UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID





MÁSTER UNIVERSITARIO EN GESTIÓN DE DESASTRES

TRABAJO FIN DE MÁSTER
CURSO 2025-2026

Gestión de la información y optimización del preposicionamiento de ayuda humanitaria ante desastres en Mozambique

Antonio Sevilla Sastre

Febrero 2026

Tutora: Begoña Vitoriano Villanueva, Facultad de Ciencias Matemáticas de la Universidad Complutense de Madrid

Entidad colaboradora: Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres de Moçambique

Tutor de la entidad: Gilberto Augusto De Castro Miguel, Delegado Provincial de Inhambane

A quienes han hecho posible este trabajo sobre logística humanitaria
con su apoyo logístico y su humanidad.

Ao povo moçambicano, que está a construir um futuro melhor. A luta continua.

Resumen

Mozambique sufre cada año numerosos desastres naturales, como ciclones e inundaciones, cuyos impactos se ven agravados por la vulnerabilidad social y la fragilidad de sus infraestructuras. La efectividad de la toma de decisiones en la gestión de estas emergencias depende de la calidad de la información disponible, destacando el papel de los datos históricos y las fuentes secundarias. En particular, los impactos de las catástrofes pueden mitigarse mediante políticas informadas de preposicionamiento estratégico de ayuda humanitaria para la respuesta inmediata.

Para abordar esta problemática, en el presente trabajo se genera una base de datos completa y fiable a nivel nacional, consolidando información procedente de diferentes fuentes. Se analiza además la geografía y las capacidades logísticas de la provincia de Inhambane. Finalmente, se emplea un modelo de optimización para la localización eficiente de almacenes humanitarios.

Palabras clave: *Gestión de datos, Logística humanitaria, Sistemas de apoyo a la toma de decisiones, Problema de localización de instalaciones.*

Abstract

Mozambique experiences numerous natural disasters each year, including cyclones and floods, whose impacts are exacerbated by social vulnerability and fragile infrastructure. Effective decision-making in emergency management relies on the quality of available information, highlighting the role of historical data and secondary sources. In particular, the effects of disasters can be mitigated through informed policies for the strategic prepositioning of humanitarian aid, enabling an immediate response.

To address this challenge, this study develops a comprehensive and reliable nationwide database by consolidating information from multiple sources. The geography and logistical capacities of Inhambane province are also examined. Finally, an optimization model is applied to determine the most efficient locations for humanitarian warehouses.

Keywords: *Data Management, Humanitarian Logistics, Decision Support Systems, Facility Location Problem.*

Índice general

1 Introducción 1
1.1 Vulnerabilidad en Mozambique 1
1.2 Gestión de desastres en Mozambique 3
1.3 Gestión de la información en Mozambique 5
1.4 Objetivos de las prácticas y el trabajo 7

2 Construcción de una base de datos nacional de desastres históricos 8
2.1 Cruce de datos 9
2.2 Agregación de eventos 11

3 Metodología para la optimización del preposicionamiento de ayuda humanitaria 14
3.1 Características e importancia del preposicionamiento informado 14
3.2 Especificaciones del problema de localización y preposicionamiento 15
3.3 Modelo de localización y preposicionamiento 17
3.4 Metodología de generación de escenarios a partir de información histórica 20

4 Preposicionamiento de ayuda humanitaria en Inhambane, Mozambique 23
4.1 Información logística 23
4.2 Generación de escenarios de desastre 32
4.3 Resultados de la optimización 36

5 Conclusiones 43
5.1 De la gestión de información 43
5.2 Del preposicionamiento de ayuda humanitaria 43
5.3 Implementación y trabajo futuro 44

Bibliografía 45

A1 Extractos visuales de la base de datos nacional de desastres históricos 50

A2 Formulación del modelo de localización y preposicionamiento..... 53

A3 Formulación del modelo de generación de escenarios de demanda global 56

Índice de figuras

1.1 Ubicación de Mozambique en el África Meridional. Fuente: TUBS, 2011. 2
1.2 Inundación en la provincia de Gaza, 19 de enero de 2026. Afectados sobre los tejados y en canoa. Fuente: Naciones Unidas. Oficina de las Naciones Unidas para la Coordinación de Asuntos Humanitarios (OCHA), 2026. 3
1.3 Ciclo de la gestión de desastres. Fuente: Naciones Unidas. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), s.f. 4
1.4 Ejemplos de actividades del INGD. Fuente: elaboración propia. 5

3.1 Árbol de escenarios independiente por etapas. Fuente: Rodríguez-Martínez, 2021. 16
3.2 Diagrama de flujo del procesamiento de la información recopilada para la optimización del preposicionamiento. Fuente: elaboración propia. 19
3.3 Representación de los *clusters* formados por el algoritmo de la tercera fase y el representante de cada uno de ellos. Fuente: Rodríguez-Martínez, 2021. 22

4.1 Ubicación de Inhambane en Mozambique. Fuente: NordNordWest, 2018. 24
4.2 Mapa de carreteras, sedes y límites distritales de la provincia de Inhambane, tratado en QGIS (QGIS Development Team, 2025) para generar el grafo de conexiones. Fuentes: Humanitarian Data Exchange, 2025b, elaboración propia. 25
4.3 Sección de mapa de carreteras y cursos hídricos, tratado en QGIS (QGIS Development Team, 2025) para estudiar las intersecciones entre ambos. Fuentes: Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação, 2025, Regional Centre for Mapping of Resources for Development, s.f. Humanitarian Data Exchange, 2025a, elaboración propia. 28
4.4 Destrucción de un tramo de la carretera nacional N-1 a la altura de Manhiça el 20 de enero de 2026. Supuso la incomunicación de las provincias de Gaza e Inhambane con Maputo hasta el 28 de enero de 2026. Fuente: *Administração Nacional de Estradas*. 29

4.5 Tipos de almacenes para primera respuesta en la provincia de Inhambane. Fuente: elaboración propia. 31
4.6 Algunos de los bienes almacenados en Inhambane cidade. Fuente: elaboración propia. 32
4.7 Comparación entre la función de distribución empírica y la función de distribución de los escenarios de demanda global. Fuente: elaboración propia. Código adaptado de Rodríguez-Martínez, 2021. 33
4.8 Asignación difusa de los casos a los escenarios. Los registros históricos están representados por las barras verticales y el grado de pertenencia a cada conjunto difuso por el eje y. Fuente: elaboración propia. Código adaptado de Rodríguez-Martínez, 2021. 34
4.9 Dendrograma de la generación de escenarios geográficos, para la segunda clase de magnitud de inundaciones. Casos en el eje x y distancia entre ellos en el eje y. Fuente: elaboración propia. Código adaptado de Rodríguez-Martínez, 2021. 35
4.10 Evolución del número de escenarios obtenidos (eje x) en función de la distancia mínima entre ellos (eje y). Fuente: elaboración propia. Código adaptado de Rodríguez-Martínez, 2021. 35
4.11 Aproximación de la frontera de Pareto con los datos estimados y 30 escenarios de emergencia. Fuentes: Rodríguez-Martínez, 2021, Mavrotas y Florios, 2013, elaboración propia. 38
4.12 Política de planificación sugerida por el modelo con los datos estimados y 30 escenarios de emergencia, para cualquier punto de la Frontera de Pareto. Fuentes: Rodríguez-Martínez, 2021, elaboración propia. 39
4.13 Política de planificación sugerida por el modelo con los datos estimados, presupuesto anual de 80.000 USD, capacidad de las vías reducida un 50 % sobre lo estimado en situaciones de desastre y 30 escenarios de emergencia. Fuentes: Rodríguez-Martínez, 2021, elaboración propia. 40
4.14 Aproximación de la frontera de Pareto con los datos estimados, presupuesto anual de 70.000 USD, capacidad de las vías reducida un 50 % sobre lo estimado en situaciones de desastre y 30 escenarios de emergencia. Fuentes: Rodríguez-Martínez, 2021, Mavrotas y Florios, 2013, elaboración propia. 41
4.15 Políticas de planificación sugeridas por el modelo con los datos estimados, presupuesto anual de 70.000 USD, capacidad de las vías reducida un 50 % sobre lo estimado en situaciones de desastre y 30 escenarios de emergencia, a lo largo de la frontera de Pareto. Fuentes: Rodríguez-Martínez, 2021, elaboración propia. 42

A1.1 Primeras variables de algunas entradas del cruce de datos *Cruzamento_simplificado*, incluyendo varios tipos de eventos y todas las fuentes. Fuentes: Naciones Unidas. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), 2025, The International Disaster Database, 2025, Salgado Lora, 2017, Rodríguez-Martínez, 2021, Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres, 2025, elaboración propia..... 51
A1.2 Todas las variables de las primeras entradas de la agregación de datos *Cheias_e_ciclones*. Fuentes: Naciones Unidas. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), 2025, The International Disaster Database, 2025, Salgado Lora, 2017, Rodríguez-Martínez, 2021, Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres, 2025, elaboración propia. 52

1. Introducción

En el presente capítulo se describen las características de los riesgos hidrometeorológicos y la vulnerabilidad particular del territorio, así como las actividades de gestión y respuesta ante desastres. Se justifica la relevancia de la gestión de la información en estos cometidos y se presentan los objetivos del estudio.

1.1. Vulnerabilidad en Mozambique

Un desastre es una grave disrupción del funcionamiento de una comunidad o sociedad que causa pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales que exceden la capacidad de la comunidad afectada para hacerles frente con sus propios recursos (Naciones Unidas. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), 2015).

Según el *Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres* (entrevista personal, 3 de septiembre de 2025), la República de Mozambique y, en particular, la provincia de Inhambane, presentan un perfil de riesgo de desastres multiamenaza. Su localización en la franja litoral del Océano Índico y su topografía mayoritariamente baja hacen que el territorio sea propenso a ciclones tropicales, precipitaciones extremas y sus consecuentes inundaciones fluviales, especialmente en distritos costeros y en áreas próximas a cuencas de drenaje. Las sequías constituyen además un peligro de evolución lenta que, debido a la limitada capacidad de almacenamiento de agua y la alta dependencia de la agricultura, compromete frecuentemente la seguridad alimentaria.

Debe señalarse que el cambio climático modifica la frecuencia e intensidad de los fenómenos y con ello de los riesgos hidrometeorológicos existentes. El aumento observado en la variabilidad de las precipitaciones incrementa enormemente la probabilidad de inundaciones y de períodos prolongados de sequía (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, Firmino, 2025).

Algunos desastres naturales, ocurridos especialmente durante los últimos años, han marcado profundamente el desarrollo social y económico del territorio. Entre



Figura 1.1: Ubicación de Mozambique en el África Meridional. Fuente: TUBS, 2011.

ellos destacan los ciclones *Eline* (2000), *Funso* (2012), *Dineo* (2017), *Idai* (2019) o *Kenneth* (2019), que afectaron a millones de personas, provocaron enormes pérdidas materiales y colapsaron las infraestructuras en varias provincias. Las últimas inundaciones a fecha de publicación de este trabajo, ocurridas en enero de 2026, han dejado por lo menos un centenar de fallecidos y más de medio millón de afectados (Naciones Unidas. Noticias ONU, 2026, Naciones Unidas. Oficina de las Naciones Unidas para la Coordinación de Asuntos Humanitarios (OCHA), 2026).

Desde el punto de vista de la exposición, un enorme porcentaje de la población reside en asentamientos informales dispersos, a veces ubicados en zonas inundables. Según la *Administração Nacional de Estradas* (entrevista personal, 24 de septiembre de 2025), la red de transporte es poco densa y está conformada principalmente por viales secundarios no pavimentados, cuya funcionalidad se puede ver severamente comprometida durante episodios de lluvia intensa. Esta situación puede generar cuellos de botella logísticos y el aislamiento temporal de algunas comunidades. La fragilidad de las conexiones condiciona tanto la evacuación preventiva como la distribución de ayuda humanitaria durante la respuesta a los desastres.

En términos de vulnerabilidad estructural, el territorio muestra déficits relevantes en infraestructuras críticas, como sistemas de abastecimiento de agua, centros de salud o almacenes logísticos resistentes a eventos extremos. Gran parte de la población mozambiqueña depende directamente de la agricultura de subsistencia y del acceso a recursos naturales locales para su sustento. Esta dependencia hace que las pérdidas



Figura 1.2: Inundación en la provincia de Gaza, 19 de enero de 2026. Afectados sobre los tejados y en canoa. Fuente: Naciones Unidas. Oficina de las Naciones Unidas para la Coordinación de Asuntos Humanitarios (OCHA), 2026.

ocasionadas por desastres tengan un efecto inmediato sobre la seguridad alimentaria y la estabilidad económica de los ciudadanos.

La capacidad operativa de la respuesta resulta muy heterogénea y limitada por las restricciones presupuestarias y la dependencia del apoyo externo. Aunque existen mecanismos de alerta temprana a nivel nacional (Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres, 2022), el desempeño de la respuesta está condicionado por la disponibilidad de recursos y la accesibilidad a ciertas poblaciones. En consecuencia, los tiempos de respuesta tienden a incrementarse en las zonas rurales, produciendo un gran impacto humanitario.

La reducción de tiempos de entrega en las primeras fases de la emergencia es fundamental para mitigar pérdidas humanas y evitar el deterioro de las condiciones de vida de la población afectada. Este contexto justifica el uso de estrategias de preparación basadas en el preposicionamiento de suministros.

1.2. Gestión de desastres en Mozambique

Nuestros gritos de «¿Por qué ahora?» o «¿Por qué nosotros?» quizá nunca obtengan una respuesta satisfactoria. Pero si miramos más allá del significado, descubriremos una pregunta que tiene profundas implicaciones morales: ¿cómo, ante la catástrofe, podemos ayudarnos y podemos ayudar a quienes nos rodean a sobrevivir y vivir mejor? [...] La prevención es posible porque los desastres no son inevitables: no

podemos evitar los terremotos o las tormentas, pero sí podemos evitar que se conviertan en desastres. [...] El riesgo no reside en el fenómeno natural, sino en las decisiones humanas previas al evento; por tanto, la prevención es una cuestión de planificación y política pública (Jones, 2021).

El ciclo de los desastres se estructura habitualmente en cuatro fases interrelacionadas: prevención/mitigación, preparación, respuesta y recuperación. La prevención y mitigación engloban las medidas orientadas a reducir la exposición y la vulnerabilidad frente a las amenazas, disminuyendo la probabilidad de daños severos. La preparación abarca todas aquellas acciones desarrolladas con anterioridad al impacto del fenómeno, orientadas a facilitar una respuesta rápida, coordinada y eficaz. En contextos de alta vulnerabilidad, como es el caso de Mozambique, la preparación adquiere un papel especialmente relevante. La respuesta se activa inmediatamente tras el impacto y tiene como objetivo principal salvar vidas y atender las necesidades básicas de la población afectada bajo condiciones de alta incertidumbre. Finalmente, la recuperación incluye los procesos de rehabilitación y reconstrucción, orientados a restablecer las condiciones de vida y, en la medida de lo posible, reducir la vulnerabilidad futura mediante un enfoque de reconstrucción resiliente.



Figura 1.3: Ciclo de la gestión de desastres. Fuente: Naciones Unidas. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), s.f.

En Mozambique, la responsabilidad institucional de la gestión del riesgo de desastres recae sobre el *Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres*, organismo encargado de coordinar las actividades de prevención, preparación y respuesta a nivel nacional, provincial y distrital (Comissão Interministerial da Reforma da Administração Pública, 2021).

El INGD desarrolla acciones de preparación adaptadas a su contexto, en un entorno marcado por amenazas meteorológicas e hídricas recurrentes, una elevada dispersión poblacional y limitaciones estructurales en infraestructuras, en particular de transporte. Estas actividades incluyen la formación comunitaria en reducción del riesgo, el acondicionamiento de infraestructuras críticas, la elaboración de planes de evacuación o la coordinación con autoridades locales y organizaciones humanitarias. Estas acciones buscan fortalecer las capacidades locales y reducir la dependencia de la ayuda externa durante las primeras horas posteriores a un desastre.



(a) Formación comunitaria en una escuela de la provincia de Inhambane (1 de octubre de 2025).

(b) Simulacro de accidente aéreo en el Aeropuerto de Inhambane (16 de octubre de 2025).

Figura 1.4: Ejemplos de actividades del INGD. Fuente: elaboración propia.

Un elemento central de la preparación en la provincia es el Plan de Contingencia Provincial para la época lluviosa y ciclónica (Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres, 2024), que se actualiza periódicamente y define los escenarios de riesgo más probables asociados a ciclones tropicales, inundaciones y sequías. Dicho plan establece los roles y responsabilidades de las distintas instituciones implicadas, los mecanismos de activación de la respuesta y las necesidades estimadas de suministros para distintos niveles de impacto.

1.3. Gestión de la información en Mozambique

Lo que no se mide, no se puede gestionar (Drucker, 1954).

