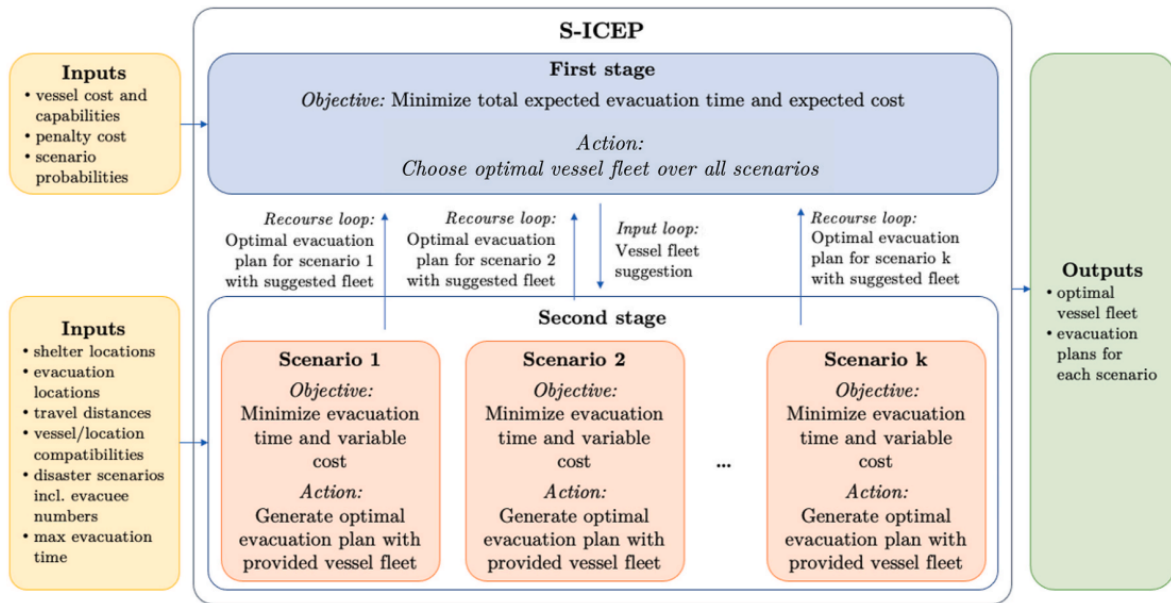


Figura 2. Modelo de dos etapas S-ICEP.¹⁶

Podemos ver que el estudio se enfoca en minimizar el tiempo de evacuación y los costos a través de la selección óptima de flotas de embarcaciones y la generación de planes de evacuación específicos para diferentes escenarios.

¹⁶ Krutein, K. F., McGowan, J., & Goodchild, A., (2022).

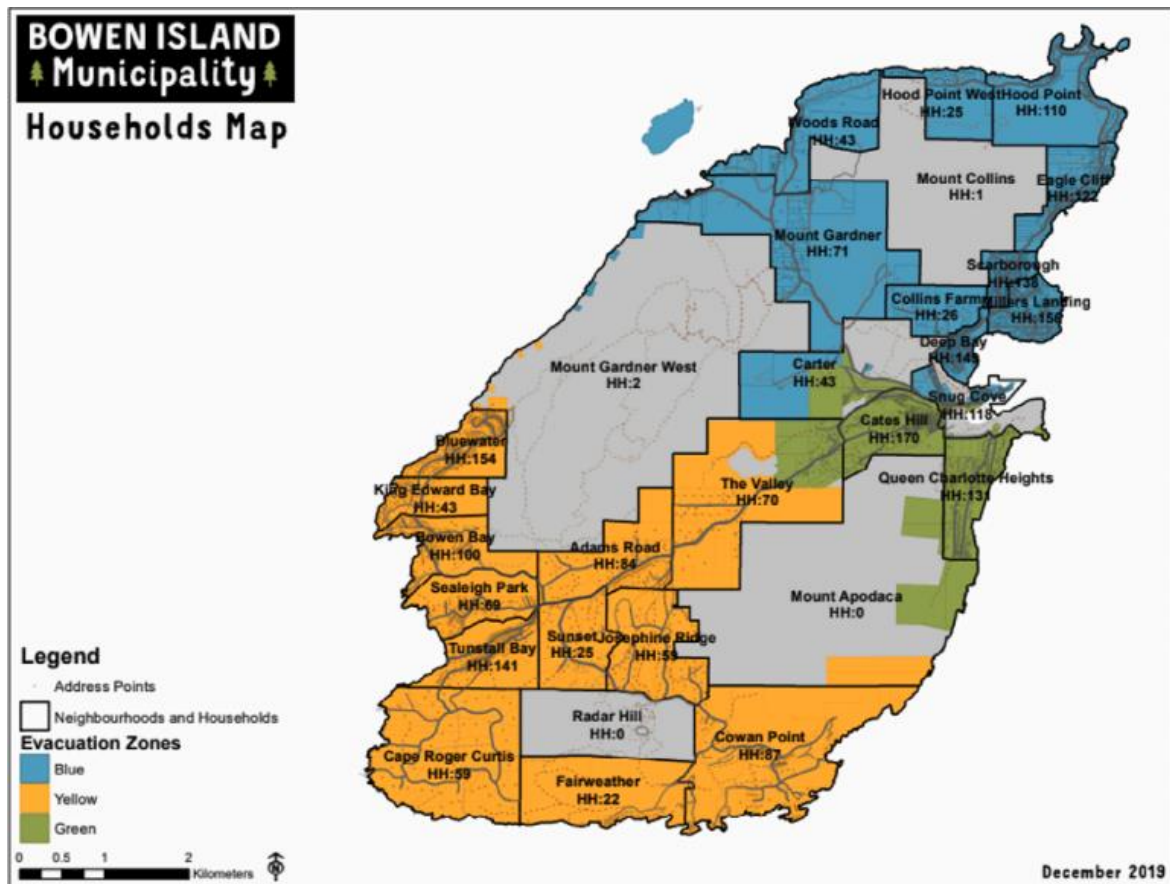


Figura 3. Mapa de los hogares en la Isla Bowen, categorizando diferentes zonas de evacuación.¹⁷

El mapa destaca claramente las zonas de evacuación, lo que facilita la planificación y ejecución de evacuaciones. Para Ceuta, un mapa similar podría identificar áreas de alto riesgo y rutas de evacuación preferidas, ayudando a coordinar mejor los esfuerzos de evacuación. La capacidad de visualizar la distribución de la población y las infraestructuras críticas en un formato de mapa es invaluable para la planificación de emergencias. Esto permitiría a los planificadores en Ceuta identificar rápidamente las áreas que necesitan atención prioritaria durante una evacuación.

Al igual que en la Isla Bowen, donde se utilizan recursos marinos para la evacuación, Ceuta puede beneficiarse de la planificación que incorpora tanto las rutas terrestres como marítimas, optimizando el uso de todos los recursos disponibles.

Importancia para el plan de evacuación de Ceuta. Estos estudios y modelos teóricos son fundamentales para desarrollar un plan de evacuación efectivo y adaptado a las características específicas de la ciudad de Ceuta. La optimización de flujos y tiempos

¹⁷ Krutein, K. F., McGowan, J., & Goodchild, A., (2022).

de evacuación¹⁸, proporciona metodologías detalladas para manejar eficazmente los desplazamientos y minimizar los cuellos de botella, lo cual es crucial en ciudades con alta densidad poblacional y complejas configuraciones urbanas. La planificación basada en simulaciones¹⁹, permite evaluar diferentes escenarios de evacuación en tiempo real, ajustando variables críticas y mejorando la eficacia de los planes de evacuación. Esta capacidad de simular y prever diferentes situaciones es esencial para responder de manera eficiente a emergencias impredecibles.

La logística de emergencia en desastres a gran escala²⁰, proporciona un marco teórico integral que aborda todo el proceso logístico, desde la evaluación de la demanda hasta la distribución de recursos y la evacuación de personas. Este enfoque es particularmente relevante para asegurar una coordinación efectiva y una respuesta rápida en situaciones de emergencia que involucren múltiples agencias y recursos limitados. Por último, se resalta la importancia de los recursos marinos y la capacitación comunitaria²¹, ofreciendo valiosas lecciones que pueden ser adaptadas para integrar rutas marítimas y mejorar la preparación comunitaria en Ceuta. La combinación de estos enfoques teóricos y metodológicos proporciona una base sólida para desarrollar estrategias de evacuación que sean efectivas, eficientes y adaptadas a las condiciones específicas de estas ciudades, mejorando así su resiliencia ante emergencias.

2.2. Estudios de Casos Comparativos

Este apartado tiene como objetivo analizar diversos estudios de caso sobre evacuaciones en diferentes contextos geográficos y de emergencia. Se busca extraer lecciones aprendidas y prácticas recomendadas que puedan ser adaptadas y aplicadas a Ceuta para mejorar su plan de evacuación. Cada estudio ofrece perspectivas valiosas sobre la gestión de evacuaciones, destacando estrategias efectivas y áreas de mejora que son cruciales para desarrollar planes de evacuación robustos y eficientes.

Se examina la evacuación de Fort McMurray²², Alberta, durante el incendio forestal de mayo de 2016, utilizando datos de conteo de tráfico y radar de vuelos. El análisis reveló un patrón de evacuación en forma de S, donde la evacuación se aceleró rápidamente después de la orden oficial y luego disminuyó a medida que más

¹⁸ Bretschneider, S., (2012).

¹⁹ Chondrogiannis, T., Bouros, P., & Emser, W., (2021).

²⁰ Jiang, Y., & Yuan, Y., (2019).

²¹ Krutein, K. F., McGowan, J., & Goodchild, A., (2022).

²² Woo, M., et al., (2017).

personas abandonaban la zona. Este patrón subraya la respuesta rápida de la comunidad ante la emergencia. La evacuación destacó la eficacia de las decisiones de dirigir a los evacuados hacia el norte a refugios temporales, lo que facilitó una salida rápida de las zonas de peligro. Sin embargo, el estudio también notó que una operación de contraflujo no planificada, aunque aumentó la capacidad de las carreteras, sugirió que una gestión más efectiva del tráfico podría haber reducido aún más la congestión. Además, el uso significativo del transporte aéreo resaltó la importancia de incluir múltiples modos de transporte en los planes de evacuación, especialmente en comunidades remotas o con redes de transporte limitadas. Estos hallazgos proporcionan lecciones cruciales para la planificación de futuras evacuaciones, resaltando la necesidad de estrategias que optimicen el uso de todas las rutas disponibles y modos de transporte para mejorar la eficiencia y eficacia de las evacuaciones.

Se analizan los impactos de ciclones tropicales y evaluación de daño ambiental.²³ La implementación de planes de evacuación eficaces en zonas urbanas como Ceuta es esencial debido a su alta densidad de población y ubicación geográfica estratégica. Estas ciudades requieren soluciones avanzadas para enfrentar tanto desastres naturales como humanos. Un ejemplo reciente es el ciclón Idai en 2019, que resalta la vulnerabilidad de las infraestructuras urbanas ante eventos catastróficos. Este contexto destaca la importancia de un enfoque multidisciplinario y multisectorial para la planificación de evacuaciones efectivas.

El estudio sobre la preparación y resiliencia ante tsunamis en la zona de subducción de Cascadia²⁴ proporciona una metodología detallada para evaluar la logística de evacuación y los tiempos estimados de despeje. Mediante encuestas a hogares y modelos de simulación, el estudio identifica los tiempos de preparación y de viaje, destacando la importancia de la educación comunitaria y la planificación detallada para asegurar una evacuación rápida y eficiente. Los hallazgos de este estudio son particularmente relevantes para Ceuta, donde la preparación de la comunidad y la rapidez en la respuesta son esenciales para mitigar los riesgos asociados a desastres naturales y humanitarios.

El estudio sobre el comportamiento durante y después un terremoto²⁵ emplea un enfoque de métodos mixtos que combina datos cuantitativos de encuestas con percepciones cualitativas para comprender el comportamiento de evacuación

²³ Kai, K., et al., (2021).

²⁴ Chen, C., et al., (2022).

²⁵ Fraser, S.A., et al., (2016).

durante y después de los terremotos. El uso de cuestionarios entregados a los residentes en suburbios costeros proporcionó información detallada sobre sus percepciones y acciones. Los hallazgos del estudio, que indican que la intensidad y duración percibidas del terremoto fueron comúnmente sobrestimadas, destacan la necesidad de herramientas de evaluación precisas y fiables en la planificación de evacuaciones. Además, el estudio incluye análisis estadísticos detallados de las respuestas de los residentes, estos análisis permiten identificar patrones y tendencias en el comportamiento de evacuación, proporcionando una base sólida para desarrollar modelos predictivos y teóricos. La investigación subraya la importancia de integrar la participación comunitaria y la educación en los modelos teóricos, asegurando que los residentes estén bien informados sobre las advertencias naturales y las respuestas adecuadas. Este enfoque es particularmente relevante para Ceuta, donde iniciativas similares de participación y educación comunitaria podrían mejorar la efectividad de los planes de evacuación.

El estudio titulado "Simulation-based evaluation of evacuation effectiveness using driving behavior sensitivity analysis"²⁶ examina cómo el comportamiento de los conductores afecta la eficacia de las evacuaciones durante emergencias. Utilizando el modelo de simulación de tráfico AIMSUN y aplicando un análisis de sensibilidad, los autores evaluaron cómo variaciones en la agresividad de los conductores influían en el tiempo de evacuación y la cantidad de personas evacuadas. El estudio emplea simulaciones basadas en el comportamiento de los conductores para evaluar diferentes escenarios de evacuación en la isla de Santorini. Debido a la falta de datos precisos sobre el comportamiento de los conductores en emergencias, se utilizó un análisis de sensibilidad para identificar los parámetros más influyentes.

La simulación con el modelo AIMSUN permite evaluar los impactos de diferentes comportamientos de conducción en la eficiencia de las evacuaciones. La aceptación de velocidad y la aceleración máxima se identificaron como los parámetros más influyentes en la eficacia de la evacuación. Variaciones en estos parámetros influyen significativamente en el tiempo de evacuación y en la cantidad de personas evacuadas. Se configuraron dos escenarios de demanda: el mejor caso (baja demanda) y el peor caso (alta demanda). Cada escenario se simuló con diferentes configuraciones de comportamiento de los conductores para determinar los tiempos de evacuación y la cantidad de personas evacuadas. El mejor caso representa condiciones de tráfico más favorables, mientras que el peor caso refleja situaciones de alta congestión y demanda. El estudio evaluó medidas como el uso de transporte público y la reversión de carriles (contraflujo) para mejorar la evacuación. La

²⁶ Kostovasili, M., & Antoniou, C., (2017).

combinación de estas medidas demostró ser efectiva para reducir los tiempos de evacuación y aumentar el número de personas evacuadas. En particular, la reversión de carriles en las vías más congestionadas mostró una reducción significativa en los tiempos de evacuación. Además, el uso de autobuses aumenta el número de personas evacuadas, aunque puede incrementar ligeramente el tiempo mínimo de evacuación. Estas conclusiones sugieren que la implementación de medidas de contraflujo y la integración del transporte público son estrategias efectivas para mejorar la eficiencia de las evacuaciones.

Importancia para el plan de evacuación de Ceuta. Los estudios analizados en esta sección proporcionan lecciones valiosas y estrategias que pueden ser adaptadas para el contexto de Ceuta. La evacuación de Fort McMurray²⁷ destaca la importancia de una gestión eficaz del tráfico y la integración de múltiples modos de transporte, lo que puede aplicarse para optimizar las rutas de evacuación en Ceuta. El estudio de los ciclones tropicales²⁸ resalta la necesidad de una planificación multidisciplinaria para manejar desastres naturales, un enfoque que es crucial para una ciudad con alta densidad poblacional y ubicación estratégicas como Ceuta. La preparación y resiliencia ante tsunamis²⁹ subraya la importancia de la educación comunitaria y la planificación detallada, elementos esenciales para asegurar una respuesta rápida y eficiente en situaciones de emergencia. Los análisis de comportamiento de evacuación en respuesta a terremotos³⁰ muestran la necesidad de herramientas de evaluación precisas y la importancia de la participación comunitaria, principios que pueden mejorar la efectividad de los planes de evacuación en Ceuta. Finalmente, el análisis del comportamiento de los conductores³¹ y las estrategias de contraflujo ofrecen insights sobre cómo gestionar mejor el tráfico y optimizar las rutas de evacuación, estrategias que pueden ser vitales para mejorar la eficiencia de las evacuaciones en estas ciudades.

2.3. Análisis de Infraestructura y Logística en Ceuta

El análisis de la infraestructura y logística en Ceuta es crucial para desarrollar un plan de evacuación efectivo. Este apartado examina diversos estudios y enfoques metodológicos que ofrecen insights valiosos sobre cómo optimizar las rutas de

²⁷ Woo, M., et al., (2017).

²⁸ Kai, K., et al., (2021).

²⁹ Chen, C., et al., (2022).

³⁰ Fraser, S.A., et al., (2016).

³¹ Kostovasili, M., & Antoniou, C., (2017).

evacuación, gestionar el tráfico durante emergencias y asegurar que las infraestructuras críticas estén preparadas para enfrentar desastres.

En el primer estudio analizado se presenta un enfoque integrado para la planificación de evacuaciones en áreas urbanas afectadas por desastres provocados por el hombre³². Este marco combina sistemas multiagente y GIS para simular y gestionar evacuaciones, considerando tanto la infraestructura física como los comportamientos humanos. Este marco incluye tres componentes clave, Emergency Evacuation Backbone Network (integra áreas críticas, rutas de evacuación y refugios, optimizando el flujo de evacuación y la respuesta en emergencias), modelos de planificación de tráfico (controlan el tráfico en zonas de daño y zonas buffer, facilitando la gestión eficiente del tráfico de evacuación y regular), y la comunicación de emergencia, la cual discute los sistemas de comunicación necesarios durante evacuaciones, destacando la importancia de la conciencia situacional y el comportamiento humano en crisis. Este enfoque puede ser adaptado para Ceuta, mejorando la planificación de evacuaciones y asegurando una respuesta rápida y organizada.

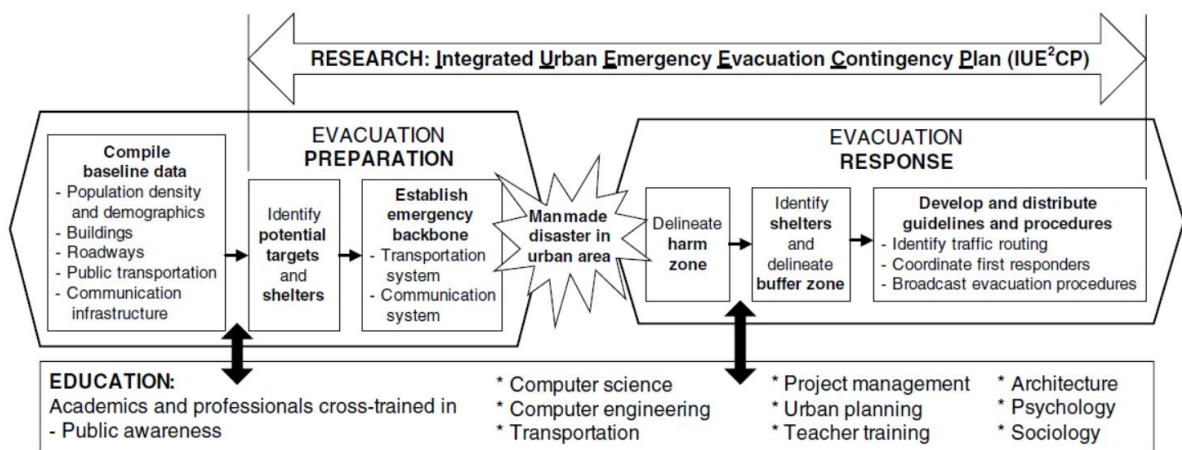


Figura 4. Concepto del Plan de Contingencia para Evacuaciones Urbanas de Emergencia Integradas (IUE²CP).³³

Este diagrama ilustra cómo se compilan los datos de línea base, se preparan las evacuaciones y se responden a las emergencias. La red de evacuación de emergencia (Emergency Evacuation Backbone Network) integra áreas críticas, rutas de evacuación y refugios, optimizando el flujo de evacuación y la respuesta en

³² Wei et al., (2008).

³³ Wei et al., (2008).

emergencias. Los modelos de planificación de tráfico gestionan el tráfico en zonas de daño y buffer, facilitando la gestión eficiente durante las evacuaciones.

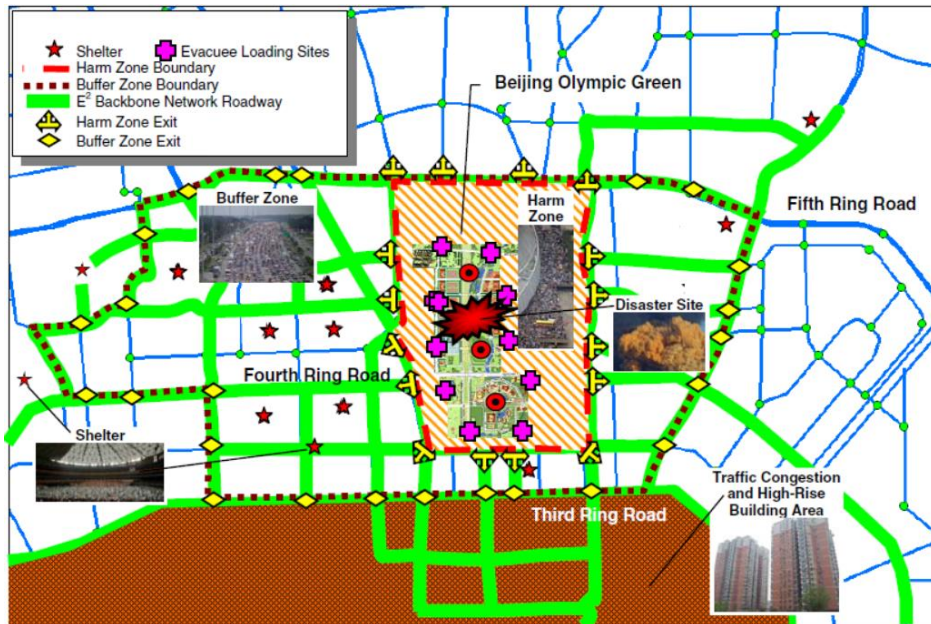


Figura 5. Componentes clave del IUE²CP aplicados en el Beijing Olympic Green.³⁴

Muestra cómo se identifican y delimitan las zonas de daño y buffer, así como los puntos de refugio y carga de evacuados. Esta ilustración es esencial para entender la planificación de rutas de evacuación y la importancia de una comunicación efectiva durante las emergencias.

³⁴ Wei et al., (2008).

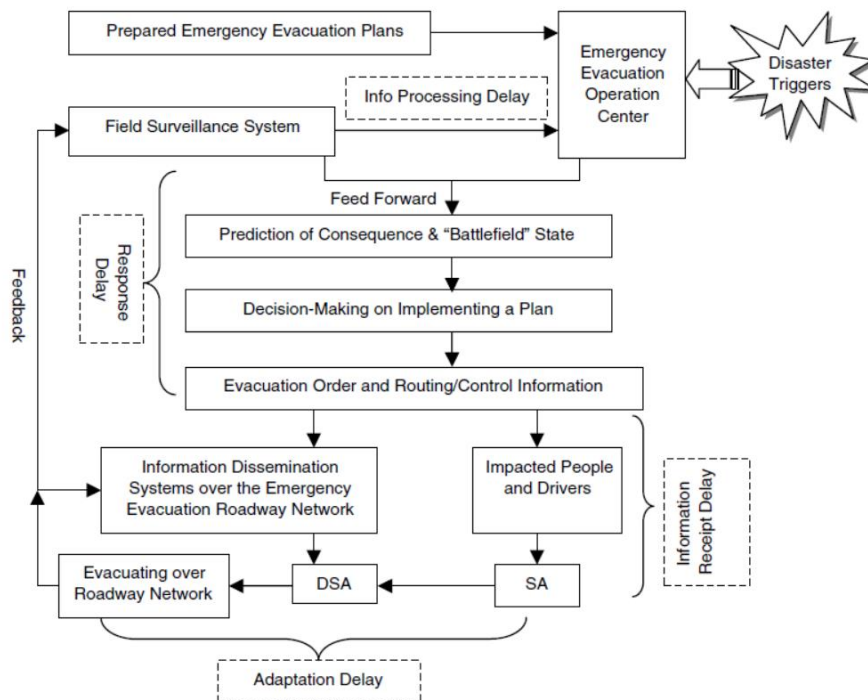


Figura 6. Mecanismos de control de evacuación de retroalimentación y alimentación anticipada.³⁵

El documento de “Emergency Logistics in a Large-Scale Disaster Context”³⁶ analiza cómo la logística de emergencia se ve afectada por la infraestructura dañada y la necesidad de coordinación entre múltiples agencias. Los autores destacan la importancia de una planificación logística eficaz y la gestión de infraestructuras críticas durante emergencias, considerando factores como la destrucción de infraestructuras, la necesidad de decisiones rápidas y la escasez de recursos.

Para Ceuta este enfoque es esencial para evaluar y mejorar las capacidades logísticas y de infraestructura. La integración de tecnologías avanzadas para la toma de decisiones en tiempo real y la adopción de modelos que consideren la incertidumbre pueden mejorar significativamente la resiliencia de estas ciudades ante desastres.

Se analiza también una evaluación de riesgos y gestión en desastres³⁷ donde se subraya la importancia de una gestión integral del riesgo que involucre la evaluación continua de amenazas y vulnerabilidades, así como la planificación estratégica y la educación comunitaria. Para Ceuta es crucial identificar las infraestructuras críticas,

³⁵ Wei et al., (2008).

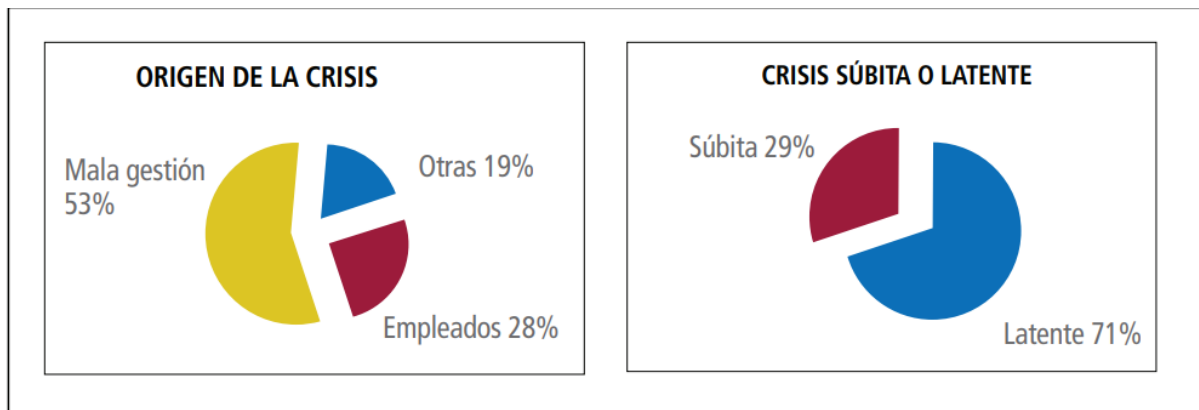
³⁶ Jiang y Yuan, (2019).

³⁷ Maturana, A., (2011).

como hospitales, escuelas y redes de transporte, y asegurar que estén adecuadamente preparadas y reforzadas para enfrentar posibles desastres.



Figura 7. Elementos fundamentales para una gestión integral de riesgos.³⁸



*ICM: Institute for crisis management (10) (Instituto de manejo de crisis).

Figura 8. Según ICM, la mayoría de las crisis no son súbitas ni por causas externas.³⁹

El documento para la evacuación del tráfico en áreas urbanas⁴⁰ utiliza el simulador SUMO para modelar evacuaciones en áreas urbanas, proporcionando una evaluación detallada de las capacidades de la infraestructura existente en Ceuta. La simulación identifica cuellos de botella como las intersecciones críticas y propone soluciones

³⁸ Maturana, A. ,(2011).

³⁹ Maturana, A. ,(2011).

⁴⁰ Chen et al., (2020).

como la reversión de carriles y la eliminación de semáforos para mejorar la eficiencia de la evacuación.

Este enfoque permite anticipar problemas y optimizar las rutas de evacuación, asegurando una respuesta rápida y efectiva durante emergencias.

El estudio “Data-driven evacuation and rescue traffic optimization with rescue contraflow control”⁴¹ se centra en la optimización del tráfico de evacuación y rescate mediante el control de flujo inverso. Este enfoque es relevante para Ceuta, donde la infraestructura vial y la capacidad de respuesta rápida son críticas en situaciones de emergencia. Los puntos clave incluyen:

Optimización de Tráfico de Evacuación y Rescate: Formulaciones de programación lineal mixta de múltiples objetivos para equilibrar el tráfico de evacuación y rescate.

Implementación de Algoritmos de Optimización: Desarrollar y aplicar un algoritmo de tres etapas para resolver problemas relacionados con parámetros desconocidos y objetivos múltiples.

Uso de Análisis Basado en Datos: Evaluar el impacto de diferentes planes de control de flujo inverso en el tráfico de evacuación y rescate.

Planificación de Rutas Óptimas: Determinar las rutas óptimas de tráfico de evacuación y rescate, considerando el volumen crítico de tráfico de rescate.

⁴¹ Liu et al., (2024).

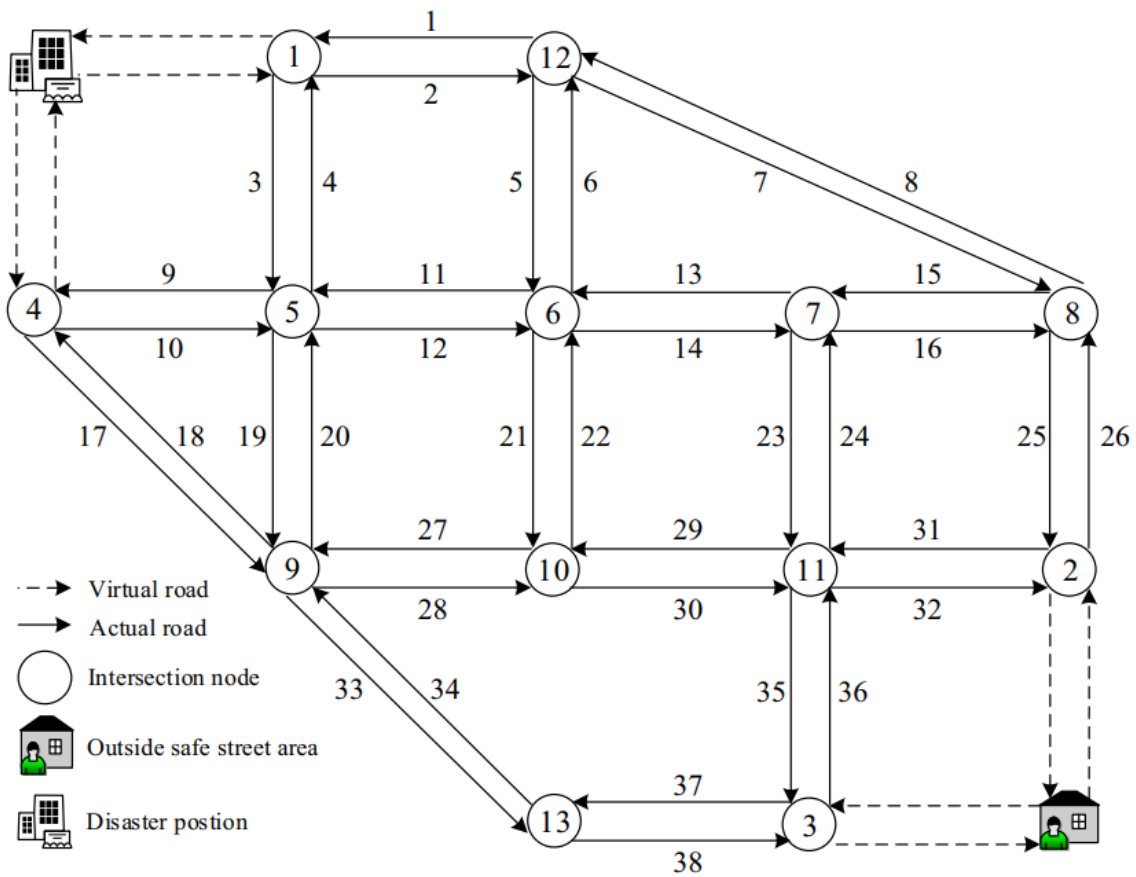


Figura 9. Estructura topológica de la red vial de Nguyen–Dupuis.

La figura muestra un diagrama de una red de carreteras con nodos de intersección numerados del 1 al 13. En esta red se distinguen dos tipos de caminos: las carreteras virtuales, indicadas con líneas punteadas, y las carreteras reales, indicadas con líneas continuas. Los nodos de intersección están representados por círculos. Las áreas fuera de la calle segura están marcadas con un ícono de una casa verde en los nodos 4 y 13. Además, hay una posición del desastre señalada con un ícono de explosión junto al nodo 2. Cada intersección y carretera está numerada para facilitar la identificación y referencia dentro del sistema de la red.

El estudio del modelo multi-periodo para la colocación de material en grandes emergencias⁴² destaca la importancia de tener una infraestructura logística robusta y eficiente para la asignación de materiales de emergencia en situaciones de desastres naturales. Para Ceuta, implementar un sistema de gestión de tráfico y control de flujo que optimice las rutas de evacuación y reduzca la congestión es crucial.

⁴² Wang y Sun, (2023).

Integrar el modelo de asignación de materiales de emergencia permitirá mejorar la eficiencia logística, mediante la optimización de costos de transporte y acceso, asegurar la efectividad para minimizar la demanda no satisfecha y responder adecuadamente a las necesidades emergentes y garantizar una distribución equitativa, reduciendo la disparidad en la satisfacción de demandas entre diferentes áreas afectadas.

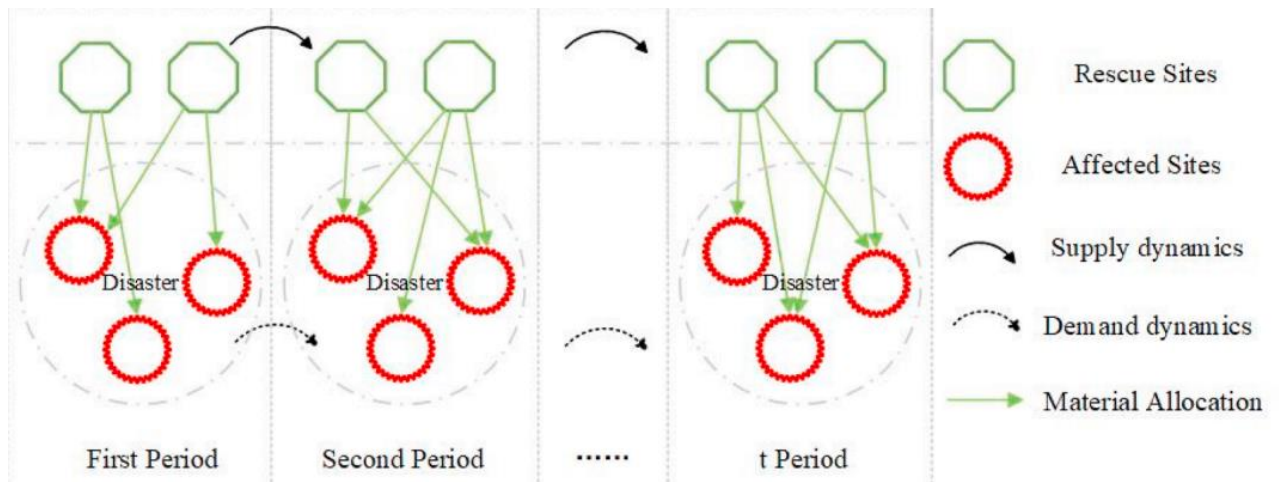


Figura 10. Red de asignación de materiales de emergencia con dos niveles.⁴³

Importancia para el plan de evacuación de Ceuta. Estos estudios proporcionan un marco sólido para la evaluación y mejora de la infraestructura y logística en Ceuta. La integración de simulaciones avanzadas, el análisis de riesgos y la optimización del tráfico y la logística permiten desarrollar estrategias de evacuación robustas y efectivas. Al aplicar estos enfoques, Ceuta puede mejorar significativamente su capacidad de respuesta ante emergencias, garantizando la seguridad y el bienestar de sus habitantes.

2.4. Demografía y Consideraciones

El análisis demográfico y social es una piedra angular en la planificación de evacuaciones efectivas y equitativas. Comprender quiénes son los residentes, dónde viven y cuáles son sus necesidades específicas permite desarrollar estrategias de evacuación que sean verdaderamente inclusivas. En el contexto de Ceuta, donde la diversidad social y las vulnerabilidades específicas plantean desafíos únicos, es fundamental integrar datos demográficos detallados, estudios sociológicos

⁴³ Wang y Sun, (2023).

profundos y consideraciones de salud pública en la formulación de planes de emergencia.

Para abordar la planificación de evacuaciones en Ceuta, es esencial comprender a fondo las características demográficas⁴⁴ y las consideraciones sociales que afectan a estas ciudades. Esto incluye una evaluación detallada de la composición de la población, las necesidades específicas de los grupos vulnerables y los recursos disponibles⁴⁵ para atender estas necesidades en situaciones de emergencia.

Los informes demográficos y censos⁴⁶ proporcionan datos vitales sobre la estructura de la población en Ceuta. Estos documentos, disponibles a través del Instituto Nacional de Estadística (INE) de España, ofrecen información detallada sobre la distribución etaria, los niveles de ingresos, la composición familiar y otros indicadores socioeconómicos⁴⁷. Conocer estas características es fundamental para diseñar planes de evacuación que sean inclusivos y efectivos para toda la población.

Las investigaciones académicas y los informes de organizaciones no gubernamentales (ONG) brindan una visión profunda de las características sociales y culturales de las comunidades en Ceuta⁴⁸. Estos estudios pueden explorar aspectos como la movilidad social, los niveles de educación, el empleo y la salud, todos factores que influyen en la capacidad de respuesta de la población ante una emergencia. Además, estos estudios pueden identificar barreras culturales y sociales que podrían afectar la efectividad de los planes de evacuación.

Es crucial considerar las necesidades de los grupos más vulnerables de la sociedad, como personas de bajos ingresos, ancianos, niños, personas con discapacidades y migrantes. Los artículos y estudios que abordan estos temas proporcionan información sobre cómo estas poblaciones enfrentan mayores riesgos durante las evacuaciones debido a la falta de recursos y movilidad limitada. Integrar estas consideraciones en la planificación de evacuaciones asegura que se aborden las necesidades de todos los sectores de la población, garantizando su seguridad y bienestar.

Los documentos de salud pública son esenciales para evaluar la vulnerabilidad sanitaria de la población y los riesgos asociados durante las evacuaciones. Estos informes pueden incluir datos sobre la accesibilidad a servicios médicos, la

⁴⁴ Ceuta - Población 2024. s. f.

⁴⁵ Financiación Autonómica: Ministerio de Hacienda, s. f.

⁴⁶ Melilla - Población 2023, s. f.

⁴⁷ Ciudad Autónoma de Melilla, s. f.

⁴⁸ Pérez García, (2022).

capacidad de los hospitales locales⁴⁹ y los recursos de salud disponibles. Esta información es vital para planificar rutas de evacuación que faciliten el acceso rápido a la atención médica en situaciones de emergencia.

2.5. Experiencias de Evacuación en Ceuta

El análisis de experiencias pasadas y la revisión de las preparaciones existentes frente a emergencias en Ceuta son fundamentales para desarrollar un plan de evacuación efectivo. Este apartado examina incidentes previos, respuestas y preparaciones actuales, y analiza documentos clave que proporcionan insights valiosos sobre la infraestructura y logística necesarias para manejar evacuaciones en estas ciudades.

Es importante revisar los incidentes pasados en Ceuta que requirieron evacuaciones para entender cómo se manejaron y qué lecciones se pueden aprender. Estos estudios de caso pueden revelar fortalezas y debilidades en los planes de evacuación existentes, ofreciendo valiosas lecciones para futuras mejoras. Un ejemplo de ello es el simulacro realizado en el Helipuerto de Ceuta⁵⁰, que tuvo como objetivo analizar la coordinación y los tiempos de respuesta ante un accidente.

Las publicaciones que exploran cómo las comunidades locales se preparan y responden a emergencias son esenciales para entender la dinámica comunitaria en Ceuta. Estos artículos pueden evaluar la efectividad de los programas de sensibilización y educación comunitaria sobre evacuaciones, proporcionando recomendaciones sobre cómo mejorar la preparación comunitaria.

El documento "Plan Territorial de Protección Civil de la Ciudad Autónoma de Ceuta (PLATERCE)"⁵¹ proporciona un marco detallado para la gestión de emergencias en Ceuta. Este plan incluye la organización, procedimientos y recursos necesarios para enfrentar situaciones de emergencia, destacando tanto la infraestructura crítica como las rutas y medidas de evacuación disponibles.

El objetivo general del PLATERCE es definir la planificación de Protección Civil en Ceuta y establecer una estructura organizativa eficaz para responder y coordinar frente a emergencias identificadas o no en el ámbito territorial de Ceuta.

⁴⁹ Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social - Portal Estadístico del SNS - Hospitales, Camas En Funcionamiento y Puestos de Hospital de Día (PHD) del Sistema Nacional de Salud (SNS), Número y Tasa Por 1.000 Habitantes y Número de Centros, Servicios y Unidades de Referencia (CSUR) Según Comunidad Autónoma, s. f.

⁵⁰ (El Helipuerto de Ceuta Realiza un Simulacro de Emergencia Para Analizar la Coordinación y los Tiempos de Respuesta Ante un Accidente, s. f.-b).

⁵¹ Vargas-Machuca Villanueva & Mora Gómez, (2014).

Ceuta tiene una infraestructura bien definida que incluye un puerto marítimo, helipuertos, y una red viaria congestionada debido a la geografía y alta densidad de población. Instalaciones portuarias, depósitos de agua, plantas desalinizadoras y sistemas de comunicación robustos son parte de los recursos críticos. El tráfico rodado y marítimo es vital, especialmente con la Operación Paso del Estrecho (OPE) que aumenta significativamente el tránsito vehicular. La Operación Paso del Estrecho se desarrolla entre el 15 de junio y el 15 de septiembre de cada año desde 1987. Es un dispositivo especial de tráfico y seguridad organizado anualmente por las autoridades españolas y marroquíes para gestionar el tránsito masivo de personas y vehículos entre Europa y África a través del Estrecho de Gibraltar. Este evento implica la coordinación de múltiples servicios y autoridades, como la Dirección General de Tráfico (DGT), la Guardia Civil, la Policía Nacional, la Cruz Roja, y las autoridades portuarias, entre otras.

Las rutas principales de evacuación en Ceuta, como el eje puerto-frontera, son cruciales para la movilidad durante emergencias. La capacidad de estas rutas para manejar flujos de evacuación es adecuada, pero puede verse comprometida durante periodos de alta demanda. La planificación y gestión del tráfico son fundamentales para asegurar una evacuación eficiente y segura. Las estadísticas indican que Ceuta maneja un alto volumen de tráfico rodado y marítimo, con complicaciones notables durante los picos de tránsito. El transporte público, cubierto por líneas de autobús y taxis, es un recurso importante en la gestión de evacuaciones. En casos de aislamiento debido a temporales, se prevé el uso de helipuertos para mantener la conexión con la península.

En términos de medidas de contingencia, es crucial contar con un plan robusto para el manejo de flujos de tráfico durante emergencias, incluyendo la implementación de contraflujos y el uso de transporte público para facilitar la evacuación masiva. La integración de tecnologías de simulación y optimización del tráfico puede mejorar significativamente la capacidad de respuesta y la eficiencia de las operaciones de evacuación.

La identificación de riesgos y medidas preventivas es otro aspecto clave a tener en cuenta, dentro de los riesgos podemos diferenciar entre riesgos naturales, como son las inundaciones, temporales en el mar y riesgos geológicos. Se incluyen medidas preventivas como el Plan MeteoAlerta de AEMET; o riesgos antrópicos, es decir riesgos derivados de actividades humanas, como el transporte de mercancías peligrosas y accidentes en medios de transporte (terrestre, marítimo y aéreo).

2.6. Tecnologías y Herramientas de Soporte para la Evacuación

Este apartado aborda las tecnologías y herramientas avanzadas que pueden mejorar la planificación y gestión de evacuaciones en Ceuta. La integración de innovaciones tecnológicas, como sistemas de navegación inteligentes, aplicaciones de realidad aumentada, datos de ubicación móviles y modelos de simulación, puede aumentar significativamente la eficacia de los planes de evacuación, garantizando una respuesta rápida y eficiente en situaciones de emergencia.

Un primer documento explora el uso de sistemas de navegación inteligentes en la evacuación de edificios⁵². Estos sistemas emplean nodos de decisión estáticos y comunicaciones móviles para guiar a las personas de manera segura y eficiente durante una evacuación. Estos principios pueden ser sugerencias útiles para áreas urbanas como Ceuta, donde la guía adaptativa y en tiempo real puede mejorar significativamente la eficacia de las evacuaciones en entornos complejos y densamente poblados.

Se destaca también cómo la realidad aumentada⁵³ puede transformar los planes de evacuación al mejorar la percepción del entorno y proporcionar direcciones visuales intuitivas a los usuarios. La AR puede ser útil en áreas urbanas, proporcionando indicaciones visuales en tiempo real que ayuden a los residentes y visitantes a encontrar rutas de evacuación seguras durante emergencias.

Se analizan cómo los datos de ubicación móviles⁵⁴ pueden ser utilizados para mejorar la planificación de evacuaciones al permitir ajustes dinámicos en tiempo real basados en los patrones de movimiento de la población. Este enfoque es vital para Ceuta, donde la capacidad de adaptar rápidamente los planes de evacuación en respuesta a cambios en el comportamiento de la multitud puede optimizar el uso de los recursos disponibles.

El estudio sobre la preparación y resiliencia ante tsunamis⁵⁵ utiliza encuestas y modelos de simulación para evaluar la logística de evacuación y los tiempos de despeje en situaciones de emergencia. Los modelos de simulación permiten prever diferentes escenarios de evacuación y evaluar la eficacia de diversas estrategias. En Ceuta estos modelos pueden identificar rutas seguras y optimizar la planificación de evacuaciones. Además, la recolección de datos a través de encuestas proporciona

⁵² Görbil et al., (2011).

⁵³ Lovreglio ,(2018).

⁵⁴ Yin et al. ,(2020).

⁵⁵ Chen et al., (2022).

información valiosa sobre el comportamiento y las necesidades de la población durante una emergencia.

En “Comportamiento de Respuesta ante Tsunamis”⁵⁶ se subraya la importancia de la comunicación efectiva y la educación en la mejora de las respuestas de evacuación. La integración de sistemas de monitoreo en tiempo real y sistemas de advertencia automatizados puede proporcionar información precisa y oportuna a los residentes, mejorando la preparación y la respuesta ante emergencias. La implementación de estas tecnologías, junto con programas de educación comunitaria, podría fortalecer la resiliencia y capacidad de respuesta de la comunidad en las Ciudades Autónomas.

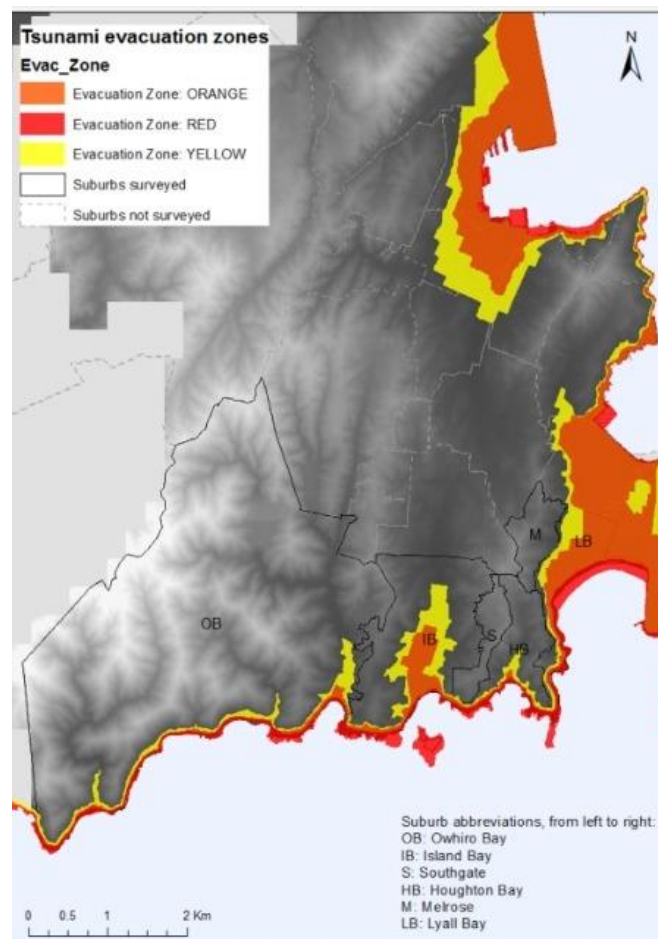


Figura 11. Zonas de evacuación para tsunamis, que representan diferentes niveles de riesgo (naranja, rojo y amarillo).⁵⁷

Esta imagen destaca la importancia de:

⁵⁶ Fraser et al., (2016).

⁵⁷ Fraser et al., (2016).

Identificación de Zonas de Riesgo, ya que las áreas de alto riesgo se designan claramente para facilitar una evacuación rápida y organizada.

Planificación Basada en Datos Demográficos: La distribución de la población en las zonas de evacuación debe ser considerada. La planificación debe incluir estrategias específicas para las zonas densamente pobladas y aquellas con una alta concentración de grupos vulnerables.

Preparación Comunitaria: La educación y la sensibilización de la comunidad son cruciales. Las zonas de evacuación deben estar claramente señalizadas y las comunidades deben estar informadas sobre las rutas de evacuación y los procedimientos a seguir en caso de emergencia.

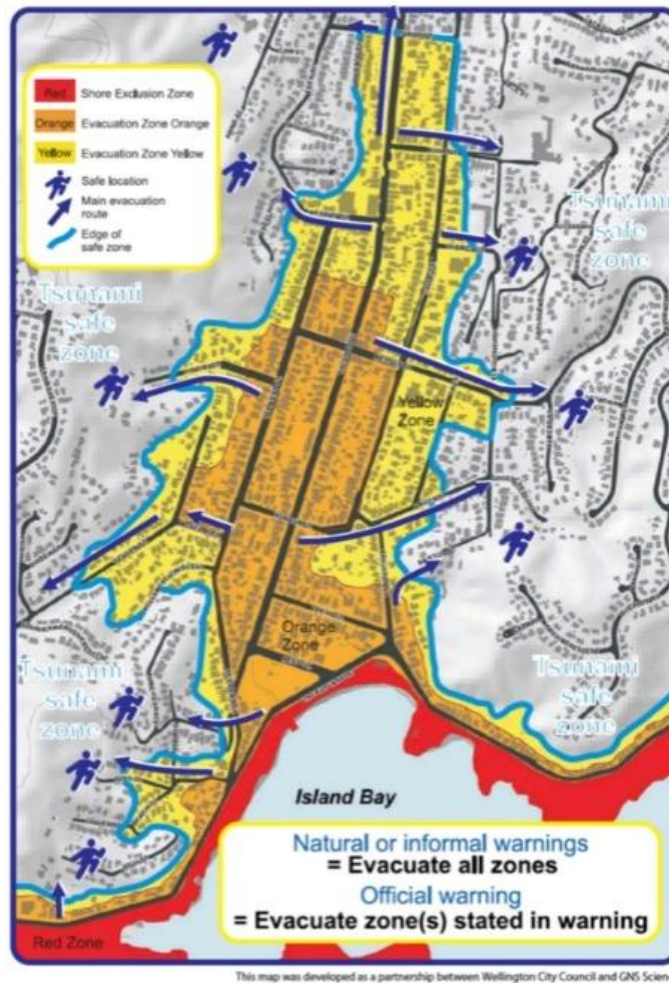


Figura 12: Zonas de evacuación y rutas de escape en Island Bay, para la evacuación en caso de tsunamis.⁵⁸

La imagen proporciona una visión detallada de cómo organizar estas zonas y rutas en un área urbana vulnerable. Se destacan las zonas de exclusión costera, donde se deben evacuar inmediatamente las áreas de alto riesgo cerca de la costa. Es crucial identificar y demarcar claramente estas zonas en Ceuta, estableciendo ubicaciones seguras y señalizándolas adecuadamente. Se especifica que las advertencias naturales o informales deben desencadenar la evacuación de todas las zonas, subrayando la necesidad de un sistema de advertencia efectivo y la importancia de la educación comunitaria. También muestra las principales rutas de evacuación,

⁵⁸ Fraser et al., (2016).

indicando las vías más seguras y rápidas para evacuar. La señalización clara y visible de estas rutas es esencial para guiar a los residentes de manera segura.

El estudio "Wildfire Evacuation Decision Modeling Using GPS Data"⁵⁹ destaca cómo los datos de GPS en tiempo real pueden rastrear movimientos y decisiones de ruta durante evacuaciones. Este enfoque proporciona información detallada sobre los patrones de desplazamiento, permitiendo la optimización de rutas y mejorando la seguridad y eficiencia de las evacuaciones. En Ceuta, la aplicación de esta tecnología podría facilitar una planificación más precisa y adaptativa, reduciendo los tiempos de viaje y evitando congestiones en las rutas de evacuación.

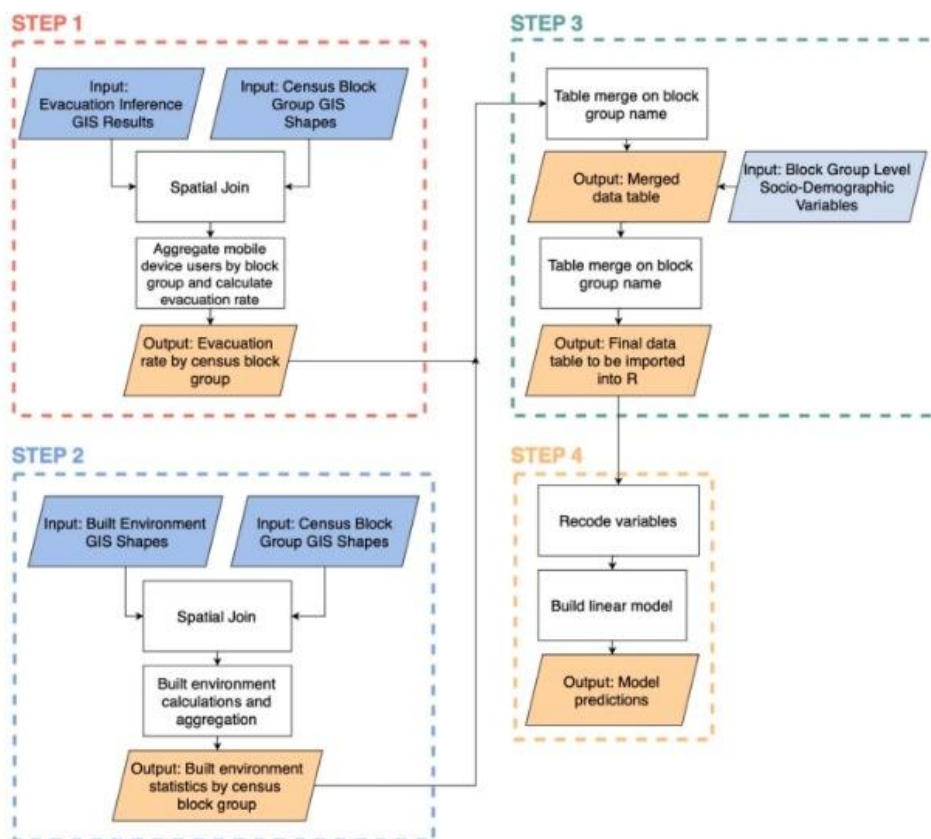


Figura 13. Cuadro metodológico.⁶⁰

⁵⁹ Wu, A. et al., (2022).

⁶⁰ Wu, A. et al., (2022).

La planificación de evacuaciones en Ceuta debe seguir un enfoque estructurado que asegure la preparación adecuada, la recopilación de datos precisos y la implementación efectiva de medidas de respuesta. La figura adjunta ilustra un modelo de contingencia de evacuación urbana que puede servir como guía. Este modelo subraya la importancia de establecer una red de evacuación de emergencia y un sistema de comunicación robusto, esenciales para la gestión de evacuaciones en áreas densamente pobladas. Además, el diagrama destaca la necesidad de una educación pública continua y la formación de profesionales en la planificación y gestión de emergencias, lo que es crucial para mejorar la resiliencia de la comunidad y la capacidad de respuesta ante desastres. Integrar estos elementos en los planes de evacuación de Ceuta garantizará una respuesta rápida y coordinada durante emergencias, mejorando la seguridad y reduciendo los riesgos para la población.

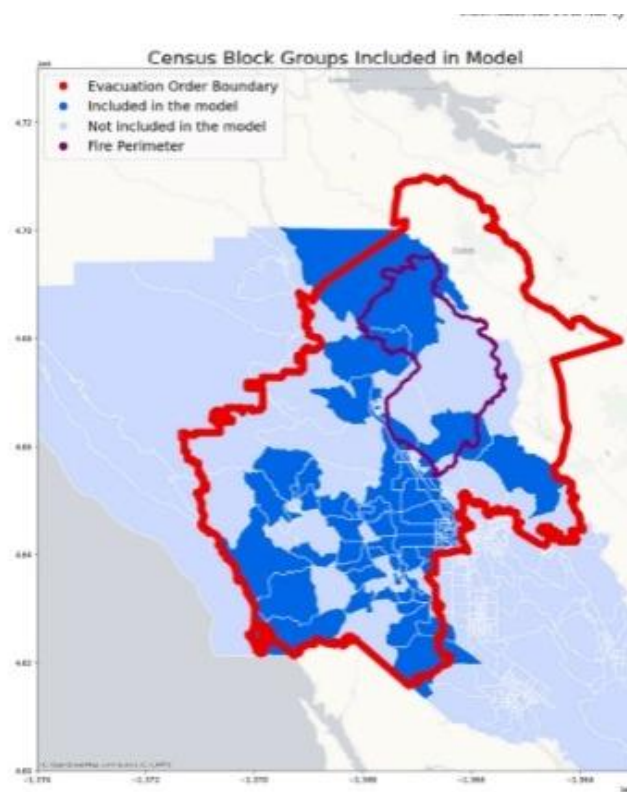


Figura 14. Grupos de bloques censales incluidos en el modelo de tasa de evacuación por incendios forestales.⁶¹

⁶¹ Wu, A. et al., (2022).

La integración de estas tecnologías y herramientas en los planes de evacuación de Ceuta es crucial para mejorar la capacidad de respuesta ante emergencias. La utilización de sistemas de navegación inteligentes y realidad aumentada puede proporcionar guías visuales adaptativas y en tiempo real. Los datos de ubicación móviles permiten ajustes dinámicos de los planes de evacuación, mientras que los modelos de simulación y las encuestas mejoran la precisión y adaptabilidad de las estrategias de evacuación. Finalmente, el uso de datos de GPS para modelar decisiones de evacuación facilita la optimización de rutas y la reducción de congestiones.

En conclusión, las tecnologías y herramientas avanzadas presentadas en estos estudios ofrecen sugerencias innovadoras y prácticas para la mejora de los planes de evacuación en Ceuta. La adopción de estos enfoques puede transformar la manera en que estas ciudades se preparan y responden a las emergencias, asegurando la seguridad y bienestar de sus residentes.

2.7. Desafíos y Barreras

Este apartado se enfoca en identificar y analizar los principales desafíos y barreras que pueden surgir al implementar planes de evacuación efectivos en Ceuta. Se consideran aspectos infraestructurales, logísticos y sociopolíticos, basados en estudios y experiencias previas. La identificación de estos obstáculos es crucial para desarrollar estrategias que aseguren una evacuación eficiente y segura.

Aparecen varios documentos importantes como:

“Planificación Robusta de Evacuación para Manejar Incertidumbres y Cambios Durante Emergencias”⁶². Dicha investigación enfatiza la necesidad de desarrollar modelos de evacuación robustos frente a las incertidumbres y variabilidades de la red urbana. Este enfoque es particularmente relevante para Ceuta debido a la densidad de tráfico y las condiciones cambiantes de sus calles. Un plan de evacuación robusto que optimice el uso de las capacidades de la red disponible es esencial para mejorar la seguridad y reducir los tiempos de respuesta en situaciones impredecibles.

“Social Vulnerabilities and Wildfire Evacuations: A Case Study of the 2019 Kincade Fire”⁶³. Este documento ofrece una visión profunda sobre cómo las vulnerabilidades sociales afectan las evacuaciones durante incendios forestales. Utilizando el incendio de Kincade en 2019 como estudio de caso, se analiza cómo las poblaciones vulnerables, como personas de bajos ingresos o discapacidades, enfrentan mayores

⁶² Maiwald, M., (2017).

⁶³ Eriksen, C., & Gill, N., (2020).

riesgos debido a la falta de recursos y movilidad limitada. El estudio subraya la importancia de integrar consideraciones sociales en la planificación de evacuaciones para asegurar la seguridad de todas las comunidades. Las recomendaciones incluyen fomentar la cooperación entre agencias gubernamentales, ONG y comunidades locales, desarrollar planes de evacuación comunitarios inclusivos y proporcionar capacitación continua y educación sobre emergencias para las poblaciones vulnerables.

“Coupled Simulation-Optimization Model for Pedestrian Evacuation Guidance Planning”⁶⁴. Este estudio presenta un modelo avanzado que integra simulación y optimización para mejorar la evacuación peatonal durante emergencias. Los modelos de simulación predicen el movimiento y el comportamiento de los peatones, mientras que las técnicas de optimización identifican las mejores rutas y estrategias de evacuación. Este enfoque permite ajustar dinámicamente los planes de evacuación en función de los datos en tiempo real, lo cual es crucial para Ceuta. Implementar sistemas que recojan datos sobre el movimiento de peatones y vehículos, y realizar simulaciones periódicas de diferentes escenarios de emergencia, es esencial para evaluar y mejorar continuamente las estrategias de evacuación.

⁶⁴ Liu, Z. et al., (2020).

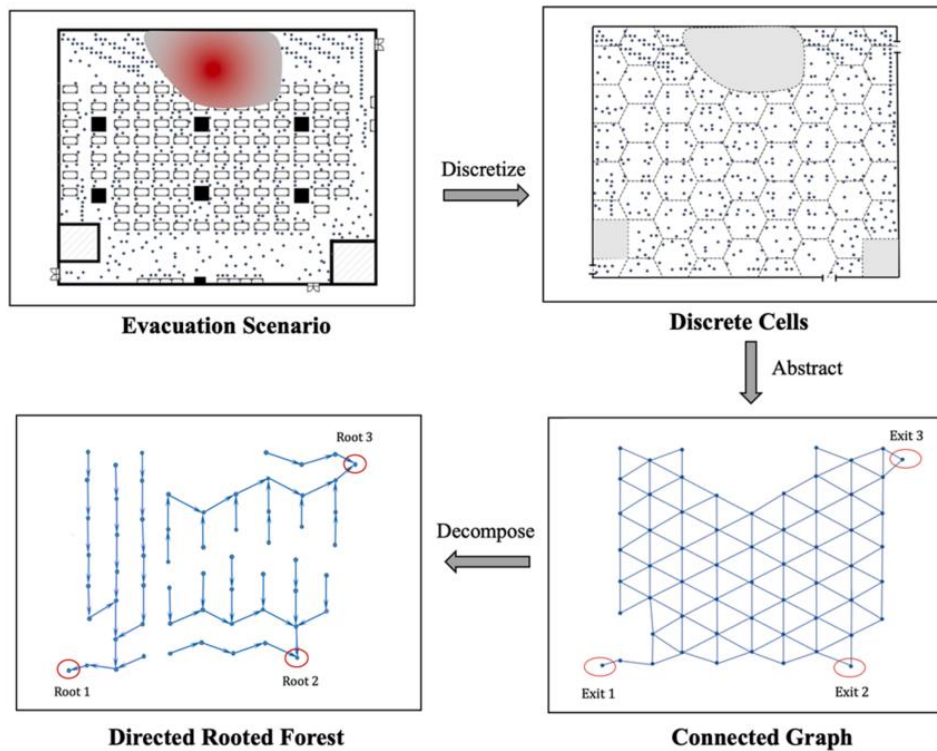


Figura 15. Diagrama esquemático de la planificación de evacuación con el modelo DRF.⁶⁵

DRF (Directed Rooted Forest). Este modelo descompone el escenario de evacuación en celdas discretas y luego las abstrae en un grafo conectado. A partir de esta representación, se construyen bosques enraizados dirigidos que ayudan a planificar rutas de evacuación eficientes.

“Challenges in Multi-Agency Collaboration in Disaster Management: A Sri Lankan Perspective”⁶⁶. Este documento analiza los desafíos en la colaboración entre agencias durante la gestión de desastres, destacando problemas como la falta de plataformas tecnológicas para el intercambio de información, las barreras sociales y políticas, y las limitaciones infraestructurales. Es crucial desarrollar sistemas de comunicación integrados, promover la cooperación interagencial, y asegurar que las infraestructuras críticas puedan soportar eventos extremos. Las estrategias propuestas incluyen el desarrollo de plataformas digitales de colaboración, la promoción del intercambio de datos, y la inversión en infraestructuras resilientes.

⁶⁵ Liu, Z. et al., (2020).