La gestión de la información constituye un elemento transversal a todas las fases del ciclo de la gestión de desastres. La capacidad de anticipar escenarios, planificar intervenciones y coordinar la respuesta depende en gran medida de la disponibilidad de información fiable, actualizada y accesible, tanto sobre los riesgos existentes como sobre los impactos de eventos pasados. Esto resulta especialmente relevante en con-

textos de alta vulnerabilidad y limitación de recursos, como el de Mozambique.

En las fases de prevención y preparación, la información histórica relativa a la ocurrencia de desastres naturales, su localización y sus consecuencias permite identificar patrones recurrentes de riesgo y áreas especialmente expuestas. Esta información resulta fundamental para la elaboración de planes de contingencia, la priorización territorial de recursos y el diseño de estrategias orientadas a reducir la vulnerabilidad. Durante la respuesta, la información operativa es esencial para estimar necesidades, asignar recursos y reducir los tiempos de entrega de ayuda humanitaria bajo condiciones de elevada incertidumbre. Finalmente, en la fase de recuperación, los datos recopilados facilitan la evaluación de daños y pérdidas, así como el diseño de estrategias de reconstrucción resilientes.

En Mozambique, la información relacionada con los desastres naturales se genera y se gestiona a partir de múltiples fuentes, tanto nacionales como internacionales. El *Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres* actúa como organismo coordinador, recopilando datos procedentes de administraciones locales, servicios meteorológicos y organizaciones humanitarias. Paralelamente, organismos internacionales, agencias de Naciones Unidas y organizaciones no gubernamentales generan y mantienen bases de datos que recogen registros históricos de eventos, impactos y necesidades humanitarias, constituyendo una fuente relevante de información secundaria.

No obstante, la gestión de estos datos presenta importantes desafíos. La dispersión de las fuentes, la heterogeneidad en los formatos, la falta de estandarización de variables y la existencia de lagunas temporales o geográficas dificultan la consolidación de una visión integral del riesgo. En muchos casos, los registros históricos se encuentran incompletos, presentan inconsistencias o no permiten una comparación directa entre eventos, lo que limita su utilidad para el análisis cuantitativo y la toma informada de decisiones.

Estas limitaciones se ven agravadas por restricciones técnicas e institucionales, como la escasez de recursos humanos especializados, la limitada digitalización de los sistemas de información y las dificultades de acceso a datos en zonas rurales o afectadas por emergencias. Como consecuencia, las decisiones estratégicas tienden a basarse en información parcial, incrementando la incertidumbre y reduciendo la eficacia de las intervenciones humanitarias.

En este escenario, el fortalecimiento de la gestión de la información es un factor clave para mejorar la planificación y la eficacia de la respuesta ante desastres.

1.4. Objetivos de las prácticas y el trabajo

El presente trabajo pretende contribuir a la reducción del impacto humanitario de los desastres naturales en Mozambique mediante la gestión de la información y el uso de herramientas matemáticas de ayuda a la decisión.

El primer objetivo del trabajo es la consolidación de una base de datos de desastres históricos completa y fiable a nivel nacional, construida a partir de fuentes secundarias contrastadas. Esto permitirá reducir la incertidumbre en la gestión, facilitar el análisis de escenarios y diseñar políticas informadas de preposicionamiento estratégico de ayuda humanitaria.

El segundo objetivo es apoyar la toma de decisiones sobre la localización estratégica de infraestructuras de almacenamiento de ayuda humanitaria en Inhambane, empleando un modelo de optimización. Esto facilitará una primera respuesta rápida, eficaz y económicamente sostenible ante diferentes situaciones de desastre.

El trabajo desarrollado se inscribe en el enfoque internacional de la reducción del riesgo de desastres promovido por Naciones Unidas, en particular en el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015–2030 (Naciones Unidas. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), 2015). Asimismo, se encuentra alineado con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, especialmente con las metas orientadas a la construcción de comunidades resilientes y al fortalecimiento de la acción frente al cambio climático (Naciones Unidas. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (DESA), 2015).

Para la obtención de información fiable se han realizado unas prácticas de tres meses de duración en el *Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres* en el marco del Programa de Voluntariado Internacional de las Universidades Públicas de la Comunidad de Madrid. El trabajo sobre el terreno ha permitido acceder a fuentes primarias no disponibles a través de repositorios públicos y contrastar la consistencia de los datos secundarios existentes. Asimismo, el contacto directo con personal técnico del INGD y otras instituciones ha facilitado enormemente la comprensión del contexto operativo y de las limitaciones reales de la gestión de la información, lo que ha sido esencial para la correcta interpretación y validación de los datos recopilados.

En el capítulo [2] se describe el procesamiento y la unificación de los datos históricos de desastres a nivel nacional. El capítulo [3] expone la metodología empleada para la optimización del preposicionamiento de bienes humanitarios, mientras que en el [4] se detalla la aplicación de dicha metodología a la provincia de Inhambane. En el capítulo [5] constan las conclusiones del proyecto.

2. Construcción de una base de datos nacional de desastres históricos

En este capítulo se detallarán los esfuerzos realizados para mejorar la accesibilidad y la calidad de la información histórica sobre catástrofes en Mozambique.

Como se ha señalado anteriormente, la información disponible se encuentra dispersa en diferentes repositorios, con criterios de registro heterogéneos y niveles de detalle variables. Esto dificulta su uso sistemático para fines analíticos y operativos a escala nacional.

Trabajos previos han puesto de relieve esta problemática y han realizado aportaciones relevantes en el tratamiento de datos históricos de desastres. En particular, los esfuerzos desarrollados por Salgado Lora, 2017 y por Rodríguez-Martínez, 2021 han evidenciado la complejidad inherente a la consolidación de los datos procedentes de fuentes diversas, así como las limitaciones existentes en términos de coherencia, completitud y comparabilidad de los registros. El presente trabajo se apoya en dichas contribuciones, reconociendo su valor como punto de partida, y busca avanzar en la integración y actualización de la información disponible.

La construcción de una base de datos nacional de desastres históricos ha requerido un proceso exhaustivo de recopilación, revisión y tratamiento de información procedente de distintas fuentes secundarias. En concreto, se han empleado como fuentes la base utilizada en el caso de estudio desarrollado por Rodríguez-Martínez, 2021 basada a su vez en la del trabajo de Salgado Lora, 2017, así como registros del Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres, 2025, de la base de datos *DesInventar* (Naciones Unidas. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), 2025) y del *Emergency Events Database* (The International Disaster Database, 2025), considerando en todos los casos sus versiones más recientes. La base de datos fruto de este trabajo se encuentra publicada en el repositorio UCM-HUMLOG Research Group, 2026.

2.1. Cruce de datos

Se ha optado por generar un primer cruzamiento de los datos, registrado como *Cruzamento*. Este incluirá en cada entrada todas las variables propias de cada una de las fuentes. Tras probar otras metodologías, se ha optado por esta, pues permite conservar toda la información posible y facilitar la trazabilidad, la depuración y la detección de inconsistencias entre fuentes.

La base de datos *DesInventar* es la más completa en términos de cantidad de registros, contando con 9.083 a fecha de publicación de este trabajo. La mayoría de los eventos se encuentran desagregados en diferentes entradas en función de la fecha y la localización. Debido a estas características, se ha usado como punto de partida para *Cruzamento*.

Por su parte, *Emergency Events Database* contaba con 164 entradas de eventos, con sus impactos agregados. Para cruzar los datos e incorporarlos en *Cruzamento*, si un evento de *Emergency Events Database* está asociado a una entrada de *DesInventar*, se copia en esa entrada respetando el valor de todas sus variables propias. Obsérvese que un evento de *Emergency Events Database* puede estar asociado a varias entradas desglosadas de *DesInventar* y copiarse en todas. Si no está asociado a ninguna entrada existente, se añade como nueva entrada. Se realiza el mismo procedimiento con las otras dos fuentes.

La base de datos desarrollada por Rodríguez-Martínez, 2021 y Salgado Lora, 2017 era un cruce de información entre *DesInventar* y *Emergency Events Database*. Ha sido usada como referencia metodológica y conservada en el resultado final, pero al haber sido actualizados sustancialmente los registros de ambas bases de datos, ese trabajo ha sido realizado nuevamente.

La base de datos del INGD es una fuente fundamental para tener registros de los propios técnicos que elaboran y emplean información sobre emergencias. Cuenta con 3.680 registros, con diferente nivel de agregación en términos temporales y geográficos. Es la más rica en términos de variables por cada entrada, siguiendo los estándares internacionales al detallar los tipos de impactos y los perfiles de vulnerabilidad de los afectados. Solo cuenta con datos desde 2016 pero a partir de esa fecha es, con diferencia, la más exhaustiva y completa.

Dado el carácter heterogéneo de las fuentes, la construcción de *Cruzamento* no se ha limitado a una simple agregación de registros. Ha sido necesario realizar un

trabajo sistemático de cruzamiento, cotejo y filtrado de la información, abordando inconsistencias en la denominación de eventos, diferencias en las escalas espaciales y temporales, y la ausencia o duplicación de determinados campos.

Uno de los principales desafíos durante el proceso ha sido la identificación y correspondencia de los eventos registrados en las distintas fuentes. La imprecisión en las fechas de ocurrencia, la heterogeneidad en las denominaciones geográficas y la frecuente ausencia de nombres o identificadores únicos de los eventos, dificultan la determinación de si ciertos registros procedentes de fuentes distintas hacen referencia a un mismo desastre o a eventos diferentes.

Para abordar esta problemática, se ha llevado a cabo un proceso cuidadoso de contraste y verificación, combinando evidencias temporales, espaciales y descriptivas, y se ha intentado asignar un identificador único a cada evento consolidado, con el objetivo de mejorar la trazabilidad, coherencia y reutilización futura de la base de datos. Este proceso ha implicado la definición de un conjunto común de variables, la armonización de criterios y la validación cruzada de los datos siempre que ha sido posible.

Se ha utilizado Excel por ser el formato más adecuado para el trabajo y el intercambio de información en un contexto interdisciplinar. Las metodologías empleadas incluyen el uso de filtros por campos, funciones de búsqueda y correspondencia, tablas dinámicas, formato condicional, transformación y concatenación de valores, así como Power Query.

Las herramientas descritas resultan muy útiles pero no suficientes. De esta manera, la validación de la información se ha apoyado en el contraste con fuentes adicionales y en la comunicación directa con personal especializado, lo que ha permitido contextualizar y depurar los datos disponibles. De forma inevitable, parte del proceso ha requerido una revisión manual, utilizando previamente filtros para acotar la información relevante y procediendo después a un análisis detallado de los casos específicos. En este trabajo se han aplicado de manera transversal los conocimientos adquiridos a lo largo de la titulación, integrando competencias analíticas y técnicas permitiendo un enfoque coherente.

Entre los campos que se han creado para homogeneizar la información se encuentran `Antsev_índice` y `Antsev_índice_completo`. El primero es un entero y el segundo un texto que contiene información de todas las fuentes registradas para cada entrada. La creación de índices únicos es fundamental en un proceso de cruce de datos, ya que permite identificar de forma inequívoca cada registro y asegurar la correcta correspondencia entre conjuntos de información procedentes de distintas fuentes. Es-

tos índices reducen ambigüedades, evitan duplicidades y errores de emparejamiento, y facilitan tanto la automatización de las operaciones de cruce como la trazabilidad y validación posterior de los resultados.

Se ha introducido también `Antsev_data`, que incluye la fecha más precisa de cada entrada, cotejando todas las fuentes, a fin de garantizar la exactitud temporal de los registros y facilitar el análisis cronológico de los datos.

Se incorporan dos columnas adicionales, `Antsev_incongruências-Des-y-Emdat` y `Antsev_incongruências-Des-y-Ingd`, destinadas a registrar posibles incongruencias entre fuentes y a documentar el proceso de cruce de datos.

El resultado de este flujo de trabajo es *Cruzamento*, un conjunto de 13.124 entradas de eventos con identificador único, con el máximo nivel de desagregación temporal y espacial que ha permitido el contraste de fuentes y que conserva la información sin alterar de todos los registros originales. Además, se actualizan las fechas con la mayor precisión posible y se señalan las posibles inconsistencias entre registros.

Se realiza posteriormente una selección de las variables más relevantes de *Cruzamento*, dando lugar a *Cruzamento_simplificado*. Este reduce la complejidad del conjunto de datos original, haciendo más accesible la interpretación de los resultados sin perder la esencia de la información obtenida en *Cruzamento*.

Ejemplos de algunas entradas y algunos campos de *Cruzamento_simplificado* se encuentran en el apéndice [A1].

2.2. Agregación de eventos

Se ha procedido a un segundo nivel de tratamiento de los datos, centrado exclusivamente en los eventos de mayor relevancia para Mozambique: inundaciones y ciclones.

La decisión de centrarse exclusivamente en ciclones e inundaciones se fundamenta, en primer lugar, en la mayor disponibilidad de datos históricos asociados a este tipo de eventos. En segundo lugar, se trata de los riesgos naturales que producen mayor impacto humanitario y perturbación de sistemas críticos. Finalmente, ambos fenómenos son de rápida evolución, lo que exige respuestas inmediatas y coordinadas, a diferencia de otros riesgos como las sequías, cuyo desarrollo es progresivo y su gestión involucra dinámicas operativas distintas. Esto será especialmente relevante para el capítulo [4], en el que se estudia el preposicionamiento de ayuda humanitaria como herramienta para hacer frente a este tipo de eventos repentinos.

Este procesamiento analítico de datos, cuyo resultado se conserva en la hoja *Cheias_e_ciclones*, consiste en consolidar múltiples registros asociados a un mismo evento en una única entrada, de manera que cada fila represente un evento individual con sus impactos agregados.

Para llevar a cabo esta agregación se ha seguido una metodología similar a la del cruce de datos. Se han definido criterios de correspondencia basados en la proximidad temporal y espacial de los registros, así como en la similitud de sus descripciones y características. Se han utilizado las fechas más precisas disponibles (`Antsev_data`) y la localización geográfica más detallada de cada evento, cotejando siempre la información entre las diferentes fuentes para garantizar la coherencia y reducir duplicidades.

Primeramente, se han agrupado los eventos de manera preliminar mediante el uso de filtros, funciones de búsqueda, acotaciones condicionales y estrategias de análisis adaptadas a las características de los registros. Esta fase ha requerido un grado significativo de ingenio y criterio analítico, dada la complejidad y dispersión de la información.

Una vez realizadas estas agrupaciones iniciales, se ha efectuado un contraste manual para corroborarlas, apoyándose en conocimientos técnicos sobre desastres y patrones históricos de ocurrencia. Este análisis ha permitido validar la correspondencia entre los registros y garantizar que cada grupo reflejara adecuadamente un evento individual.

Además, se han estudiado estos eventos para incluir otras informaciones relevantes:

- Se ha llevado a cabo un contraste exhaustivo de todas las fuentes utilizadas, con el objetivo de asignar a cada evento la categoría correspondiente de ciclón o inundación. Dada la naturaleza difusa de algunos registros y la heterogeneidad en la clasificación de los desastres, este paso ha resultado fundamental para asegurar la coherencia del conjunto de datos.
- Se han unificado los nombres de las localizaciones a nivel de distritos, homogeneizando la información geográfica y facilitando el análisis espacial de los eventos.
- Se ha establecido una asociación temporal de los registros a nivel trimestral, lo que ha permitido fijar un marco de referencia común para todos los eventos.
- Se ha hecho una agregación cuidadosa del número de afectados, considerando los datos provenientes de todas las fuentes y resolviendo las inconsistencias existentes para garantizar que los valores finales reflejen la magnitud real de los impactos.

Gran parte de estos procedimientos se encuentran documentados de manera preliminar en las hojas de Excel denominadas `Tratamento`, `Listas` y `Map`, las cuales recogen los pasos y ajustes realizados durante el proceso de consolidación y validación de los datos.

El resultado final de este procedimiento es *Cheias_e_ciclones*, un conjunto de 1.330 entradas, correspondientes a un único evento de inundación o ciclón, incluyendo las variables más relevantes previamente seleccionadas en *Cruzamento_simplificado*. Esta agregación integra información previamente fragmentada o contradictoria de distintas fuentes. Resulta especialmente valiosa, ya que permite contar con una visión unificada y coherente de cada desastre, evitando duplicidades y reduciendo la dispersión de información que caracteriza a las fuentes originales.

Las primeras entradas de *Cheias_e_ciclones* se encuentran en el apéndice [A1].

Disponer de los eventos agregados facilita la realización de análisis estadísticos más precisos y comparables, el cálculo de indicadores de riesgo y vulnerabilidad, la identificación de tendencias temporales y espaciales, o la evaluación de impactos sobre la población y los daños materiales.

Otro ejemplo de estas aplicaciones es la información de las políticas de preposicionamiento de ayuda humanitaria. Una adaptación formal de *Cheias_e_ciclones* destinada a aplicar los algoritmos de generación de escenarios descritos en la sección [3.4] se encuentra en *Para_o_modelo*.