⁶⁶ Abdeen et al. (2021).

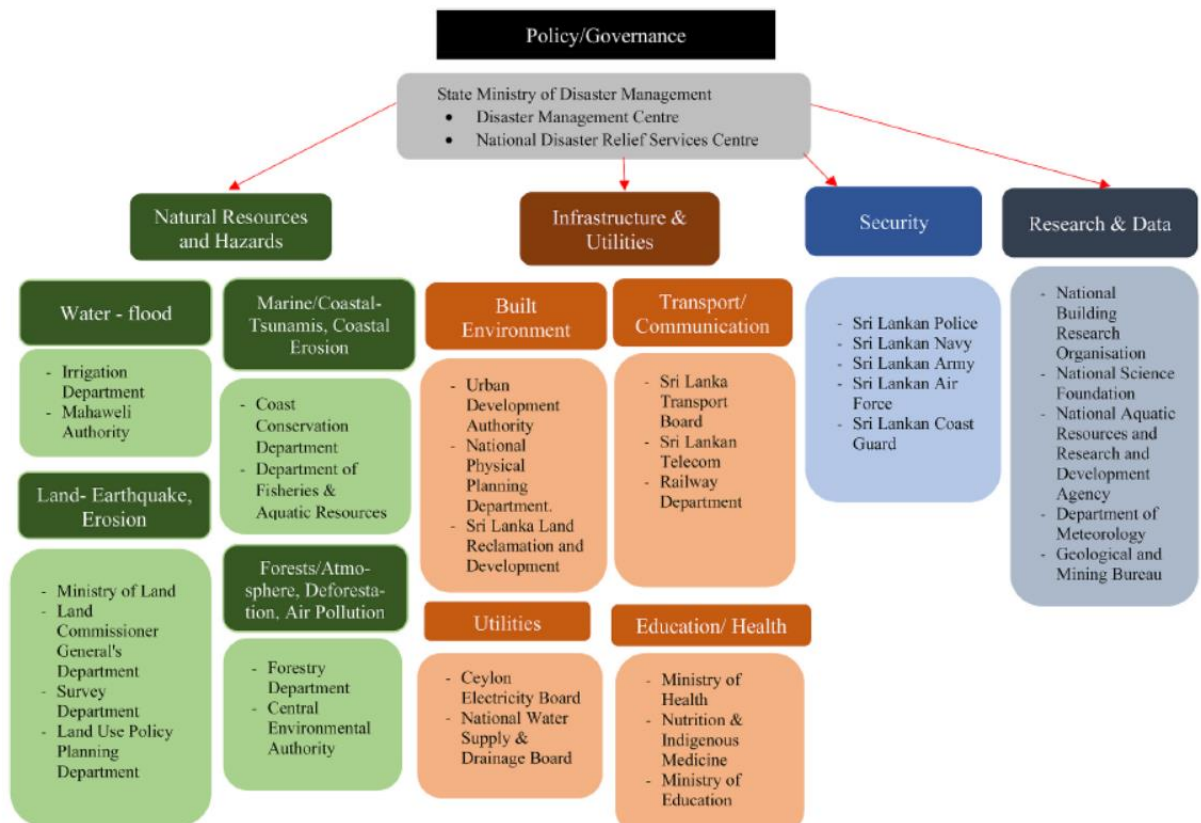


Figura 16. Agencias de gestión de desastres en Sri Lanka.⁶⁷

Esta estructura organizativa facilita la coordinación y la respuesta efectiva durante emergencias. Implementar una estructura similar en Ceuta puede ser beneficioso para superar los desafíos y barreras en la gestión de evacuaciones y emergencias, ya que facilita una colaboración eficiente entre diferentes agencias y departamentos, asegurando una respuesta coordinada y efectiva. Además, permite una gestión integral de recursos y servicios críticos, que es esencial para manejar desastres complejos y de gran escala.

“An Agent-Based Simulation Framework for Emergency Evacuations from Toxic Gas Incidents and an Empirical Study in Taiwan”⁶⁸ presenta un modelo de simulación basado en agentes para evacuaciones en incidentes de gas tóxico, utilizando el software ALOHA. ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) es una herramienta de modelado de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA) que simula la dispersión de gases tóxicos en la atmósfera y ayuda a evaluar los riesgos y planificar respuestas ante incidentes químicos. El modelo de simulación se divide en

⁶⁷ Abdeen et al., (2021).

⁶⁸ Chang et al., (2024).

dos fases: evacuación peatonal a puntos de reunión y evacuación vehicular a refugios. Este enfoque puede aplicarse en Ceuta para optimizar los puntos de reunión y rutas de evacuación, reduciendo significativamente los tiempos de evacuación. La implementación de simulacros periódicos y campañas educativas es fundamental para asegurar que la población esté preparada y comprenda los procedimientos de evacuación.

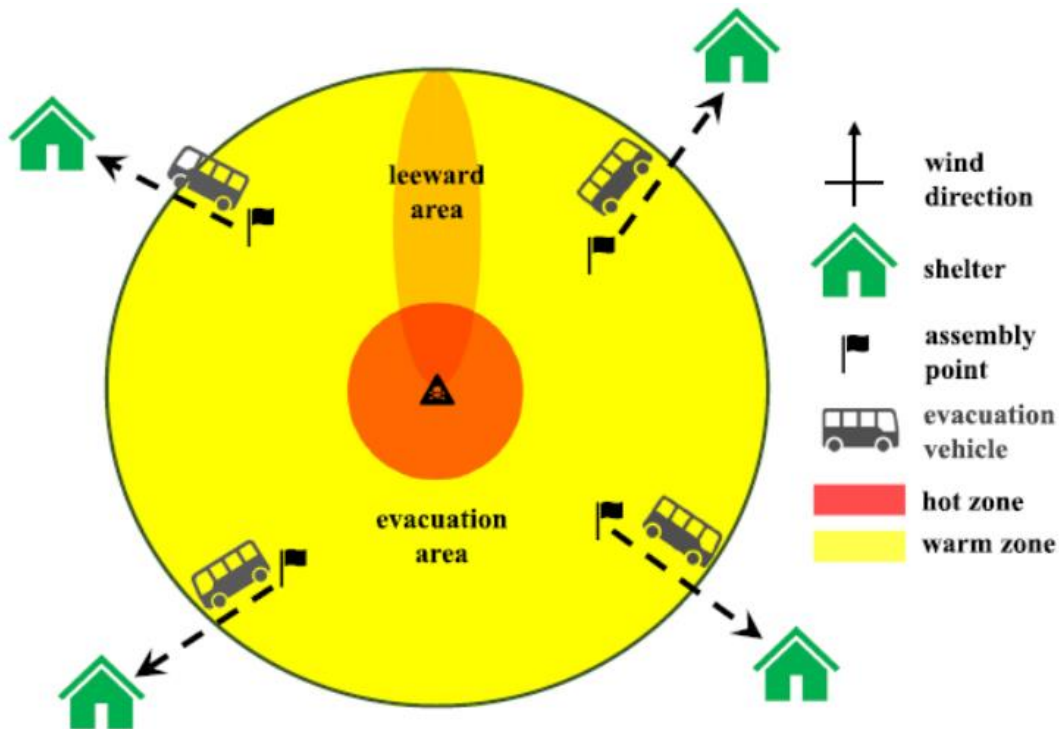


Figura 17. Modelo de proceso de evacuación en dos fases.⁶⁹

Primero, los evacuados a pie se dirigen a puntos de reunión designados. Luego, son transportados en vehículos de evacuación a refugios ubicados fuera del área de evacuación.

“Collaboration and Individual Performance During Disaster Response”⁷⁰ analiza la colaboración multifactorial durante la respuesta a desastres, identificando desafíos como compartir información, resolver conflictos, y coordinar actividades. En las Ciudades Autónomas es esencial establecer sistemas robustos de intercambio de información, implementar mecanismos para la resolución de conflictos, y asegurar una coordinación efectiva entre todas las agencias involucradas. La formación

⁶⁹ Chang et al., (2024).

⁷⁰ Guerrero et al., (2023).

continua y los ejercicios de simulación pueden mejorar la preparación y la capacidad de respuesta.

Los documentos revisados proporcionan una comprensión profunda de los desafíos y barreras que pueden surgir en la implementación de planes de evacuación en Ceuta. Abordar estos desafíos mediante la adopción de estrategias como la planificación robusta, la integración de consideraciones sociales, la colaboración entre agencias, y el uso de tecnologías avanzadas de simulación y optimización puede mejorar significativamente la capacidad de respuesta ante emergencias. La preparación comunitaria, la inversión en infraestructuras resilientes y la formación continua son esenciales para desarrollar un plan de evacuación inclusivo y efectivo que minimice los riesgos y mejore la resiliencia comunitaria ante desastres naturales y antrópicos.

Al integrar estas estrategias y enfoques en el plan de evacuación de Ceuta, se puede asegurar una respuesta más coordinada, eficiente y segura en situaciones de emergencia, protegiendo a todos los residentes y minimizando el impacto de los desastres.

2.8. Síntesis de la Literatura

La revisión de la literatura ha proporcionado una comprensión integral de los diversos enfoques, teorías, modelos y tecnologías aplicados a la planificación de evacuaciones en entornos urbanos complejos, con un enfoque particular en Ceuta. A lo largo de esta revisión, se han identificado varios hallazgos clave que deben integrarse en el desarrollo de un plan de evacuación efectivo para estas ciudades.

En primer lugar, la planificación de evacuaciones debe basarse en modelos robustos que consideren las incertidumbres y variabilidades de la red urbana.⁷¹ Además, es esencial utilizar simulaciones avanzadas y técnicas de optimización para evaluar y mejorar las estrategias de evacuación.⁷²⁷³

Los estudios de caso, como son el de la evacuación de Fort McMurray⁷⁴ y el del comportamiento de respuesta ante tsunamis⁷⁵, han demostrado la importancia de integrar múltiples modos de transporte y educar a la comunidad para mejorar la efectividad de las evacuaciones. La evaluación de la infraestructura y logística,

⁷¹ Maiwald, (2017).

⁷² Chondrogiannis et al., (2021).

⁷³ Liu et al., (2020).

⁷⁴ Woo et al., (2017).

⁷⁵ Fraser et al., (2016).

apoyada por el marco teórico⁷⁶, subraya la necesidad de una planificación logística eficaz y una gestión de infraestructuras críticas.

No obstante, se han identificado lagunas en la literatura existente.

La revisión literaria ha resaltado la importancia de una planificación de evacuación integral y adaptada a las características específicas de Ceuta. Los aprendizajes más importantes incluyen que la utilización de modelos robustos y simulaciones avanzadas es esencial para prever diferentes escenarios de evacuación y optimizar las rutas y estrategias. Los estudios revisados, ya citados anteriormente, subrayan la necesidad de una planificación basada en datos y ajustable en tiempo real. Es fundamental integrar las características demográficas y las vulnerabilidades sociales en la planificación de evacuaciones. También se destacan cómo las poblaciones vulnerables enfrentan mayores riesgos y la necesidad de planes inclusivos⁷⁷.

Además, la evaluación y mejora de la infraestructura crítica y la logística es crucial. Los enfoques propuestos⁷⁸⁷⁹ proporcionan marcos teóricos robustos que pueden ser adaptados a Ceuta. La adopción de tecnologías emergentes puede mejorar significativamente la eficacia de las evacuaciones. Estos avances deben integrarse en los planes de evacuación para proporcionar guías adaptativas y optimizar el uso de los recursos disponibles.

Las implicaciones para el diseño del plan de evacuación en Ceuta son claras: se debe desarrollar un enfoque multidisciplinario y multisectorial que integre modelos teóricos avanzados, datos demográficos y sociales detallados, y tecnologías emergentes. Además, es esencial fomentar la educación y participación comunitaria para asegurar una respuesta rápida y coordinada durante emergencias, mejorando así la resiliencia y seguridad de estas Ciudades Autónomas.

⁷⁶ Jiang y Yuan, (2019).

⁷⁷ Eriksen y Gill, (2020).

⁷⁸ Wei et al., (2008).

⁷⁹ Jiang y Yuan, (2019).

CAPÍTULO 3. TEORÍA MATEMÁTICA. MÉTODO NGUYEN-DUPUIS

3.1. Introducción al Método Nguyen-Dupuis

Tras la revisión literaria del capítulo anterior, he decidido quedarme con el método Nguyen-Dupuis⁸⁰ para el plan de evacuación de Ceuta por varias razones clave. Estas razones se basan en la eficiencia del método, su aplicabilidad en situaciones de emergencia y los resultados prometedores observados en estudios previos.

El método Nguyen-Dupuis fue desarrollado para abordar problemas complejos de optimización del tráfico, especialmente en situaciones de emergencia. Este enfoque se basa en los trabajos de dos investigadores, Nguyen y Dupuis, quienes se propusieron encontrar soluciones eficientes para la gestión del tráfico urbano durante eventos críticos. Su objetivo principal era crear un modelo que no solo optimizara el flujo de vehículos, sino que también pudiera adaptarse a diversas condiciones y restricciones propias de las redes viales urbanas.

La base teórica del método Nguyen-Dupuis se sustenta en la programación lineal mixta, una técnica matemática que permite la optimización con variables continuas y discretas con varias restricciones y objetivos. Permite modelar y resolver problemas complejos de tráfico de manera eficiente, considerando múltiples factores como el tiempo de viaje, el suministro de vehículos en cada uno de los puntos, la capacidad de las carreteras y las restricciones de contraflujo.

Este método incorpora el concepto de contraflujo, donde se invierte temporalmente la dirección de las vías para facilitar el paso de vehículos de emergencia y mejorar la evacuación de áreas afectadas. Esta técnica permite maximizar el uso de la infraestructura vial disponible durante situaciones críticas, aumentando la capacidad de las rutas de evacuación y reduciendo el tiempo necesario para evacuar a las personas afectadas. Es especialmente útil en áreas con infraestructura vial limitada, como Ceuta, donde es esencial optimizar cada recurso disponible. Desde su desarrollo, el método ha sido perfeccionado y adaptado por diversos investigadores, quienes han validado su eficacia en diferentes escenarios.

Las aplicaciones prácticas son numerosas y han demostrado ser altamente efectivas. Uno de los principales casos de estudio donde se ha aplicado exitosamente es en la planificación de evacuaciones urbanas durante desastres naturales, como huracanes

⁸⁰ Tras el capítulo de revisión literaria, el método de Nguyen-Dupuis encontrado en el documento de 'Data driven evacuation and rescue traffic optimization with rescue contraflow control' escrito por Liu et al. este mismo año se ha considerado lo más útil para aplicar en un plan de evacuación de las ciudad autónoma de Ceuta.

y terremotos. Por ejemplo, en ciudades propensas a inundaciones, el método ha permitido diseñar rutas de evacuación que minimizan el tiempo de salida de los residentes y maximizan la capacidad de las carreteras disponibles.



Figura 18. Carreteras de circunvalación de Madrid⁸¹

Otra aplicación destacada del método es en la gestión del tráfico durante incendios en edificios altos. En estos escenarios, el método Nguyen-Dupuis ha sido utilizado para coordinar la entrada de vehículos de rescate y la evacuación de personas, asegurando que ambos flujos de tráfico puedan coexistir sin conflictos significativos. Además, ha sido empleado en simulaciones de evacuación a gran escala, donde se han evaluado diferentes estrategias de contraflujo y su impacto en la eficiencia del tráfico de rescate y evacuación.

En resumen, este método se ha consolidado como una herramienta robusta y versátil en la optimización del tráfico de evacuación. Su capacidad para adaptarse a diversos contextos y su enfoque en la eficiencia operativa lo hacen particularmente adecuado para la planificación de evacuaciones en ciudades con infraestructuras viales complejas y áreas densamente pobladas, como Ceuta, que pueden enfrentar diferentes tipos de emergencias debido a su ubicación geográfica y contexto político.

⁸¹ Emesa,(2024).

La metodología permite una coordinación efectiva entre los vehículos de evacuación y los de rescate, asegurando que ambos puedan operar sin interferencias significativas. Este equilibrio es vital en situaciones de emergencia donde cada segundo cuenta.

Además, los resultados prometedores en estudios previos validan la elección del método Nguyen-Dupuis, mostrando una mejora significativa en la eficiencia de evacuación y rescate.

En resumen, la elección del método Nguyen-Dupuis para el plan de evacuación de Ceuta se basa en su capacidad para optimizar el tráfico de manera eficiente, su aplicabilidad en diversos escenarios de emergencia y los resultados positivos observados en estudios anteriores. Este método proporciona una base sólida para desarrollar un plan de evacuación que pueda salvar vidas y minimizar el impacto de los desastres en la región.

3.2. Principios de la optimización del tráfico

La asignación de tráfico es el proceso de distribuir vehículos a través de una red vial de manera que se minimicen los tiempos de viaje, o los kilómetros totales recorridos y se eviten congestiones. Este proceso considera varios factores, incluyendo la capacidad de las carreteras, la demanda de tráfico y las condiciones del tráfico en tiempo real. En el método Nguyen-Dupuis, la asignación de tráfico es crucial para determinar las rutas óptimas de evacuación y rescate, asegurando que los vehículos puedan moverse de manera eficiente y segura.

Un principio fundamental en la optimización del tráfico es la minimización de los tiempos de viaje, o el número total de kilómetros recorridos como es nuestro caso. Debido a que a veces es mejor tardar algo más de tiempo y que los coches estén en movimiento, antes de que estén parados en una situación crítica como la que vamos a estudiar y sufran un mayor vulnerabilidad y posibles ataques. Esto implica no solo encontrar las rutas más cortas, sino también considerar las condiciones actuales del tráfico, las capacidades de las carreteras y cualquier restricción específica, como la necesidad de contraflujo.

La minimización de los kilómetros de viaje recorridos es especialmente importante en situaciones de emergencia, debido a que menos kilómetros recorridos implican menos estrés y desgaste en las carreteras y puentes. En una evacuación masiva, la infraestructura puede verse rápidamente saturada y dañada. Minimizar el recorrido total ayuda a preservar la infraestructura crítica, que será esencial tanto durante como después de la evacuación. Cuando los vehículos recorren menos distancia, es

menos probable que se formen cuellos de botella y congestiones severas en ciertas áreas de la red vial. Esto puede ayudar a mantener un flujo de tráfico más constante y evitar que ciertas rutas se sobrecarguen, lo cual es crucial para una evacuación ordenada y rápida. También puede reducir la exposición a riesgos adicionales en la carretera, como accidentes o ataques, y disminuir el estrés emocional y físico de los evacuados. Además, una vez que la evacuación haya terminado, las tareas de reasentamiento y recuperación pueden comenzar más rápidamente si los vehículos no han recorrido distancias innecesariamente largas. Esto puede ayudar a las autoridades a reasentar a las personas en áreas seguras de manera más eficiente y comenzar los esfuerzos de recuperación más pronto.

La maximización de la eficiencia de rescate implica planificar rutas que permitan a los vehículos de emergencia moverse rápidamente, evitando congestiones y minimizando las interferencias con el tráfico de evacuación. Se incorporan estrategias de contraflujo y asignación de tráfico que priorizan el acceso rápido de los vehículos de rescate, garantizando que las operaciones de evacuación y rescate puedan llevarse a cabo de manera simultánea y efectiva.

En resumen, los conceptos clave y los principios de la optimización del tráfico proporcionan la base teórica necesaria para comprender y aplicar el método Nguyen-Dupuis en la planificación de evacuaciones. Estos fundamentos aseguran que el tráfico de evacuación y rescate se gestione de manera óptima factores cruciales para la seguridad y el bienestar de las personas en situaciones de emergencia.

3.3. Estructura topológica de la red Nguyen-Dupuis

3.3.1 Descripción de la red

La red vial utilizada en el método Nguyen-Dupuis es una representación abstracta y simplificada de un sistema de carreteras, diseñada para facilitar la optimización del tráfico de evacuación y rescate. Esta red está compuesta por nodos de intersección y enlaces (carreteras) que conectan estos nodos. Los nodos representan puntos de intersección donde los vehículos pueden cambiar de una carretera a otra, mientras que los enlaces representan los tramos de carretera entre estas intersecciones. La red se diseña de tal manera que permite modelar y analizar el flujo de tráfico bajo diferentes condiciones y restricciones, como el contraflujo y la capacidad de las carreteras.

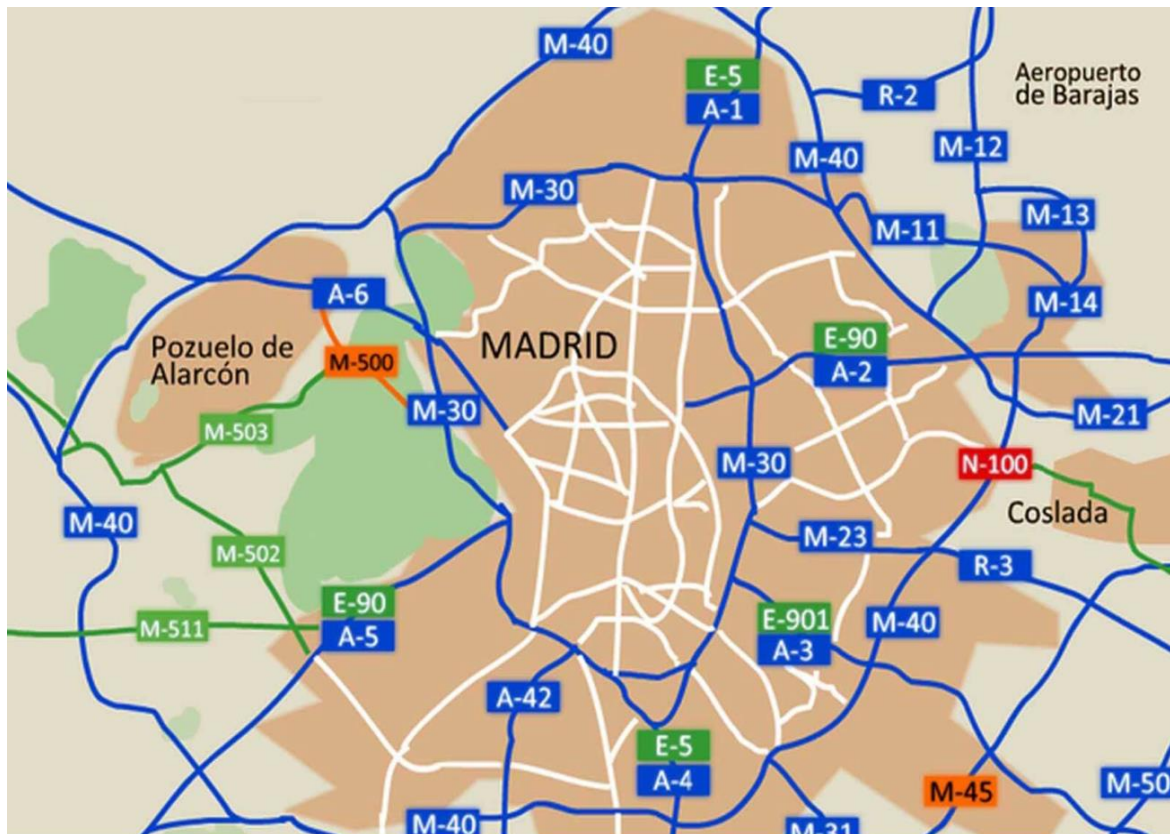


Figura 19. Carreteras de Madrid sin aplicar el método Nguyen-Dupuis⁸²

En la red Nguyen-Dupuis, se incluyen tanto carreteras reales como virtuales. Las carreteras reales son aquellas que existen físicamente y están disponibles para el tráfico regular, mientras que las carreteras virtuales son enlaces hipotéticos que se utilizan para modelar situaciones específicas, como rutas de emergencia que no están disponibles en condiciones normales.

⁸² Emesa ,(2024).

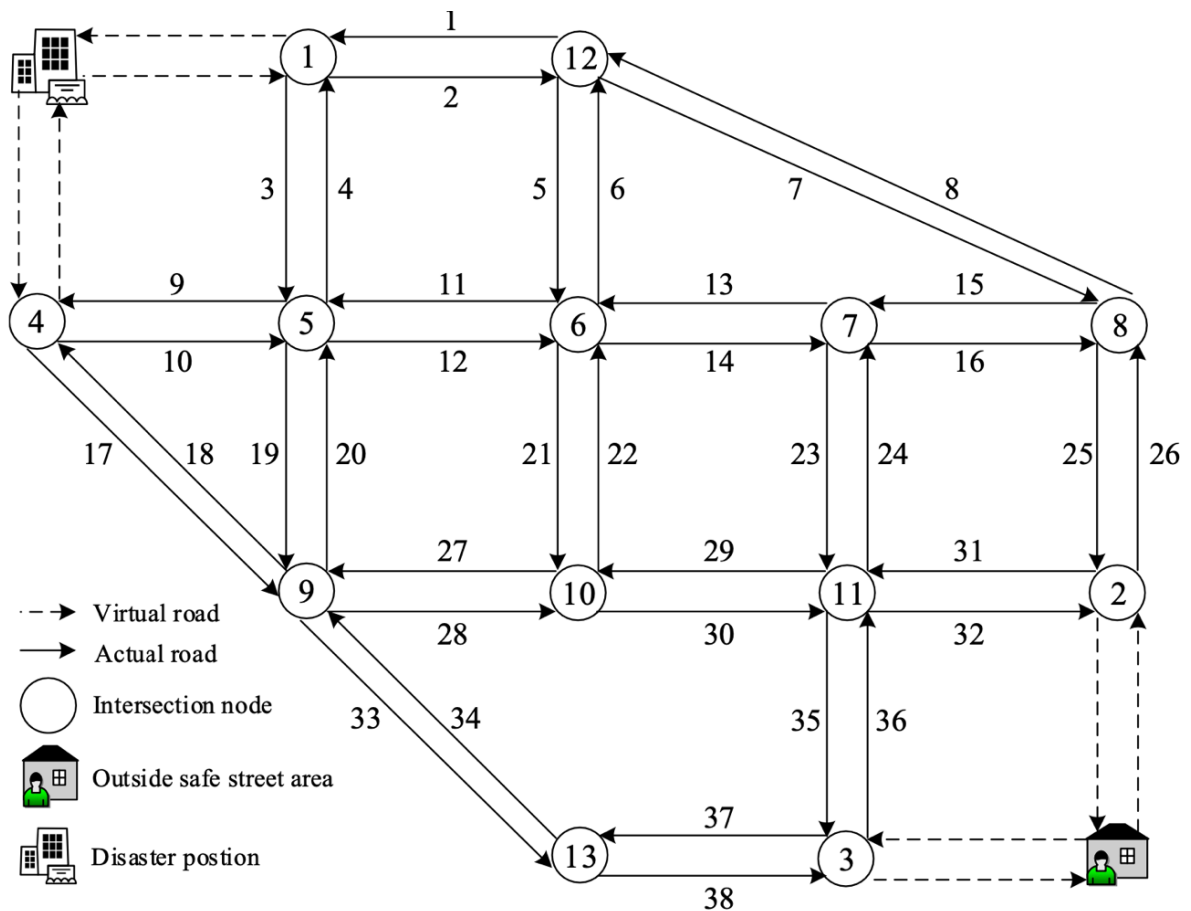


Figura. 20. Nguyen-Dupuis Road network⁸³

3.3.2 Nodos de Intersección y Carreteras

La estructura de la red Nguyen-Dupuis se basa en una serie de nodos de intersección y carreteras que conectan estos nodos. Los nodos de intersección son puntos donde convergen dos o más carreteras y permiten el cambio de dirección del tráfico. En el contexto de la optimización del tráfico de evacuación y rescate, estos nodos son cruciales ya que representan puntos críticos donde se pueden generar congestiones o donde se pueden implementar estrategias de contraflujo.

Las carreteras en la red se representan como enlaces entre los nodos. Cada enlace tiene atributos específicos como longitud, capacidad (número máximo de vehículos que puede soportar), y estado (real o virtual). En nuestro caso vamos a tratar todas las carreteras como reales, ya que solo estamos analizando el estado crítico o de evacuación. La longitud de la carretera y su capacidad se utilizan para determinar el

⁸³ Liu et al., (2024)

flujo máximo de tráfico que la carretera puede manejar sin congestión. Los estados de las carreteras (reales o virtuales) determinan si la carretera está disponible para el tráfico regular o si se utiliza únicamente en escenarios de emergencia. Como en este caso estamos analizando una situación de emergencia, ambos tipos de carreteras se tratarán de la misma forma, y solo se distinguirá entre las que tengan y las que no tengan contraflujo.

Para una mejor comprensión de la estructura de nodos y carreteras, es útil considerar la inclusión de un diagrama topológico que muestre cómo están conectados los nodos y las carreteras en la red Nguyen-Dupuis. Este diagrama puede ayudar a visualizar las rutas posibles para la evacuación y el rescate, así como las áreas donde se puede implementar el contraflujo, como hemos visto en la Figura 20.

3.3.3 Clasificación de Carreteras: Virtuales vs. Reales

En la red Nguyen-Dupuis, las carreteras se clasifican en dos categorías principales: carreteras virtuales y carreteras reales.

Las carreteras reales son aquellas que existen físicamente en la infraestructura vial y están disponibles para el tráfico regular, las que en la Figura 20 se encuentran en mayoría, y están representadas por una línea continua. Estas carreteras son las principales rutas utilizadas para la evacuación y el rescate en situaciones de emergencia. Los atributos de las carreteras reales incluyen su longitud, capacidad y ubicación en la red. La gestión eficiente del tráfico en estas carreteras es crucial para asegurar una evacuación rápida y segura.

Las carreteras virtuales, por otro lado, son enlaces hipotéticos que no existen físicamente pero que se utilizan en el modelo para representar rutas de emergencia o alternativas temporales que pueden ser habilitadas en caso de desastre. Las que en la Figura 20 aparecen punteadas, y nos indican como ir desde la posición de desastre a las carreteras de evacuación, y de estas últimas al área segura. Estas carreteras permiten una mayor flexibilidad en la planificación de rutas de evacuación y rescate, ya que pueden ser activadas o desactivadas según sea necesario. Por ejemplo, una carretera virtual podría representar un paso temporal a través de una zona normalmente inaccesible, que se abre únicamente en situaciones de emergencia para facilitar la evacuación rápida.

La diferenciación entre carreteras virtuales y reales es esencial para la modelización precisa y efectiva del tráfico de evacuación y rescate. Mientras que las carreteras reales representan las limitaciones físicas de la infraestructura vial existente, las

carreteras virtuales ofrecen oportunidades adicionales para optimizar el flujo de tráfico y mejorar la respuesta en situaciones críticas.

En resumen, la estructura topológica de la red Nguyen-Dupuis se compone de nodos de intersección y carreteras (reales y virtuales) que se diseñan para modelar el flujo de tráfico de manera eficiente. La comprensión detallada de esta estructura y la correcta clasificación de las carreteras son fundamentales para aplicar el método de manera efectiva y optimizar las operaciones de evacuación y rescate.

3.4. Formulación matemática

La formulación matemática del método Nguyen-Dupuis es crucial para entender cómo se optimiza el tráfico de evacuación y rescate en situaciones de emergencia. A continuación, se detallan las notaciones y variables utilizadas, las restricciones y condiciones que deben cumplirse, así como la función objetivo del modelo de optimización.

Para formalizar el problema de optimización, se utilizan las diferentes notaciones y variables, con las cuales podemos llegar a 3 restricciones y 1 función objetivo que optimizaremos.

Antes de nada es necesario saber que nuestra red vial se ve representada por $G=(N, E)$: Grafo dirigido que representa la red vial, donde N es el conjunto de nodos (intersecciones) y E es el conjunto de aristas (carreteras).

3.4.1 Restricciones y Condiciones

El modelo de optimización está sujeto a varias restricciones y condiciones que aseguran la factibilidad y eficiencia del tráfico de evacuación y rescate.

CONSERVACIÓN DEL TRÁFICO

Para cada nodo i en la red, la cantidad de tráfico que entra debe ser igual a la cantidad de tráfico que sale, menos cualquier tráfico que se origina o termina en ese nodo. Esto garantiza que no haya acumulación o desaparición inexplicable de vehículos en la red. Esto se puede expresar matemáticamente como:

$$\sum_{j \in N} f_{ij} - \sum_{j \in N} f_{ji} = s_i - d_i \quad , \forall i \in N \quad (1)$$

Donde:

f_{ij} : Flujo de tráfico en el enlace entre el nodo i y el nodo j .

f_{ji} : Flujo de tráfico en el enlace entre el nodo j y el nodo i .

s_i : Cantidad de tráfico que sale del nodo i .

d_i : Cantidad de tráfico que llega al nodo i .

Teniendo en cuenta que N es el conjunto de nodos (intersecciones).

DINÁMICA DE CARGA DEL TRÁFICO

El flujo de tráfico en cada enlace debe respetar su capacidad, es decir, no puede exceder la capacidad máxima del enlace:

$$f_{ij} \leq c_{ij} \cdot n_{ij} \cdot (1 + x_{ij}), \quad \forall (i, j) \in E \quad (2)$$

Donde:

f_{ij} : Flujo de tráfico en el enlace entre el nodo i y el nodo j .

c_{ij} : Capacidad del enlace entre el nodo i y el nodo j .

n_{ij} : Número de carriles del enlace entre el nodo i y el nodo j .