En términos generales, la realización de las prácticas *in situ* ha permitido complementar este trabajo mediante el acceso a información adicional y el contraste directo con personal técnico implicado en la generación y uso de los datos. Este intercambio ha contribuido a mejorar la comprensión de los procesos de registro y a identificar limitaciones prácticas que no siempre son evidentes a partir de los repositorios públicos, reforzando la consistencia de la base de datos resultante.

Como resultado, se ha obtenido una base de datos nacional más completa y coherente que las disponibles de forma individual, adecuada para el análisis histórico de desastres y para su uso como soporte en el desarrollo del modelo de preposicionamiento estratégico de ayuda humanitaria. Si bien la base de datos no está exenta de limitaciones, constituye una herramienta útil para reducir la incertidumbre en la planificación y apoyar la toma de decisiones, aspectos que se desarrollarán con mayor detalle en el Capítulo [4].

3. Metodología para la optimización del preposicionamiento de ayuda humanitaria

En las páginas siguientes se justifica la relevancia del preposicionamiento de bienes de emergencia y la utilización de modelos matemáticos de optimización como herramienta para apoyar la toma de decisiones en logística humanitaria. Tras ello, se presenta la estructura y características del problema de localización de almacenes y se describe el modelo de optimización empleado. Finalmente, se expone una metodología para la generación de escenarios de desastres a partir de datos históricos, necesaria para la aplicación del modelo.

3.1. Características e importancia del preposicionamiento informado

El preposicionamiento estratégico de suministros destaca como una herramienta fundamental de la logística humanitaria. Consiste en el almacenamiento anticipado de bienes esenciales como alimentos, kits de refugio, material sanitario o equipos de agua y saneamiento en ubicaciones estratégicas cercanas a las zonas de riesgo, con el fin de minimizar los tiempos de entrega durante la fase de respuesta.

La experiencia operativa es enormemente valiosa y es el mejor criterio para contrastar la pertinencia de cualquier política de gestión. Sin embargo, la complejidad e importancia de estas labores hacen que la planificación basada exclusivamente en la experiencia no esté exenta de limitaciones. La modelización matemática permite una evaluación sistemática de las distintas alternativas de decisión incorporando de manera estructurada variables geográficas, infraestructurales y de demanda bajo distintos escenarios de emergencia, facilitando la toma de decisiones informadas sobre la localización estratégica de almacenes y la asignación de suministros.

La eficacia de esta práctica depende de la disponibilidad de datos precisos sobre

la frecuencia, intensidad y ubicación de eventos pasados, así como de información detallada sobre la infraestructura logística, la accesibilidad de las rutas y la distribución de la población vulnerable.

La disponibilidad de datos precisos y coherentes facilita anticipar necesidades, priorizar recursos y determinar localizaciones estratégicas de manera objetiva y reproducible, convirtiendo al preposicionamiento en una aplicación concreta y tangible de la gestión de la información.

3.2. Especificaciones del problema de localización y preposicionamiento

El principal objetivo es ubicar de manera eficiente almacenes permanentes de ayuda humanitaria, así como dimensionar adecuadamente sus capacidades a lo largo de un determinado horizonte temporal. Se tienen en cuenta simultáneamente la localización de los almacenes, la asignación de suministros y el uso eficiente del presupuesto disponible, considerando tanto la probabilidad como las consecuencias de distintos escenarios de desastre.

Mientras que en la logística empresarial el criterio de desempeño es la eficiencia económica, en la logística humanitaria priman la rapidez y la fiabilidad en la atención a los beneficiarios. No obstante, el coste de las operaciones tiene gran importancia debido a las fuertes limitaciones presupuestarias. De esta manera, se intentará minimizar simultáneamente y considerando todos los escenarios:

- La demanda insatisfecha de bienes humanitarios.
- Los costes de aprovisionamiento y transporte de los suministros, medidos a través de las desviaciones entre el presupuesto planificado y el gasto requerido.

Esta estructura equilibrará la eficiencia económica con la eficacia humanitaria, asegurando que la red logística pueda responder de forma rápida y fiable ante desastres de diversa magnitud, maximizando la resiliencia del territorio.

El horizonte temporal de planificación se considera dividido en etapas (por ejemplo, años), cada una compuesta por varios períodos consecutivos (por ejemplo, estaciones), lo que permite capturar la variabilidad estacional de los riesgos.

Se consideran como decisiones estratégicas la ubicación permanente de los almacenes y la determinación de su capacidad. Estas decisiones se toman en el primer período de cada etapa y se mantienen durante todo el horizonte de planificación.

Por su parte, las decisiones tácticas son los niveles de inventario de bienes en los almacenes y se definen para cada período. Se asume que el nivel de *stock* definido para el siguiente período se recupera con independencia del escenario ocurrido, lo que evita un crecimiento exponencial del árbol de escenarios. Esta adquisición de bienes se realiza en cualquier período del horizonte temporal, y de forma conjunta para todos los almacenes a fin de incrementar la eficiencia.

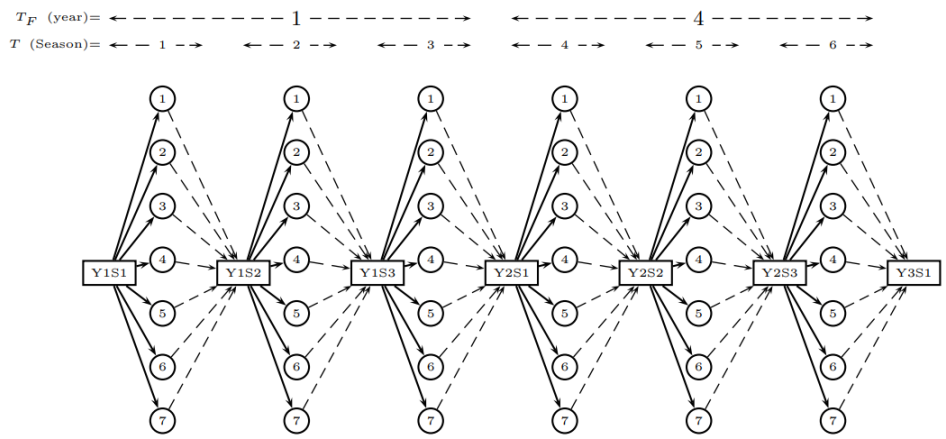


Figura 3.1: Árbol de escenarios independiente por etapas. Fuente: Rodríguez-Martínez, 2021.

En cada período, las decisiones estratégicas son únicas, mientras que las tácticas se ajustan en función del escenario considerado.

Se consideran dos presupuestos diferenciados, uno asociado a las decisiones estratégicas y otro a las tácticas. La asignación de recursos entre estas categorías constituye, a su vez, una decisión que debe optimizar la eficiencia del gasto y minimizar las desviaciones presupuestarias, garantizando que se disponga de recursos suficientes para responder ante eventos de alta severidad.

El territorio se discretiza en un conjunto finito de nodos que actúan como ubicaciones candidatas para los almacenes y como puntos de localización de la demanda en situaciones de desastre.

La red de transporte, a través de la cual se distribuyen los suministros en los distintos escenarios de desastre, se representa mediante las conexiones o arcos entre dichos nodos.

Esta simplificación del territorio como un grafo permite reflejar con realismo la logística de distribución tras la ocurrencia de una calamidad.

Además, ciertos nodos pueden recibir recursos directamente de los proveedores en la fase de respuesta. Esta adquisición de emergencia está limitada por la capacidad de los almacenes de cada nodo, ya que toda la ayuda humanitaria deberá recibirse y gestionarse antes de ser entregada a los beneficiarios.

Se supone un conjunto finito de escenarios de desastre para cada período, definidos por su probabilidad y el número de personas afectadas. Cada escenario puede afectar de forma diferente a los nodos de demanda y a la capacidad de los arcos que los conectan.

Finalmente, se asume que la ocurrencia de desastres en una etapa no altera la probabilidad de los escenarios en etapas posteriores, lo que en términos matemáticos se conoce como independencia de las variables aleatorias asociadas.

3.3. Modelo de localización y preposicionamiento

En este trabajo se adopta directamente la modelización propuesta por Rodríguez-Martínez, 2021, utilizando su enfoque para abordar el problema de localización de infraestructuras destinadas a la preparación ante desastres naturales como un problema de optimización lineal estocástico multietapa, que integra decisiones estratégicas y tácticas bajo incertidumbre. Esta formulación ha sido validada y aplicada a la provincia de Nampula, Mozambique.

A continuación se exponen los elementos principales del modelo de optimización ligeramente adaptados para las necesidades del proyecto. Estas adaptaciones incluyen no considerar la diferenciación entre afectados y desplazados ni la inflación, así como eliminar la limitación del número de almacenes que se pueden habilitar en cada etapa y de la probabilidad de escasez de demanda.

Estos elementos principales ofrecen una visión general de la información requerida para la aplicación del modelo, así como de las decisiones que se pretende obtener a partir de él.

Conjuntos

- T: períodos consecutivos (p. ej., estaciones) a lo largo del horizonte temporal.
- E: etapas (p. ej., años) en las que se particiona el conjunto de períodos, de forma que T^e es el conjunto de períodos consecutivos de la etapa e (p. ej., estaciones de un año), donde $T^e \cap T^{e'} = \emptyset$ para $e \neq e'$ y $T = \bigcup_{e \in E} T^e$.
- Ω: escenarios de emergencia considerados.

- $\Omega^t \subseteq \Omega$: escenarios que pueden darse en el período $t \in T$.
- I: nodos de la red de transporte.
- $I^\omega \subseteq I$: nodos afectados por el escenario $\omega \in \Omega$.
- $\tilde{I} \subseteq I$: nodos capaces de recibir ayuda de emergencia directamente desde los proveedores.
- A: enlaces de transporte existentes (i, j) en la red de desastre, con $i, j \in I$.
- $A^\omega \subseteq A$: enlaces de transporte disponibles, posiblemente con capacidad reducida, en el escenario $\omega \in \Omega$.
- $\Gamma_i^{+\omega}$: conjunto de nodos j tales que $(i, j) \in A^\omega$.
- $\Gamma_i^{-\omega}$: conjunto de nodos j tales que $(j, i) \in A^\omega$.

Parámetros

Parámetros deterministas

- t^e: primer período de la etapa $e \in E$.
- G: consumo unitario de capacidad de almacenamiento por paquete de ayuda, tanto en almacenes como en transporte.
- B_i^e: coste fijo de apertura de la instalación en el nodo i en el período t^e.
- F_i^e: coste lineal asociado al tamaño de la instalación en el nodo i en t^e.
- λ_i^m: tamaño mínimo permitido para la instalación en el nodo i.
- λ_i^M: tamaño máximo permitido para la instalación en el nodo i.
- P: beneficio unitario por paquete de ayuda en *stock* al final del horizonte temporal.
- $\bar{C}^e$: presupuesto anual disponible en la etapa e.
- τ_i: coste de mantenimiento de una instalación, como porcentaje del valor de construcción.
- γ: fracción del *stock* reutilizable en el período siguiente.
- Q_i^t: coste unitario (por paquete de ayuda) de aprovisionamiento no urgente al nodo i en el período t.
- C_i^t: coste unitario (por paquete de ayuda) de aprovisionamiento de emergencia al nodo i en el período t, con $i \in \tilde{I}$.
- ϕ: proporción de capacidad disponible para gestionar suministro de emergencia.

Parámetros estocásticos dependientes del escenario

- W^{ω}: peso o probabilidad del escenario ω en el período t.
- N_a^{ω}: capacidad del enlace $a \in A^{\omega}$ en el escenario ω.
- C_a^{ω}: coste unitario (por paquete de ayuda) de transporte a través del enlace a.
- D_i^{ω}: demanda de paquetes de ayuda en el nodo i bajo el escenario ω.

Para la aplicación del modelo a la situación de la provincia de Inhambane, los parámetros descritos serán estimados en el capítulo [4]; en la sección [4.1] los deterministas y en la sección [4.2] los dependientes de los escenarios de desastre.

Principales variables de decisión

- $\alpha_i^e \in \{0, 1\}$: decisión estratégica, vale 1 si la instalación en el nodo i está operativa en t^e.
- f_i^e: decisión estratégica, capacidad de la instalación en el nodo i disponible en t^e.
- $\hat{s}_i^t$: decisión táctica, nivel de *stock* en el nodo i en el período t.

Las demás variables de decisión, las funciones objetivo, las restricciones del modelo y su descripción se detallan en el apéndice [A2].

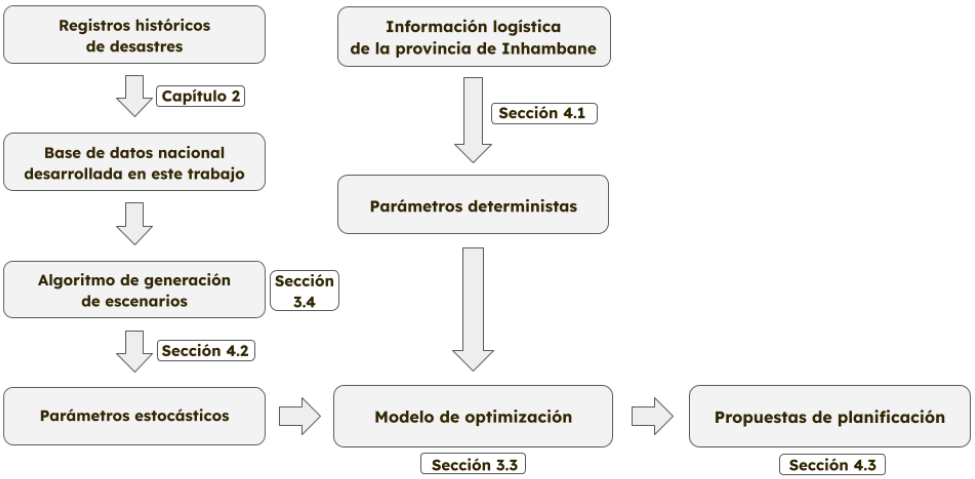


Figura 3.2: Diagrama de flujo del procesamiento de la información recopilada para la optimización del preposicionamiento. Fuente: elaboración propia.

3.4. Metodología de generación de escenarios a partir de información histórica

Una de las hipótesis de la modelización es la consideración de un conjunto finito de escenarios de desastre. Debido a la naturaleza de la programación lineal, esta es una simplificación clave para posibilitar la resolución del problema en términos de tiempo de computación y eficiencia de las soluciones.

Partiendo de datos históricos de desastres, es interesante realizar una transformación de los mismos para generar los escenarios que tendrá en cuenta el modelo de la manera más representativa posible. Aglutinar la máxima cantidad de información en los escenarios facilita la obtención de soluciones más fieles a la realidad. La brillante metodología para hacerlo fue desarrollada originalmente en Rodríguez-Martínez, 2021 y se encuentra detallada en dicho trabajo.

Dado que los registros históricos de los que se dispone son necesariamente escasos, ya que la ocurrencia de desastres es infrecuente, esta información tiende a presentar sesgos e imprecisiones. La metodología fue desarrollada teniendo en cuenta estas limitaciones y pensada para ser aplicada en países en desarrollo, como Mozambique (Rodríguez-Martínez, 2021).

Los escenarios de desastre se caracterizan a partir del número de personas afectadas y su distribución geográfica en diferentes nodos. Cada escenario tiene asociada una probabilidad de ocurrencia para cada estación.

La generación se divide en cinco fases consecutivas, las tres primeras dedicadas a obtener representantes de los desastres, y las dos últimas a combinar estos representantes y reducir el número de casos sin perder información.

Fase 1

Existen desastres de muy diversas magnitudes y es deseable que todos se vean representados en el conjunto de escenarios. Por ello, el primer paso es discretizar estas magnitudes. Se construye un conjunto finito de clases, divididas en función de la gravedad en términos de número de afectados, con una probabilidad asociada a cada una.

Para ello, se emplea un modelo de programación lineal basado en el trabajo de Vitoriano et al., 2000 y Høyland et al., 2003 que resulta efectivo en este contexto. Tiene la capacidad de representar los desastres particularmente disruptivos, evitar escenarios con probabilidades demasiado bajas y obtener escenarios diversos respetando la naturaleza exponencial de las magnitudes de los desastres.

Dicho modelo se basa en maximizar la dispersión del número de afectados entre clases de magnitud, para obtener escenarios lo más variados posibles. Como restricciones, asegura que los momentos estadísticos de hasta tercer orden de la distribución obtenida sean razonablemente parecidos a los de la distribución histórica, fija una probabilidad mínima para cada escenario y una magnitud máxima permitida. Su formulación se explicita en el Apéndice [A3].

Fase 2

Se realiza una asociación difusa de los registros a las clases de magnitud obtenidas en la primera fase, considerando conjuntos trapezoidales difusos. Cada desastre puede asociarse a una o más de ellas con diferente grado de asignación.

Esta fase es especialmente relevante, teniendo en cuenta la cantidad reducida de registros para algunas clases de magnitud.

Fase 3

Para la construcción de escenarios con asignación geográfica se emplea un algoritmo jerárquico aglomerativo, que se ejecuta para cada clase de magnitud y tipo de desastre. Este tipo de algoritmos miden la cercanía entre *clusters* de objetos, y desde un estado inicial en el que cada objeto constituye su propio *cluster*, unen iterativamente los que se encuentran a menor distancia.

Se definen los objetos desastre en función del número de afectados en cada nodo y la localización geográfica de estos. Se construye una función con las propiedades de medida que permita calcular la distancia entre objetos. Para elegir el representante de un *cluster*, se emplea un modelo de optimización que elige el objeto que minimiza la distancia a los demás miembros. Será necesario emplear una heurística para proveer a dicho modelo de optimización de una solución inicial factible.

Fase 4

Se generan nuevos escenarios de desastre como las combinaciones de los escenarios obtenidos anteriormente.

Se estima la probabilidad de cada escenario para cada estación y, asumiendo independencia en la probabilidad de ocurrencia de los eventos, se calcula la probabilidad de cada combinación.

Si no se hubiera realizado la agrupación de escenarios de la fase 2, se obtendrían muchas más combinaciones en esta.

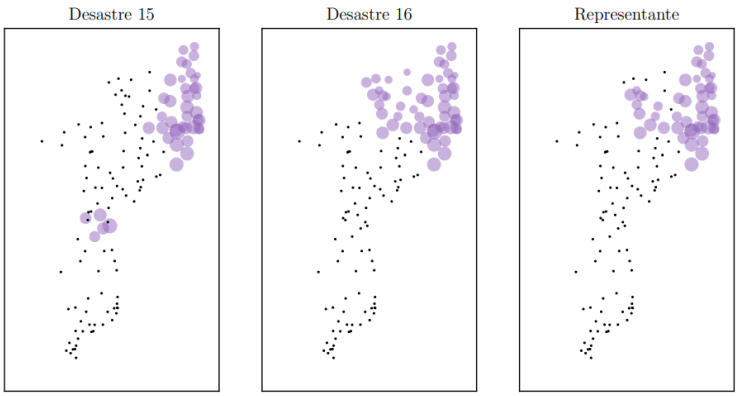


Figura 3.3: Representación de los *clusters* formados por el algoritmo de la tercera fase y el representante de cada uno de ellos. Fuente: Rodríguez-Martínez, 2021.

Fase 5

Cuando la cantidad de escenarios resulta excesiva, se puede emplear esta fase para reducirla, sacrificando la menor cantidad de información posible.

En Rodríguez-Martínez, 2021 se aplica otro algoritmo jerárquico aglomerativo parecido al de la tercera fase sobre el conjunto obtenido anteriormente. Este emplea otra definición de objeto desastre, una nueva función de distancia, un modelo específico para la elección de representantes y su propia heurística para alimentarlo de soluciones iniciales.

Tras esto se obtiene, para cada estación, un conjunto reducido de escenarios de desastre representativos. Estos tienen diferentes magnitudes y probabilidades de ocurrencia en cada estación, representando adecuadamente los casos extremos y agrupando toda la información geográfica posible sin comprometer la capacidad del modelo de localización de almacenes.

4. Preposicionamiento de ayuda humanitaria en Inhambane, Mozambique

En este capítulo se describen las características geográficas de la provincia de Inhambane, así como la información disponible sobre sus capacidades logísticas. También se detalla la aplicación que se ha realizado de la metodología de generación de escenarios de emergencia. Todo ello sirve para dar valores a los parámetros del modelo de optimización descritos en la sección [3.3].

El modelo de optimización se aplica exclusivamente a la provincia de Inhambane y no al conjunto del territorio de Mozambique. Esta decisión responde, por un lado, a limitaciones computacionales y metodológicas, ya que la extensión del modelo a escala nacional daría lugar a dimensiones del problema excesivamente grandes, dificultando su resolución práctica. Por otro lado, la aplicación del modelo requiere información detallada, cuya recopilación solo ha sido posible con el nivel de precisión necesario en la provincia concreta en la que se realizaron las prácticas (Rodríguez-Martínez, 2021).

Se considera un horizonte de planificación de 5 años, un período útil a nivel administrativo porque es para el que se aprueban los presupuestos del INGD. Las subdivisiones temporales son trimestres que empiezan en el período diciembre-enero-febrero. Esto se debe a las características climáticas del territorio, que marcan la ocurrencia de fenómenos extremos. Históricamente, la planificación logística de la respuesta a emergencias se ha venido haciendo en torno a estas divisiones temporales.

4.1. Información logística

A continuación se presenta una recopilación de información logística de la provincia de Inhambane, que constituye una extensión práctica del proceso de gestión de información descrito en el Capítulo [2].

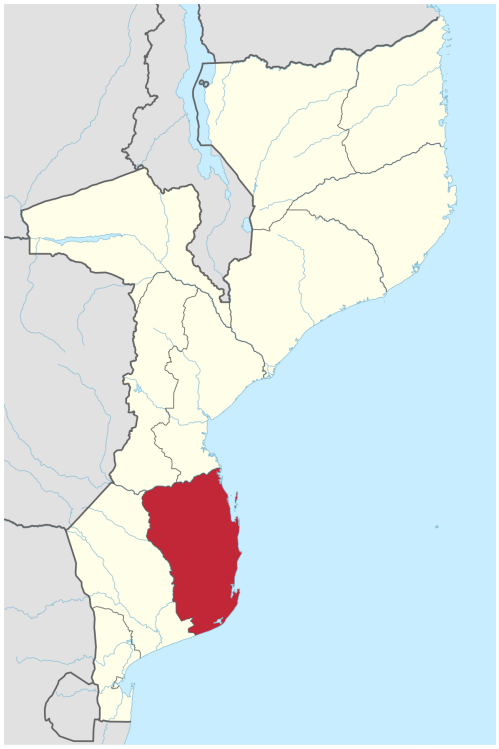


Figura 4.1: Ubicación de Inhambane en Mozambique. Fuente: NordNordWest, 2018.

A partir del tratamiento sistemático y sobre el terreno de diversas fuentes, se ha generado un conjunto de datos estructurados que permite caracterizar de manera global las divisiones temporales, la distribución de asentamientos, la conectividad vial, la capacidad de transporte, los costes de movilización de suministros, la disponibilidad de almacenes, los productos a distribuir y los recursos presupuestarios asociados.

Gran parte de la información presentada en esta sección se ha obtenido a través de entrevistas personales realizadas presencialmente con los actores relevantes.

Este conjunto de datos refleja la realidad operativa de la provincia y sirve como base para la planificación anticipada de operaciones de preposicionamiento de ayuda humanitaria. Esto garantiza que las decisiones logísticas puedan fundamentarse en datos precisos, consistentes y actualizados.

Asentamientos

Aunque existen otras divisiones territoriales de la provincia de Inhambane, como los *postos*, para el caso de estudio se considera solo la división en distritos. Por razones de mantenimiento, suministro eléctrico, seguridad y otras cuestiones operativas, se asume que la instalación de los almacenes de ayuda humanitaria solo se puede producir

en la sede de cada distrito. Todos los asentamientos dentro de los distritos están relativamente bien comunicados con sus sedes, pudiendo estas ejercer de foco logístico. Se toman, por tanto, los 14 distritos como los nodos de la red de transporte.

Conexiones entre asentamientos

Se han procesado a través del Sistema de Información Geográfica QGIS (QGIS Development Team, 2025) datos georreferenciados de la ubicación de las sedes de los distritos, los límites políticos de estos y las capas de carreteras procedentes de Mozambique de Humanitarian Data Exchange, 2025b, que clasifican los tipos de vías en función de la composición de su pavimento.

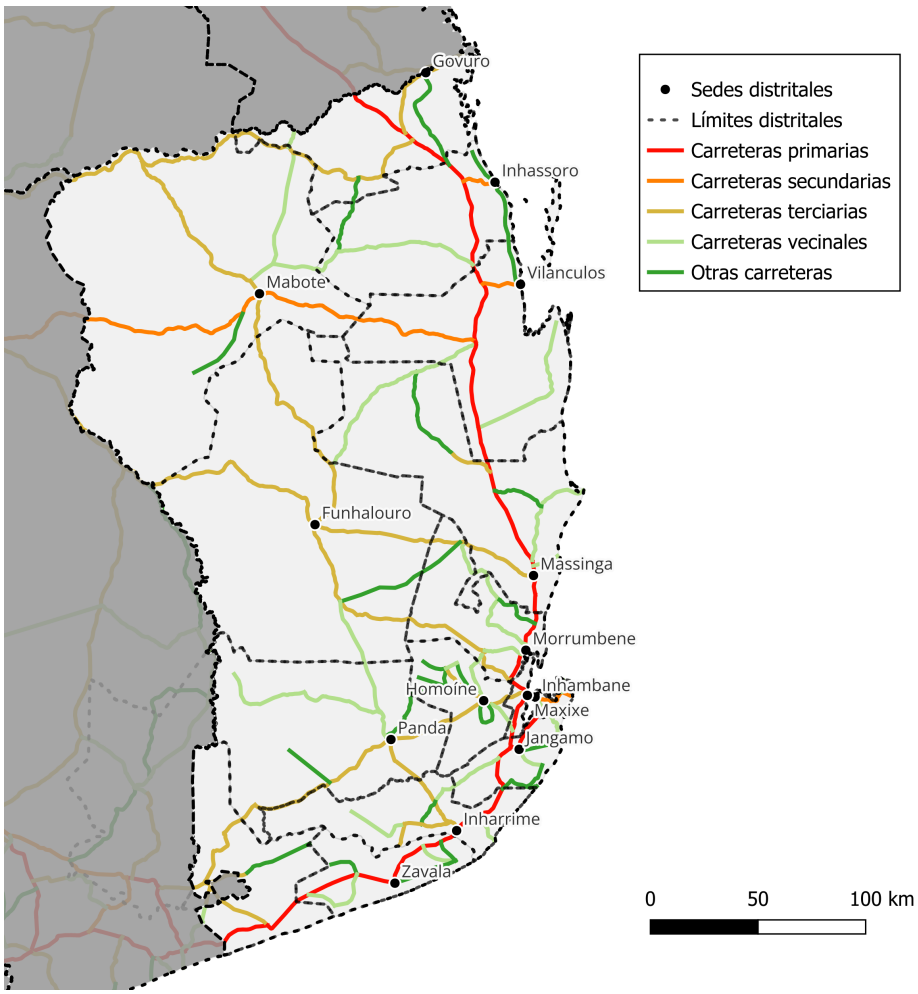


Figura 4.2: Mapa de carreteras, sedes y límites distritales de la provincia de Inhambane, tratado en QGIS (QGIS Development Team, 2025) para generar el grafo de conexiones. Fuentes: Humanitarian Data Exchange, 2025b, elaboración propia.

En operaciones de primera respuesta frente a un desastre las vías marítimas resultan demasiado lentas para el transporte o no están habilitadas para el mismo, como por ejemplo la conexión Inhambane-Maxixe.

Con la información recogida se ha construido un grafo con los 14 nodos de demanda y los 49 arcos que representan las rutas existentes.

Capacidad de las conexiones

La capacidad de las conexiones entre distritos depende del tipo de pavimento de la carretera que los conecta.

Se consideran las operaciones habituales del INGD, en las que se emplean no más de 8 camiones con capacidad de carga de 30 toneladas, que tardan 3 horas en cargarse y en descargarse y circulan de día durante las primeras 72 horas después de la emergencia. La capacidad de la vía, por tanto, viene dada por

$$\text{capacidad(tramo) t} = 8\,\text{camiones} \cdot 30\,\text{t} \cdot \left\lfloor \frac{3\,\text{días} \cdot 10\,\text{h}}{6\text{h} + 2 \cdot \text{tiempo de recorrido(tramo) h}} \right\rfloor$$

y el tiempo de recorrido ha sido calculado como

$$\text{tiempo de recorrido(tramo) h} = \sum_{\text{subtramos}} \frac{\text{distancia(subtramo) km}}{\text{velocidad máxima permitida(subtramo) km/h}}$$

considerándose una velocidad de 60 km/h para las vías de cemento, 40 km/h para las de grava, 25 km/h para las carreteras terciarias de tierra y 20 km/h para los caminos de tierra.

En situaciones de desastre, la capacidad de un tramo se puede ver drásticamente afectada si este cruza un río desbordado. Para estudiar esos casos se han utilizado las bases de datos de ríos y arroyos de Mozambique proporcionadas por el Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação, 2025, de Regional Centre for Mapping of Resources for Development, s.f. y de Humanitarian Data Exchange, 2025a. Según el Delegado Provincial del *Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação* (entrevista personal, 29 de septiembre de 2025) los cursos hídricos han cambiado mucho en los últimos años debido al cambio climático y la erosión del terreno provocada por las lluvias más fuertes, por lo que solamente conviene considerar los datos geográficos más recientes.

La capacidad considerada en esas situaciones viene dada por

$$\text{capacidad_reducida(vía, escenario) t} =$$
$$= \text{capacidad_habitual(vía)} \cdot \text{factor_magnitud(escenario)} \cdot \text{factor_pavimento(vía) t}$$

siendo

$$\text{factor_magnitud(escenario)} = \begin{cases} 0.9 & \text{si número de afectados} \leq 50,000 \\ 0.75 & \text{si } 50,000 < \text{número de afectados} \leq 500,000 \\ 0.5 & \text{si } 500,000 < \text{número de afectados} \leq 1,000,000 \\ 0.25 & \text{si } 1,000,000 < \text{número de afectados} \leq 2,000,000 \\ 0 & \text{si número de afectados} > 2,000,000 \end{cases}$$

$$\text{factor_pavimento(vía)} = \begin{cases} 0{,}9 & \text{si es una carretera principal, pavimentada con asfalto} \\ 0{,}8 & \text{si es una carretera secundaria, pavimentada con grava} \\ 0{,}65 & \text{si es una carretera terciaria, de barro} \\ 0{,}5 & \text{si es un camino, de barro} \\ 0{,}4 & \text{para otras vías} \end{cases}$$

Costes de transporte

Con respecto a las restricciones geográficas para el preposicionamiento y el abastecimiento en la fase de preparación, se asume que todo el material que nutre los almacenes se transporta desde la capital del país, Maputo, que se encuentra 500 km al sur. Se considera la opción de abastecimiento más rentable para cada almacén. Esta puede ser la ruta más corta por carretera o barco desde Maputo.

Según el Delegado Provincial del *Instituto de Transporte Marítimo* (entrevista personal, 9 de octubre de 2025), la provincia de Inhambane cuenta con cuatro puertos que históricamente han recibido carga durante operaciones relacionadas con ayuda humanitaria y desastres, sitos en las ciudades de Inhambane, Maxixe, Vilanculos e Inhassoro.

Se ha considerado una primera estimación del coste de transporte terrestre por tonelada y kilómetro para la provincia de Nampula en 2021 (Rodríguez-Martínez, 2021). Se ha producido un incremento del precio del combustible desde entonces (Global Petrol Prices, s.f.), aunque es más barato en Inhambane que en Nampula. En una operación grande los costes asociados al transporte son del orden de un tercio del total. La variación del IPC desde 2021, especialmente en lo tocante a transportes,

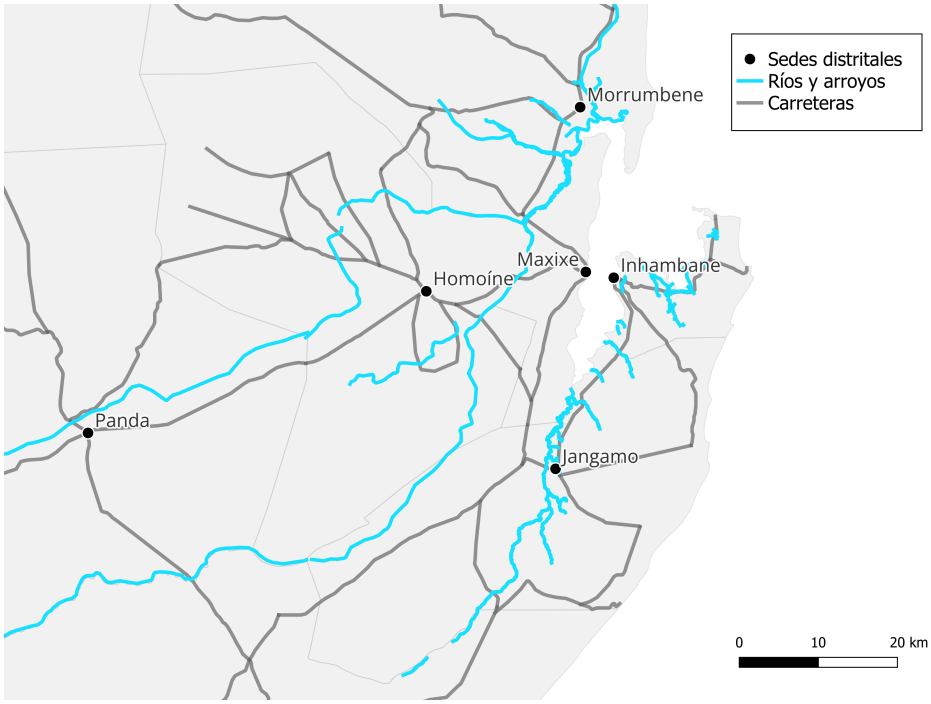


Figura 4.3: Sección de mapa de carreteras y cursos hídricos, tratado en QGIS (QGIS Development Team, 2025) para estudiar las intersecciones entre ambos. Fuentes: Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação, 2025, Regional Centre for Mapping of Resources for Development, s.f. Humanitarian Data Exchange, 2025a, elaboración propia.

es despreciable (The Global Economy, s.f.). Con esto, se toma un coste unitario de $0,17801 \cdot (1 + (0,35 \cdot 0,3)) \approx 0,19670$ USD/km-t. Dicho coste unitario es multiplicado por diferentes factores en función del tipo de pavimento de la vía utilizada.