$x_{ij} \in (0,1)$: Variable binaria que indica si el enlace entre el nodo i y el nodo j se utiliza (1) o no (0).

Teniendo en cuenta que E es el conjunto de aristas (carreteras).

CONTROL DE CONTRAFLUJO

El contraflujo implica la inversión temporal de la dirección de ciertos enlaces. Esto introduce restricciones adicionales en el modelo para asegurar que los enlaces de contraflujo no interfieran con el tráfico regular y se utilicen de manera eficiente:

$$x_{ij} + x_{ji} \leq 1, \quad \forall (i, j) \in E. \quad (3)$$

Donde x_{ij} y $x_{ji} \in (0,1)$ son las variables binarias que indican si la carretera que va del nodo i al j , o viceversa tiene el contraflujo operativo para la evacuación.

3.4.2 Función Objetivo

El modelo de optimización multiobjetivo busca equilibrar varios objetivos simultáneamente. Las funciones objetivos principales pueden incluir:

MINIMIZACIÓN DEL TRÁFICO DE EVACUACIÓN

Simultáneamente, se busca minimizar el tiempo total de evacuación para el tráfico de evacuación, es decir, evacuar la zona lo más rápido posible en dichas condiciones especiales:

$$\min \sum_{(i,j) \in E} f(t,i) \cdot d_{ij} \quad (4)$$

Donde:

$f_{t,i}$: Flujo de tráfico de evacuación en el enlace i en el tiempo t .

d_{ij} : Distancia en kilómetros en el enlace entre el nodo i y el nodo j .

Además de la función objetivo, se busca minimizar el uso del contraflujo para evitar conflictos y complejidades adicionales. Para ellos se irán analizando diversas hipótesis.

$$\min \sum_{i \in LP} x_{ij} \quad (5)$$

Donde:

$x_{ij} \in (0,1)$: Variable binaria que indica si el enlace entre el nodo i y el nodo j se utiliza (1) o no (0).

LP : Conjunto de enlaces en los que se puede aplicar el contraflujo.

Para concluir el capítulo sobre el Método Nguyen-Dupuis aplicado a la optimización del tráfico de evacuación, se destaca la robustez y eficiencia de este enfoque en situaciones de emergencia. Este método combina principios fundamentales de optimización del tráfico, como la programación lineal mixta, con estrategias específicas como el contraflujo, para asegurar una gestión efectiva y rápida de las evacuaciones.

Además, la formulación matemática detallada proporciona un marco sólido para la implementación práctica del método, asegurando que se cumplan todas las condiciones y restricciones necesarias para una planificación efectiva. La inclusión de carreteras virtuales y reales, así como la gestión controlada del contraflujo, son elementos clave que permiten adaptar el modelo a las necesidades específicas de cada situación de emergencia.

En resumen, el Método Nguyen-Dupuis no solo ofrece una herramienta poderosa para optimizar el tráfico de evacuación y rescate, sino que también proporciona un marco flexible y adaptable que puede ser fundamental para la seguridad y bienestar de la población en situaciones críticas. Su implementación efectiva en Ceuta (en los

próximos capítulos) promete mejorar significativamente la capacidad de respuesta ante desastres, minimizando el impacto negativo.

CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DEL MÉTODO NGUYEN-DUPUIS A CEUTA

En el capítulo anterior, se expuso detalladamente el método Nguyen-Dupuis, una herramienta fundamental para la planificación de rutas de evacuación en áreas urbanas densamente pobladas. Este capítulo se centrará en la aplicación práctica de dicho método a una de las dos ciudades autónomas españolas, Ceuta. La finalidad es adaptar y optimizar las estrategias de evacuación según las características específicas de cada ciudad, garantizando así la seguridad y eficiencia en situaciones de emergencia.

Los objetivos de este capítulo son, realizar un análisis preliminar de las infraestructuras y condiciones geográficas de Ceuta y Melilla e identificar las principales diferencias y similitudes entre ambas ciudades con respecto a la planificación de rutas de evacuación, y posteriormente implementar el método Nguyen-Dupuis en la más crítica, Ceuta. Después se expondrá todo el proceso que se ha analizado en el capítulo anterior de forma teórica.

Para aplicar el método Nguyen-Dupuis, es esencial llevar a cabo un análisis preliminar que considere varios factores fundamentales, tales como la infraestructura vial existente, la densidad de población, la vulnerabilidad a desastres naturales y las condiciones geográficas específicas de cada ciudad autónoma.

Ceuta, ubicada en la costa norte de África, presenta una infraestructura vial más limitada en comparación con Melilla. La red vial de Ceuta incluye varias rutas de salida tanto hacia la península ibérica a través de conexiones marítimas como hacia Marruecos por tierra. La ciudad tiene una alta densidad de población, especialmente concentrada en su núcleo urbano central, lo que implica que un gran número de personas necesitaría ser evacuado en caso de emergencia. La vulnerabilidad a desastres naturales en Ceuta es moderada; existen riesgos de inundaciones y terremotos que podrían afectar significativamente las rutas de evacuación. Además, la topografía de Ceuta es predominantemente montañosa, lo que puede complicar el diseño y la implementación de rutas de evacuación efectivas.

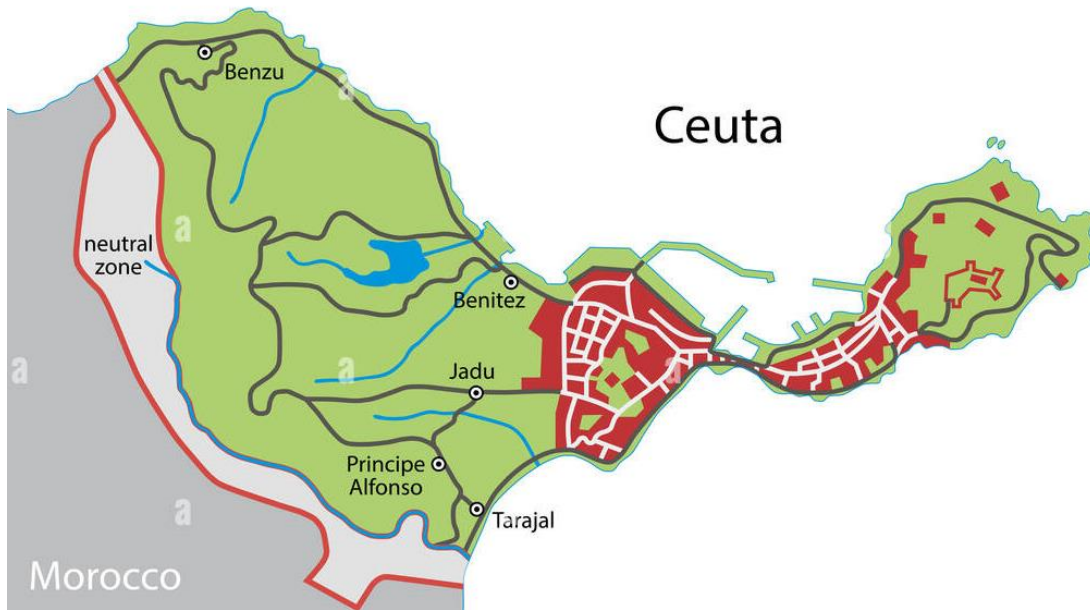


Figura 21. Mapa orientativo de Ceuta.⁸⁴

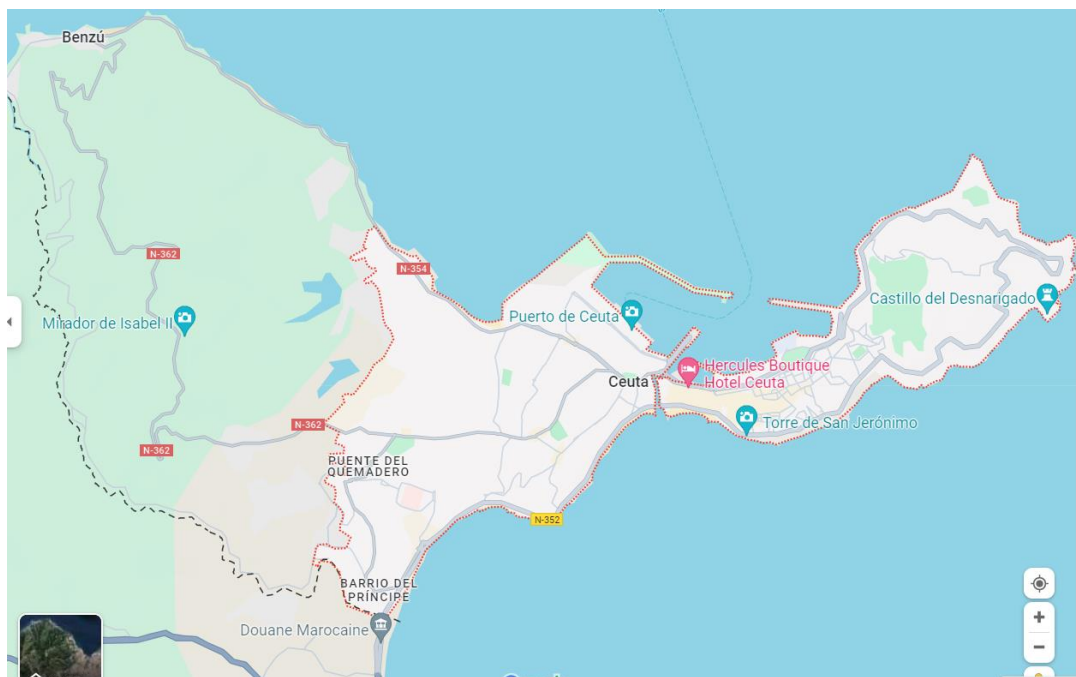


Figura 22. Captura de pantalla de Ceuta en Google Maps.⁸⁵

⁸⁴ Arab y Alioua (s. f.)

⁸⁵ Google. (2024).

Comparando Ceuta con Melilla, esta última también situada en la costa norte de África, cuenta con una infraestructura vial más desarrollada, incluyendo un mayor número de rutas de acceso y conexiones tanto marítimas como aéreas. La densidad de población en Melilla es alta, pero su distribución es más dispersa en comparación con Ceuta, lo que puede facilitar ciertos aspectos de la evacuación. Al igual que Ceuta, Melilla enfrenta riesgos de inundaciones y terremotos, aunque su terreno relativamente plano podría facilitar la implementación de rutas de evacuación. Las condiciones geográficas menos complejas de Melilla pueden hacer que las estrategias de evacuación sean más fáciles de diseñar y ejecutar.

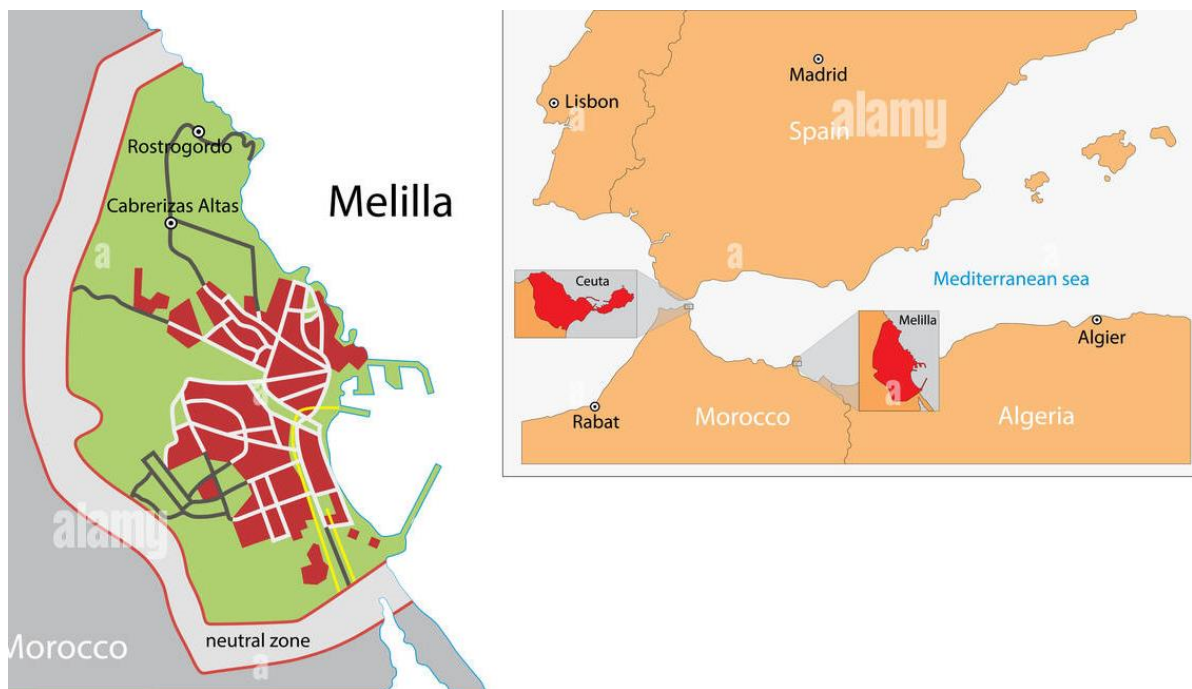


Figura 23. Mapa orientativo de Melilla.⁸⁶

⁸⁶ Arab y Alioua (s. f.)

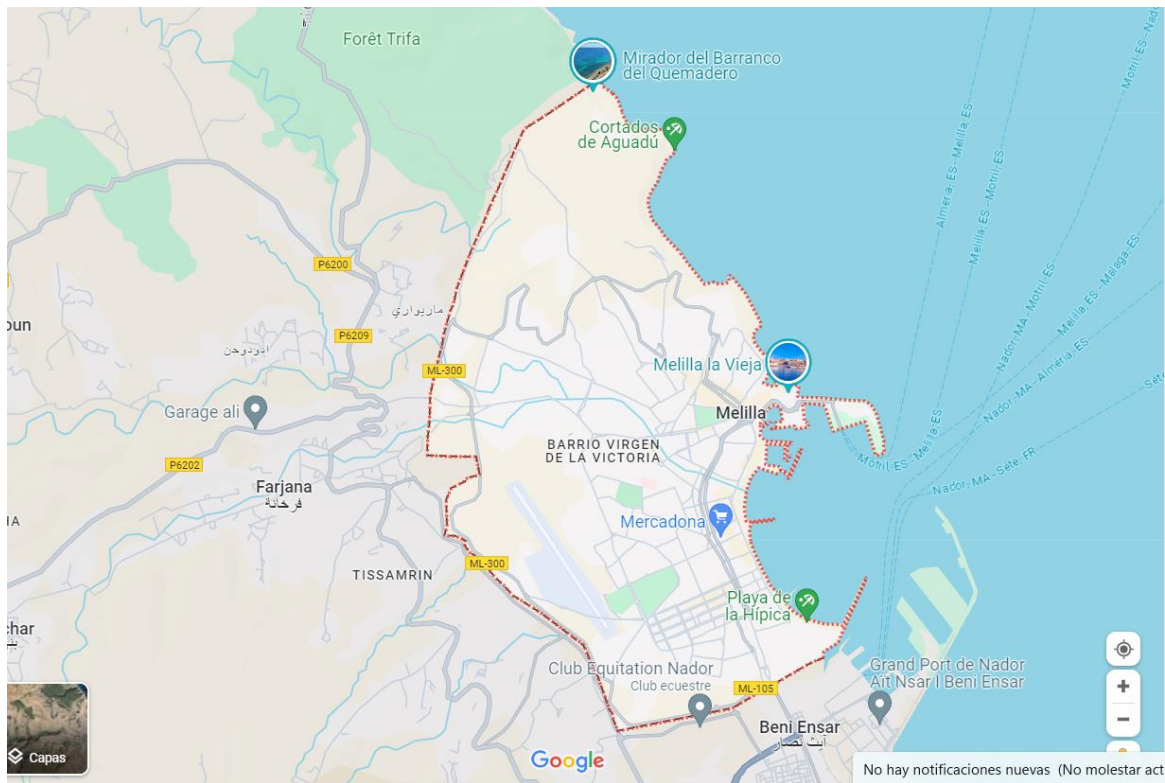


Figura 24. Captura de pantalla de Melilla en Google Maps.⁸⁷

Decisión de Prioridad. Considerando estos factores, se ha decidido realizar el plan de evacuación sobre Ceuta para la aplicación del método Nguyen-Dupuis. Esta decisión se basa en la combinación de una infraestructura vial más limitada y una mayor concentración de población en áreas urbanas, lo que presenta un mayor desafío inicial. Abordar primero los problemas más complejos y críticos en Ceuta proporcionará un marco robusto.

4.1 Análisis de Ceuta

Ceuta es una ciudad autónoma española situada en la costa norte de África, en el estrecho de Gibraltar. Limita al norte, este y sur con el Mar Mediterráneo y al oeste con Marruecos. Su ubicación estratégica ha sido crucial a lo largo de la historia, sirviendo como punto de conexión entre Europa y África. Con una superficie de aproximadamente 18.5 km², Ceuta cuenta con una población de alrededor de 84,000 habitantes. La ciudad se caracteriza por su multiculturalidad, con una mezcla de culturas española, marroquí y judía, entre otras. Su economía se basa principalmente

⁸⁷ Google. (2024).

en el comercio y los servicios, con un puerto de gran relevancia para el tránsito de mercancías.

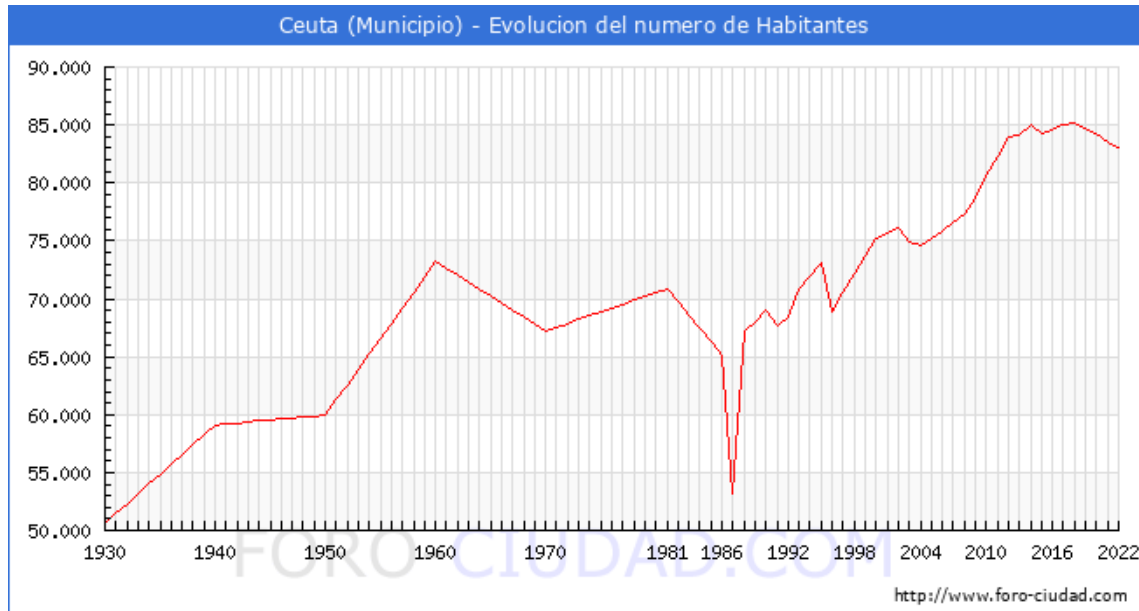


Figura 25. Evolución número de habitantes Ceuta.⁸⁸

La infraestructura vial de Ceuta incluye una red de carreteras bien desarrollada que conecta las distintas áreas de la ciudad. Sin embargo, debido a su tamaño compacto y la densidad de población, existen varios cuellos de botella y áreas críticas que deben ser considerados en el análisis de evacuación. Las principales arterias viales incluyen la carretera N352, que conecta el centro de la ciudad con la frontera con Marruecos, y diversas avenidas principales que distribuyen el tráfico interno. La red vial se complementa con una serie de calles secundarias y caminos rurales que facilitan el acceso a las zonas periféricas.

El mapa vial de Ceuta muestra una alta concentración de tráfico en zonas como el centro urbano y las áreas cercanas al puerto, especialmente durante las horas pico. Es crucial identificar estos puntos de congestión para diseñar rutas de evacuación eficientes. Además, se deben considerar los accesos limitados en algunas áreas debido a la geografía accidentada de la región.

⁸⁸ Habitantes Ceuta 1930-2023,(s. f.)

Densidad de Población y Vulnerabilidad

La distribución de la población en Ceuta es heterogénea, con una alta concentración en el centro urbano y una menor densidad en las áreas periféricas, es por esto que nos centraremos en la zona más urbanita de la ciudad, asumiendo que es en dicho lugar donde encontraríamos la gran mayoría de dificultades. La densidad de población y la estructura demográfica son factores clave en la planificación de la evacuación, ya que influyen la velocidad de desplazamiento y las necesidades de la población.

Un análisis detallado de la vulnerabilidad debe considerar la exposición de la población a estos riesgos, así como la capacidad de respuesta de los servicios de emergencia. Las áreas con mayor densidad de población, como el centro urbano, podrían enfrentar mayores desafíos durante una evacuación debido a la congestión y la limitada capacidad de las infraestructuras existentes.

La topografía de Ceuta es variada, con colinas y áreas montañosas que pueden complicar las operaciones de evacuación. La ciudad se encuentra en una península rodeada por el mar, lo que limita las opciones de salida en caso de emergencia. La geografía accidentada y la presencia de zonas elevadas pueden representar un reto significativo para la movilidad, especialmente para personas con movilidad reducida y durante condiciones climáticas adversas.



Figura 26. Topografía de Ceuta.⁸⁹

El impacto de la topografía en la evacuación se debe analizar minuciosamente para identificar las rutas más seguras y eficientes. Además, la proximidad al mar implica un riesgo adicional de tsunamis, lo que requiere una planificación específica para la evacuación hacia áreas elevadas, si bien este riesgo es mínimo, y por lo tanto se analizará la posibilidad de un ataque desde la frontera con Marruecos, antes que una evacuación de urgencia por cualquier problema meteorológico repentino.

La proximidad de Ceuta a Marruecos, con solo una frontera terrestre de 8 km, plantea un riesgo potencial de conflicto. A lo largo de la historia, Ceuta ha sido objeto de tensiones y ataques. En 1859, por ejemplo, Marruecos intentó tomar la ciudad durante la Guerra de África, aunque sin éxito. Estas tensiones persisten, lo que aumenta la necesidad de estar preparados para situaciones de emergencia derivadas de conflictos armados. La identificación de puntos de encuentro seguros y la instalación de señalización adecuada son medidas esenciales para garantizar una evacuación ordenada y efectiva.

⁸⁹ De Documentación (s. f.)

Proximidad a la Península Ibérica y Opciones de Evacuación

Ceuta está mucho más cerca de la Península Ibérica que Melilla, lo cual es beneficioso en términos de evacuación. La distancia entre Ceuta y la península es de aproximadamente 14 km, lo que facilita la evacuación marítima y aérea. Una vez que la población ha llegado a las zonas seguras designadas dentro de la ciudad, se podría proceder a la evacuación hacia la Península mediante ferris, barcos militares y aviones.



Figura 27. Mapa para apreciar la distancia entre Ceuta y la Península.⁹⁰

Evacuación Marítima: La evacuación por mar puede ser rápida y eficiente, utilizando tanto ferris comerciales como buques militares. El puerto de Ceuta está bien equipado para manejar grandes volúmenes de personas y mercancías, lo que lo convierte en un punto de evacuación crucial.

Evacuación Aérea: La evacuación aérea es otra opción viable, especialmente para personas con necesidades especiales o en situaciones donde el tiempo es crítico. El

⁹⁰ Ceuta Weather Forecast, (s. f.)

helipuerto de Ceuta puede facilitar la evacuación, aunque su capacidad es limitada en comparación con el puerto.

Ambas opciones deben ser evaluadas y coordinadas para garantizar una evacuación rápida y segura en caso de emergencia. La cercanía a la península y las infraestructuras existentes ofrecen ventajas significativas en la planificación de la evacuación.

4. 2. Modelado de la red vial en Ceuta

Proteger la ciudad ante un posible ataque

Si bien es importante saber una vez alcanzado el punto “seguro” como van a ser evacuados los habitantes a la Península, nuestro objetivo principal es trazar la Red Vial, para ser capaces de hallar la ruta óptima para desplazarse desde el punto en el que se inicia el atentado, hasta el punto seguro, como pueden ser el Puerto o el Helipuerto de dicha Ciudad Autónoma.

Antes de nada, se realiza un análisis detallado sobre las vulnerabilidades y las estrategias de defensa ante posibles ataques o atentados en Ceuta, se han identificado varios aspectos estratégicos clave que requieren vigilancia y protección prioritaria.

Primero, es fundamental asegurar las fronteras terrestres y los puntos de entrada marítimos de Ceuta. Esto incluye implementar controles fronterizos reforzados, mantener una vigilancia constante y utilizar sistemas avanzados de detección para mitigar riesgos. Además, se deben identificar y proteger infraestructuras críticas como puertos, aeropuertos, centros de transporte, suministro de agua, centrales eléctricas y hospitales. Estos sitios son objetivos potenciales debido a su importancia estratégica y el impacto significativo que un ataque podría tener en la población y la economía local.

Es crucial reforzar la seguridad en áreas densamente pobladas, como el centro de la ciudad, zonas residenciales y comerciales, mediante la implementación de patrullas policiales, cámaras de vigilancia y protocolos de respuesta rápida ante emergencias. Asimismo, asegurar las bases militares, comisarías de policía y otras instalaciones de seguridad es fundamental, dado que podrían ser blanco de ataques directos o indirectos. Mantener una estrecha cooperación internacional con autoridades de seguridad y países vecinos es necesario para compartir inteligencia, información y estrategias de defensa comunes, fortaleciendo así las capacidades de seguridad de Ceuta ante posibles amenazas externas. En preparación para emergencias, desarrollar planes de contingencia detallados y llevar a cabo simulacros periódicos

garantiza que todas las agencias involucradas estén preparadas para responder de manera efectiva ante cualquier situación de crisis.

En resumen, proteger efectivamente a Ceuta contra posibles ataques o atentados de Marruecos requiere un enfoque integral que abarque la seguridad de las fronteras, la protección de infraestructuras críticas y áreas pobladas, así como una sólida cooperación internacional y una preparación interna rigurosa para responder a emergencias.

¿Cómo puede ser Ceuta atacado desde Marruecos?

Desde Marruecos hacia Ceuta, existen varios puntos de entrada tanto terrestres como marítimos que son estratégicamente importantes y controlados por medidas de seguridad para regular el tráfico y prevenir riesgos como el contrabando y la inmigración ilegal.

La frontera terrestre en Benzú es el principal punto de acceso por carretera entre Marruecos y Ceuta. Se encuentra ubicada en la península de Benzú y está controlada por las autoridades de España y Marruecos. Este paso fronterizo es crucial para el movimiento de personas y mercancías, siendo utilizado principalmente desde la ciudad marroquí de Fnideq (anteriormente conocida como Castillejos). La zona está equipada con controles fronterizos reforzados y sistemas de vigilancia avanzados para asegurar su integridad y prevenir posibles incidentes.



Figura 28. Paso fronterizo en Benzú. Es el principal punto de acceso a Ceuta desde Marruecos.⁹¹

En contraste con los puntos de entrada marítimos como el puerto de Ceuta y el puerto deportivo, la frontera terrestre en Benzú representa un punto crítico debido a su exposición directa a posibles ataques o intrusiones. Dada su importancia estratégica y el potencial de ser blanco de incursiones armadas, asaltos a puestos de control o infiltración de combatientes, es vital mantener una vigilancia rigurosa y capacidades de respuesta rápida.

El análisis detallado de la seguridad en la frontera terrestre incluye la evaluación de vulnerabilidades específicas como la accesibilidad para patrullas, la efectividad de los sistemas de detección de intrusos y la capacidad de movilización rápida de fuerzas de seguridad en caso de emergencia. Estas medidas son fundamentales para asegurar la protección efectiva de Ceuta contra posibles amenazas provenientes de Marruecos a través de esta frontera clave.

⁹¹ Redaccion y Redaccion (2020)

Ataques a través de la Frontera de Benzú

Los ataques a través de la frontera entre Ceuta y Marruecos pueden manifestarse de diversas maneras, cada una con sus propios desafíos y riesgos potenciales. Entre los escenarios más comunes se incluyen:

Las incursiones armadas, donde grupos organizados intentan cruzar la frontera de manera coordinada y armada para llevar a cabo ataques directos contra instalaciones estratégicas, fuerzas de seguridad o civiles. Este tipo de acción requiere una respuesta inmediata y efectiva por parte de las autoridades para neutralizar la amenaza y proteger la integridad territorial.

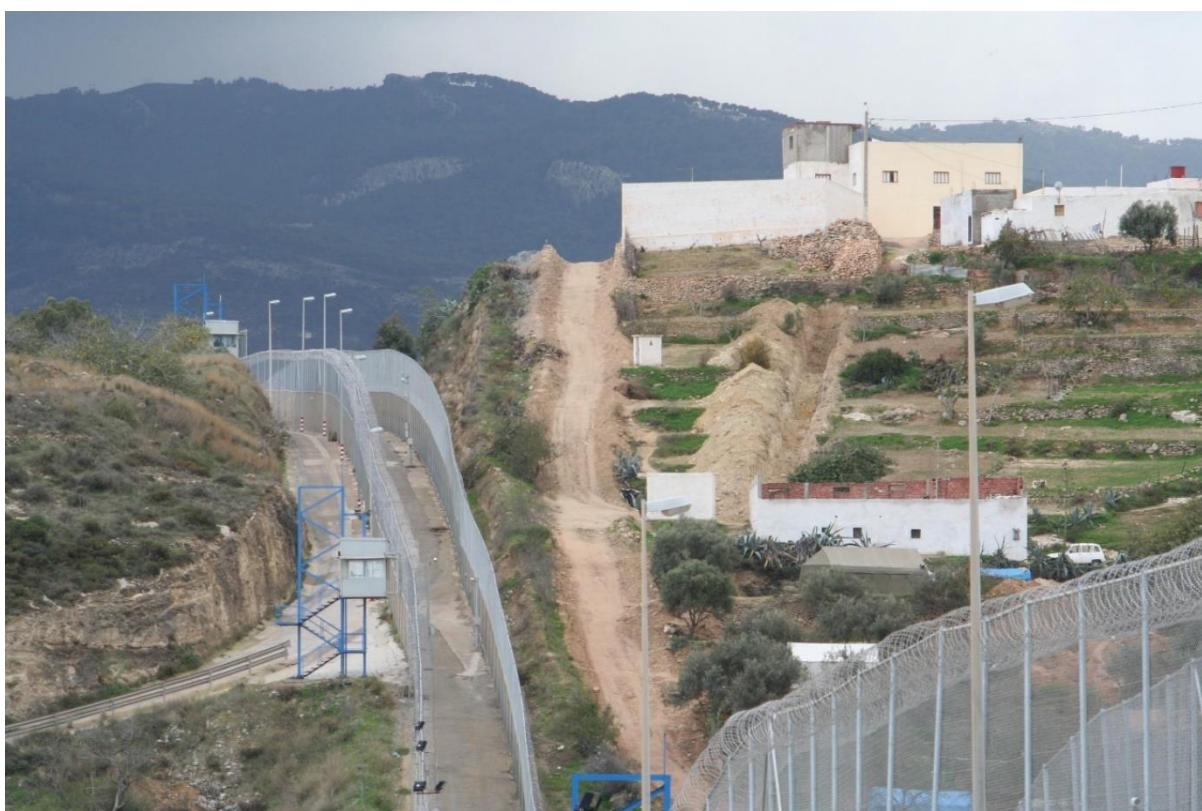


Figura 29. Vallado fronterizo entre Ceuta y Marruecos.⁹²

Los asaltos a puestos fronterizos, que pueden incluir intentos de tomar control de puntos de control para facilitar el paso ilegal de personas o materiales con

⁹² Efe (2022)

intenciones ilegales o violentas. Estas situaciones pueden poner en riesgo la seguridad tanto de los agentes fronterizos como de los civiles presentes en la zona.

La infiltración de combatientes, donde grupos extremistas pueden intentar pasar desapercibidos a través de la frontera, utilizando disfraces civiles, documentación falsa o mezclándose con grupos de migrantes legítimos. Este método busca aprovechar las vulnerabilidades en los controles de seguridad para introducir agentes hostiles en el territorio.

Los ataques con artefactos explosivos, que implican el uso de explosivos improvisados o dispositivos explosivos para atacar puestos de control, vehículos de patrulla u otras instalaciones estratégicas en la frontera. Estos ataques pueden causar daños significativos y poner en peligro la vida de civiles y personal de seguridad.