Con respecto al transporte por barco, se puede enmarcar en el conjunto de operaciones *Short Sea Shipping*, por las que Mozambique está apostando como una opción rentable económicamente, ecológica y sostenible (Santos y Santos, 2025, Alcalde, 2019). La mayoría de estudios realizados sobre los costes unitarios de transporte marítimo consideran largas distancias (Sander van der Meulen et al., 2023), debido a que los datos que provee la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo al respecto (Naciones Unidas. Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD), s.f.) no están desglosados en función de la dimensión de las operaciones. Sin embargo, los precios operativos para *Short Sea Shipping* son significativamente mayores que los del transporte marítimo de larga distancia. Teniendo en cuenta datos de rutas parecidas (Xue-Bin Zheng, Yul-Seong Kim and Young-Ran Shin, 2021) se toma una media de 0,05 USD/km-t.

Para la estimación del precio de adquisición de bienes y transporte de los mismos en una situación de emergencia, que puede hacerse desde diversos lugares tanto internos



Figura 4.4: Destrucción de un tramo de la carretera nacional N-1 a la altura de Manhiça el 20 de enero de 2026. Supuso la incomunicación de las provincias de Gaza e Inhambane con Maputo hasta el 28 de enero de 2026. Fuente: *Administração Nacional de Estradas*.

como externos a la provincia, se asume que este es tres veces más alto que si se hubiese adquirido de forma anticipada (Rodríguez-Martínez, 2021).

Ayuda externa durante la fase de respuesta

Se consideran todas las vías de suministro externas a la provincia en su conjunto durante una situación de respuesta ante una emergencia. Se asume que aquellos distritos que estén conectados por alguna de estas vías y cuenten con almacenes, pueden operar al 500 % de la capacidad de estos (Rodríguez-Martínez, 2021).

El transporte marítimo, muy eficiente y rentable durante la fase de preparación, no se considera para la fase de respuesta debido a su lentitud.

Con respecto a la ayuda aérea en grandes cantidades, se contemplan los aeropuertos de Inhambane y Vilanculos. Según la Dirección de Seguridad del Aeropuerto de Inhambane (entrevista personal, 7 de octubre de 2025), este no cuenta con iluminación en las pistas, ni almacenes o muelles de carga, y solo hay una plataforma de estacionamiento, con lo que podría operar aproximadamente 8 vuelos diarios si fuera necesario. Las pistas aceptan aviones de no más de 30 toneladas, que podrían llevar

no más de 10 toneladas de carga. El aeropuerto de Vilanculos, por su lado, cuenta con 4 *aprons* e iluminación en las pistas, con lo que podría operar las 24 horas, y tiene muelles de carga. Se considera que el primero puede recibir un total de $3 \cdot 8 \cdot 10 = 240\,\mathrm{t}$ y el segundo unas 8 veces más (Logistics Cluster, s.f.-a).

Si bien todos los distritos cuentan con aeródromos pequeños, el estado de las pistas de tierra de estos es incierto y variable. Repartir ayuda directamente con aviones de carga no suele ser operativo en esos lugares. Hacerlo con helicópteros es más viable, pero depende de la cantidad disponible de ellos. No es extraño que en la respuesta a una emergencia se compagine su labor de rescate con el transporte de mercancías. Cada uno de estos aparatos carga típicamente de 0,3 t a 0,5 t y pueden realizar de 2 a 4 desplazamientos dentro de la provincia durante un día, dependiendo de la distancia del trayecto. Teniendo en cuenta su limitada capacidad logística, no son considerados en la modelización.

Almacenes

Existen dos almacenes fijos en el distrito de Inhambane cidade. Según el personal encargado del mantenimiento de los mismos (entrevista personal, 13 de octubre de 2025) tienen una estructura recubierta de chapa de 45m×13m×4m y pueden albergar en torno a 2.500 toneladas, debido a que no se cuenta con la maquinaria apropiada para operar carga almacenada en altura. Uno de ellos se encuentra inoperativo por los daños sufridos durante un temporal. Se aplican los costes de su reparación como costes de habilitación en Inhambane cidade.

Según Mohamed Razak, *Supply Chain Officer* del Programa Mundial de Alimentos en Mozambique (entrevista personal, 18 de septiembre de 2025) hay ubicados, además, un par de unidades de almacenamiento móvil (MSU) en Vilanculos y otro par en Funhalouro. Estas presentan una estructura de aluminio cubierta por lonas de 32m×10m×5,5m y tienen 250 toneladas de capacidad cada una, ya que tampoco permiten operar en altura (Naciones Unidas. Programa Mundial de Alimentos (WFP), 2020), (Logistics Cluster, s.f.-b). Se asume que se pueden instalar hasta veinte de estos almacenes por cada distrito distinto de Inhambane cidade.

De acuerdo con las necesidades del INGD, no se impone ninguna limitación en términos de cantidad de almacenes que se pueden habilitar en cada período.

Se dispone de información según la cual los costes de instalación rondaron los 180.000 USD para el almacén de Inhambane y se estima en 60.000 USD los de la reparación del mismo. Para cada MSU se consideran

$$15.000 + 2 \cdot \text{coste_de_abastecimiento_y_transporte(distrito)} + 100\,\mathrm{USD}$$



(a) Almacén fijo en Inhambane cidade.



(b) MSU en Vilanculos.

Figura 4.5: Tipos de almacenes para primera respuesta en la provincia de Inhambane. Fuente: elaboración propia.

teniendo en cuenta el precio de los materiales, el transporte de los mismos y la mano de obra (Naciones Unidas. Programa Mundial de Alimentos (WFP), 2020). Se establecen unos costes de mantenimiento anuales, que incluyen gestión, reposición y seguridad, del 8 % del coste de instalación de cada almacén (Rodríguez-Martínez, 2021).

Productos de socorro

Adaptando el modelo a las necesidades del INGD, se contemplarán paquetes de ayuda que tengan en cuenta un promedio de las necesidades habituales en situaciones de respuesta. Según informan desde el propio instituto, el 60 % de los bienes que se reparten en estas operaciones son alimentarios y, del resto, la gran mayoría son de socorro. Aproximadamente el 30 % de los desastres produce pérdida de viviendas, lo que requiere una atención específica y significativamente costosa en términos económicos, de tamaño y peso.

Teniendo en cuenta estas proporciones, estimaciones previas para la provincia de Nampula (Rodríguez-Martínez, 2021) y las especificaciones de Sphere Association, 2018, se asume que por cada 1.000 afectados se requieren 80 toneladas de ayuda humanitaria, con un precio promedio de 600 USD por tonelada (excluyendo transporte y manipulación) y un porcentaje de caducidad del 0,82 %.

Presupuesto

Según responsables del INGD (entrevista personal, 10 de octubre de 2025), en 2024 se invirtieron en la provincia de Inhambane en torno a 20.000 USD para operaciones de preposicionamiento y reparto de ayuda humanitaria en situaciones de desastre, sin contar el soporte internacional. Durante ese período no se habilitó ninguna infraestructura de almacenamiento. Para simplificar el problema, se asume que el presupuesto anual se ajusta a la inflación.



(a) Sacos de arroz.



(b) Tiendas de campaña, letrinas móviles, menaje, chalecos salvavidas, cubos, variedad de herramientas.

Figura 4.6: Algunos de los bienes almacenados en Inhambane cidade. Fuente: elaboración propia.

4.2. Generación de escenarios de desastre

El proceso de generación de escenarios de emergencia destinado a alimentar el modelo para el estudio del preposicionamiento en la provincia de Inhambane sigue la metodología descrita en la sección [3.4] de este trabajo.

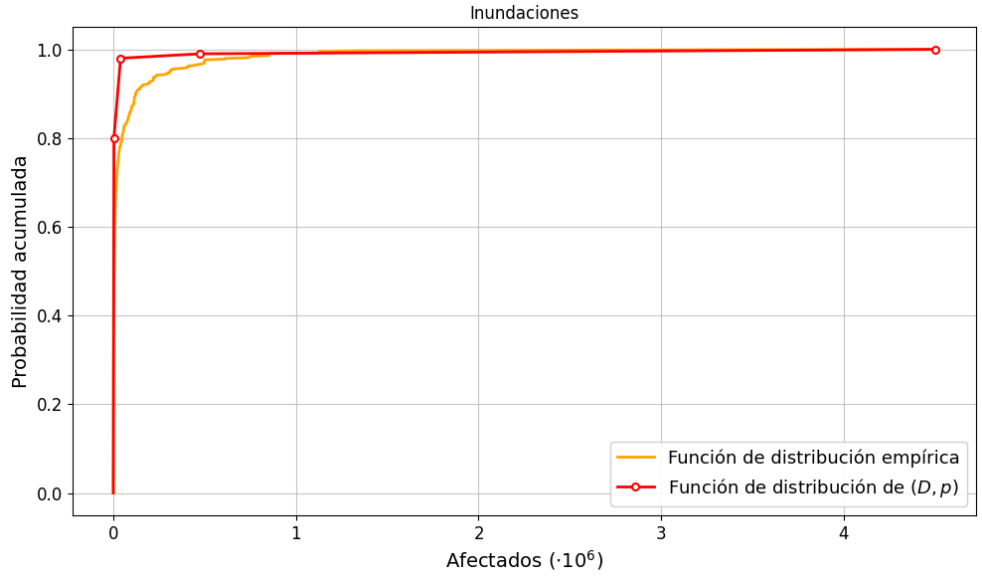
Se parte de la base de datos cuya elaboración se detalla en la sección [2.2], preparada para aplicar los algoritmos desarrollados en Rodríguez-Martínez, 2021.

Para la primera fase, se discretizan en cuatro categorías las magnitudes de las inundaciones y las de los ciclones.

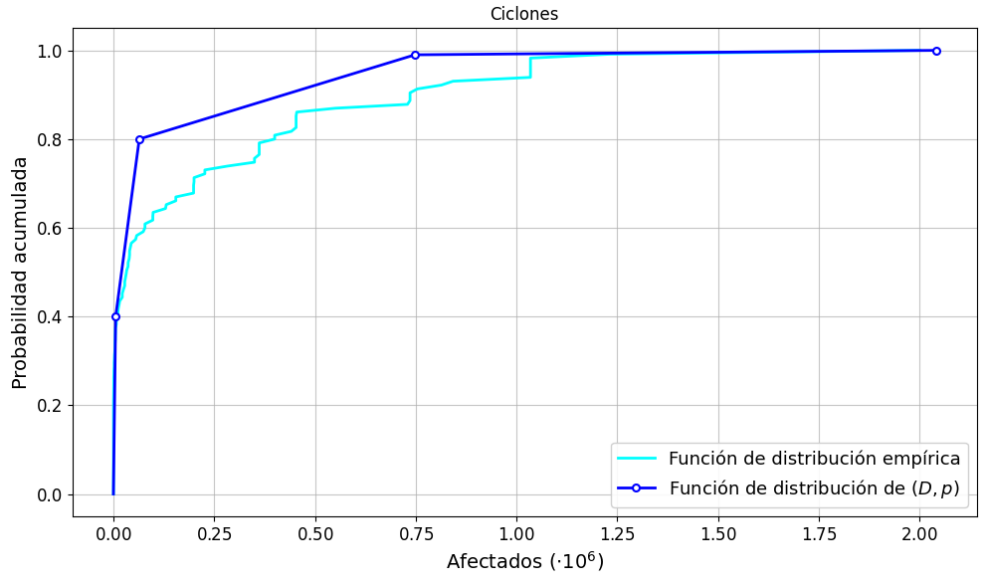
Se consideran solamente los eventos con un mínimo de 50 afectados registrados, pues a partir de este umbral se puede suponer que son susceptibles de intervención institucional. Un total de 753 registros cumplen esta propiedad.

Además, se impone que la categoría de mayor magnitud debe representar, por lo menos, las dimensiones del peor desastre registrado. Esta decisión responde a un enfoque basado en períodos de retorno, en el que las clases de magnitud deben abarcar eventos extremos de muy baja probabilidad pero alto impacto. Asimismo, en un contexto de cambio climático, la no estacionariedad de los procesos naturales incrementa la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos y altera los períodos de retorno históricos.

A continuación se muestra la representación de las distribuciones de los escenarios de demanda considerados.



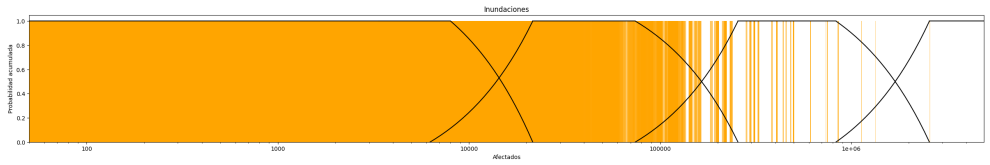
(a) Inundaciones.



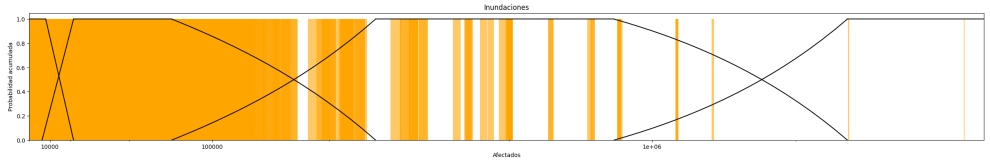
(b) Ciclones.

Figura 4.7: Comparación entre la función de distribución empírica y la función de distribución de los escenarios de demanda global. Fuente: elaboración propia. Código adaptado de Rodríguez-Martínez, 2021.

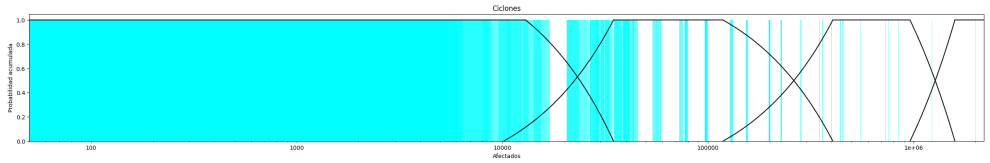
Se aplica la metodología descrita para la asignación difusa de los eventos históricos a los escenarios obtenidos. Dicha asignación se representa a continuación.



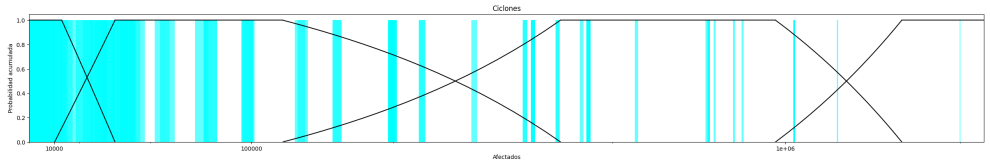
(a) Inundaciones con el eje x en escala logarítmica.



(b) Inundaciones con el eje x en escala seno hiperbólico.



(c) Ciclones con el eje x en escala logarítmica.



(d) Ciclones con el eje x en escala seno hiperbólico.

Figura 4.8: Asignación difusa de los casos a los escenarios. Los registros históricos están representados por las barras verticales y el grado de pertenencia a cada conjunto difuso por el eje y. Fuente: elaboración propia. Código adaptado de Rodríguez-Martínez, 2021.

Para la generación de escenarios localizados, se parte de los registros de los que se tiene información geográfica precisa, que son 688 de los 753 empleados con anterioridad. Mediante la aplicación del algoritmo jerárquico aglomerativo de la fase 3 y las combinaciones frecuentistas de la fase 4 se obtienen dos casos de estudio. El primero tiene un conjunto de 115 escenarios, de los cuales 30 azotan total o parcialmente a la provincia de Inhambane. Se obtiene al considerar como distancia mínima entre escenarios $\Psi = 1{,}1$. El segundo consta de 227 escenarios, con distancia mínima entre ellos $\Psi = 1{,}15$, y de los cuales 56 afectan a la provincia.

La cantidad de escenarios de ambos casos de estudio da lugar a unas dimensiones asumibles del problema y del modelo de optimización, por lo que no es necesario aplicar la fase 5 para la reducción de escenarios.

Al realizar una generación de escenarios a nivel nacional y después seleccionar solamente aquellos que afectan a una provincia, se deben normalizar las probabilidades asociadas a cada uno. Otra metodología que se podría aplicar para estudiar la sensibilidad del modelo sería realizar primero una selección de los eventos que involucran

a Inhambane y después aplicar el proceso de generación de escenarios a partir de los escogidos.

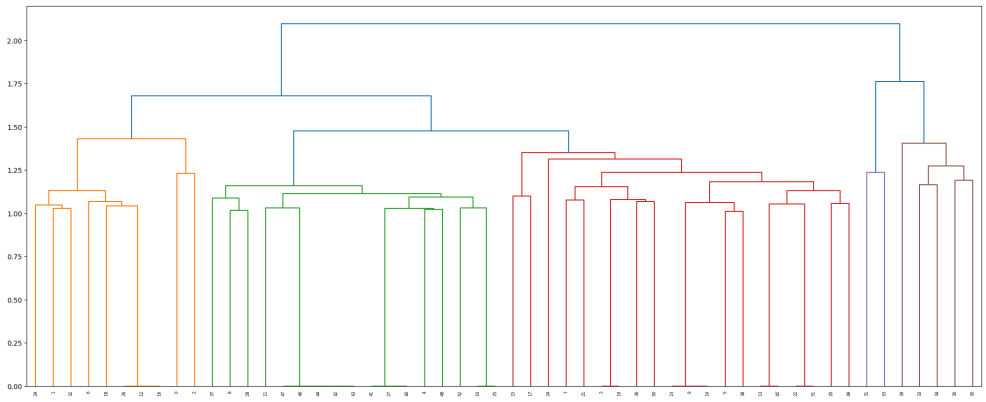


Figura 4.9: Dendrograma de la generación de escenarios geográficos, para la segunda clase de magnitud de inundaciones. Casos en el eje x y distancia entre ellos en el eje y. Fuente: elaboración propia. Código adaptado de Rodríguez-Martínez, 2021.

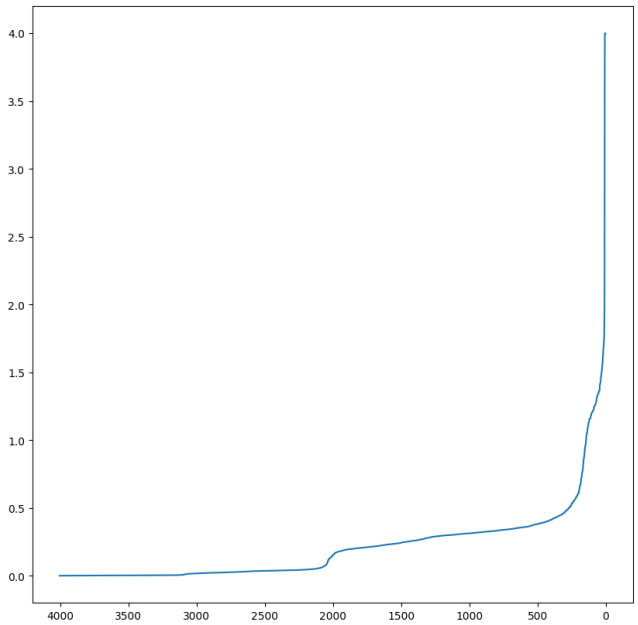


Figura 4.10: Evolución del número de escenarios obtenidos (eje x) en función de la distancia mínima entre ellos (eje y). Fuente: elaboración propia. Código adaptado de Rodríguez-Martínez, 2021.

De esta manera, se obtiene el conjunto finito de escenarios necesario para la aplicación del modelo. Todo escenario está caracterizado por su probabilidad de ocurrencia en cada estación, la demanda humanitaria en cada distrito y las vías de transporte afectadas.

4.3. Resultados de la optimización

Dimensiones y tiempos de cómputo

Las dimensiones del problema, antes de las simplificaciones que realiza el algoritmo de optimización, son 67.590 restricciones, 68.280 variables, en torno a 251.000 valores no nulos y 75 variables binarias, para el caso de estudio con 30 escenarios de emergencia. Para el caso con 56 escenarios, estas ascienden a 125.570 restricciones, 127.040 variables, en torno a 467.000 valores no nulos y las mismas 75 variables binarias.

La programación del modelo de optimización se ha realizado con GAMS y CPLEX en su versión 49.6.1 (GAMS Development Corporation, 2025), para ejecutarlo en un equipo con procesador de 2,3 GHz, 16 GB de RAM y sistema operativo Windows 11.

Se ha utilizado como criterio de parada del algoritmo la obtención de soluciones a distancia relativa del óptimo menor al 1 %.

Bajo estas condiciones, el tiempo de cómputo se mantiene en el orden de los minutos para todas las instancias analizadas.

Sin embargo, al comparar las ejecuciones con el caso de estudio de 30 escenarios y las realizadas con el de 56, se observa un incremento en los tiempos de resolución en este último, debido al mayor tamaño del modelo.

Se ha observado que un incremento del presupuesto en determinados rangos amplía el conjunto de soluciones factibles, lo que se traduce en un aumento de los tiempos de resolución. Cuando el presupuesto es muy restrictivo o, por el contrario, muy holgado, el modelo converge rápidamente hacia la solución óptima. Sin embargo, en intervalos presupuestarios intermedios, el tiempo de resolución se incrementa debido a la mayor complejidad del espacio de decisión y al número más elevado de alternativas a evaluar.

Comportamiento general del modelo

Se verifica la programación del modelo mediante la realización de distintas ejecuciones y el análisis de los valores de las variables de salida. Su comportamiento es coherente en relación a su formulación. El modelo persigue correctamente la optimización de la función objetivo definida, sin violar las restricciones de capacidad, presupuesto o balance de flujos.

Las soluciones ofrecidas involucran almacenamiento de *stock* en aquellos nodos donde se decide la construcción de almacenes y anticipa la reposición de suministros

antes de los períodos de mayor demanda. Asimismo, la ayuda es transportada a través de las rutas más eficientes desde los nodos con capacidad de almacenamiento hacia los puntos de demanda y se incorpora ayuda externa únicamente cuando las condiciones del escenario lo requieren. Todo ello se realiza ejecutando el gasto completo del presupuesto disponible.

Además, presenta un comportamiento estable y consecuente ante los cambios de las condiciones iniciales del problema, observándose patrones repetidos entre ejecuciones similares.

Resultados

A continuación se exponen los resultados de alimentar el modelo con los datos obtenidos en la sección [4.1] y los conjuntos de escenarios generados en la sección [4.2] y se justifica su validez y pertinencia para el problema que representa.

La incorporación de un enfoque multicriterio resulta fundamental en este trabajo, ya que los objetivos analizados presentan una relación de compromiso que no puede resolverse adecuadamente mediante una única función objetivo. Exigir un mayor nivel de ayuda servida implica de forma evidente un incremento de los costes y, por tanto, de las desviaciones presupuestarias asociadas. Optimizar exclusivamente uno de estos criterios conduce inevitablemente a deterioros significativos en el otro, ocultando soluciones intermedias potencialmente más equilibradas y operativas en un contexto humanitario.

La frontera de Pareto permite caracterizar el conjunto de soluciones eficientes de un problema multicriterio. Una solución se considera Pareto-óptima cuando no es posible mejorar uno de los objetivos sin empeorar el otro. La frontera de Pareto recoge, por tanto, todas las alternativas no dominadas, proporcionando una visión estructurada de los compromisos existentes entre el nivel de ayuda servida y el coste. En la práctica, cada punto del conjunto representa una política operativa plausible, en función de la importancia relativa otorgada a cada criterio.

Uno de los métodos más robustos para la obtención de dicha frontera es el método de las ε-restricciones, que consiste en optimizar uno de los objetivos mientras el otro se incorpora al modelo como restricciones acotadas por valores ε, que se varían de forma sistemática. En particular, se aplica el método AUGMECON2 (Mavrotas y Florios, 2013) para la obtención sistemática y computacionalmente eficiente de la frontera de Pareto.

Cuando se le da poca importancia a las desviaciones presupuestarias, el modelo tiende a cubrir la demanda priorizando la compra intensiva de ayuda de emergencia

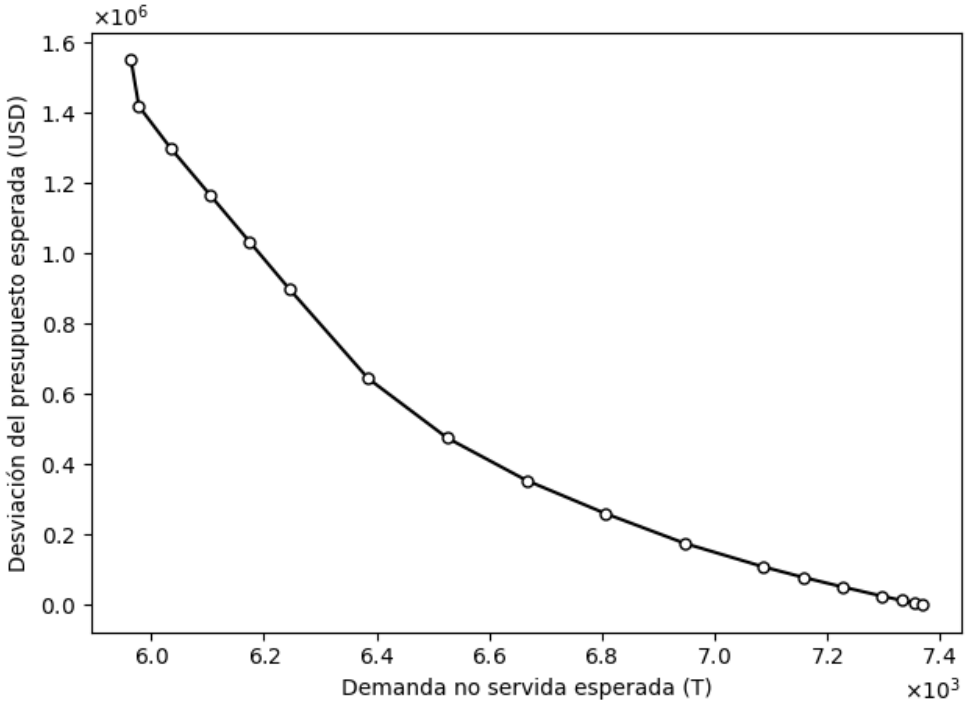


Figura 4.11: Aproximación de la frontera de Pareto con los datos estimados y 30 escenarios de emergencia. Fuentes: Rodríguez-Martínez, 2021, Mavrotas y Florios, 2013, elaboración propia.

y el uso de transporte intraprovincial en trayectos de larga distancia, independientemente de su elevado coste. En cambio, al incorporar explícitamente las desviaciones presupuestarias como criterio de decisión, estas políticas se restringen a aquellos casos en los que resultan estrictamente necesarias. Esto favorece soluciones logísticamente más eficientes y coherentes con las limitaciones presupuestarias.

Además, se observa que para cualquier ponderación de las funciones objetivo, se invierte el presupuesto disponible en habilitar 11 MSUs más en Vilanculos en el primer período de la planificación.

Esta localización resulta pertinente por la capacidad de recibir y operar ayuda externa a través de su aeropuerto internacional. Además, su ubicación septentrional dentro de la provincia es estratégicamente interesante, debido a la cercanía a los distritos más desconectados de la provincia. Inhambane cidade cuenta con 2.500 toneladas de almacenamiento para abastecer el sur de la provincia.

El hecho de habilitar los almacenes al principio de la planificación se debe a que disponer de capacidad logística y *stock* desde las primeras etapas de la respuesta re-

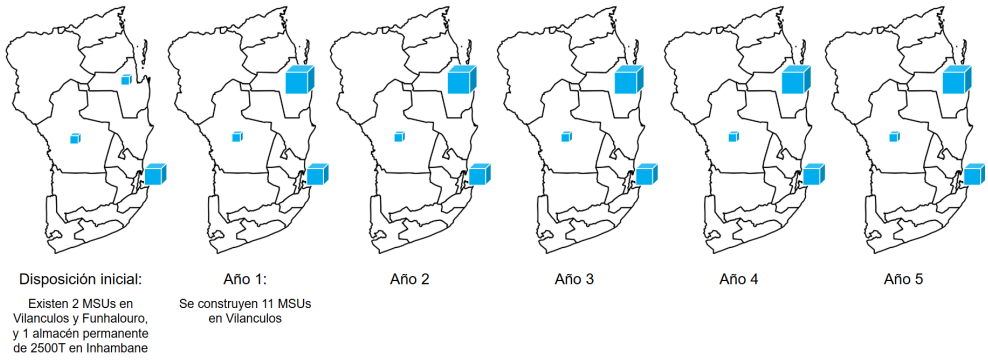


Figura 4.12: Política de planificación sugerida por el modelo con los datos estimados y 30 escenarios de emergencia, para cualquier punto de la Frontera de Pareto. Fuentes: Rodríguez-Martínez, 2021, elaboración propia.

duce la dependencia de envíos de emergencia más costosos y aumenta la flexibilidad del sistema para absorber picos de demanda en los períodos iniciales.

La invariancia frente a distintas ponderaciones de los objetivos sugiere que aumentar la capacidad de este nodo estratégico es una decisión robusta ante la incertidumbre.

Análisis de sensibilidad

A continuación se describe cómo se comporta la distribución de los recursos al variar los distintos parámetros del modelo.

1. Si se supone que no existe ningún almacén operativo, estos se habilitan en Inhambane y Vilanculos, por su proximidad a los aeropuertos; y en algunas zonas más inaccesibles como Funhalouro, debido precisamente a su desconexión de la red de transporte. En este sentido, los resultados del modelo muestran una buena concordancia con la experiencia práctica, validándose mutuamente.

2. Cuando se eliminan totalmente las restricciones de transporte, el modelo tiende a asignar todos los recursos a Inhambane. Cuando, por el contrario, se limita la capacidad de las vías en situaciones de desastre, el modelo tiende a habilitar mayor número de almacenes y preposicionar más *stock* en los distritos más incomunicados. Si esta capacidad se reduce a un 50 %, el modelo propone aumentar la cantidad de almacenes de Funhalouro y no solo la de Vilanculos. Esto refleja la influencia crítica de la conectividad sobre la distribución eficiente.

3. En general, un aumento del presupuesto incrementa significativamente la capacidad de los almacenes en Vilanculos y, en menor medida, en Funhalouro, mientras que en Inhambane los cambios son más limitados. Si se permite un presupuesto

aún más elevado, el modelo tiende a distribuir los recursos de manera más amplia entre todos los nodos.

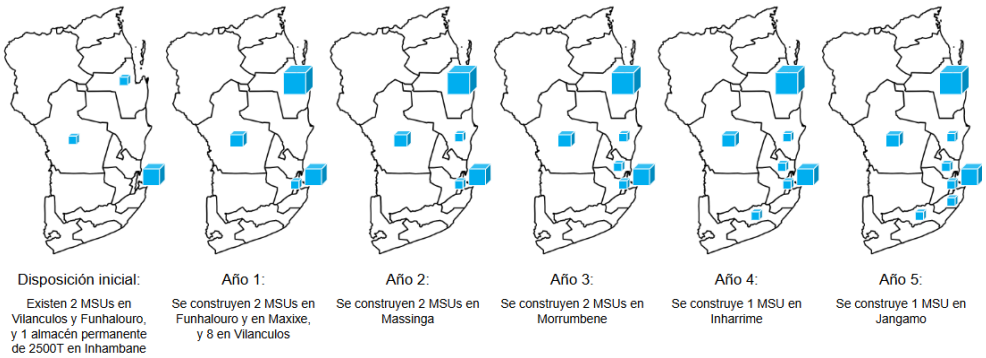


Figura 4.13: Política de planificación sugerida por el modelo con los datos estimados, presupuesto anual de 80.000 USD, capacidad de las vías reducida un 50 % sobre lo estimado en situaciones de desastre y 30 escenarios de emergencia. Fuentes: Rodríguez-Martínez, 2021, elaboración propia.

4. Otro factor clave estudiado es la distribución del presupuesto. Si se supone que en lugar de estar distribuido homogéneamente a lo largo de los 5 años de planificación se puede disponer de 60.000 USD el primer año e invertir 15.000 USD en los demás, el modelo aconseja la habilitación de un par de MSUs en Maxixe, con capacidades distintas en función de la importancia dada a la cobertura de demanda sobre el ahorro. Si se aumenta el presupuesto a 80.000 USD el primer año y 20.000 USD durante los demás, además se habilita otro almacén en Massinga.

   Estas ubicaciones son particularmente estratégicas debido a que se encuentran en la intersección entre la carretera nacional N-1 y las vías que conectan los distritos más aislados.