Los disparos dirigidos a instalaciones o personas desde el lado marroquí hacia Ceuta, con la intención de causar daño directo o crear pánico entre la población. Estos actos pueden ser perpetrados en momentos de menor vigilancia o durante crisis políticas o sociales en la región.

La efectividad de estos ataques depende de la planificación y recursos disponibles para los perpetradores, quienes podrían coordinarse con apoyo logístico desde el lado marroquí, incluyendo armas, municiones o refugio temporal. Para prevenir estas amenazas, es crucial mantener una vigilancia robusta en la frontera, utilizar tecnología avanzada de detección y fortalecer la cooperación entre las fuerzas de seguridad de España y Marruecos. Además, contar con planes de respuesta rápida y contingencia bien desarrollados es fundamental para mitigar el impacto de cualquier eventualidad en la seguridad fronteriza.

Evacuación marítima desde el puerto

La decisión de optar por una evacuación marítima desde el puerto en lugar de una evacuación aérea desde el helipuerto, en un escenario donde la frontera terrestre está bajo amenaza directa, involucra considerar varios factores críticos.

En primer lugar, la accesibilidad y seguridad son fundamentales. El transporte marítimo proporciona un acceso rápido y directo desde el puerto hacia la península española, evitando posibles bloqueos o riesgos que podrían afectar al acceso aéreo dependiendo de la situación y las condiciones meteorológicas.

La capacidad de evacuación es otro factor a considerar. Aunque el transporte marítimo puede parecer más lento, su capacidad para evacuar a un gran número de

personas en una sola operación es significativamente mayor en comparación con las capacidades aéreas disponibles. Esto es especialmente importante dado que los buques y ferris pueden transportar a cientos o incluso miles de personas en un solo viaje, lo que resulta en una mayor eficiencia de evacuación.

El estado de las infraestructuras juega un papel crucial. El puerto de Ceuta está bien equipado para manejar grandes cantidades de pasajeros y vehículos, con múltiples muelles y facilidades de embarque, mientras que el helipuerto tiene una capacidad limitada para manejar grandes cantidades de personas simultáneamente.

La seguridad del transporte y la logística es otro aspecto clave. Los buques pueden proporcionar un entorno más seguro y controlado durante la evacuación, y las rutas marítimas pueden ser escoltadas por fuerzas navales para garantizar la seguridad contra posibles amenazas.

En conclusión, dada la situación de amenaza directa en la frontera terrestre, la evacuación marítima desde el puerto podría ser más prudente debido a la mayor capacidad de transportar un gran número de personas de una sola vez y la infraestructura más robusta para manejar una evacuación a gran escala.

Desarrollo de la red vial

Una vez evaluados todos los aspectos relacionados con la seguridad y la logística para una posible evacuación desde Ceuta, podemos proceder con el desarrollo de la red vial. En este contexto, el término "Disaster Position" se refiere al punto crítico donde se podría iniciar un desastre, mientras que "Outside Safe Area" se refiere a un lugar seguro fuera de esa área de desastre.

En nuestro caso, la "Disaster Position" se establece en la frontera terrestre en Benzú, que es el punto principal de acceso y posible amenaza desde Marruecos hacia Ceuta. Esta área crítica requiere especial atención en términos de seguridad y control para prevenir posibles incidentes como ataques o intrusiones.

Por otro lado, el "Outside Safe Area" se define en el puerto de Ceuta. Este puerto representa el lugar seguro hacia donde dirigiríamos las operaciones de evacuación en caso de emergencia. Es crucial asegurar que esté operativo, seguro y accesible, con condiciones adecuadas para embarques y abordajes que faciliten una evacuación rápida y efectiva hacia la península española.

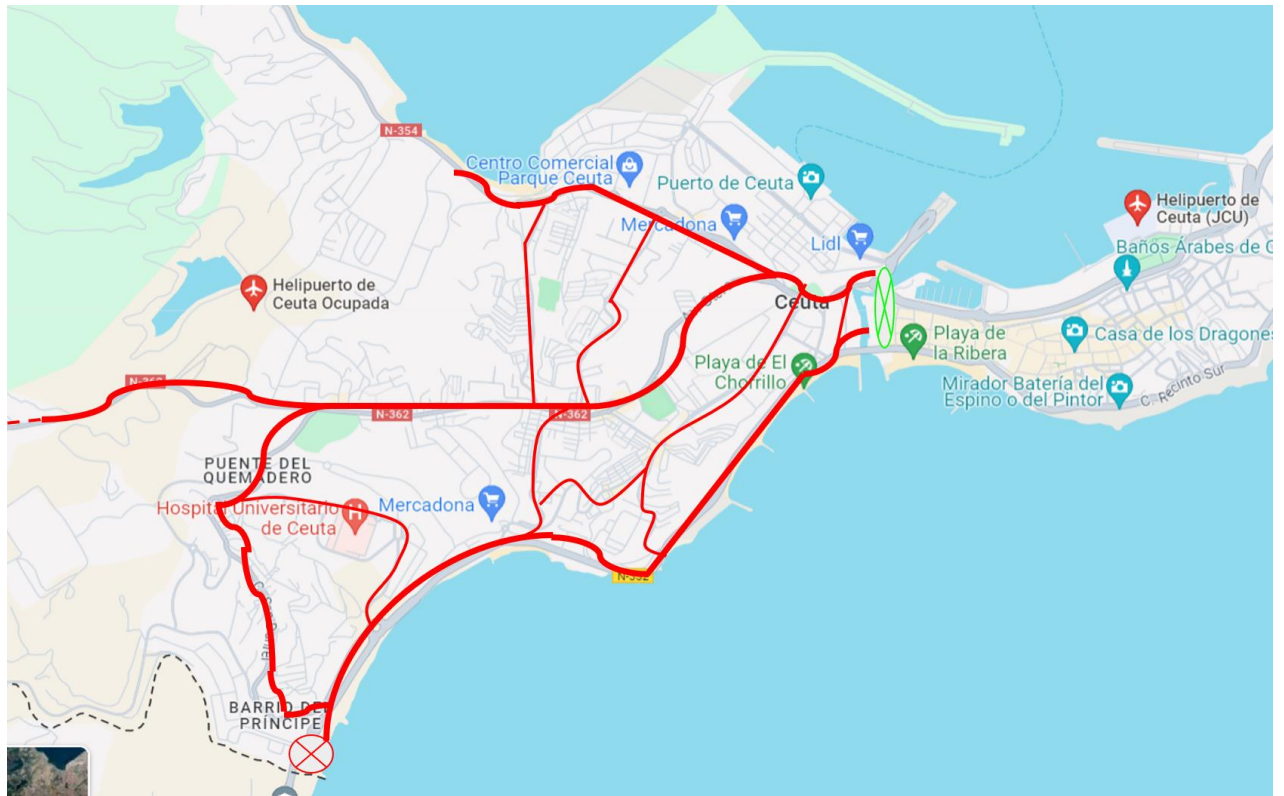


Figura 30. Posibles carreteras a tratar como Red Vial principal⁹³

Con esta configuración en mente, se procede a diseñar y optimizar la red vial. El objetivo principal será establecer rutas seguras y eficientes que conecten la frontera terrestre en Benzú con el puerto de Ceuta. Este diseño considerará la implementación de medidas como el contraflujo, que ayudará a gestionar y optimizar el flujo de tráfico en situaciones de evacuación y crisis.

Además, se deben tener en cuenta los puntos críticos a lo largo de esta red vial, como áreas de concentración poblacional, infraestructuras estratégicas y puntos de control de seguridad. La planificación detallada de estas rutas permitirá una respuesta efectiva ante emergencias, asegurando la protección de la población y la infraestructura clave en Ceuta.

En resumen, el diseño de la red vial debe enfocarse en conectar de manera segura y eficiente la frontera terrestre en Benzú con el puerto de Ceuta, estableciendo así una

⁹³ Elaboración propia, (2024).

infraestructura preparada para gestionar y responder ante posibles crisis y emergencias que puedan surgir en esta región estratégica.

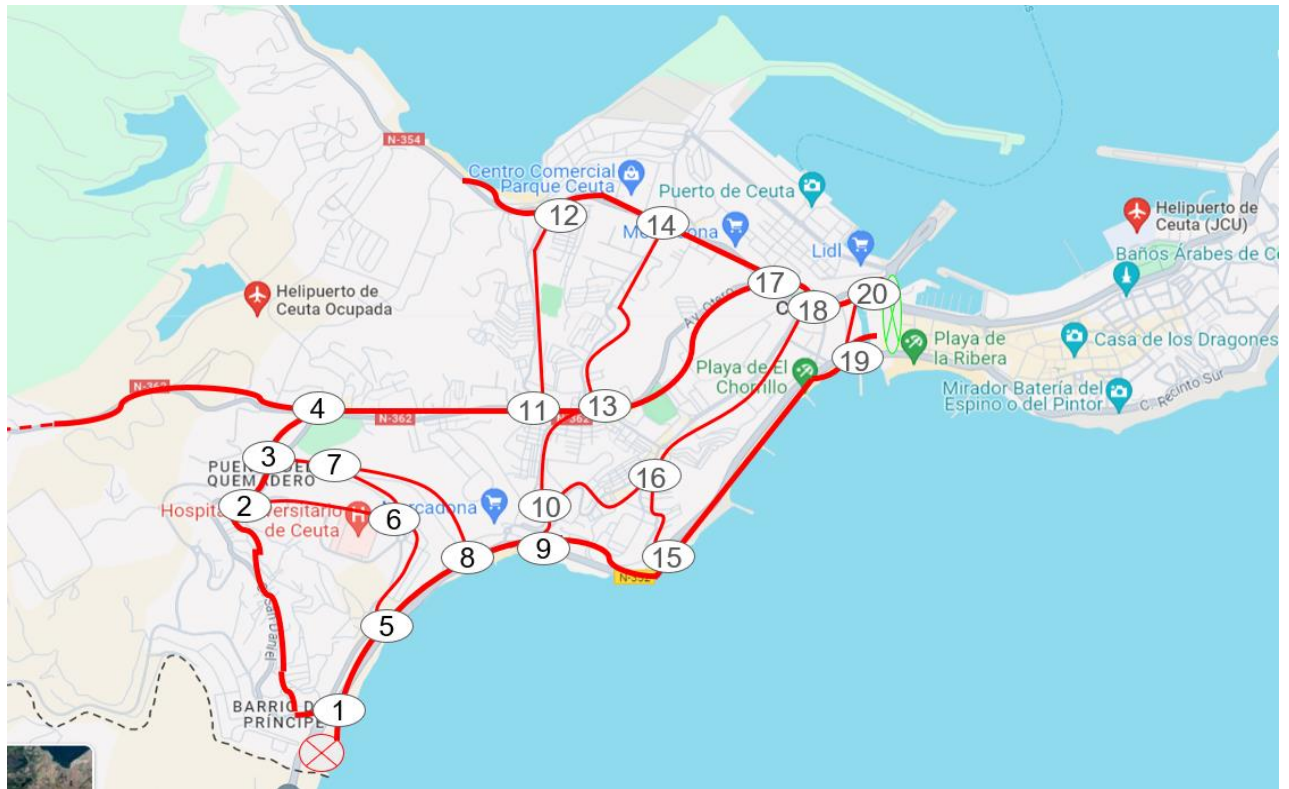


Figura 31. Carreteras a tratar como Red Vial principal con los distintos nodos.⁹⁴

Se han dibujado encima del mapa obtenido en Google Maps las carreteras a incluir en el Nguyen Dupuis, y posteriormente se han señalado los nudos uno a uno. Se pueden ver 20 nudos, conectados mediante 27 arcos.

⁹⁴ Elaboración propia, (2024).



Figura 32. Carreteras a tratar como Red Vial principal con los distintos nodos y el punto problemático (nodo 1) y el punto seguro (nodos 19 y 20) definidos.⁹⁵

⁹⁵ Elaboración propia, (2024).

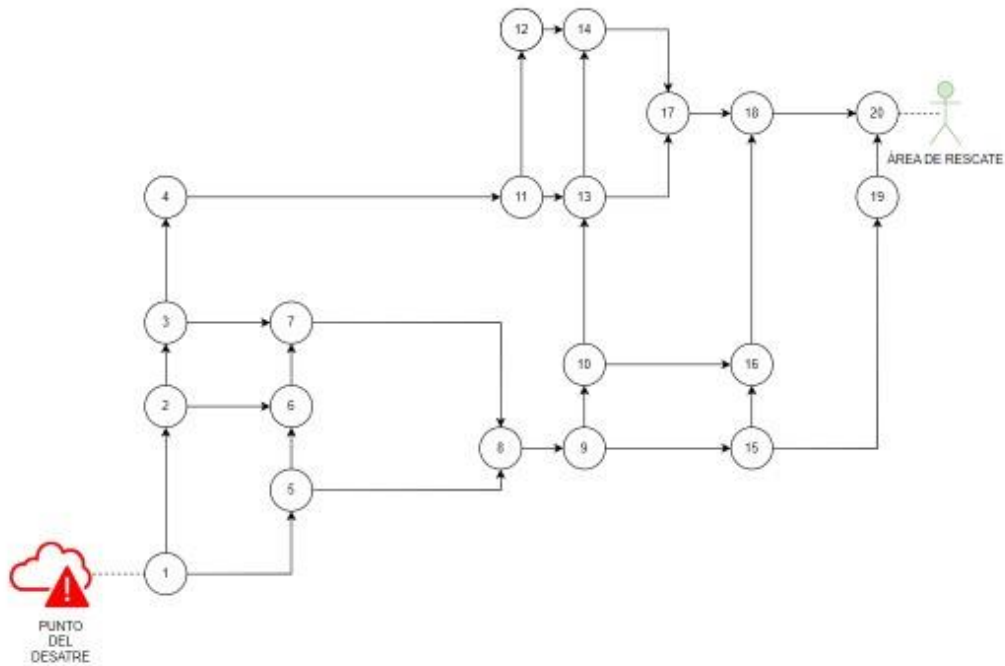


Figura 33. Red Nguyen Dupuis de la zona urbana a evacuar de Ceuta.⁹⁶

Se pasa a un formato de ordenador, y se señalan el punto de desastre, el cual da con el nodo 1, y el área de rescate. Finalmente se utilizarán los puntos 19 y 20, ya que desembocan al mismo sitio, y de esta forma se conseguirá una evacuación mucho más rápida.

4.3. Definición de variables y condiciones

Una vez definidos los nodos y los arcos, se procede a definir el resto de las variables necesarias, antes de implementar el modelo en Excel. Estas son la demanda en cada nodo, es decir; el número de personas que necesitan ser evacuadas, así como el suministro de los nodos iniciales y finales, o punto de partida y ambos puntos de destino. Además, se calcula la distancia de cada arco en kilómetros, y la capacidad de estos, o lo que es lo mismo, el número de vehículos que pueden pasar simultáneamente.

Las condiciones por implementar son la demanda, entrante o saliente de cada uno de los nudos, la distancia entre los arcos en kilómetros, y las capacidades de cada

⁹⁶ Elaboración propia, (2024).

uno de los arcos (carreteras), primero su capacidad inicial, y posteriormente la capacidad corregida en función del tiempo.

Respecto a la primera de las condiciones la demanda bien positiva o negativa de cada nudo, sabemos que Ceuta tiene una densidad de 4.216,05 habitantes por kilómetro cuadrado, cuarenta y siete veces por encima de la media nacional (89,51 habitantes/km²). Además, los problemas derivados de esta alta concentración se ven incrementados diariamente de forma relevante si tenemos en cuenta que entran en la Ciudad, por diversos motivos, unas 50.000 personas diarias, por lo que la densidad de población se dispara hasta las 6.900 personas por kilómetro cuadrado.

Para llevar a cabo un análisis preciso y efectivo del plan de evacuación en Ceuta, se han establecido ciertos parámetros clave basados en datos demográficos y logísticos. A continuación, se explican los supuestos y valores utilizados en el modelo de evacuación.

Ceuta presenta una densidad de población de aproximadamente 6.900 habitantes por kilómetro cuadrado en momentos de pico. Este dato es fundamental para estimar el número total de personas que necesitan ser evacuadas desde cada zona de la ciudad. La densidad de población permite calcular, de manera aproximada, cuántas personas residen en una determinada área y, por ende, cuánto tráfico de evacuación se generará.

Según el Instituto Nacional de Estadística (INE), la media de personas por hogar en España es de aproximadamente 2.5 personas. Esto puede variar ligeramente, pero podemos usar este promedio como una base para nuestros cálculos. En España, la tasa de motorización es alta, con una media de aproximadamente 500-600 vehículos por cada 1,000 habitantes. Esto indica que una gran mayoría de los hogares tiene al menos un vehículo. Durante una evacuación, es razonable suponer que un coche estará lleno al máximo de su capacidad debido a la urgencia de la situación. Generalmente, los coches tienen capacidad para 4-5 personas.

Una vez obtenidos estos datos, teniendo en cuentas las posibles excepciones de coches más grandes donde pueden caber hasta 12 personas, u otros vehículos con menor capacidad, que pueden llegar a ser incluso individuales, como es una moto o una bici, y que las distancias no son muy largas y este último caso también podría llegar a darse. Se utilizará una media de 4 personas/ vehículo de cara a la evacuación.

Este valor considera un uso óptimo del espacio disponible en los vehículos, teniendo en cuenta tanto la comodidad como la seguridad de los ocupantes. Al utilizar vehículos con una capacidad estándar de 4 personas, se facilita la planificación y

coordinación del número de vehículos necesarios para evacuar a la población de manera eficiente.

Una vez dicho esto, se divide toda la red en nueve lazos, es decir en nueve zonas que están siendo encerradas por carreteras. En la segunda columna se puede ver que nodos tocan cada lazo.

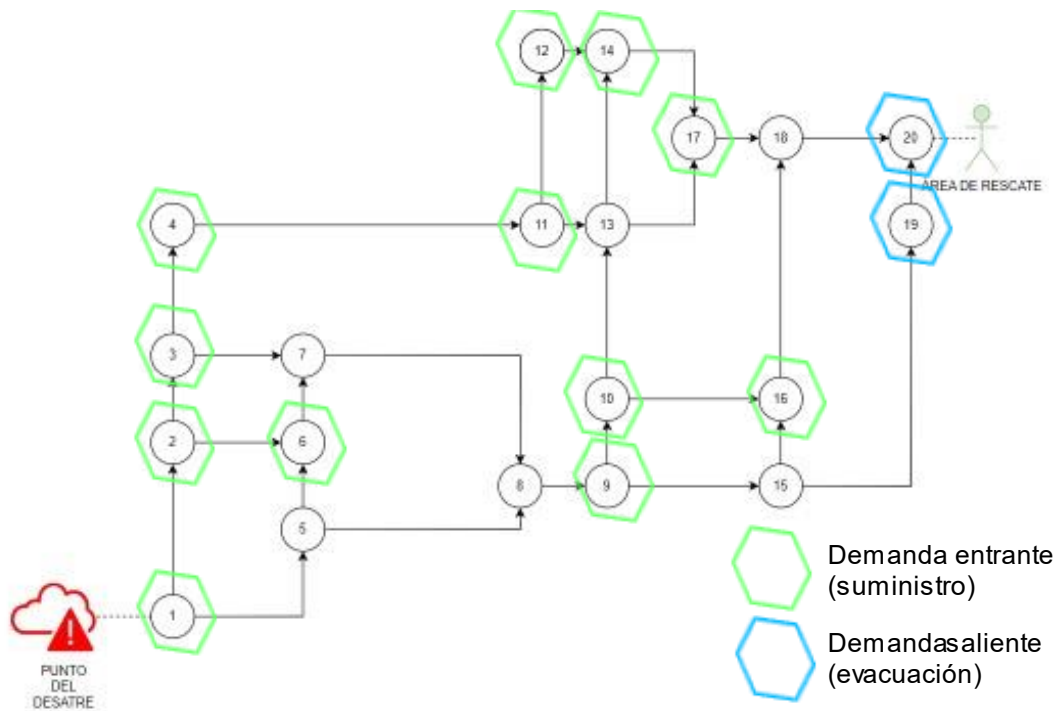


Figura 34. Red vial Nguyen-Dupuis Ceuta con los nodos de demanda entrante (suministro), y saliente (evacuación) señalados.⁹⁷

Si bien en la segunda columna de la 'Tabla 1' siguiente vemos que no por todos los nodos entran coches. Hay algunos nodos que son intersecciones, o lugares por los que no es posible que entre coches. Entran coches por los nodos 1,2,3,4,6,9,10,11,12,14,16,17. Salen coches (porque llegan al punto de evacuación) por los nodos 19 y 20. Por lo tanto por los nodos 5,7,8,13,15,18 entran los mismos coches que salen, es decir; su flujo es nulo.

Es decir:

Los nodos de demanda son 19, 20.

⁹⁷ Elaboración propia, (2024).

Los nodos de suministro son 1 ,2 ,3 ,4 ,6 ,9,10,11,12, 14, 16,17.

No son nos de suministro ni de demanda a estos efectos 5 ,7 ,8 ,13 ,15 ,18.

Se encuentran por lo tanto 2 nodos de demanda, 6 nodos a 0, es decir no son ni de suministro ni de demanda, y el resto, 12 nodos, de suministro.

Teniendo el número de entre los 12 posibles nodos de suministro que hay en cada lazo se calcula el suministro de cada uno de estos nodos. Primero calculando el número de habitantes totales a evacuar de cada nodo, y lo dividiremos entre el promedio de personas que van a ir en un coche a la hora de evacuar. Aproximando a la alta, y se obtendrá el dato buscado.

Para esto se calcula, a través de Google Maps, la superficie en kilómetros cuadrados de cada lazo, y al multiplicarlo por la densidad de población en pico (6.900), y dividirlo por el número de personas promedio que ocuparan cada vehículo a la hora de la evacuación (4), obtengo los coches necesarios por lazo. Los lazos utilizados son los siguientes:

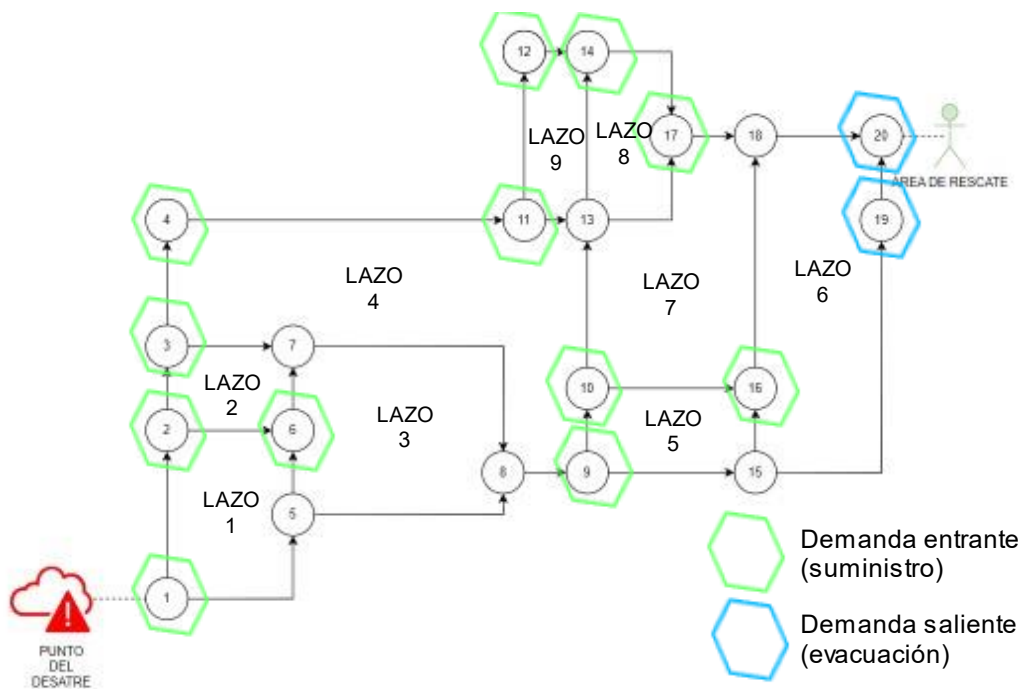


Figura 35. Red vial Nguyen Dupuis de Ceuta con los 9 lazos señalizados.⁹⁸

⁹⁸ Elaboración propia, (2024).

Este número de coches es dividido entre los distintos nodos que suministran vehículos, y se obtiene así la última columna en la que se indica el número exacto de vehículos por entrada de ese lazo en particular.

	NODOS INCLUIDOS	N.º NODOS CON COCHES IN	SUPERFICIE (m ²)	COCHES NECESARIOS POR LAZO	COCHES POR ENTRADA
1	1,2,6,5	3	478279	825	275
2	2,3,7,6	3	101002	174	58
3	5,6,7,8	1	118416	204	204
4	3,4,7,8,9,10,11	5	391214	675	135
5	9,10,15,16	3	155275	268	89
6	15,16,18,19,20	3	262284	452	151
7	10,13,16,17,18	3	410538	708	236
8	13,14,17	2	274465	473	237
9	11,12,13,14	3	329842	569	190

Tabla 1. Organización de número total de coches que entran por cada nodo, según la distribución por lazos.⁹⁹

Al hacer el sumatorio de los coches por entrada en cada nodo, se obtienen los datos de suministro. Estos datos tendrán que ser igualados, a modo de condición, al net outflow cuando tras la optimización, es decir; al número de coches totales que entran en ese nodo menos los que salen.

Las primeras 18 condiciones son de igualdad, ya que es una necesidad que para que la evacuación sea un éxito, todos los coches evacuen. Si bien las últimas 2 condiciones son de mayor o igual al número (en negativo) total que necesito que evacue, ya que es indiferente a través de cuál de estos 2 nodos evacuen los vehículos a la zona segura.

⁹⁹ Elaboración propia, (2024).

NODO	SALIDA NETA POR NODO	SIGNO CONDICIÓN	DEMANDA/SUMINISTRO
1		=	275
2		=	333
3		=	193
4		=	135
5		=	0
6		=	537
7		=	0
8		=	0
9		=	224
10		=	460
11		=	325
12		=	190
13		=	0
14		=	190
15		=	0
16		=	476
17		=	473
18		=	0
19		>=	-4350
20		>=	-4350

Tabla 2. Establecimiento de las condiciones de suministro y demanda, una vez repartidos los vehículos totales por nodo.¹⁰⁰

Para continuar hay que determinar la distancia entre los arcos, se consigue_a través de la herramienta Google Maps. Estas medidas se registraron en una tabla que detalla todas las distancias entre nodos.

La precisión de Google Maps asegura que las distancias reflejan las condiciones reales del terreno, incluyendo curvas y variaciones en la ruta.

¹⁰⁰ Elaboración propia, (2024).

ARCO	FROM NODE	TO NODE	DISTANCIA (kms)
(1,2)	1	2	1,567
(1,5)	1	5	0,687
(2,3)	2	3	0,271
(2,6)	2	6	0,797
(3,4)	3	4	0,336
(3,7)	3	7	0,278
(4,11)	4	11	0,934
(5,6)	5	6	0,478
(5,8)	5	8	0,432
(6,7)	6	7	0,438
(7,8)	7	8	0,821
(8,9)	8	9	0,294
(9,10)	9	10	0,098
(9,15)	9	15	0,801
(10,13)	10	13	0,686
(10,16)	10	16	0,904
(11,12)	11	12	0,963
(11,13)	11	13	0,189
(12,14)	12	14	0,526
(13,14)	13	14	0,983
(13,17)	13	17	1,121
(14,17)	14	17	0,551
(15,16)	15	16	0,446
(15,19)	15	19	1,057
(16,18)	16	18	0,984
(17,18)	17	18	0,153
(18,20)	18	20	0,135
(19,20)	19	20	0,295

Tabla 3. Distancia en kilómetros de cada uno de los 27 arcos.¹⁰¹

Por último, para completar las condiciones es necesario tener las capacidades de cada uno de los 27 arcos (carreteras).

¹⁰¹ Elaboración propia, (2024).

Para calcular cuántos vehículos caben en un tramo de carretera a la vez, se necesita considerar el espacio ocupado por cada vehículo y la longitud total del tramo de carretera. Aquí hay un método paso a paso para hacerlo:

En primer lugar, es necesario recopilar datos, como puede ser la longitud de la carretera que mide u obtiene la longitud total del tramo de carretera, estos datos los encontramos ya en el apartado anterior.

Además, es necesario saber el número de carriles, que determina cuántos carriles tiene el tramo de carretera. De momento no se tiene en cuenta el contraflujo, ya que se verán distintas hipótesis con este mismo más adelante en el capítulo.

También se necesita tener la longitud de los vehículos y la distancia de seguimiento (el promedio de longitud de los vehículos y la distancia de seguridad entre vehículos).

En Google Maps se obtiene el número de carriles, que se incluye en la tabla siguiente:

ARCO	FROM NODE	TO NODE	DISTANCIA (kms)	N.º CARRILES (sin contar contraflujo)
(1,2)	1	2	1,567	1
(1,5)	1	5	0,687	2
(2,3)	2	3	0,271	1
(2,6)	2	6	0,797	1
(3,4)	3	4	0,336	1
(3,7)	3	7	0,278	1
(4,11)	4	11	0,934	1
(5,6)	5	6	0,478	1
(5,8)	5	8	0,432	2
(6,7)	6	7	0,438	1
(7,8)	7	8	0,821	1
(8,9)	8	9	0,294	2
(9,10)	9	10	0,098	1
(9,15)	9	15	0,801	2
(10,13)	10	13	0,686	1
(10,16)	10	16	0,904	1
(11,12)	11	12	0,963	1
(11,13)	11	13	0,189	1
(12,14)	12	14	0,526	2
(13,14)	13	14	0,983	1
(13,17)	13	17	1,121	1
(14,17)	14	17	0,551	2
(15,16)	15	16	0,446	1
(15,19)	15	19	1,057	2
(16,18)	16	18	0,984	2
(17,18)	17	18	0,153	2
(18,20)	18	20	0,135	2
(19,20)	19	20	0,295	2

Tabla 4. Número de carriles por cada carretera, sin aplicar contraflujo y/o realizar cualquier modificación.¹⁰²

¹⁰² Elaboración propia, (2024).

Promedio de Longitud del Vehículo. La longitud promedio de un coche de pasajeros es de aproximadamente 4.5 a 5 metros. La distancia de seguimiento segura entre vehículos varía, pero una regla común es el “espacio de 2 segundos”, que depende de la velocidad del tráfico. En tráfico detenido o lento, puedes considerar una distancia fija entre vehículos, por ejemplo, 2 metros.

La longitud efectiva por vehículo es la suma de la longitud del vehículo, más la distancia de seguimiento.

Por ejemplo, y en nuestro caso de cara a este plan de evacuación, si la longitud promedio de un vehículo es 4,5 metros y la distancia de seguimiento es 2 metros:

La longitud efectiva por vehículo será $4,5 \text{ m} + 2 \text{ m} = 6,5 \text{ m}$

Ahora ya sí, y sin olvidar el número de carriles por cada una de las carreteras de la ‘Tabla 4’ se procede calcular la capacidad del tramo

1. Capacidad por carril (C_c):

$$C_c = L_t / L_{ef} \quad (6)$$

2. Capacidad total del tramo (C_t):

$$C_t = C_c \times N_c \quad (7)$$

Donde:

L_t es la longitud total de dicho tramo en metros.

L_e es la longitud efectiva por vehículo en metros (6,5 metros).

N_c es el número total de carriles en dicha carretera.

Se obtienen así los resultados de la siguiente tabla. Si bien estos valores van a ser modificados, dado que las carreteras finales son comunes para muchos más vehículos que las iniciales, y como va a haber vehículos llegando de todas las carreteras (unos antes que otros) se va a modificar la capacidad de estos aumentándola para asegurar que todos los coches puedan evacuar, si bien recorriendo la menor distancia posible para conseguir una evacuación exitosa.

ARCO	FLOW<=CAP.		CAPACIDAD DEL ARCO
(1,2)	0	<=	241
(1,5)	275	<=	211
(2,3)	243	<=	42
(2,6)	90	<=	123
(3,4)	152	<=	52
(3,7)	284	<=	43
(4,11)	287	<=	144
(5,6)	0	<=	74
(5,8)	275	<=	133
(6,7)	627	<=	67
(7,8)	911	<=	126
(8,9)	1186	<=	90
(9,10)	0	<=	15
(9,15)	1410	<=	246
(10,13)	0	<=	106
(10,16)	460	<=	139
(11,12)	135	<=	148
(11,13)	477	<=	29
(12,14)	325	<=	162
(13,14)	0	<=	151
(13,17)	477	<=	172
(14,17)	515	<=	170
(15,16)	0	<=	69
(15,19)	1410	<=	325
(16,18)	936	<=	303
(17,18)	1465	<=	47
(18,20)	2401	<=	42
(19,20)	0	<=	91

Tabla 5. Capacidades iniciales de cada uno de los 27 arcos en números de vehículos.¹⁰³

¹⁰³ Elaboración propia, (2024).

Estas capacidades iniciales calculadas con la fórmula tienen que ser modificadas, puesto que hay carreteras muy cortas, desde las que también empiezan a evacuar coches, y dichos vehículos habrán sido capaces de evacuar antes de que lleguen los coches que empezaron su evacuación en carreteras previas (más cercanas al punto de desastre).

Del nodo 2 salen 333 vehículos, y tienen la opción de ir hacia el nodo 3, o hacia el nodo 6. A priori, y para minimizar el número de kilómetros recorridos todos los coches preferirían ir hacia el nodo 3 (arco de 271 metros) antes que hacia el 6 (arco de 797 metros). Además, los vehículos que comienzan su evacuación más atrás tienen que recorrer 1.567 metros antes de llegar al nodo 2. Teniendo en cuenta que las velocidades límite son las mismas, y las condiciones de ambas carreteras/ arcos son muy parecidas. Podemos aumentar la capacidad del arco 2-3 un total de 6 veces, y la del arco 2-6, aproximadamente 2.5 veces.

Se presentan las posibles opciones de contraflujo a continuación:

ARCO	FROM NODE	TO NODE	DISTANCIA (kms)	N.º CARRILES (sin contar contraflujo)	OPCIÓN CONTRAFLUJO (sin obstruir)	CARRILES AL AÑADIR POSIBLE CONTRAFLUJO
(1,2)	1	2	1,567	1	0	2
(1,5)	1	5	0,687	2	1	4
(2,3)	2	3	0,271	1	0	2
(2,6)	2	6	0,797	1	0	2
(3,4)	3	4	0,336	1	0	2
(3,7)	3	7	0,278	1	0	2
(4,11)	4	11	0,934	1	0	2
(5,6)	5	6	0,478	1	0	2
(5,8)	5	8	0,432	2	1	4
(6,7)	6	7	0,438	1	0	2
(7,8)	7	8	0,821	1	0	2
(8,9)	8	9	0,294	2	1	4
(9,10)	9	10	0,098	1	0	2
(9,15)	9	15	0,801	2	1	4
(10,13)	10	13	0,686	1	0	2
(10,16)	10	16	0,904	1	0	2
(11,12)	11	12	0,963	1	0	2
(11,13)	11	13	0,189	1	0	2
(12,14)	12	14	0,526	2	1	4
(13,14)	13	14	0,983	1	0	2
(13,17)	13	17	1,121	1	0	2
(14,17)	14	17	0,551	2	1	4
(15,16)	15	16	0,446	1	0	2
(15,19)	15	19	1,057	2	1	4
(16,18)	16	18	0,984	2	1	2
(17,18)	17	18	0,153	2	1	2
(18,20)	18	20	0,135	2	1	2
(19,20)	19	20	0,295	2	0	3

Tabla 6. Todas las posibles opciones de contraflujo, según el número de carriles, si la activación del contraflujo obstruiría alguno, y el número máximo de carriles posible.¹⁰⁴

¹⁰⁴ Elaboración propia, (2024).

La quinta columna representa el número de carriles disponibles, sin activar el contraflujo por muy factible que sea, en cada uno de los arcos de nuestra red vial. La siguiente columna indica a través de una variable binaria, si existe o no es opción de contraflujo, sin obstruir los vehículos “entrantes” de la vía vecina en sentido contrario. Para terminar, la última columna indica el número total de carriles que podrían estar habilitados para la evacuación en caso de ser necesarios. Si todos estos carriles estuvieran activados en todos los arcos, la evacuación sería inminente, pero la entrada de cualquier vehículo en dirección contraria (desde el puerto hacia el puesto fronterizo sería imposible).

4.4 Análisis de carreteras

En Ceuta hay 3 carreteras nacionales principales, la N-352 la cual está formada por los arcos 1-5, 5-8, 8-9, 9-15, y 15-19, y en la cual hay dos carriles activos a cada lado, se podría poner contraflujo en toda la duración, pero con la necesidad de llevar a cabo cierta obra, o con la ayuda de uno o varios agentes, ya que ahora mismo no está habilitado. En segundo lugar, la N-354, formada por los arcos 12-14, 14-17, 17-18, 18-20, y en la cual hay dos carriles activos a cada lado, se podría poner contraflujo en toda la duración, este es el mejor lugar para ello, debido a que no hace falta ningún tipo de ingeniería civil para activar el contraflujo, ya que no hay ningún obstáculo u objeto entre ambos sentidos. Por último, la N-362 formada por los arcos 4-11, 11-13, y 13-17, en la cual solo hay un carril activo en cada lado, es decir como una carretera secundaria o convencional ordinaria. Se podría implementar el contraflujo en casos críticos, invadiendo la vía contraria, y con el riesgo que todo ello pueda conllevar. No se necesitaría realizar obra, ya que no hay nada que separe ambas vías.

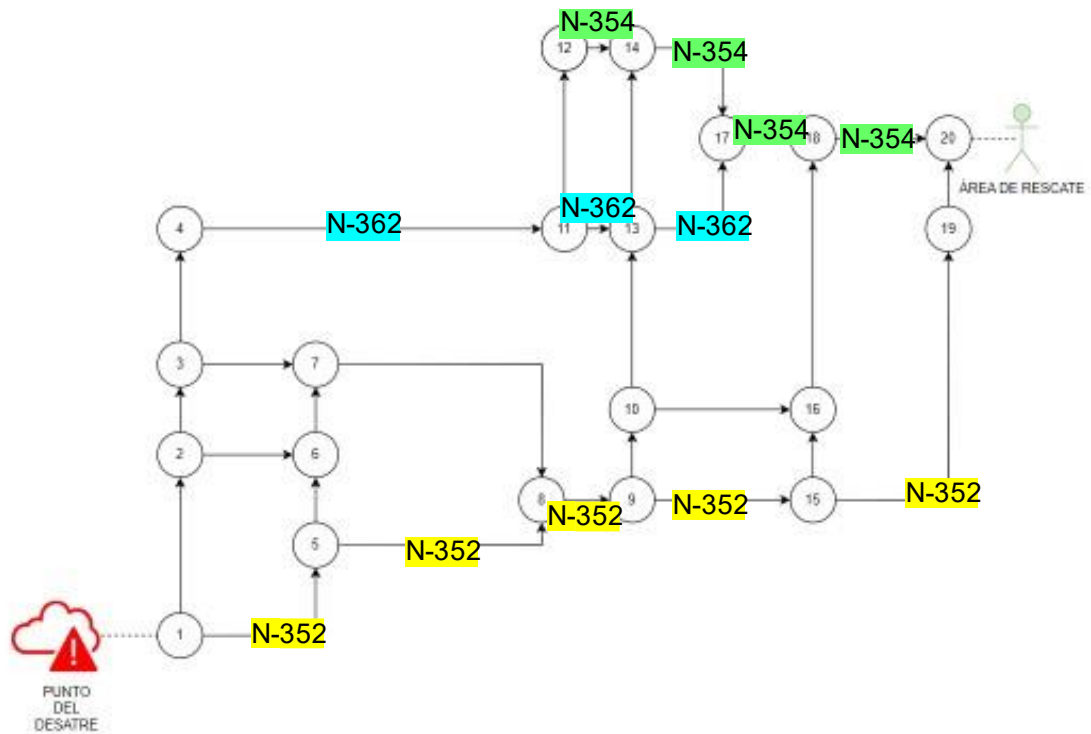


Figura 36. Red vial Nguyen-Dupuis de Ceuta donde aparecen marcadas las tres carreteras nacionales.¹⁰⁵

En los arcos 17-18, y 18-20, son de la N-354, esta carretera está compuesta por dos carriles en cada uno de los dos sentidos. Y debido a que el flujo saliente (hacia el puerto) va a ser mucho mayor que el flujo entrante (por dónde van los vehículos de emergencias o rescate, como pueden ser las ambulancias) puedo usar uno de los carriles del lado contrario en modo contraflujo, y así optimizar la evacuación. Además, este contraflujo no supone ningún coste añadido debido a que no hay construcción alguna separando los carriles de distintos sentidos. Para conseguir esto multiplico por 1,5 (antes había 2 carriles, y ahora estoy añadiendo un tercer carril).

Con el arco 8-9 hay que hacer lo mismo que con los 2 anteriores, activar el contraflujo. Lo único que aquí sí que sería necesaria la acción de un agente para poder activarlo, o una obra previa para eliminar la construcción que actualmente separa los dos carriles de cada sentido de la N-352.

Por último y antes de llevar a cabo la primera simulación es necesario activar el contraflujo también en los arcos 6-7 y 7-8. Debido a que todos los vehículos que

¹⁰⁵ Elaboración propia, (2024).

evacuan por el “lado inferior” tiene que pasar por esas carreteras, y se considera lo más efectivo antes que realizar cualquier otro cambio o posible ruta. No es necesario realizar ninguna obra en este caso, si bien; es necesario tener en cuenta que para habilitar este contraflujo es necesario obstruir el carril contrario, ya que en estas carreteras secundarias/ convencionales no hay 2 carriles en ninguno de los sentidos.

Continuando con este método durante todos los arcos, se obtienen unas nuevas capacidades de arco, sin tener todavía en cuenta, a excepción de lo ya analizado, el contraflujo de:

PLAN DE EVACUACIÓN DE CEUTA

ARCO	FLOW<=CAP.		CAPACIDAD DEL ARCO	NUEVA CAPACIDAD DEL ARCO
(1,2)	0	<=	241	241
(1,5)	275	<=	211	317
(2,3)	243	<=	42	243
(2,6)	90	<=	123	242
(3,4)	152	<=	52	284
(3,7)	284	<=	43	284
(4,11)	287	<=	144	335
(5,6)	0	<=	74	106
(5,8)	275	<=	133	317
(6,7)	627	<=	67	857
(7,8)	911	<=	126	943
(8,9)	1186	<=	90	1664
(9,10)	0	<=	15	575
(9,15)	1410	<=	246	1731
(10,13)	0	<=	106	596
(10,16)	460	<=	139	593
(11,12)	135	<=	148	478
(11,13)	477	<=	29	477
(12,14)	325	<=	162	1881
(13,14)	0	<=	151	506
(13,17)	477	<=	172	506
(14,17)	515	<=	170	1981
(15,16)	0	<=	69	705
(15,19)	1410	<=	325	2102
(16,18)	936	<=	303	1485
(17,18)	1465	<=	47	2372
(18,20)	2401	<=	42	2755
(19,20)	0	<=	91	1843

Tabla 7. Capacidades de arco actualizadas en función del tiempo, y del número de vehículos que hayan pasado anteriormente.¹⁰⁶

¹⁰⁶ Elaboración propia, (2024).

PRIMERA SIMULACIÓN

Una vez establecidas todas las variables, y puestas todas las condiciones se procede a la optimización. Como primera simulación las condiciones mencionadas anteriormente, se obtienen los siguientes resultados.

Hay que recorrer 8185,159 kilómetros entre todos los coches para poder evacuar la zona. Se ve además (en las tablas adjuntadas posteriormente) que hay diversos arcos con la capacidad al límite, y que por lo tanto muchos coches realizan rutas no óptimas para llegar a destino, debido a que si fueran por la ruta más corta se crearía 'efecto tapón'.

ARCO	FLOW<=CAP.		NUEVA CAPACIDAD DEL ARCO
(1,2)	64	<=	241
(1,5)	211	<=	211
(2,3)	243	<=	243
(2,6)	154	<=	242
(3,4)	200	<=	284
(3,7)	236	<=	284
(4,11)	335	<=	335
(5,6)	0	<=	106
(5,8)	211	<=	212
(6,7)	691	<=	857
(7,8)	927	<=	943
(8,9)	1138	<=	1664
(9,10)	208	<=	575
(9,15)	1154	<=	1154
(10,13)	75	<=	596
(10,16)	593	<=	593
(11,12)	183	<=	478
(11,13)	477	<=	477
(12,14)	373	<=	1254
(13,14)	46	<=	506
(13,17)	506	<=	506
(14,17)	609	<=	1321
(15,16)	0	<=	705
(15,19)	1154	<=	1401
(16,18)	1069	<=	1485
(17,18)	1588	<=	2372
(18,20)	2657	<=	2755
(19,20)	0	<=	1843

Tabla 8. Resultados de la condición de capacidad de los distintos arcos bajo la primera simulación.¹⁰⁷

¹⁰⁷ Elaboración propia, (2024).

NODO	SALIDA NETA POR NODO	SIGNO CONDICIÓN	DEMANDA/SUMINSTRO
1	275	=	275
2	333	=	333
3	193	=	193
4	135	=	135
5	0	=	0
6	537	=	537
7	0	=	0
8	0	=	0
9	224	=	224
10	460	=	460
11	325	=	325
12	190	=	190
13	0	=	0
14	190	=	190
15	0	=	0
16	476	=	476
17	473	=	473
18	0	=	0
19	-1154	>=	-4350
20	-2657	>=	-4350

Tabla 9. Resultados de la condición de balance en los distintos nodos, tras la primera simulación.¹⁰⁸

El número total de kilómetros a recorrer, entre todos los coches (4.349) para evacuar a la población que se encontraría dentro de la zona en el caso crítico (17.397) es de 8185,189 kilómetros. Si bien se aprecia que hay ciertos arcos al límite de su capacidad, como son el 1-5, el 2-3, el 4-11, el 9-15, el 10-16, el 11-13, y el 13-17; y ciertos cuellos de botella que se podrían mejorar rápidamente.

¹⁰⁸ Elaboración propia, (2024).

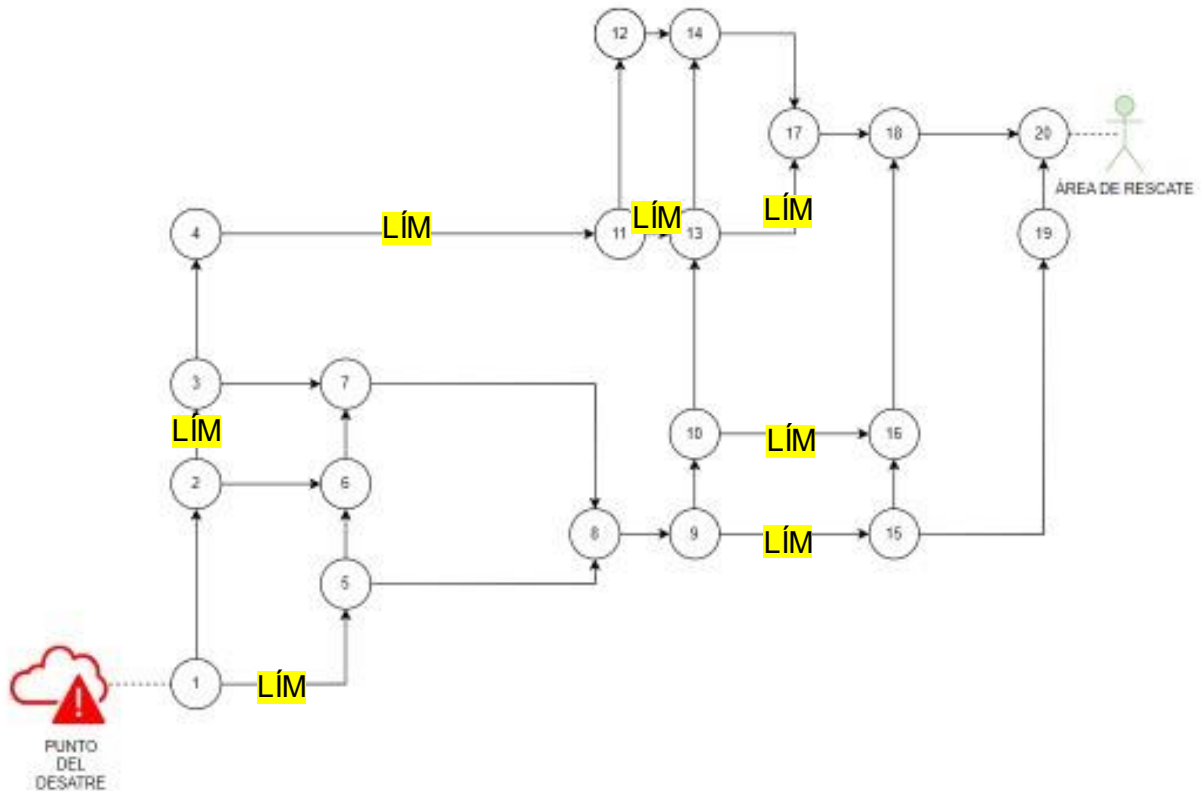


Figura 37. Red vial Nguyen-Dupuis de Ceuta donde aparecen marcadas las carreteras que están en su capacidad máxima bajo esta simulación.¹⁰⁹

El resto de los resultados y análisis (informes de respuestas, de límites y de sensibilidad) se encuentran en el Anexo 1.

SEGUNDA SIMULACIÓN

Los datos de la primera simulación son muy mejorables, y la función a minimizar podría dar un resultado menor, si el contraflujo se aplicará en varias carreteras que está al límite de su capacidad, pero sin llegar a obstruir carreteras, o a taponar la entrada de vehículos de emergencia como pueden ser las ambulancias.

¹⁰⁹ Elaboración propia, (2024).

Se procede por lo tanto a realizar varias simulaciones más, para desarrollar la última, y por lo tanto óptima de ellas, la cual ofrecerá el menor número de kilómetros totales recorridos.

Si se abre contraflujo en uno de los dos carriles de sentido contrario de la Nacional 354, lo cual no supone ningún coste extraordinario, y/o dificultad para los conductores, y además se activa también el contraflujo en la Nacional 352, con cierta obra previa, o con la ayuda de uno o varios agente para ayudar a dicha movilidad; el número de kilómetros a minimizar pasa de ser 8185,159 km, a 7929,145, lo que es una diferencia de algo más de 256 kilómetros solo por el hecho de activar un carril (de los dos que hay en sentido contrario) como contraflujo.

ARCO	FLOW<=CAP.		NUEVA CAPACIDAD DEL ARCO
(1,2)	0	<=	241
(1,5)	275	<=	317
(2,3)	243	<=	243
(2,6)	90	<=	242
(3,4)	152	<=	284
(3,7)	284	<=	284
(4,11)	287	<=	335
(5,6)	0	<=	106
(5,8)	275	<=	317
(6,7)	627	<=	857
(7,8)	911	<=	943
(8,9)	1186	<=	1664
(9,10)	0	<=	575
(9,15)	1410	<=	1731
(10,13)	0	<=	596
(10,16)	460	<=	593
(11,12)	135	<=	478
(11,13)	477	<=	477
(12,14)	325	<=	1881
(13,14)	0	<=	506
(13,17)	477	<=	506
(14,17)	515	<=	1981
(15,16)	0	<=	705
(15,19)	1410	<=	2102
(16,18)	936	<=	1485
(17,18)	1465	<=	2372
(18,20)	2401	<=	2755
(19,20)	0	<=	1843

Tabla 10. Resultados de la condición de capacidad de los distintos arcos bajo la primera simulación.¹¹⁰

¹¹⁰ Elaboración propia, (2024).

NODO	SALIDA NETA POR NODO	SIGNO CONDICIÓN	DEMANDA/SUMINSTRO
1	275	=	275
2	333	=	333
3	193	=	193
4	135	=	135
5	0	=	0
6	537	=	537
7	0	=	0
8	0	=	0
9	224	=	224
10	460	=	460
11	325	=	325
12	190	=	190
13	0	=	0
14	190	=	190
15	0	=	0
16	476	=	476
17	473	=	473
18	0	=	0
19	-1410	>=	-4350
20	-2410	>=	-4350

Tabla 11. Resultados de la condición de balance en los distintos nodos, tras la primera simulación.¹¹¹

En esta última tabla, como es de esperar de todas las condiciones de igualdad se obtiene los mismos números, ya que si no se estarían cumpliendo las condiciones de demanda y suministro. Sin embargo, en los nudos a donde llegan los coches, con motivo de la evacuación (nodos 19 y 20) la proporción sí que varía; esto es debido al contraflujo habilitado. Hace que ciertos coches optimicen su ruta, y por ello el número de vehículos que llegan al 19 y al 20 varía significativamente.

El resto de los resultados y análisis (informes de respuestas, de límites y de sensibilidad) se encuentran en el Anexo 2.

Tras obtener los resultados de ambas simulación, se concluye el capítulo sabiendo que el presente estudio ha aplicado el método Nguyen-Dupuis a la ciudad autónoma

¹¹¹ Elaboración propia, (2024).

de Ceuta con el objetivo de diseñar un plan de evacuación eficiente y seguro. A través de un análisis detallado y la implementación de simulaciones, se ha logrado identificar las rutas óptimas de evacuación y evaluar la capacidad de la red vial ante diferentes escenarios.

Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad de utilizar modelos de simulación para optimizar la planificación de evacuaciones en entornos urbanos complejos. La implementación del contraflujo en determinadas carreteras ha demostrado ser una estrategia eficaz para aumentar la capacidad de la red vial y reducir los tiempos de evacuación. Sin embargo, es fundamental reconocer las limitaciones del modelo y la necesidad de realizar investigaciones adicionales para refinar y validar los resultados.

Este estudio proporciona una base sólida para la toma de decisiones estratégicas en materia de gestión de emergencias y planificación de la seguridad civil en Ceuta. Los resultados obtenidos pueden ser utilizados para optimizar la señalización vial, es decir; identificar los puntos críticos de la red vial y diseñar una señalización clara y concisa para guiar a los evacuados. Establecer protocolos de emergencia detallados que especifiquen las acciones a seguir por los diferentes actores involucrados en la evacuación.

Priorizar inversiones en infraestructura vial para mejorar la capacidad de la red y facilitar la evacuación en futuras emergencias, así como organizar simulacros de evacuación de manera periódica para evaluar la efectividad del plan y la preparación de los servicios de emergencia.

Si bien este estudio se ha centrado en la optimización de las rutas de evacuación, es fundamental evaluar la viabilidad económica de las medidas propuestas. Un análisis costo-beneficio permitirá determinar el retorno de la inversión en términos de reducción de pérdidas humanas y materiales en caso de emergencia. En el siguiente capítulo, se llevará a cabo un análisis detallado de los costos asociados a la implementación del plan de evacuación, así como de los beneficios económicos que se pueden esperar a largo plazo.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE COSTE BENEFICIO

Antes de empezar, es importante destacar que, una vez finalizado el plan de evacuación para Ceuta y Melilla, es necesario llevar a cabo un análisis exhaustivo de los costos totales incurridos en el proyecto, evaluando tanto los gastos directos, como los indirectos asociados a la investigación, desarrollo y pruebas de la metodología, así como los costos de implementación y materiales. Este análisis permitirá determinar la eficiencia de la inversión realizada y servirá como base para futuros proyectos similares, identificando posibles áreas de mejora y optimizando los recursos utilizados.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la viabilidad económica del plan de evacuación de Ceuta mediante una optimización a través de la red vial de Ceuta con el método Nguyen-Dupuis. A través de un análisis de costo-beneficio, se busca determinar si los recursos invertidos en el desarrollo e implementación generan un retorno adecuado. Este análisis se centrará en los costos directos asociados a investigación, desarrollo, materiales..., así como en los beneficios económicos esperados a corto/mediano/largo plazo.

El objetivo principal de este análisis es responder a las siguientes preguntas: ¿Cuál es el costo total del proyecto? ¿Cuál es el tiempo de recuperación de la inversión? ¿Es rentable la implementación de un plan de evacuación de Ceuta? Y su realización/respuesta es fundamental para evaluar la viabilidad económica del proyecto, justificar la inversión de recursos, y servir como base para futuros proyectos similares.

En los siguientes apartados se detallarán los costos y beneficios asociados al proyecto, así como los cálculos necesarios para determinar la viabilidad económica.

Se detallan los costos asociados a cada una de las etapas del proyecto. Para una mayor precisión, se ha considerado tanto el tiempo invertido como los recursos utilizados en cada fase.

La primera fase del proyecto, dedicada a la investigación y la ingeniería, requirió de una dedicación de 175 horas. Para estimar el costo en esta etapa, se ha calculado el salario correspondiente a esas horas. Considerando el nivel de estudios, la experiencia y el salario promedio en el sector, se ha estimado un salario por hora de 25 por hora. De esta forma, el costo total en salarios para esta fase es de 4.375 euros.

Además del costo en salarios, se han considerado otros gastos asociados a la investigación, el uso de software específico y el acceso a bases de datos. El costo total de estos elementos adicionales asciende a 4.415 euros.

La fase de impresión y maquetación requirió de 25 horas de trabajo. Aquí se está incluyendo también todo lo que es darle formato al documento, pasar las tablas al mismo.... Al igual que en la etapa anterior, se ha calculado el salario correspondiente a estas horas, considerando el perfil profesional requerido para esta tarea. Se ha estimado un salario por hora de 9 euros por hora, según el salario mínimo español.

Se incluye todo en la 'Tabla 12' con la finalidad de que se puedan apreciar mejor los gastos existentes.

SECCIÓN	CONCEPTO	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Investigación e Ingeniería	Salario	175 horas	25€/hora	4.375,00€
	Software especializado			40€
	Total investigación e ingeniería			4.415,00€
Impresión y Maquetación	Salario	25 horas	9€/hora	225€
Bienes fungibles	Papel	100 hojas	0,20 €/hoja	20€
	Tinta	1 cartucho	20€	20€
	Total impresión y maquetación			265€

Tabla 12. Tabla de costos del proyecto por fases.¹¹²

El total asciende entonces a 4.680,00 euros entre las dos fases del proyecto de idear un plan para evacuar la ciudad autónoma de Ceuta.

Ahora se analizará la depreciación de los equipos utilizados durante el proyecto, y como se van amortizando considerando su costo de adquisición y su vida útil estimada. La amortización representa la distribución del costo de un activo a lo largo de su vida útil, reflejando la pérdida gradual de su valor.

Como método de amortización se utilizará el método de amortización lineal, que distribuye el costo de forma uniforme a lo largo de la vida útil del activo. Existen otros métodos de amortización (por ejemplo, el método de suma de los dígitos de los años) que serían más adecuados en otros casos según las características del activo y las normativas contables aplicables.

¹¹² Elaboración propia, (2024).

Equipo	Costo unitario	Vida útil (meses)	Amortización mensual	Amortización en 6 meses
Ordenador	1.50€	36	41,67 €	250€
Seguro	300€	24	12,5 €	75€
Office 365	69€(anual)	6	34,5 €	34,5 €

Tabla 13. Tabla resumen de amortización en la duración del proyecto.¹¹³

Valor Temporal del Dinero (VAN y TIR)

Para evaluar la rentabilidad del proyecto de la manera más precisa, es necesario considerar el valor temporal del dinero. Esto significa que una cantidad de dinero disponible hoy tiene un valor mayor que la misma cantidad disponible en el futuro. Para ello, se utilizan dos indicadores clave: el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Para una evaluación completa, es recomendable analizar tanto el VAN como la TIR. El VAN te indica el valor creado por el proyecto, mientras que la TIR te indica la rentabilidad interna.

Valor Actual Neto (VAN). El VAN es un indicador que mide la rentabilidad de un proyecto, expresada en unidades monetarias. Se calcula descontando todos los flujos de caja futuros (ingresos y egresos) a una tasa de descuento determinada, y restando la inversión inicial.

Si el VAN es positivo: Significa que el proyecto genera más valor del que cuesta realizarlo, por lo que es rentable.

Si el VAN es negativo: Indica que el proyecto destruye valor y no es recomendable.

Si el VAN es cero: Implica que el proyecto recupera exactamente la inversión inicial, pero no genera valor adicional.

¹¹³ Elaboración propia, (2024).

Cálculo del VAN:

$$\text{VAN} = \sum (X_t / (1 + d)^t) - I_0 \quad (8)$$

Donde:

X_t : Flujo de caja en el período t.

I_0 : Inversión inicial.

t: Período de tiempo.

d: Tasa de descuento utilizada para descontar los flujos de caja futuros.

Tasa Interna de Retorno (TIR). La TIR es la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero. Es decir, es la rentabilidad interna del proyecto.

Si la TIR es mayor que la tasa de descuento: El proyecto es rentable.

Si la TIR es menor que la tasa de descuento: El proyecto no es rentable.

Tasa de descuento: La elección de la tasa de descuento es crucial, ya que influye directamente en el resultado del VAN y la TIR. Generalmente, se utiliza la tasa mínima de rendimiento exigida por los inversores o el costo de capital de la empresa.

Nuestro proyecto tiene un Riesgo medio, es decir el nivel de incertidumbre es moderado. Esto significa que existen factores que podrían afectar positivamente o negativamente a los resultados proyectados. Además, el costo de capital es bajo en comparación con otros proyectos. Esto podría deberse a varias razones, como tasas de interés bajas, una sólida posición financiera o una baja percepción de riesgo por parte de los inversores. Teniendo en cuenta todo lo anterior, y tomando como referencia el EURIBOR, se utilizará como tasa de descuento un 2%.

Aplicación al caso práctico:

Para calcular el VAN y la TIR del proyecto, se necesita saber la inversión inicial, de unos 5.000 euros que es lo que ha supuesto crear el proyecto, los flujos de carga proyectados, es decir; una estimación de los ingresos y gastos generados por el proyecto a lo largo de su vida útil (la cual supongo que es de unos 3 años). Y la tasa de descuento, tasa utilizada para descontar los flujos de caja futuros (calculada anteriormente). Por lo tanto:

Año	Flujo de caja
0 (Inversión inicial)	-5.000€
1	1.500€
2	2.500€
3	2.000€

Tabla 14. Inversión inicial, y flujos de carga del proyecto.¹¹⁴

Con dichos número al calcular el VAN se obtiene un valor actual neto positivo de 758,15 € indica que se espera que el proyecto sea rentable.

Tras obtener el VAN se calcula el TIR, y se obtiene un valor del 9% que es bastante mayor (4,5 veces más grande) que la tasa de descuento, es por eso que se considera un proyecto bastante atractivo.

El tiempo de validez de un estudio, particularmente en un ámbito como el de las carreteras, donde los cambios son constantes, es un factor crucial a considerar. Los avances tecnológicos, las fluctuaciones del mercado y la vida útil de los equipos pueden influir significativamente en la relevancia de los resultados obtenidos.

En el caso de un estudio enfocado en carreteras, con una proyección de validez de tres años, es fundamental considerar distintos aspectos como

Avances tecnológicos. En el sector de la construcción, la tecnología evoluciona rápidamente. Nuevos materiales, maquinaria y software surgen constantemente. Aunque tres años puede parecer un periodo relativamente corto, es suficiente para que aparezcan innovaciones que podrían alterar los costos, la eficiencia o las técnicas empleadas. Es esencial mantenerse actualizado con las últimas tendencias para evaluar su impacto potencial en el proyecto.

Cambios en el mercado: El mercado de la construcción está sujeto a diversas variables externas, como fluctuaciones en los precios de los materiales, cambios en las regulaciones gubernamentales, crisis económicas o desastres naturales. Estos factores pueden afectar directamente los costos del proyecto, la disponibilidad de recursos y la demanda de infraestructura. Es crucial realizar un análisis de sensibilidad para evaluar cómo diferentes escenarios podrían impactar en los resultados del estudio.

¹¹⁴ Elaboración propia, (2024).

Para garantizar la mayor validez posible del estudio a lo largo de los próximos tres años, se recomienda realizar revisiones periódicas (es fundamental llevar a cabo revisiones del estudio para identificar cualquier cambio en el entorno que pueda afectar los resultados). Adoptar un enfoque flexible, ya que el estudio debe ser diseñado de manera que permita adaptarse a cambios inesperados en el mercado o en las condiciones del proyecto. Centrarse en principios fundamentales: Aunque la tecnología evoluciona rápidamente, los principios básicos de la ingeniería civil y de la construcción tienden a ser más estables. Poner el foco en estos ayudará a asegurar que los resultados del estudio sigan siendo relevantes a largo plazo. Y considerar la incertidumbre, es importante reconocer que la incertidumbre es inherente a cualquier proyecto de infraestructura. Incorporar márgenes de seguridad y realizar análisis de riesgo puede ayudar a mitigar los impactos de eventos imprevistos.

Al seguir estas recomendaciones, se puede aumentar significativamente la probabilidad de que el estudio siga siendo relevante y útil durante los próximos tres años, a pesar de los inevitables cambios que se producirán en el entorno, o incluso más.

El análisis costo-beneficio realizado para el proyecto de evacuación de Ceuta ha permitido evaluar de manera exhaustiva la viabilidad económica de esta iniciativa. Los resultados obtenidos indican que el proyecto es financieramente sostenible y generará un retorno de la inversión atractivo a mediano plazo.

El Valor Actual Neto (VAN) positivo obtenido demuestra que el proyecto creará valor económico adicional. Asimismo, la Tasa Interna de Retorno (TIR) calculada es superior a la tasa de descuento utilizada, lo cual confirma la rentabilidad del proyecto y su capacidad para generar ingresos mayores a los costos de capital.