   Este estudio refuerza la hipótesis de que una asignación eficiente del presupuesto a lo largo del horizonte de planificación, con una inversión concentrada en las primeras etapas, resulta clave para disponer de capacidad de almacenamiento y existencias desde el inicio.

5. En general, se ha observado que los resultados y las políticas de localización muestran diferencias mínimas entre el caso de 30 escenarios y el de 56.

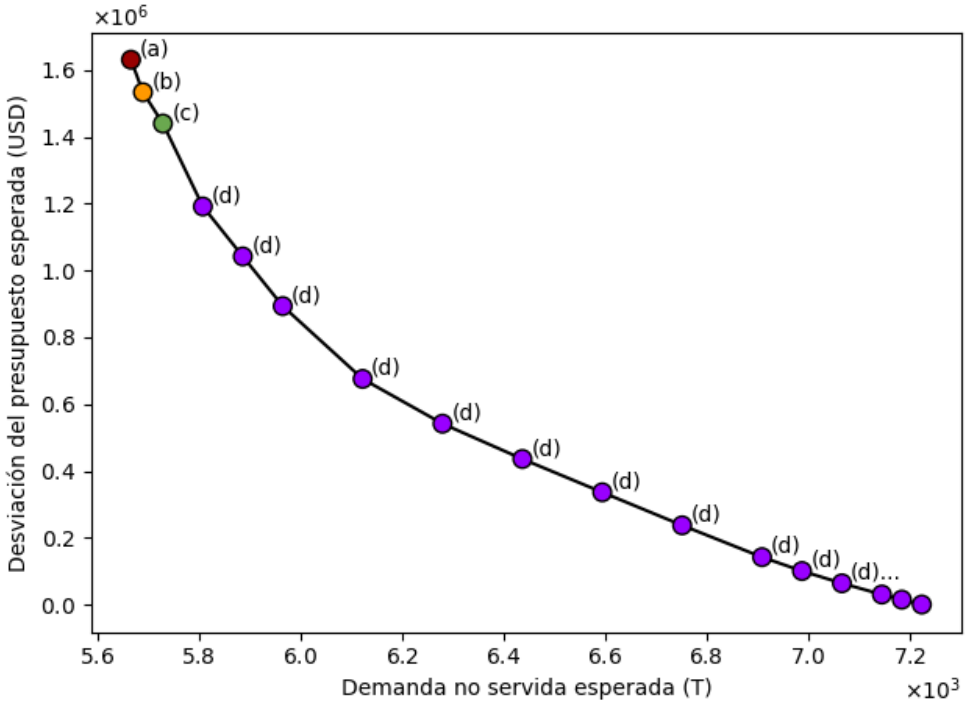
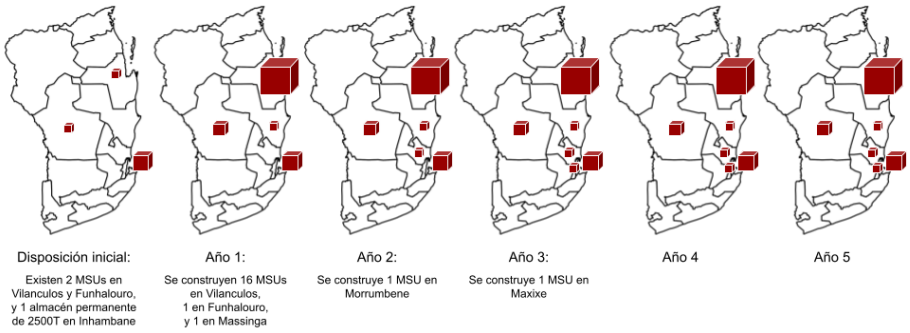
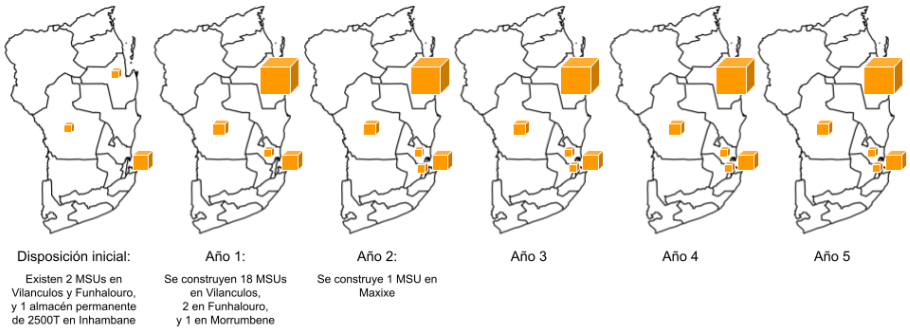


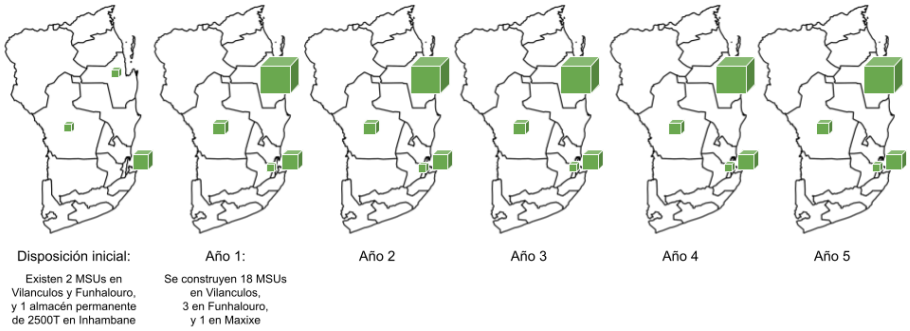
Figura 4.14: Aproximación de la frontera de Pareto con los datos estimados, presupuesto anual de 70.000 USD, capacidad de las vías reducida un 50 % sobre lo estimado en situaciones de desastre y 30 escenarios de emergencia. Fuentes: Rodríguez-Martínez, 2021, Mavrotas y Florios, 2013, elaboración propia.



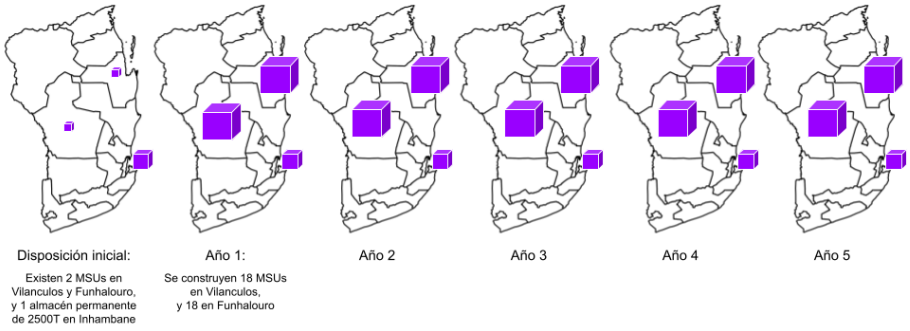
(a) Se impone como ε-restricción una cobertura de demanda a un 1 % del óptimo.



(b) Se impone como ε-restricción una cobertura de demanda a un 2,5 % del óptimo.



(c) Se impone como ε-restricción una cobertura de demanda a un 5 % del óptimo.



(d) Se imponen como ε-restricciones otros valores de cobertura de demanda inferiores.

Figura 4.15: Políticas de planificación sugeridas por el modelo con los datos estimados, presupuesto anual de 70.000 USD, capacidad de las vías reducida un 50 % sobre lo estimado en situaciones de desastre y 30 escenarios de emergencia, a lo largo de la frontera de Pareto. Fuentes: Rodríguez-Martínez, 2021, elaboración propia.

5. Conclusiones

A continuación, se expone el cumplimiento de los objetivos y las conclusiones del proyecto.

5.1. De la gestión de información

El proceso de armonización, cruce y consolidación de los registros ha permitido abordar los problemas habituales de dispersión, heterogeneidad y falta de estandarización de los datos existentes. La definición de un conjunto común de variables y la validación cruzada de eventos han reducido duplicidades, mejorado la trazabilidad de los registros y aumentado la comparabilidad entre eventos y períodos temporales. Dicha labor ha combinado herramientas de tratamiento de datos avanzadas con revisión manual y contextual, asegurando que la base de datos resultante sea operativa y fiable.

En conjunto, el trabajo realizado constituye un avance significativo en la gestión de la información sobre desastres en Mozambique. Sienta las bases para futuras actualizaciones, incorporación de nuevas fuentes y fortalecimiento de la estandarización institucional, contribuyendo así a mejorar la planificación y la eficacia de la respuesta humanitaria.

5.2. Del preposicionamiento de ayuda humanitaria

Los resultados obtenidos de las ejecuciones del modelo sugieren que la calidad y el nivel de desagregación de los datos empleados son suficientes para alimentar un modelo de ayuda a la decisión de estas características. El proceso de recopilación, contraste y unificación de la información histórica de desastres ha permitido reducir de forma significativa la incertidumbre asociada a la demanda y a los escenarios considerados.

Los resultados, además, son consistentes con las expectativas derivadas de la formulación del modelo. En particular, se confirma la importancia crítica de la inversión temprana en capacidad logística, así como el papel determinante de la conectividad y el acceso a infraestructuras de transporte en la localización óptima de almacenes.

Además, los resultados muestran que la concentración de recursos en nodos estratégicos con buena accesibilidad aérea y terrestre constituye una política robusta frente a la incertidumbre.

Desde una perspectiva operativa, las soluciones obtenidas ofrecen conclusiones aplicables al contexto real de la gestión humanitaria. El modelo identifica ubicaciones prioritarias para el preposicionamiento de ayuda que coinciden, en gran medida, con la experiencia práctica de los actores locales, lo que refuerza la validez externa de los resultados. Además, el análisis de escenarios pone de manifiesto cómo las restricciones de transporte y la distribución temporal del presupuesto influyen de manera decisiva en la eficacia del sistema logístico, proporcionando criterios claros para la planificación estratégica.

La incorporación de un enfoque multicriterio ha demostrado ser especialmente adecuada para el problema analizado, facilitando la comparación entre políticas alternativas y reforzando el carácter del modelo como herramienta de apoyo a la toma de decisiones.

Este trabajo supone una prueba más de que el modelo desarrollado en Rodríguez-Martínez, 2021 es funcional, estable y computacionalmente eficiente, incluso al considerar un número elevado de escenarios. Esto lo convierte en una herramienta potencialmente útil para apoyar la planificación logística humanitaria.

En conjunto, este trabajo demuestra que la combinación de datos de calidad, conocimiento del contexto operativo y herramientas matemáticas de optimización puede contribuir a mejorar la toma de decisiones en la gestión del preposicionamiento de ayuda ante desastres naturales.

5.3. Implementación y trabajo futuro

La base de datos de desastres construida en este trabajo y la aplicación del modelo de optimización para el preposicionamiento de ayuda humanitaria han sido desarrolladas con un enfoque práctico, buscando generar herramientas útiles para la gestión del riesgo de desastres en Mozambique. Gracias a las prácticas realizadas en el *Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres*, se ha alineado tanto la estructura de la base de datos como los criterios del modelo con las necesidades operativas y los flujos de información utilizados por el INGD, facilitando su posible adopción y uso directo en la planificación ante emergencias.

La base de datos histórica de desastres a nivel nacional puede emplearse para una muy amplia variedad de fines. Se incluyen la identificación de patrones temporales y

espaciales de ocurrencia de eventos extremos, la evaluación de la exposición y vulnerabilidad de la población y de infraestructuras críticas, la elaboración y priorización de planes de contingencia y estrategias de mitigación, el análisis de la efectividad de intervenciones pasadas, la estimación de pérdidas económicas y sociales asociadas a distintos tipos de desastres, la generación de escenarios simulados para pruebas de respuesta y entrenamiento, o incluso la investigación científica sobre tendencias climáticas y ambientales.

El modelo de preposicionamiento puede ser utilizado como soporte para la planificación de la ubicación estratégica de infraestructuras de almacenamiento y suministros. Además, con información más precisa y actualizada, se puede mejorar la calidad de los parámetros del modelo, considerando cambios demográficos, infraestructurales y climáticos. Esto podría ayudar a diseñar políticas de preposicionamiento más eficientes y fieles a la realidad.

Otra posible línea de trabajo es la integración de estas herramientas en sus sistemas internos. Se plantea fortalecer la estandarización institucional y la capacitación del personal del INGD en el manejo de estas herramientas, de manera que el conocimiento generado se mantenga dentro de la institución y contribuya a una gestión más eficiente y resiliente del riesgo de desastres. Pueden adaptarse los formatos de la base de datos en función de la retroalimentación de los usuarios finales, incrementando su operatividad, incorporarse nuevas fuentes de información o automatizar la actualización y validación de registros. El trabajo futuro también puede orientarse hacia la accesibilidad del modelo de optimización, mediante la creación de una infraestructura de software adecuada o una interfaz.

En definitiva, las prácticas y el proyecto dejan como resultado recursos complementarios que pueden ayudar a reducir la incertidumbre en la planificación, mejorar la rapidez y eficacia de la respuesta humanitaria y fortalecer la resiliencia de las comunidades frente a desastres en Mozambique.

Las herramientas analíticas y matemáticas constituyen un recurso fundamental para la promoción del bienestar social y el desarrollo sostenible. Es nuestra responsabilidad ética y profesional emplearlas para el interés público y para fortalecer la colaboración global en la reducción del impacto de las calamidades. El conocimiento solo es valioso si se comparte y se pone al servicio de la comunidad.

Cabe destacar que solo una cooperación internacional basada en la justicia y la equidad, respaldada por una inversión adecuada, permitirá abordar de manera sostenible los impactos de los desastres. La reducción del riesgo no es solo un objetivo técnico, sino un compromiso con la justicia social.

Bibliografía

Alcalde, E. M. (2019). Gestión del transporte multimodal. https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/147450/2/GestionDelTransporteMultimodal.pdf

Comissão Interministerial da Reforma da Administração Pública. (2021). *Estatuto Orgânico do Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres* [Resolução n.º 3/2021]. https://disasterlaw.ifrc.org/sites/default/files/media/disaster_law/2021-06/EstatutoOrganico-do-INGD-Aprovado.pdf

Drucker, P. F. (1954). *The Practice of Management*. Harper & Row.

Firmino, H. (2025). *Cheias e seca ameaçam mais de 170 mil pessoas em Inhambane*. https://opais.co.mz/cheias-e-seca-ameacam-mais-de-170-mil-pessoas-em-inhambane/

GAMS Development Corporation. (2025). *The General Algebraic Modeling System* [Version 49.6.1]. https://www.gams.com

Global Petrol Prices. (s.f.). *Mozambique diesel prices* [Consultado por última vez el 1 de diciembre de 2025]. https://es.globalpetrolprices.com/Mozambique/diesel_prices/

Høyland, K., Kaut, M., & Wallace, S. W. (2003). A heuristic for moment-matching scenario generation. *Computational optimization and applications*, *24*(2), 169-185. https://link.springer.com/article/10.1023/A:1021853807313

Humanitarian Data Exchange. (2025a). *Mozambique Waterways (OpenStreetMap Export)* [Consultado por última vez el 1 de diciembre de 2025]. https://data.humdata.org/dataset/hotosm_moz_waterways

Humanitarian Data Exchange. (2025b). *Mozambique: Roads* [Consultado por última vez el 1 de diciembre de 2025]. https://data.humdata.org/dataset/mozambique-roads

Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres. (2022). *Estratégia nacional para o estabelecimento de um sistema integrado do fluxo de informação de aviso prévio de cheias e ciclones em Moçambique*.

Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres. (2024). *Proposta do plano de contingência provincial para época chuvosa e ciclónica 2024-2025*.

Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres. (2025). *Centro de Integração de Dados na Nuvem* [Consultado por última vez el 1 de diciembre de 2025].

Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação. (2025). *Bases de dados de rios e ribeiros* [Consultado por última vez el 1 de diciembre de 2025].

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Cambio Climático 2022: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del IPCC. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

Jones, L. (2021). *Desastres: Cómo las grandes catástrofes moldean nuestra historia* (M. P. Sánchez, Trad.) [Traducción de *The Big Ones: How Natural Disasters Have Shaped Us (and What We Can Do About Them)*, 2018]. Capitán Swing Libros.