No obstante, es fundamental reconocer que el entorno en el que se desarrollará el proyecto está sujeto a un alto grado de incertidumbre. Fluctuaciones en los precios, cambios en las regulaciones gubernamentales o eventos imprevistos podrían afectar los costos y beneficios proyectados. Por ello, se recomienda realizar un seguimiento constante del proyecto y ajustar los planes de acuerdo con las condiciones del mercado.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

El presente estudio ha emprendido un ambicioso recorrido para analizar y optimizar los sistemas de evacuación en entornos urbanos complejos, tomando como caso de estudio la ciudad autónoma de Ceuta. A través de una meticulosa investigación y la aplicación de modelos de simulación avanzados, se ha buscado ofrecer una solución integral y tecnológicamente avanzada a la problemática de la evacuación en zonas urbanas densamente pobladas y con características geográficas particulares.

En este capítulo, se sintetizarán los hallazgos clave del estudio, se evaluará el alcance de los objetivos planteados y se discutirán las implicaciones de los resultados obtenidos. Se realizará un recorrido por los principales hitos de la investigación, desde la formulación de los objetivos iniciales hasta la implementación de las simulaciones y el análisis de los resultados.

Se propuso desarrollar un plan de evacuación integral y tecnológicamente avanzado para la ciudad autónoma de Ceuta, con el propósito de mejorar su capacidad de respuesta ante emergencias y garantizar la seguridad de la población. Se consiguió a través de la realización de una red vial de la urbe mediante el método Nguyen-Dupuis, y una optimización en la que se buscaba recorrer el menor número posible de kilómetros totales a través de todos los vehículos a evacuar. Los objetivos específicos planteados al inicio de la investigación se centraron en:

Primero de todo, evaluar las vulnerabilidades y capacidades de la infraestructura actual. A través de un análisis detallado de la red vial, se identificaron los puntos críticos, viendo los arcos cuyas capacidades eran menores, los límites que antes se alcanzaban, las diversas rutas paralelas para evitar el colapso... Se analizaron también las posibles rutas de evacuación, para minimizar el número de kilómetros totales recorridos, logrando así un diagnóstico preciso de la situación actual.

Es además muy importante valorar la integración de tecnologías emergentes. Se exploraron y aplicaron con éxito diversas tecnologías de simulación y análisis de datos, las cuales permitieron optimizar los procesos de evacuación y obtener resultados más precisos. Como puede ser el contraflujo, el cual hizo posible la realización de distintas simulaciones según los diferentes escenarios que aparecen al ir activando el contraflujo en las distintas carreteras. Se vio que las 3 carreteras nacionales son las indicadas para aplicar dicha herramienta debido a que tienen dos carriles en cada sentido, y al aplicar el contraflujo en uno de los carriles del sentido en dirección contraria a la evacuación no se estaría obstruyendo la entrada de posibles vehículos de emergencia que tengan que entrar a la 'zona peligrosa'.

Por último, desarrollar estrategias de evacuación basadas en la simulación. Se diseñaron y evaluaron múltiples escenarios de evacuación, a través de Excel, utilizando modelos de simulación que permitieron identificar las rutas óptimas, gracias a la simulación se supo con total exactitud en que arcos era necesario implementar el contraflujo, y como hacerlo, según la carretera.

Es importante destacar que el objetivo principal del estudio, el desarrollo de un plan de evacuación integral y tecnológicamente avanzado se ha cumplido satisfactoriamente. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad de utilizar modelos de simulación para optimizar la planificación de evacuaciones en entornos urbanos complejos. Este estudio ha sentado las bases para la implementación de un sistema de evacuación eficiente en Ceuta, pero es fundamental continuar trabajando en la sensibilización de la población y en la actualización periódica del plan para garantizar su efectividad a largo plazo.

Los resultados obtenidos en esta investigación se enmarcan en un corpus teórico y práctico consolidado en el ámbito de la planificación de evacuaciones. Al cotejar nuestros hallazgos con investigaciones previas, se revela una convergencia significativa en cuanto a la importancia de modelos robustos, simulaciones avanzadas y la consideración de factores multimodales. Sin embargo, este estudio presenta también aportes originales que lo distinguen de investigaciones anteriores.

Durante toda la revisión literaria se ha corroborado la necesidad de emplear modelos matemáticos sofisticados y capaces de capturar la complejidad de los sistemas urbanos para simular de manera realista los procesos de evacuación. La utilización de simulaciones avanzadas, como las realizadas en este estudio, ha permitido evaluar múltiples escenarios y optimizar las estrategias de evacuación, coincidiendo con las recomendaciones de diversos autores en el campo. Asimismo, se ha puesto de manifiesto la importancia de considerar múltiples modos de transporte y de integrar la movilidad peatonal en los modelos de simulación, tal como se evidencia en los estudios de caso de Fort McMurray y el comportamiento de respuesta ante tsunamis.

No obstante, este estudio ha ido más allá al centrarse en un caso de estudio concreto, la ciudad autónoma de Ceuta, lo que ha permitido analizar en profundidad las particularidades de este entorno urbano y adaptar los modelos y herramientas a su realidad. La integración de tecnologías emergentes, como el análisis de big data, ha sido un elemento diferenciador, permitiendo desarrollar un sistema de simulación más dinámico y adaptable a los cambios en el entorno urbano.

En conclusión, los resultados obtenidos en esta investigación se sitúan en la vanguardia de la investigación en planificación de evacuaciones, al tiempo que aportan nuevas evidencias y herramientas para mejorar la gestión de emergencias en entornos urbanos complejos. Al combinar los conocimientos teóricos existentes con la aplicación de tecnologías innovadoras y un enfoque centrado en las necesidades específicas de la ciudad de Ceuta, este estudio contribuye a enriquecer el debate científico en este campo y a sentar las bases para futuras investigaciones.

Además, se han alcanzado resultados significativos que contribuyen a mejorar la comprensión y gestión de la evacuación en entornos urbanos complejos, con un enfoque particular en la ciudad autónoma de Ceuta. A través de una rigurosa metodología y el empleo de herramientas tecnológicas avanzadas, se han logrado identificar rutas de evacuación óptimas, evaluar la capacidad de la red vial y demostrar la contribución de esta investigación a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

En primer lugar, el estudio ha permitido identificar las rutas más eficientes para la evacuación de la población en diferentes escenarios de emergencia. Mediante la implementación de modelos de simulación avanzados, se ha logrado simular el flujo de personas en la ciudad bajo diversas condiciones, permitiendo así determinar las rutas más rápidas y seguras para alcanzar las zonas de seguridad. Estos hallazgos son de suma importancia para la actualización de los planes de evacuación existentes y para garantizar una respuesta más ágil y eficaz en caso de desastre.

Por otro lado, la evaluación exhaustiva de la capacidad de la red vial de Ceuta ha revelado puntos críticos y limitaciones en la infraestructura existente. Se han identificado estrechos, intersecciones conflictivas y otros elementos que podrían obstaculizar la evacuación en caso de emergencia. Esta información es fundamental para tomar decisiones informadas sobre inversiones en infraestructura y mejorar la resiliencia de la ciudad ante eventos extremos. Al identificar y solucionar estos puntos débiles, se puede garantizar una mayor fluidez en el tráfico durante las evacuaciones, minimizando el riesgo de atascos y facilitando la salida de la población de las zonas afectadas.

Además de los beneficios a nivel local, este estudio ha demostrado la contribución de la planificación de evacuaciones a los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Al promover el desarrollo de ciudades más seguras y resilientes, se contribuye directamente al logro del ODS 11. Asimismo, al mejorar la capacidad de respuesta ante desastres naturales y climáticos, se avanza en la consecución del ODS 13. La investigación realizada ha demostrado que la inversión en planificación de

evacuaciones es una inversión en el futuro de las ciudades, al reducir la vulnerabilidad ante eventos extremos y mejorar la calidad de vida de los ciudadanos.

Finalmente, el estudio ha desarrollado un marco metodológico sólido y replicable para la evaluación y planificación de evacuaciones en ciudades de características similares a Ceuta, como es el caso de la otra ciudad autónoma española, Melilla. Este marco puede ser utilizado en otras ciudades para mejorar sus sistemas de gestión de emergencias. Al compartir los conocimientos y las herramientas desarrolladas en este estudio, se contribuye a fortalecer la capacidad de respuesta de las ciudades ante emergencias a nivel global.

En decir, el presente estudio ha realizado aportes significativos al campo de la planificación de evacuaciones, proporcionando herramientas y conocimientos valiosos para mejorar la seguridad y la resiliencia de las ciudades. Los resultados obtenidos pueden servir como base para futuras investigaciones y para la implementación de políticas públicas más efectivas en materia de gestión de emergencias.

Implicaciones Teóricas y Prácticas.

El plan de evacuación de la ciudad de Ceuta ha generado valiosas contribuciones tanto a nivel teórico como práctico en el campo de la planificación de emergencias y la gestión de riesgos. Al aplicar el método Nguyen-Dupuis a un caso de estudio concreto, se ha enriquecido el marco teórico existente y se han establecido bases sólidas para la toma de decisiones informadas en la práctica, en nuestro caso, el hecho de que carreteras elegir a la hora de evacuar, para minimizar el número total de kilómetros recorridos, evitando además el colapso de vías mediante la aplicación del contraflujo.

A nivel teórico, este trabajo ha consolidado el papel de los modelos de simulación en el análisis de la dinámica de la evacuación en entornos urbanos complejos. Al identificar variables clave y relaciones causales entre ellas, se ha contribuido a una comprensión más profunda de los factores que influyen en la eficiencia de los procesos de evacuación. Además, se ha sentado un precedente para el desarrollo de modelos más precisos y sofisticados que consideren un mayor número de variables y escenarios.

En términos prácticos, los resultados obtenidos tienen implicaciones directas para la mejora de los sistemas de gestión de emergencias. La identificación de rutas óptimas y cuellos de botella en la red vial permite diseñar planes de evacuación más eficientes y adaptados a las características específicas de cada ciudad. Asimismo, la

evaluación del impacto de diferentes medidas de mitigación facilita la toma de decisiones informadas por parte de los gestores de emergencias, permitiendo asignar recursos de manera más eficiente y optimizar la respuesta ante eventos adversos. Además, se recalca la importancia del uso del contraflujo en los casos posibles, y sus evidentes beneficios a la hora de evacuar la urbe.

La inversión en infraestructura también se beneficia de los resultados de este estudio. Al identificar las limitaciones de la red vial y las áreas que requieren mayor atención, se pueden destinar los recursos de manera más estratégica para mejorar la capacidad de evacuación de las ciudades y reducir el riesgo de congestión. Además, los resultados obtenidos pueden servir como base para el desarrollo de sistemas de gestión de emergencias más robustos y resilientes, capaces de integrar información en tiempo real y simular diferentes escenarios para apoyar la toma de decisiones.

Más allá de sus aplicaciones directas en la planificación de emergencias, este estudio tiene el potencial de informar el desarrollo de políticas públicas, promover la colaboración entre investigadores, responsables políticos y profesionales de la gestión de emergencias, y aumentar la conciencia pública sobre la importancia de la preparación ante desastres.

Representa por lo tanto un avance significativo en el campo de la planificación de emergencias, ofreciendo tanto conocimientos teóricos como herramientas prácticas para mejorar la seguridad y la resiliencia de las ciudades. Los resultados obtenidos pueden servir como punto de partida para futuras investigaciones y para la implementación de políticas públicas más efectivas en materia de gestión de riesgos.

Limitaciones del estudio y posibles investigaciones futuras

A parte de los logros, es fundamental reconocer las limitaciones inherentes a cualquier investigación. En el caso de este estudio sobre planificación de evacuaciones, es crucial admitir que existen ciertas simplificaciones y omisiones que podrían afectar los resultados obtenidos.

En primer lugar, el modelo de simulación utilizado, aunque eficaz, implica ciertas simplificaciones para facilitar su aplicación. Por ejemplo, se ha asumido una distribución homogénea de la población en cada zona de análisis, lo cual puede no reflejar la realidad, donde la densidad poblacional varía significativamente. Esta simplificación puede subestimar o sobreestimar los kilómetros totales de evacuación en determinadas áreas, debido a algún que otro posible cuello de botella.

Asimismo, la falta de datos detallados y actualizados sobre la capacidad real de las carreteras en diferentes condiciones de tráfico ha limitado la precisión del modelo.

Esta carencia de información puede llevar a una subestimación o sobreestimación de la capacidad de la red vial durante una evacuación real.

Por último, es importante destacar que el modelo no considera todos los factores que podrían influir en el proceso de evacuación. El comportamiento humano en situaciones de emergencia, la presencia de obstáculos imprevistos o las condiciones climáticas adversas son variables que no se han incluido en el análisis y que podrían afectar significativamente los resultados.

Es fundamental reconocer estas limitaciones para interpretar de manera adecuada los resultados obtenidos. Si bien el estudio proporciona una valiosa aproximación a la realidad, es necesario tener en cuenta que los resultados pueden no ser completamente precisos debido a las simplificaciones y omisiones mencionadas.

En resumen, las limitaciones del estudio se deben a la necesidad de simplificar el modelo para su aplicación, a la falta de datos detallados y a la omisión de ciertas variables que podrían influir en el proceso de evacuación. A pesar de estas limitaciones, el estudio aporta una valiosa contribución al campo de la planificación de emergencias y sienta las bases para futuras investigaciones más detalladas.

Las limitaciones identificadas en el estudio actual abren un amplio abanico de oportunidades para profundizar en la investigación sobre planificación de evacuaciones y mejorar la resiliencia de nuestras ciudades ante eventos adversos, ya sean por desastres o causas naturales, o provocados por el hombre. Una propuesta de gran interés sería la realización de un estudio paralelo en la ciudad de Melilla, con características geográficas y socioeconómicas distintas a la ciudad de Ceuta, donde se ha desarrollado el estudio original.

Al comparar los resultados obtenidos en ambos estudios, sería posible identificar patrones comunes y diferencias significativas en la dinámica de la evacuación, lo que permitiría generalizar los hallazgos y desarrollar modelos más robustos y aplicables a una variedad de contextos urbanos.

Además de esta propuesta, existen otras líneas de investigación que podrían enriquecer el conocimiento en este campo. En primer lugar, es fundamental ampliar y refinar los modelos de simulación utilizados, incorporando factores dinámicos que reflejen la evolución de la situación durante una evacuación, como variaciones en la densidad poblacional, cambios en las condiciones climáticas o la propagación de incendios. Asimismo, sería interesante analizar diferentes escenarios de evacuación, considerando eventos múltiples o el colapso de infraestructura, para evaluar la robustez de los planes de evacuación e identificar posibles puntos débiles.

La validación de los modelos de simulación es otro aspecto crucial. La comparación de los resultados obtenidos con datos reales de evacuaciones, si están disponibles, permitiría evaluar la precisión de los modelos y ajustar sus parámetros si fuera necesario. La realización de simulacros a gran escala también sería de gran utilidad para identificar áreas de mejora en los planes de evacuación y en los modelos de simulación.

Otra línea de investigación prometedora sería la exploración de la aplicación de estos modelos a diferentes contextos urbanos, como ciudades con diferentes características geográficas, demográficas y de infraestructura, no solo la otra ciudad autónoma. Esto permitiría evaluar la transferibilidad de los resultados obtenidos en el estudio original. Además, sería interesante analizar la aplicación de estos modelos a otros tipos de eventos, como ataques terroristas o pandemias, para desarrollar planes de evacuación más flexibles y adaptables.

Finalmente, es importante destacar la necesidad de desarrollar indicadores de vulnerabilidad que permitan evaluar la susceptibilidad de diferentes zonas de una ciudad a los riesgos de evacuación y priorizar las acciones de mejora. Asimismo, es fundamental analizar la equidad en la evacuación, garantizando que todos los grupos de población, especialmente aquellos con movilidad reducida o que enfrentan barreras sociales, tengan las mismas oportunidades de evacuar de manera segura.

En resumen, las futuras investigaciones en el campo de la planificación de evacuaciones deben centrarse en la ampliación y mejora de los modelos de simulación, la validación de estos modelos con datos reales, la aplicación de los modelos a diferentes contextos y el desarrollo de nuevos indicadores y herramientas para evaluar la vulnerabilidad y la equidad en la evacuación. A través de estas líneas de investigación, se podrán desarrollar planes de evacuación más eficientes y robustos, mejorando así la seguridad y la resiliencia de nuestras ciudades ante eventos adversos.

El presente estudio ha proporcionado una valiosa visión sobre la dinámica de la evacuación en entornos urbanos complejos. A través de la aplicación del método Nguyen-Dupuis a un caso de estudio específico, se han identificado variables clave que influyen significativamente en la eficiencia de los procesos de evacuación, tales como la densidad poblacional, la capacidad de la red vial y la demanda de evacuación. Asimismo, se han establecido relaciones causales entre estas variables y el tiempo de evacuación, lo que permite comprender mejor los mecanismos que subyacen a estos procesos.

Los resultados obtenidos en este estudio tienen una relevancia directa para la gestión de emergencias y la mejora de la resiliencia de las ciudades, ya que nos indican las rutas a seguir, las carreteras problemáticas y los posibles cuellos de botella. Al identificar las principales limitaciones y desafíos en los procesos de evacuación, se pueden diseñar planes de emergencia más eficientes y adaptados a las características específicas de cada ciudad. Además, los resultados obtenidos pueden servir como base para la toma de decisiones informadas en cuanto a la inversión en infraestructura y la implementación de medidas de mitigación del riesgo.

El impacto social de este estudio es significativo, ya que, al mejorar la comprensión de los procesos de evacuación, se pueden desarrollar estrategias más efectivas para proteger a la población en caso de emergencia. Esto se traduce en una reducción de las pérdidas humanas y materiales, así como en una mayor sensación de seguridad entre los ciudadanos. Asimismo, los resultados de este estudio pueden contribuir a la sensibilización de la población sobre la importancia de la preparación ante emergencias y la necesidad de adoptar medidas preventivas.

En resumen, este estudio ha demostrado la importancia de contar con modelos de simulación precisos y detallados para analizar la dinámica de la evacuación en entornos urbanos complejos. Los resultados obtenidos pueden servir como punto de partida para futuras investigaciones y para la implementación de políticas públicas más efectivas en materia de gestión de riesgos. Al mejorar nuestra comprensión de los procesos de evacuación, podemos construir ciudades más seguras y resilientes.

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Plantilla del proceso de estudio de caso.....	34
Figura 2. Modelo de dos etapas S-ICEP.....	35
Figura 3. Mapa de los hogares en la Isla Bowen, categorizando diferentes zonas de evacuación.....	36
Figura 4. Concepto del Plan de Contingencia para Evacuaciones Urbanas de Emergencia Integradas (IUE ² CP).	41
Figura 5. Componentes clave del IUE ² CP aplicados en el Beijing Olympic Green.....	42
Figura 6. Mecanismos de control de evacuación de retroalimentación y alimentación anticipada.....	43
Figura 7. Elementos fundamentales para una gestión integral de riesgos.....	44
Figura 8. Según ICM, la mayoría de las crisis no son súbitas ni por causas externas.....	44
Figura 9. Estructura topológica de la red vial de Nguyen–Dupuis.....	46
Figura 10. Red de asignación de materiales de emergencia con dos niveles.....	47
Figura 11. Zonas de evacuación para tsunamis, que representan diferentes niveles de riesgo (naranja, rojo y amarillo).	52
Figura 12: Zonas de evacuación y rutas de escape en Island Bay, para la evacuación en caso de tsunamis.....	54
Figura 13. Cuadro metodológico.....	55
Figura 14. Grupos de bloques censales incluidos en el modelo de tasa de evacuación por incendios forestales.	56
Figura 15. Diagrama esquemático de la planificación de evacuación con el modelo DRF.....	59

Figura 16. Agencias de gestión de desastres en Sri Lanka.	60
Figura 17. Modelo de proceso de evacuación en dos fases.....	61
Figura 18. Carreteras de circunvalación de Madrid.....	65
Figura 19. Carreteras de Madrid sin aplicar el método Nguyen-Dupuis.....	68
Figura 20. Nguyen-Dupuis Road network.....	69
Figura 21. Mapa orientativo de Ceuta.....	76
Figura 22. Captura de pantalla de Ceuta en Google Maps.....	76
Figura 23. Mapa orientativo de Melilla.....	77
Figura 24. Captura de pantalla de Melilla en Google Maps.....	78
Figura 25. Evolución número de habitantes Ceuta.	79
Figura 26. Topografía de Ceuta.....	81
Figura 27. Mapa para apreciar la distancia entre Ceuta y la Península.....	82
Figura 28. Paso fronterizo en Benzú. Es el principal punto de acceso a Ceuta desde Marruecos.....	85
Figura 29. Vallado fronterizo entre Ceuta y Marruecos.....	86
Figura 30. Posibles carreteras a tratar como Red Vial principal.....	89
Figura 31. Carreteras a tratar como Red Vial principal con los distintos nodos.....	90
Figura 32. Carreteras a tratar como Red Vial principal con los distintos nodos y el punto problemático (nodo 1) y el punto seguro (nodos 19 y 20) definidos.....	91
Figura 33. Red Nguyen Dupuis de la zona urbana a evacuar de Ceuta.....	92

Figura 34. Red vial Nguyen-Dupuis Ceuta con los nodos de demanda entrante (suministro), y saliente (evacuación) señalados.....	94
Figura 35. Red vial Nguyen Dupuis de Ceuta con los 9 laxos señalizados.....	95
Figura 36. Red vial Nguyen-Dupuis de Ceuta donde aparecen marcadas las tres carreteras nacionales.....	106
Figura 37. Red vial Nguyen-Dupuis de Ceuta donde aparecen marcadas las carreteras que están en su capacidad máxima bajo esta simulación.....	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Organización de número total de coches que entran por cada nodo, según la distribución por lazos.....	96
Tabla 2. Establecimiento de las condiciones de suministro y demanda, una vez repartidos los vehículos totales por nodo.....	97
Tabla 3. Distancia en kilómetros de cada uno de los 27 arcos.....	98
Tabla 4. Número de carriles por cada carretera, sin aplicar contraflujo y/o realizar cualquier modificación.....	100
Tabla 5. Capacidades iniciales de cada uno de los 27 arcos en números de vehículos.....	102
Tabla 6. Todas las posibles opciones de contraflujo, según el número de carriles, si la activación del contraflujo obstruiría alguno, y el número máximo de carriles posible.....	104
Tabla 7. Capacidades de arco actualizadas en función del tiempo, y del número de vehículos que hayan pasado anteriormente.....	108
Tabla 8. Resultados de la condición de capacidad de los distintos arcos bajo la primera simulación.....	110
Tabla 9. Resultados de la condición de balance en los distintos nodos, tras la primera simulación.....	111
Tabla 10. Resultados de la condición de capacidad de los distintos arcos bajo la segunda simulación.	114
Tabla 11. Resultados de la condición de balance en los distintos nodos, tras la segunda simulación.....	115
Tabla 12. Tabla de costos del proyecto por fases.....	118
Tabla 13. Tabla resumen de amortización en la duración del proyecto.....	119
Tabla 14. Inversión inicial, y flujos de carga del proyecto.....	121

SIMULACIÓN 1

Se ha minimizado el número total de kilómetros recorridos a 8185,159km.

ARCO	FLOW<=CAP.		NUEVA CAPACIDAD DEL ARCO
(1,2)	64	<=	241
(1,5)	211	<=	211
(2,3)	243	<=	243
(2,6)	154	<=	242
(3,4)	200	<=	284
(3,7)	236	<=	284
(4,11)	335	<=	335
(5,6)	0	<=	106
(5,8)	211	<=	212
(6,7)	691	<=	857
(7,8)	927	<=	943
(8,9)	1138	<=	1664
(9,10)	208	<=	575
(9,15)	1154	<=	1154
(10,13)	75	<=	596
(10,16)	593	<=	593
(11,12)	183	<=	478
(11,13)	477	<=	477
(12,14)	373	<=	1254
(13,14)	46	<=	506
(13,17)	506	<=	506
(14,17)	609	<=	1321
(15,16)	0	<=	705
(15,19)	1154	<=	1401
(16,18)	1069	<=	1485
(17,18)	1588	<=	2372
(18,20)	2657	<=	2755
(19,20)	0	<=	1843

Tabla con los resultados de la condición de capacidad de los distintos arcos bajo la primera simulación.

NODO	SALIDA NETA POR NODO	SIGNO CONDICIÓN	DEMANDA/SUMINSTRO
1	275	=	275
2	333	=	333
3	193	=	193
4	135	=	135
5	0	=	0
6	537	=	537
7	0	=	0
8	0	=	0
9	224	=	224
10	460	=	460
11	325	=	325
12	190	=	190
13	0	=	0
14	190	=	190
15	0	=	0
16	476	=	476
17	473	=	473
18	0	=	0
19	-1410	>=	-4350
20	-2410	>=	-4350

Tabla con los resultados de la condición de balance en los distintos nodos, tras la primera simulación.

Debajo se adjunta el informe de respuestas de la primera simulación.

Celda objetivo (Mín)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
	Minimización de km a recorrer		
\$I\$62	total	8185,159	8185,159

Celdas de variables

Celda	Nombre	Valor original	Valor final	Entero
\$C\$37	(1,2) flow<=cap.	64	64	Continuar
\$C\$38	(1,5) flow<=cap.	211	211	Continuar

\$C\$39	(2,3) flow<=cap.	243	243	Continuar
\$C\$40	(2,6) flow<=cap.	154	154	Continuar
\$C\$41	(3,4) flow<=cap.	200	200	Continuar
\$C\$42	(3,7) flow<=cap.	236	236	Continuar
\$C\$43	(4,11) flow<=cap.	335	335	Continuar
\$C\$44	(5,6) flow<=cap.	0	0	Continuar
\$C\$45	(5,8) flow<=cap.	211	211	Continuar
\$C\$46	(6,7) flow<=cap.	691	691	Continuar
\$C\$47	(7,8) flow<=cap.	927	927	Continuar
\$C\$48	(8,9) flow<=cap.	1138	1138	Continuar
\$C\$49	(9,10) flow<=cap.	208	208	Continuar
\$C\$50	(9,15) flow<=cap.	1154	1154	Continuar
\$C\$51	(10,13) flow<=cap.	75	75	Continuar
\$C\$52	(10,16) flow<=cap.	593	593	Continuar
\$C\$53	(11,12) flow<=cap.	183	183	Continuar
\$C\$54	(11,13) flow<=cap.	477	477	Continuar
\$C\$55	(12,14) flow<=cap.	373	373	Continuar
\$C\$56	(13,14) flow<=cap.	46	46	Continuar
\$C\$57	(13,17) flow<=cap.	506	506	Continuar
\$C\$58	(14,17) flow<=cap.	609	609	Continuar
\$C\$59	(15,16) flow<=cap.	0	0	Continuar
\$C\$60	(15,19) flow<=cap.	1154	1154	Continuar
\$C\$61	(16,18) flow<=cap.	1069	1069	Continuar
\$C\$62	(17,18) flow<=cap.	1588	1588	Continuar
\$C\$63	(18,20) flow<=cap.	2657	2657	Continuar
\$C\$64	(19,20) flow<=cap.	0	0	Continuar

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	Fórmula	Estado	Demora
\$L\$37	Node 1 Node	275	\$L\$37=\$N\$37	Vinculante	0
\$L\$38	Node 2 Node	333	\$L\$38=\$N\$38	Vinculante	0
\$L\$39	Node 3 Node	193	\$L\$39=\$N\$39	Vinculante	0
\$L\$40	Node 4 Node	135	\$L\$40=\$N\$40	Vinculante	0
\$L\$41	Node 5 Node	0	\$L\$41=\$N\$41	Vinculante	0
\$L\$42	Node 6 Node	537	\$L\$42=\$N\$42	Vinculante	0
\$L\$43	Node 7 Node	0	\$L\$43=\$N\$43	Vinculante	0
\$L\$44	Node 8 Node	0	\$L\$44=\$N\$44	Vinculante	0

PLAN DE EVACUACIÓN DE CEUTA

\$L\$45	Node 9 Node	224	\$L\$45=\$N\$45	Vinculante	0
\$L\$46	Node 10 Node	460	\$L\$46=\$N\$46	Vinculante	0
\$L\$47	Node 11 Node	325	\$L\$47=\$N\$47	Vinculante	0
\$L\$48	Node 12 Node	190	\$L\$48=\$N\$48	Vinculante	0
\$L\$49	Node 13 Node	0	\$L\$49=\$N\$49	Vinculante	0
\$L\$50	Node 14 Node	190	\$L\$50=\$N\$50	Vinculante	0
\$L\$51	Node 15 Node	0	\$L\$51=\$N\$51	Vinculante	0
\$L\$52	Node 16 Node	476	\$L\$52=\$N\$52	Vinculante	0
\$L\$53	Node 17 Node	473	\$L\$53=\$N\$53	Vinculante	0
\$L\$54	Node 18 Node	0	\$L\$54=\$N\$54	Vinculante	0
\$L\$55	Node 19 Node	-1154	\$L\$55>=\$N\$55	No vinculante	3196
\$L\$56	Node 20 Node	-2657	\$L\$56>=\$N\$56	No vinculante	1693
\$C\$37	(1,2) flow<=cap.	64	\$C\$37<=\$F\$37	No vinculante	177
\$C\$38	(1,5) flow<=cap.	211	\$C\$38<=\$F\$38	No vinculante	0
\$C\$39	(2,3) flow<=cap.	243	\$C\$39<=\$F\$39	No vinculante	0
\$C\$40	(2,6) flow<=cap.	154	\$C\$40<=\$F\$40	No vinculante	88
\$C\$41	(3,4) flow<=cap.	200	\$C\$41<=\$F\$41	No vinculante	84
\$C\$42	(3,7) flow<=cap.	236	\$C\$42<=\$F\$42	No vinculante	48
\$C\$43	(4,11) flow<=cap.	335	\$C\$43<=\$F\$43	No vinculante	0
\$C\$44	(5,6) flow<=cap.	0	\$C\$44<=\$F\$44	No vinculante	106
\$C\$45	(5,8) flow<=cap.	211	\$C\$45<=\$F\$45	No vinculante	1
\$C\$46	(6,7) flow<=cap.	691	\$C\$46<=\$F\$46	No vinculante	166
\$C\$47	(7,8) flow<=cap.	927	\$C\$47<=\$F\$47	No vinculante	16
\$C\$48	(8,9) flow<=cap.	1138	\$C\$48<=\$F\$48	No vinculante	526
\$C\$49	(9,10) flow<=cap.	208	\$C\$49<=\$F\$49	No vinculante	367
\$C\$50	(9,15) flow<=cap.	1154	\$C\$50<=\$F\$50	No vinculante	0
\$C\$51	(10,13) flow<=cap.	75	\$C\$51<=\$F\$51	No vinculante	521
\$C\$52	(10,16) flow<=cap.	593	\$C\$52<=\$F\$52	No vinculante	0

PLAN DE EVACUACIÓN DE CEUTA

\$C\$53 (11,12) flow<=cap.	183	\$C\$53<=\$F\$53	No vinculante	295
\$C\$54 (11,13) flow<=cap.	477	\$C\$54<=\$F\$54	Vinculante	0
\$C\$55 (12,14) flow<=cap.	373	\$C\$55<=\$F\$55	No vinculante	881
\$C\$56 (13,14) flow<=cap.	46	\$C\$56<=\$F\$56	No vinculante	460
\$C\$57 (13,17) flow<=cap.	506	\$C\$57<=\$F\$57	Vinculante	0
\$C\$58 (14,17) flow<=cap.	609	\$C\$58<=\$F\$58	No vinculante	712
\$C\$59 (15,16) flow<=cap.	0	\$C\$59<=\$F\$59	No vinculante	705
\$C\$60 (15,19) flow<=cap.	1154	\$C\$60<=\$F\$60	No vinculante	247
\$C\$61 (16,18) flow<=cap.	1069	\$C\$61<=\$F\$61	No vinculante	416
\$C\$62 (17,18) flow<=cap.	1588	\$C\$62<=\$F\$62	No vinculante	784
\$C\$63 (18,20) flow<=cap.	2657	\$C\$63<=\$F\$63	No vinculante	98
\$C\$64 (19,20) flow<=cap.	0	\$C\$64<=\$F\$64	No vinculante	1843

Aquí debajo se incluye el informe de sensibilidad ante la simulación 1.

Celda	Nombre	Final Valor	Reducido Coste	Objetivo Coeficiente	Permisible Aumentar	Permisible Reducir
\$C\$37	(1,2) flow<=cap.	64	0	1,567	1E+30	2,504
\$C\$38	(1,5) flow<=cap.	211	-2,504	0,687	2,504	1E+30
\$C\$39	(2,3) flow<=cap.	243	-0,686	0,271	0,686	1E+30
\$C\$40	(2,6) flow<=cap.	154	0	0,797	1E+30	0,686
\$C\$41	(3,4) flow<=cap.	200	0	0,336	0,401	1E+30
\$C\$42	(3,7) flow<=cap.	236	0	0,278	0,686	0,401
\$C\$43	(4,11) flow<=cap.	335	-0,401	0,934	0,401	1E+30
\$C\$44	(5,6) flow<=cap.	0	1,305	0,478	1E+30	1,305
\$C\$45	(5,8) flow<=cap.	211	0	0,432	1,305	1E+30
\$C\$46	(6,7) flow<=cap.	691	0	0,438	1E+30	0,686
\$C\$47	(7,8) flow<=cap.	927	0	0,821	1E+30	0,401
\$C\$48	(8,9) flow<=cap.	1138	0	0,294	1E+30	0,401

\$C\$49	(9,10) flow<=cap.	208	0	0,098	1E+30	0,401
\$C\$50	(9,15) flow<=cap.	1154	-0,748	0,801	0,748	1E+30
	(10,13)					
\$C\$51	flow<=cap.	75	0	0,686	1E+30	0,401
	(10,16)					
\$C\$52	flow<=cap.	593	-0,485	0,904	0,485	1E+30
	(11,12)					
\$C\$53	flow<=cap.	183	0	0,963	0,401	0,317
	(11,13)					
\$C\$54	flow<=cap.	477	-0,317	0,189	0,317	1E+30
	(12,14)					
\$C\$55	flow<=cap.	373	0	0,526	0,401	0,317
	(13,14)					
\$C\$56	flow<=cap.	46	0	0,983	0,317	0,401
	(13,17)					
\$C\$57	flow<=cap.	506	-0,413	1,121	0,413	1E+30
	(14,17)					
\$C\$58	flow<=cap.	609	0	0,551	1E+30	0,413
	(15,16)					
\$C\$59	flow<=cap.	0	0,508	0,446	1E+30	0,508
	(15,19)					
\$C\$60	flow<=cap.	1154	0	1,057	0,508	1E+30
	(16,18)					
\$C\$61	flow<=cap.	1069	0	0,984	0,485	0,508
	(17,18)					
\$C\$62	flow<=cap.	1588	0	0,153	1E+30	0,485
	(18,20)					
\$C\$63	flow<=cap.	2657	0	0,135	1E+30	0,508
	(19,20)					
\$C\$64	flow<=cap.	0	0,295	0,295	1E+30	0,295

Celda	Nombre	Final	Sombra	Restricción	Permisible	Permisible
		Valor	Precio	Lado derecho	Aumentar	Reducir
\$L\$37	Node 1 Node	275	6,523	275	16	46
\$L\$38	Node 2 Node	333	4,956	333	16	46
\$L\$39	Node 3 Node	193	3,999	193	16	46
\$L\$40	Node 4 Node	135	3,663	135	16	46
\$L\$41	Node 5 Node	0	3,332	0	1	46
\$L\$42	Node 6 Node	537	4,159	537	16	46

\$L\$43	Node 7 Node	0	3,721	0	16	46
\$L\$44	Node 8 Node	0	2,9	0	98	46
\$L\$45	Node 9 Node	224	2,606	224	98	46
\$L\$46	Node 10 Node	460	2,508	460	98	46
\$L\$47	Node 11 Node	325	2,328	325	98	183
\$L\$48	Node 12 Node	190	1,365	190	98	373
\$L\$49	Node 13 Node	0	1,822	0	98	46
\$L\$50	Node 14 Node	190	0,839	190	98	609
\$L\$51	Node 15 Node	0	1,057	0	247	1154
\$L\$52	Node 16 Node	476	1,119	476	98	1069
\$L\$53	Node 17 Node	473	0,288	473	98	1588
\$L\$54	Node 18 Node	0	0,135	0	98	2657
		-				
\$L\$55	Node 19 Node	1154	0	-4350	3196	1E+30
		-				
\$L\$56	Node 20 Node	2657	0	-4350	1693	1E+30

Aquí debajo se incluye el informe de límites ante la simulación 1.

Objetivo		Valor
Celda	Nombre	
\$I\$62	<= Coches que caben en un carril	8185

Celda	Variable	Valor	Inferior		Superior	
			Límite	Objetivo Resultado	Límite	Objetivo Resultado
\$C\$3						
7	(1,2) flow<=cap.	64	64	8185,159	64	8185,159
\$C\$3						
8	(1,5) flow<=cap.	211	211	8185,159	211	8185,159
\$C\$3						
9	(2,3) flow<=cap.	243	243	8185,159	243	8185,159
\$C\$4						
0	(2,6) flow<=cap.	154	154	8185,159	154	8185,159
\$C\$4						
1	(3,4) flow<=cap.	200	200	8185,159	200	8185,159

\$C\$4					
2	(3,7) flow<=cap.	236	236	8185,159	236 8185,159
\$C\$4					
3	(4,11) flow<=cap.	335	335	8185,159	335 8185,159
\$C\$4					
4	(5,6) flow<=cap.	0	0	8185,159	0 8185,159
\$C\$4					
5	(5,8) flow<=cap.	211	211	8185,159	211 8185,159
\$C\$4					
6	(6,7) flow<=cap.	691	691	8185,159	691 8185,159
\$C\$4					
7	(7,8) flow<=cap.	927	927	8185,159	927 8185,159
\$C\$4					
8	(8,9) flow<=cap.	1138	1138	8185,159	1138 8185,159
\$C\$4					
9	(9,10) flow<=cap.	208	208	8185,159	208 8185,159
\$C\$5					
0	(9,15) flow<=cap.	1154	1154	8185,159	1154 8185,159
\$C\$5					
1	(10,13) flow<=cap.	75	75	8185,159	75 8185,159
\$C\$5					
2	(10,16) flow<=cap.	593	593	8185,159	593 8185,159
\$C\$5					
3	(11,12) flow<=cap.	183	183	8185,159	183 8185,159
\$C\$5					
4	(11,13) flow<=cap.	477	477	8185,159	477 8185,159
\$C\$5					
5	(12,14) flow<=cap.	373	373	8185,159	373 8185,159
\$C\$5					
6	(13,14) flow<=cap.	46	46	8185,159	46 8185,159
\$C\$5					
7	(13,17) flow<=cap.	506	506	8185,159	506 8185,159
\$C\$5					
8	(14,17) flow<=cap.	609	609	8185,159	609 8185,159
\$C\$5					
9	(15,16) flow<=cap.	0	0	8185,159	0 8185,159
\$C\$6					
0	(15,19) flow<=cap.	1154	1154	8185,159	1154 8185,159
\$C\$6					
1	(16,18) flow<=cap.	1069	1069	8185,159	1069 8185,159
\$C\$6					
2	(17,18) flow<=cap.	1588	1588	8185,159	1588 8185,159

PLAN DE EVACUACIÓN DE CEUTA

\$C\$6					
3	(18,20) flow<=cap.	2657	2657	8185,159	2657 8185,159
\$C\$6					
4	(19,20) flow<=cap.	0	0	8185,159	1693 8684,594

SIMULACIÓN 2

Se ha minimizado el número total de kilómetros recorridos a 7929,145km.

ARCO	FLOW<=CAP.		NUEVA CAPACIDAD DEL ARCO
(1,2)	0	<=	241
(1,5)	275	<=	317
(2,3)	243	<=	243
(2,6)	90	<=	242
(3,4)	152	<=	284
(3,7)	284	<=	284
(4,11)	287	<=	335
(5,6)	0	<=	106
(5,8)	275	<=	317
(6,7)	627	<=	857
(7,8)	911	<=	943
(8,9)	1186	<=	1664
(9,10)	0	<=	575
(9,15)	1410	<=	1731
(10,13)	0	<=	596
(10,16)	460	<=	593
(11,12)	135	<=	478
(11,13)	477	<=	477
(12,14)	325	<=	1881
(13,14)	0	<=	506
(13,17)	477	<=	506
(14,17)	515	<=	1981
(15,16)	0	<=	705
(15,19)	1410	<=	2102
(16,18)	936	<=	1485
(17,18)	1465	<=	2372
(18,20)	2401	<=	2755
(19,20)	0	<=	1843

Tabla con los resultados de la condición de capacidad de los distintos arcos bajo la segunda simulación.

NODO	SALIDA NETA POR NODO	SIGNO CONDICIÓN	DEMANDA/SUMINSTRO
1	275	=	275
2	333	=	333
3	193	=	193
4	135	=	135
5	0	=	0
6	537	=	537
7	0	=	0
8	0	=	0
9	224	=	224
10	460	=	460
11	325	=	325
12	190	=	190
13	0	=	0
14	190	=	190
15	0	=	0
16	476	=	476
17	473	=	473
18	0	=	0
19	-1410	>=	-4350
20	-2410	>=	-4350

Tabla con los resultados de la condición de balance en los distintos nodos, tras la segunda simulación.

Debajo se adjunta el informe de respuestas de la segunda simulación.

Celda objetivo (Mín)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$I\$62	<= Objective to minimize	8185,159	7929,145

Celdas de variables

Celda	Nombre	Valor original	Valor final	Entero
\$C\$3				
7	(1,2) flow<=cap.	64	0	Continuar

\$C\$3				
8	(1,5) flow<=cap.	211	275	Continuar
\$C\$3				
9	(2,3) flow<=cap.	243	243	Continuar
\$C\$4				
0	(2,6) flow<=cap.	154	90	Continuar
\$C\$4				
1	(3,4) flow<=cap.	200	152	Continuar
\$C\$4				
2	(3,7) flow<=cap.	236	284	Continuar
\$C\$4				
3	(4,11) flow<=cap.	335	287	Continuar
\$C\$4				
4	(5,6) flow<=cap.	0	0	Continuar
\$C\$4				
5	(5,8) flow<=cap.	211	275	Continuar
\$C\$4				
6	(6,7) flow<=cap.	691	627	Continuar
\$C\$4				
7	(7,8) flow<=cap.	927	911	Continuar
\$C\$4				
8	(8,9) flow<=cap.	1138	1186	Continuar
\$C\$4				
9	(9,10) flow<=cap.	208	0	Continuar
\$C\$5				
0	(9,15) flow<=cap.	1154	1410	Continuar
\$C\$5				
1	(10,13) flow<=cap.	75	0	Continuar
\$C\$5				
2	(10,16) flow<=cap.	593	460	Continuar
\$C\$5				
3	(11,12) flow<=cap.	183	135	Continuar
\$C\$5				
4	(11,13) flow<=cap.	477	477	Continuar
\$C\$5				
5	(12,14) flow<=cap.	373	325	Continuar
\$C\$5				
6	(13,14) flow<=cap.	46	0	Continuar
\$C\$5				
7	(13,17) flow<=cap.	506	477	Continuar
\$C\$5				
8	(14,17) flow<=cap.	609	515	Continuar

\$C\$5				
9	(15,16) flow<=cap.	0	0	Continuar
\$C\$6				
0	(15,19) flow<=cap.	1154	1410	Continuar
\$C\$6				
1	(16,18) flow<=cap.	1069	936	Continuar
\$C\$6				
2	(17,18) flow<=cap.	1588	1465	Continuar
\$C\$6				
3	(18,20) flow<=cap.	2657	2401	Continuar
\$C\$6				
4	(19,20) flow<=cap.	0	0	Continuar

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	Fórmula	Estado	Demora
\$L\$37	Node 1 Node	275	\$L\$37=\$N\$37	Vinculante	0
\$L\$38	Node 2 Node	333	\$L\$38=\$N\$38	Vinculante	0
\$L\$39	Node 3 Node	193	\$L\$39=\$N\$39	Vinculante	0
\$L\$40	Node 4 Node	135	\$L\$40=\$N\$40	Vinculante	0
\$L\$41	Node 5 Node	0	\$L\$41=\$N\$41	Vinculante	0
\$L\$42	Node 6 Node	537	\$L\$42=\$N\$42	Vinculante	0
\$L\$43	Node 7 Node	0	\$L\$43=\$N\$43	Vinculante	0
\$L\$44	Node 8 Node	0	\$L\$44=\$N\$44	Vinculante	0
\$L\$45	Node 9 Node	224	\$L\$45=\$N\$45	Vinculante	0
\$L\$46	Node 10 Node	460	\$L\$46=\$N\$46	Vinculante	0
\$L\$47	Node 11 Node	325	\$L\$47=\$N\$47	Vinculante	0
\$L\$48	Node 12 Node	190	\$L\$48=\$N\$48	Vinculante	0
\$L\$49	Node 13 Node	0	\$L\$49=\$N\$49	Vinculante	0
\$L\$50	Node 14 Node	190	\$L\$50=\$N\$50	Vinculante	0
\$L\$51	Node 15 Node	0	\$L\$51=\$N\$51	Vinculante	0
\$L\$52	Node 16 Node	476	\$L\$52=\$N\$52	Vinculante	0
\$L\$53	Node 17 Node	473	\$L\$53=\$N\$53	Vinculante	0
\$L\$54	Node 18 Node	0	\$L\$54=\$N\$54	Vinculante	0
			\$L\$55>=\$N\$5	No	
\$L\$55	Node 19 Node	-1410	5	vinculante	2940
			\$L\$56>=\$N\$5	No	
\$L\$56	Node 20 Node	-2401	6	vinculante	1949

\$C\$3			\$C\$37<=\$F\$3	No	
7	(1,2) flow<=cap.	0	7	vinculante	241
\$C\$3			\$C\$38<=\$F\$3	No	
8	(1,5) flow<=cap.	275	8	vinculante	42
\$C\$3			\$C\$39<=\$F\$3		
9	(2,3) flow<=cap.	243	9	Vinculante	0
\$C\$4			\$C\$40<=\$F\$4	No	
0	(2,6) flow<=cap.	90	0	vinculante	152
\$C\$4			\$C\$41<=\$F\$4	No	
1	(3,4) flow<=cap.	152	1	vinculante	132
\$C\$4			\$C\$42<=\$F\$4		
2	(3,7) flow<=cap.	284	2	Vinculante	0
\$C\$4			\$C\$43<=\$F\$4	No	
3	(4,11) flow<=cap.	287	3	vinculante	48
\$C\$4			\$C\$44<=\$F\$4	No	
4	(5,6) flow<=cap.	0	4	vinculante	106
\$C\$4			\$C\$45<=\$F\$4	No	
5	(5,8) flow<=cap.	275	5	vinculante	42
\$C\$4			\$C\$46<=\$F\$4	No	
6	(6,7) flow<=cap.	627	6	vinculante	230
\$C\$4			\$C\$47<=\$F\$4	No	
7	(7,8) flow<=cap.	911	7	vinculante	32
\$C\$4			\$C\$48<=\$F\$4	No	
8	(8,9) flow<=cap.	1186	8	vinculante	478
\$C\$4			\$C\$49<=\$F\$4	No	
9	(9,10) flow<=cap.	0	9	vinculante	575
\$C\$5			\$C\$50<=\$F\$5	No	
0	(9,15) flow<=cap.	1410	0	vinculante	321
\$C\$5			\$C\$51<=\$F\$5	No	
1	(10,13) flow<=cap.	0	1	vinculante	596
\$C\$5			\$C\$52<=\$F\$5	No	
2	(10,16) flow<=cap.	460	2	vinculante	133
\$C\$5			\$C\$53<=\$F\$5	No	
3	(11,12) flow<=cap.	135	3	vinculante	343
\$C\$5			\$C\$54<=\$F\$5		
4	(11,13) flow<=cap.	477	4	Vinculante	0
\$C\$5			\$C\$55<=\$F\$5	No	
5	(12,14) flow<=cap.	325	5	vinculante	1556
\$C\$5			\$C\$56<=\$F\$5	No	
6	(13,14) flow<=cap.	0	6	vinculante	506
\$C\$5			\$C\$57<=\$F\$5	No	
7	(13,17) flow<=cap.	477	7	vinculante	29

\$C\$5			\$C\$58<=\$F\$5	No	
8	(14,17) flow<=cap.	515	8	vinculante	1466
\$C\$5			\$C\$59<=\$F\$5	No	
9	(15,16) flow<=cap.	0	9	vinculante	705
\$C\$6			\$C\$60<=\$F\$6	No	
0	(15,19) flow<=cap.	1410	0	vinculante	692
\$C\$6			\$C\$61<=\$F\$6	No	
1	(16,18) flow<=cap.	936	1	vinculante	549
\$C\$6			\$C\$62<=\$F\$6	No	
2	(17,18) flow<=cap.	1465	2	vinculante	907
\$C\$6			\$C\$63<=\$F\$6	No	
3	(18,20) flow<=cap.	2401	3	vinculante	354
\$C\$6			\$C\$64<=\$F\$6	No	
4	(19,20) flow<=cap.	0	4	vinculante	1843

Aquí debajo se incluye el informe de sensibilidad ante la simulación 2.

Celdas de variables

Celda	Nombre	Final Valor	Reducido Coste	Objetivo Coeficiente	Permisible Aumentar	Permisible Reducir
\$C\$37	(1,2) flow<=cap.	0	2,504	1,567	1E+30	2,504
\$C\$38	(1,5) flow<=cap.	275	0	0,687	2,504	1E+30
\$C\$39	(2,3) flow<=cap.	243	-0,339	0,271	0,339	1E+30
\$C\$40	(2,6) flow<=cap.	90	0	0,797	1E+30	0,339
\$C\$41	(3,4) flow<=cap.	152	0	0,336	0,339	0,347
\$C\$42	(3,7) flow<=cap.	284	-0,347	0,278	0,347	1E+30
\$C\$43	(4,11) flow<=cap.	287	0	0,934	0,339	0,347
\$C\$44	(5,6) flow<=cap.	0	1,305	0,478	1E+30	1,305
\$C\$45	(5,8) flow<=cap.	275	0	0,432	1,305	1E+30
\$C\$46	(6,7) flow<=cap.	627	0	0,438	1E+30	0,339
\$C\$47	(7,8) flow<=cap.	911	0	0,821	0,347	0,339
\$C\$48	(8,9) flow<=cap.	1186	0	0,294	0,347	0,339
\$C\$49	(9,10) flow<=cap.	0	0,263	0,098	1E+30	0,263
\$C\$50	(9,15) flow<=cap.	1410	0	0,801	0,263	0,339
\$C\$51	(10,13) flow<=cap.	0	0,072	0,686	1E+30	0,072
\$C\$52	(10,16) flow<=cap.	460	0	0,904	0,072	0,263
\$C\$53	(11,12) flow<=cap.	135	0	0,963	0,339	0,347
\$C\$54	(11,13) flow<=cap.	477	-0,73	0,189	0,73	1E+30

\$C\$55	(12,14) flow<=cap.	325	0	0,526	0,339	0,347
\$C\$56	(13,14) flow<=cap.	0	0,413	0,983	1E+30	0,413
\$C\$57	(13,17) flow<=cap.	477	0	1,121	0,413	0,072
\$C\$58	(14,17) flow<=cap.	515	0	0,551	0,339	0,347
\$C\$59	(15,16) flow<=cap.	0	0,508	0,446	1E+30	0,508
\$C\$60	(15,19) flow<=cap.	1410	0	1,057	0,263	0,339
\$C\$61	(16,18) flow<=cap.	936	0	0,984	0,072	0,263
\$C\$62	(17,18) flow<=cap.	1465	0	0,153	0,339	0,072
\$C\$63	(18,20) flow<=cap.	2401	0	0,135	0,339	0,263
\$C\$64	(19,20) flow<=cap.	0	0,295	0,295	1E+30	0,295

Restricciones

Celda	Nombre	Final	Sombra	Restricción	Permisible	Permisible
		Valor	Precio	Lado derecho	Aumentar	Reducir
\$L\$37	Node 1 Node	275	3,271	275	42	275
\$L\$38	Node 2 Node	333	4,208	333	32	90
\$L\$39	Node 3 Node	193	3,598	193	48	135
\$L\$40	Node 4 Node	135	3,262	135	48	135
\$L\$41	Node 5 Node	0	2,584	0	42	275
\$L\$42	Node 6 Node	537	3,411	537	32	627
\$L\$43	Node 7 Node	0	2,973	0	32	911
\$L\$44	Node 8 Node	0	2,152	0	321	1186
\$L\$45	Node 9 Node	224	1,858	224	321	1410
\$L\$46	Node 10 Node	460	2,023	460	133	460
\$L\$47	Node 11 Node	325	2,328	325	343	135
\$L\$48	Node 12 Node	190	1,365	190	354	325
\$L\$49	Node 13 Node	0	1,409	0	29	477
\$L\$50	Node 14 Node	190	0,839	190	354	515
\$L\$51	Node 15 Node	0	1,057	0	692	1410
\$L\$52	Node 16 Node	476	1,119	476	354	936
\$L\$53	Node 17 Node	473	0,288	473	354	1465
\$L\$54	Node 18 Node	0	0,135	0	354	2401
		-				
\$L\$55	Node 19 Node	1410	0	-4350	2940	1E+30
		-				
\$L\$56	Node 20 Node	2401	0	-4350	1949	1E+30

Aquí debajo se incluye el informe de límites ante la simulación 2.

Celda	Objetivo Nombre	Valor
\$I\$62	<= Objective to minimize	7929

Celda	Variable Nombre	Valor	Inferior Límite	Objetivo Resultado	Superior Límite	Objetivo Resultado
\$C\$37	(1,2) flow<=cap.	0	0	7929,145	0	7929,145
\$C\$38	(1,5) flow<=cap.	275	275	7929,145	275	7929,145
\$C\$39	(2,3) flow<=cap.	243	243	7929,145	243	7929,145
\$C\$40	(2,6) flow<=cap.	90	90	7929,145	90	7929,145
\$C\$41	(3,4) flow<=cap.	152	152	7929,145	152	7929,145
\$C\$42	(3,7) flow<=cap.	284	284	7929,145	284	7929,145
\$C\$43	(4,11) flow<=cap.	287	287	7929,145	287	7929,145
\$C\$44	(5,6) flow<=cap.	0	0	7929,145	0	7929,145
\$C\$45	(5,8) flow<=cap.	275	275	7929,145	275	7929,145
\$C\$46	(6,7) flow<=cap.	627	627	7929,145	627	7929,145
\$C\$47	(7,8) flow<=cap.	911	911	7929,145	911	7929,145
\$C\$48	(8,9) flow<=cap.	1186	1186	7929,145	1186	7929,145
\$C\$49	(9,10) flow<=cap.	0	0	7929,145	0	7929,145
\$C\$50	(9,15) flow<=cap.	1410	1410	7929,145	1410	7929,145
\$C\$51	(10,13) flow<=cap.	0	0	7929,145	0	7929,145
\$C\$52	(10,16) flow<=cap.	460	460	7929,145	460	7929,145
\$C\$53	(11,12) flow<=cap.	135	135	7929,145	135	7929,145
\$C\$54	(11,13) flow<=cap.	477	477	7929,145	477	7929,145
\$C\$55	(12,14) flow<=cap.	325	325	7929,145	325	7929,145
\$C\$56	(13,14) flow<=cap.	0	0	7929,145	0	7929,145
\$C\$57	(13,17) flow<=cap.	477	477	7929,145	477	7929,145
\$C\$58	(14,17) flow<=cap.	515	515	7929,145	515	7929,145
\$C\$59	(15,16) flow<=cap.	0	0	7929,145	0	7929,145
\$C\$60	(15,19) flow<=cap.	1410	1410	7929,145	1410	7929,145
\$C\$61	(16,18) flow<=cap.	936	936	7929,145	936	7929,145
\$C\$62	(17,18) flow<=cap.	1465	1465	7929,145	1465	7929,145
\$C\$63	(18,20) flow<=cap.	2401	2401	7929,145	2401	7929,145
\$C\$64	(19,20) flow<=cap.	0	0	7929,145	1843	8472,83

BIBLIOGRAFÍA

- Abdeen, F., Fernando, T., Kulatunga, U., Hettige, S., & Ranasinghe, K. A. (2021). Challenges in multi-agency collaboration in disaster management: A Sri Lankan perspective. *International Journal Of Disaster Risk Reduction*, 62, 102399. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102399>
- Arab, C., & Alioua, M. (s. f.). *Ceuta et Melilla, pièges à migrants entre le Maroc et l'Espagne*. The Conversation. <https://theconversation.com/ceuta-et-melilla-pieges-a-migrants-entre-le-maroc-et-lespaigne-186327>
- Bretschneider, S. (2012). *A Pattern-Based Evacuation Planning Model for Urban Areas*. , 101-128. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28759-6_5.
- Ceuta 2024*. (s. f.-b). Datosmacro.com. <https://datosmacro.expansion.com/ccaa/ceuta>
- Ceuta weather forecast*. (s. f.). <https://www.weather-forecast.com/locations/Ceuta/forecasts/latest>
- Chang, K., Hsu, C., & Su, W. (2024). An agent-based simulation framework for emergency evacuations from toxic gas incidents and an empirical study in Taiwan. *Computers & Operations Research*, 106645. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106645>
- Chen, C., Wang, H., Lindell, M. K., Jung, M. C., & Siam, M. (2022). Tsunami preparedness and resilience: Evacuation logistics and time estimations. *Transportation Research. Part D, Transport And Environment*, 109, 103324. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103324>

Chen, Y., Shafi, S. Y., & Chen, Y. (2020). Simulation pipeline for traffic evacuation in urban areas and emergency traffic management policy improvements through case studies. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 7, 100210. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100210>

Chondrogiannis, T., Bouros, P., & Emser, W. (2021). Simulation-based Evacuation Planning for Urban Areas. *Proceedings of the 29th International Conference on Advances in Geographic Information Systems*. <https://doi.org/10.1145/3474717.3483963>.

Ciudad Autónoma de Ceuta. (2008). *Plan Territorial de Protección Civil de la Ciudad Autónoma de Ceuta (PLATERCE)*. Consejería de Presidencia.

Ciudad autónoma de Melilla. (s. f.). https://www.planestrategicomelilla.net/f14_02.htm

Cuello, A., Cilio, F., Vives, C., & Leale, G. (2020). Aplicación de un estudio de simulación para la definición de políticas de evacuación. *SIII O, Simposio Argentino de Informática Industrial e Investigación Operativa*. 50 JAIIO. <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Tragedia de Cromacron%20B1%20B3n&oldid=130650271>

De Documentación, I. G. N.-. S. (s. f.). *Ceuta. Mapa Topográfico Nacional 1:25.000*. 2018. <https://www.ign.es/web/catalogo-cartoteca/resources/html/031754.html>

Efe. (2022, 12 mayo). España utilizará drones para vigilar la frontera entre España y Marruecos en Melilla. *www.20minutos.es - Últimas Noticias*. <https://www.20minutos.es/noticia/4999380/0/espana-utilizara-drones-para-vigilar-la-frontera-entre-espana-y-marruecos-en-melilla/>

El Helipuerto de Ceuta realiza un simulacro de emergencia para analizar la coordinación y los tiempos de respuesta ante un accidente. (s. f.).

<https://www.aena.es/es/prensa/el-helipuerto-de-ceuta-realiza-un-simulacro-de-emergencia-para-analizar-la-coordinacion-y-los-tiempos-de-respuesta-ante-un-accidente.html>

Emesa. (2024, 9 abril). *Carreteras de circunvalación de Madrid | Emesa M-30*.

Emesa M-30. <https://www.emesa-m30.es/carreteras-de-circunvalacion-de-madrid/>

Eriksen, C., & Gill, N. (2020). Social vulnerabilities and wildfire evacuations: A case study of the 2019 Kincade fire. *Natural Hazards*, 104(1), 973-994.

<https://doi.org/10.1007/s11069-020-04185-5>

Financiación autonómica: Ministerio de Hacienda. (s. f.).

<https://www.hacienda.gob.es/es->

[ES/Areas%20Tematicas/Financiacion%20Autonomica/Paginas/Financiacion%20Autonomica.aspx](https://www.hacienda.gob.es/es-ES/Areas%20Tematicas/Financiacion%20Autonomica/Paginas/Financiacion%20Autonomica.aspx)

Fraser, S. A., Doyle, E. E., Wright, K. C., Potter, S. H., McClure, J., Johnston, D. M., Leonard, G. S., Coomer, M. A., Becker, J. S., & Johal, S. (2016). Tsunami response behaviour during and following two local-source earthquakes in Wellington, New Zealand. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 16, 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.02.008>

Google. (2024). *Captura de pantalla de Ceuta en Google Maps*.

Google. (2024). *Captura de pantalla de Melilla en Google Maps*.

Görbil, G., Filippopolitis, A., & Gelenbe, E. (2011). Intelligent navigation systems for building evacuation. *Comput. J.*, 54(6), 1010-1024.

Guerrero, A., Bodin, Ö., Nohrstedt, D., Plummer, R., Baird, J., & Summers, R. (2023).

Collaboration and individual performance during disaster response. *Global Environmental Change*, 82, 102729.

<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102729>

Habitantes Ceuta1930-

2023.(s. f.).<https://www.forociudad.com/ceuta/ceuta/habitantes.html>

Jiang, Y., & Yuan, Y. (2019). Emergency Logistics in a Large-Scale Disaster Context:

Achievements and challenges. *International Journal of Environmental Research and Public Health/International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(5), 779. <https://doi.org/10.3390/ijerph16050779>

Kai, K., Osima, S., Ismail, M., Waniha, P., & Omar, H. (2021). Assessment of the Impacts of Tropical Cyclones Idai to the Western Coastal Area and Hinterlands of the South Western Indian Ocean. *Atmospheric and Climate Sciences*. <https://doi.org/10.4236/acs.2021.114047>.

KostovKostovasili, M., & Antoniou, C. (2017). Simulation-based evaluation of

evacuation effectiveness using driving behavior sensitivity analysis. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 70, 135–

148. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.10.010>

- Krutein, K. F., McGowan, J., & Goodchild, A. (2022). Evacuating isolated islands with marine resources: A Bowen Island case study. *International Journal Of Disaster Risk Reduction*, 72, 102865. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.102865>
- Li, X., Li, Q., & Claramunt, C. (2017). A time-extended network model for staged evacuation planning. *Safety Science*.
<https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2017.08.004>.
- Liu, Z., Liu, J., Shang, X., & Li, X. (2024). Data-driven evacuation and rescue traffic optimization with rescue contraflow control. *Journal Of Safety Science And Resilience*, 5(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2023.11.002>
- Liu, Z., Wang, H., & Zhang, Y. (2024). Coupled simulation-optimization model for pedestrian evacuation guidance planning. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 134, 102922. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2024.102922>
- Lovreglio, R. (2018). A Review of Augmented Reality Applications for Building Evacuation. *ArXiv*, abs/1804.04186.
- Maiwald, M. (2017). *Robust Evacuation Planning for Urban Areas.*, 23-28. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18500-8_4.
- Maturana, A. (2011). Evaluación de riesgos y gestión en desastres. 10 preguntas para la década actual. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 22(5), 545-555.
- Melilla - población 2023. (s. f.). Datosmacro.com.
<https://datosmacro.expansion.com/demografia/poblacion/espana-comunidades-autonomas/melilla#:~:text=Melilla%20cerr%C3%B3%20diciembre%20de%202023,poblaci%C3%B3n%20fue%20de%2085.664%20personas>.

Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social - Portal Estadístico del SNS - Hospitales, camas en funcionamiento y puestos de hospital de día (PHD) del Sistema Nacional de Salud (SNS), número y tasa por 1.000 habitantes y número de Centros, Servicios y Unidades de referencia (CSUR) según comunidad autónoma. (s. f.).

<https://www.sanidad.gob.es/estadEstudios/sanidadDatos/tablas/tabla22.htm>

Pérez García, J. (2022). *Los modelos sociales de las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla.*

Redaccion, & Redaccion. (2020, 28 septiembre). El plan de Marruecos para anexionar Ceuta y Melilla - Adelante España. *Adelante España - Diario online de información y análisis.* <https://adelanteespana.com/el-plan-de-marruecos-para-anexionar-ceuta-y-melilla>

Syrians facing 'ever worsening' conditions, top UN officials warn. (2023, 29 junio). UN News. <https://news.un.org/en/story/2023/06/1138202>

Wang, S., & Sun, B. (2023). Model of multi-period emergency material allocation for large-scale sudden natural disasters in humanitarian logistics: Efficiency, effectiveness and equity. *International Journal Of Disaster Risk Reduction*, 85, 103530. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103530>

Wei, H., Zeng, Q., Hu, H., Wang, X., & Kukreti, A. (2008). Integrated Urban Evacuation Planning Framework for Responding to Human-Caused Disasters over a Surface Transportation Network. *Transportation Research Record*, 2041, 29 - 37. <https://doi.org/10.3141/2041-04>.

Woo, M., Hui, K., Ren, K., Gan, K., & Kim, A. (2017). Reconstructing an Emergency

Evacuation by Ground and Air the wildfire in Fort McMurray, Alberta, Canada. *Transportation Research Record*, 2604, 63 - 70. <https://doi.org/10.3141/2604-08>.

- Wu, A., Yan, X., Kuligowski, E., Lovreglio, R., Nilsson, D., Cova, T., Xu, Y., & Zhao, X. (2022). Wildfire evacuation decision modeling using GPS data. *Social Science Research Network*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4133179>
- Yin, L., Chen, J., Zhang, H., Yang, Z., Wan, Q., Ning, L., Hu, J., & Yu, Q. (2020). Improving emergency evacuation planning with mobile phone location data. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 47, 964 - 980. <https://doi.org/10.1177/23998083198748>