Logistics Cluster. (s.f.-a). *Mozambique aviation logistics capacity assessment* [Consultado por última vez el 1 de diciembre de 2025]. https://lca.logcluster.org/22-mozambique-aviation

Logistics Cluster. (s.f.-b). *Mozambique storage assessment* [Consultado por última vez el 1 de diciembre de 2025]. https://lca.logcluster.org/26-mozambique-storage-assessment

Mavrotas, G., & Florios, K. (2013). A novel version of the ϵ-constraint method for finding the exact Pareto set in Multi-Objective Integer Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, *219*(18), 9652-9669. https://doi.org/10.1016/j.amc.2013.03.002

Naciones Unidas. Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD). (s.f.). *UNCTADstat database* [Consultado por última vez el 1 de diciembre de 2025]. https://unctadstat.unctad.org/EN/

Naciones Unidas. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (DESA). (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. https://sdgs.un.org/2030agenda

Naciones Unidas. Noticias ONU. (2026). *Las inundaciones dejan más de medio millón de damnificados en Mozambique*. https://news.un.org/es/story/2026/01/1541038

Naciones Unidas. Oficina de las Naciones Unidas para la Coordinación de Asuntos Humanitarios (OCHA). (2026). *Mozambique: Inundaciones - diciembre de 2025*. https://reliefweb.int/disaster/fl-2025-000227-moz

Naciones Unidas. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR). (s.f.). *Riesgos y desastres* [Accedido el 31 enero 2026]. https://www.un-spider.org/es/riesgos-y-desastres

Naciones Unidas. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR). (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*. https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030

Naciones Unidas. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR). (2025). *DesInventar* [Consultado por última vez el 1 de diciembre de 2025]. https://www.desinventar.net/

Naciones Unidas. Programa Mundial de Alimentos (WFP). (2020). *Overview of Mobile Storage Units*. https://docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000117433/download/

NordNordWest. (2018). Inhambane Province in Mozambique 2018.svg [SVG locator map showing Inhambane Province in Mozambique (2018)]. *Wikimedia Commons*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inhambane_Province_in_Mozambique_2018.svg

QGIS Development Team. (2025). *QGIS Geographic Information System* (Ver. 3.40.10) [Software]. https://qgis.org

Regional Centre for Mapping of Resources for Development. (s.f.). *RCOE Geoportal* [Consultado por última vez el 1 de diciembre de 2025]. https://rcoe-geoportal.rcmrd.org

Rodríguez-Martínez, A. (2021). *Modelización estocástica y generación de escenarios para gestión de desastres* [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. https://docta.ucm.es/entities/publication/3dae6345-5fce-45ee-bebd-69fbb3b22d6f

Salgado Lora, E. (2017). *Formulación de proyectos: gestión y análisis de información para identificación de necesidades.* [Trabajo Fin de Máster]. ERICAM, Universidad Complutense de Madrid, Universidad Pedagógica de Mozambique.

Sander van der Meulen et al. (2023). Cost figures for freight transport. https://www.kimnet.nl/site/binaries/site-content/collections/documents/2023/03/30/kostenkengetallen-voor-het-goederenvervoer/Cost%2Bfigures%2Bfor%2Bfreight%2Btransport_def.pdf

Santos, P. B., & Santos, T. (2025). Evaluating the economic feasibility of short sea shipping in Southern Africa: A case study of regional freight transports. *Case Studies on Transport Policy*, *21*, 101538. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cstp.2025.101538

Sphere Association. (2018). *El Manual Esfera: Carta humanitaria y normas mínimas para la respuesta humanitaria* (4.ª ed.). https://spherestandards.org/es/manual-2018/

The Global Economy. (s.f.). *Mozambique: Inflation* [Consultado por última vez el 1 de diciembre de 2025]. https://www.theglobaleconomy.com/Mozambique/Inflation/

The International Disaster Database. (2025). *Base de datos de desastres históricos en Mozambique* [Consultado por última vez el 1 de diciembre de 2025]. https://www.emdat.be/

TUBS. (2011, mayo). *Mozambique_in_its_region.svg* [SVG locator map showing the location of Mozambique in its region]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mozambique_in_its_region.svg

UCM-HUMLOG Research Group. (2026). *Case Studies – Decision Aid Models for Logistics and Disaster Management (Humanitarian Logistics)*. https://blogs.mat.ucm.es/humlog/case-studies/

Vitoriano, B., Cerisola, S., & Ramos, A. (2000). Generating scenario trees for hydro inflows. *Proceedings of the 6th International Conference Probabilistic Methods Applied to Power Systems PMAPS*, *2*. https://www.researchgate.net/profile/Begona-Vitoriano/publication/268031759_Generating_Scenario_Trees_for_Hydro_Inflows/links/546bcbc40cf2f5eb180925cd/Generating-Scenario-Trees-for-Hydro-Inflows.pdf

Xue-Bin Zheng, Yul-Seong Kim and Young-Ran Shin. (2021). Sustainability of maritime transport in developing countries. *Journal of Marine Science and Engineering*, *9*(12), 1340. https://www.mdpi.com/2077-1312/9/12/1340

A1. Extractos visuales de la base de datos nacional de desastres históricos

La base de datos completa en formato `.xlsx` puede consultarse en UCM-HUMLOG Research Group, 2026.

AntSev_indice_complexo	AntSev_incongruências-Des-y-Emdat	AntSev_incongruências-Des-y-Ingd	AntSev_data	Des_name0	Des_name1	Des_lugar	Emdat_Location	Ingd_Provincia	Ingd_Distrito	Des_evento	Emdat_Disaster Type	Emdat_Disaster Subtype	Adan_Evento	Ingd_Ocorrência
índice único do cruzamento	Inconsistências entre a Desinventariar e Emdat	Inconsistências entre a Desinventariar e INGD	Data final com a maior precisão possível	Provincia registrada em Desinventariar	Distrito registrado em Desinventariar	Outras informações geográficas registradas em Desinventariar	Outras informações geográficas registadas em Emdat	Província registrada em INGD	Distrito registrado em INGD2	Tipo de evento consoante Desinventariar	Tipo de evento consoant e Emdat	Subtipo de evento consoante Emdat	Tipo de evento consoante Adan	Tipo de evento consoante INGD
604_Des108669_Emdat1996-0852-MOZ			13/01/1996	SOFALA	BUZI		Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		INUNDAÇÃO	Storm	Tropical cyclone		
605_Des108670_Emdat1996-0852-MOZ_Adan			13/01/1996	SOFALA	CAIA		Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CHEIAS	Storm	Tropical cyclone	Flood	
606_Des108932_Emdat1996-0852-MOZ			13/01/1996	ZAMBEZIA	INHASSUNGE		Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CICLONE	Storm	Tropical cyclone		
607_Des108933_Emdat1996-0852-MOZ_Adan			13/01/1996	ZAMBEZIA	CHINDE		Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CICLONE	Storm	Tropical cyclone	Cyclone	
608_Des108935_Emdat1996-0852-MOZ_Adan			13/01/1996	ZAMBEZIA	PEBANE		Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CICLONE	Storm	Tropical cyclone	Cyclone	
609_Des108936_Emdat1996-0852-MOZ_Adan_Ingd7			13/01/1996	ZAMBEZIA	CIDADE DE QUELIMANE		Zambezia, Gaza, MaputZambezia		Quelimane	CICLONE	Storm	Tropical cyclone	Cyclone	Ciclone Bonita
610_Des108938_Emdat1996-0852-MOZ			13/01/1996	ZAMBEZIA	MAGANJA DA COSTA		Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CICLONE	Storm	Tropical cyclone		
611_Des74921_Emdat1996-0852-MOZ			13/01/1996	SOFALA	NHAMATANDA		Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CHEIAS	Storm	Tropical cyclone		
612_Des108141_Emdat1996-0852-MOZ_Adan			14/01/1996	NAMPULA	CIDADE DE NACALA-PORTO		Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CICLONE	Storm	Tropical cyclone	Cyclone	
613_Des53095			15/01/1996	TETE	CHIUTA					INUNDAÇÃO				
614_Des81689_Adan			15/01/1996	INHAMBANE	MORRUMBENE					SECA			Drought	
615_Des108176			16/01/1996	ZAMBEZIA	MAGANJA DA COSTA					DEPRESSÃO				
616_Des108911			16/01/1996	ZAMBEZIA	MILANGE					DESLIZAMENTO				
617_Des108705			19/01/1996	SOFALA	BUZI					CHEIAS				
618_Des74482_Adan			19/01/1996	SOFALA	BUZI					CHEIAS			Flood	
619_Des108441_Adan			29/01/1996	MAPUTO	NAMAACHA					CHEIAS			Flood	
620_Des108354			1/02/1996	SOFALA	BUZI					SECA				
621_Des36121_Emdat1996-0852-MOZ			1/02/1996	NAMPULA	MOMA		Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CICLONE	Storm	Tropical cyclone		Bonita
622_Des52989			1/02/1996	TETE	MAGOE					INUNDAÇÃO				
623_Des74920			1/02/1996	SOFALA	NHAMATANDA	Pungue-Linha ferea				CHEIAS				
624_Des108926			5/02/1996	ZAMBEZIA	NICOADALA					CHUVAS				
625_Des108927			5/02/1996	ZAMBEZIA	PEBANE					CHUVAS				
626_Des108928			5/02/1996	ZAMBEZIA	MAGANJA DA COSTA					CHUVAS				
627_Des108929			5/02/1996	ZAMBEZIA	NAMACURRA					CHUVAS				
628_Des108930			5/02/1996	ZAMBEZIA	MOPEIA					CHUVAS				
629_Des108931			5/02/1996	ZAMBEZIA	CHINDE					CHUVAS				
630_Des108950			5/02/1996	NAMPULA	ANGOCHE					PESTE				
631_Des108951			5/02/1996	NAMPULA	MOMA					PESTE				
632_Des53305			12/02/1996	TETE	CHANGARA					INUNDAÇÃO				
633_Des108174_Emdat1996-0852-MOZ_Adan			13/02/1996	ZAMBEZIA			Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CHEIAS	Storm	Tropical cyclone	Flood	Bonita
634_Des108491_Emdat1996-0852-MOZ			13/02/1996	SOFALA			Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CICLONE	Storm	Tropical cyclone		Bonita
635_Des108491_Emdat1996-0852-MOZ_Adan			13/02/1996	SOFALA			Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CHEIAS	Storm	Tropical cyclone	Flood	Bonita
636_Des108611_Emdat1996-0852-MOZ_Adan			13/02/1996	MAPUTO			Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CHEIAS	Storm	Tropical cyclone	Flood	Bonita
637_Des108640_Emdat1996-0852-MOZ_Adan			13/02/1996	GAZA			Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CHEIAS	Storm	Tropical cyclone	Flood	Bonita

Figura A1.1: Primeras variables de algunas entradas del cruce de datos *Cruzamento_simplificado*, incluyendo varios tipos de eventos y todas las fuentes. Fuentes: Naciones Unidas. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), 2025, The International Disaster Database, 2025, Salgado Lora, 2017, Rodríguez-Martínez, 2021, Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres, 2025, elaboración propia.

índice	data	trimestre	tipo de calamidade	número de afectados	regiões afetadas	calamidades associadas
1	1/04/1956	MAM	Flood	0		4_Emdat1956-0035-MOZ
2	1/02/1967	DJF	Flood	50000		5_Emdat1967-0016-MOZ
3	29/01/1971	DJF	Flood	500000		6_Emdat1971-0011-MOZ
4	25/01/1975	DJF	Flood	75000		8_Emdat1975-0016-MOZ
5	1/02/1977	DJF	Flood	440000		9_Emdat1977-0040-MOZ
6	22/10/1977	SON	Flood	51		11_Emdat1977-0126-MOZ
7	1/03/1978	MAM	Flood	200000		12_Emdat1978-0040-MOZ
8	23/12/1978	DJF	Flood	105000		13_Emdat1978-0144-MOZ
9	21/01/1980	DJF	Flood	0		31_Des1-391
10	1/02/1980	DJF	Flood	5000	Macomia	32_Des100377_Adan
11	23/11/1980	SON	Cyclone	0	Guija	34_Des100961
12	4/01/1981	DJF	Flood	1	Moamba, Mutarara	56_Des1-392, 57_Des100229
13	1/02/1981	DJF	Flood	500000		58_Emdat1981-0126-MOZ
14	16/02/1981	DJF	Flood	0	Cidade de Quelimane	59_Des100042
15	17/12/1981	DJF	Cyclone	0	Inhassunque	60_Des100909
16	24/12/1981	DJF	Cyclone	0	Malema	61_Ingd4
17	31/01/1982	DJF	Cyclone	0	Chiburo	65_Des100946
18	1/12/1983	DJF	Flood	0	Magoe	80_Des81888
19	10/01/1984	DJF	Cyclone	350000	Namaacha	100_Des100462, 101_Des100609_Emdat1984-0018-MO
20	23/01/1984	DJF	Flood	0	Massangena, Manhiça, Matutuine, Mutarara	109_Des100024_Adan, 110_Des100025_Adan, 111_De
21	28/01/1984	DJF	Cyclone	350000	Panda	113_Des93536_Emdat1984-0018-MOZ
22	2/02/1984	DJF	Flood	0		114_Des45781
23	1/02/1985	DJF	Flood	500000		135_Emdat1985-0028-MOZ
24	24/02/1985	DJF	Flood	1495	Massingir, Boane, Memba, Buzi, Chemba, Marromeu	136_Des100569, 137_Des100570, 138_Des100571, 1
25	26/03/1985	MAM	Flood	0		143_Emdat1985-0047-MOZ
26	31/03/1986	MAM	Cyclone	0		146_Emdat1986-0306-MOZ
27	19/10/1986	SON	Cyclone	0		151_Emdat1986-0314-MOZ
28	1/02/1988	DJF	Flood	0	Manjacaze-Dingane, Namaacha, Cuamba, Changara, Chinde	173_Des100420_Adan, 174_Des100421, 175_Des1004
29	23/02/1988	DJF	Cyclone	4000		179_Des100694_Emdat1988-0102-MOZ
30	1/03/1988	MAM	Cyclone	4000	Macomia	180_Des100488_Emdat1988-0102-MOZ

Figura A1.2: Todas las variables de las primeras entradas de la agregación de datos *Cheias_e_ciclones*. Fuentes: Naciones Unidas. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), 2025, The International Disaster Database, 2025, Salgado Lora, 2017, Rodríguez-Martínez, 2021, Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres, 2025, elaboración propia

A2. Formulación del modelo de localización y preposicionamiento

Variables de decisión complementarias

Variables tácticas

- β_F^e: presupuesto asignado a decisiones estratégicas en la etapa e.
- β_T^t: presupuesto asignado a decisiones tácticas y operativas en el período t.
- v_T^ω: desviación del presupuesto táctico en el escenario ω.

Variables operativas dependientes del escenario

- x_i^ω: suministro de emergencia al nodo i.
- r_i^ω: aprovisionamiento para recuperar el *stock* del siguiente período.
- $\tilde{r}_i^\omega$: exceso de aprovisionamiento.
- s_i^ω: *stock* remanente.
- y_a^ω: flujo por el enlace a.
- v_i^ω: demanda insatisfecha en el nodo i.

Funciones objetivo

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{\omega \in \Omega^t} W^\omega v_T^\omega \tag{A2.1}$$

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{\omega \in \Omega^t} \sum_{i \in I} W^\omega v_i^\omega \tag{A2.2}$$

La función objetivo (A2.1) pretende minimizar la desviación esperada del coste, y la función objetivo (A2.2) la demanda insatisfecha estimada.

Restricciones lineales

$$\bar{C}^e \geq \beta_F^e + \sum_{t \in T^e} \beta_T^t \qquad \forall e \in E \qquad \text{(A2.3)}$$

$$\alpha_i^{e-1} \leq \alpha_i^e, \quad \alpha_i^e \in \{0,1\} \qquad \forall i \in I,\ e \in E \qquad \text{(A2.4)}$$

$$f_i^e \leq \lambda_i^M \alpha_i^e \qquad \forall i \in I,\ e \in E \qquad \text{(A2.5)}$$

$$\lambda_i^m \alpha_i^e \leq f_i^e \qquad \forall i \in I,\ e \in E \qquad \text{(A2.6)}$$

$$f_i^{e-1} \leq f_i^e \qquad \forall i \in I,\ e \in E \qquad \text{(A2.7)}$$

$$f_i^e - f_i^{e-1} \leq \lambda_i^M \left(\alpha_i^e - \alpha_i^{e-1}\right) \qquad \forall i \in I,\ e \in E \qquad \text{(A2.8)}$$

$$\sum_{i \in I} B_i^e \left(\alpha_i^e - \alpha_i^{e-1}\right) + \sum_{i \in I} F_i^e \left(f_i^e - f_i^{e-1}\right) + \sum_{i \in I} \tau_i \left(B_i^e \alpha_i^e + F_i^e f_i^e\right) = \beta_F^e \qquad \forall e \in E \qquad \text{(A2.9)}$$

$$\sum_{i \in I} \left(Q_i^t \left(r_i^\omega - \tilde{r}_i^\omega\right) + C_i^t x_i^\omega\right) + \sum_{a \in A^\omega} GC_a^\omega y_a^\omega - v_T^\omega = \beta_T^t + \left(\sum_{i \in I} P \gamma s_i^\omega\right)_{t=|T|} \qquad \forall \omega \in \Omega^t,\ t \in T \qquad \text{(A2.10)}$$

$$G\hat{s}_i^t \leq f_i^e \qquad \forall i \in I,\ t \in T^e,\ e \in E \qquad \text{(A2.11)}$$

$$Gx_i^\omega \leq \phi f_i^e \qquad \forall i \in \tilde{I},\ \omega \in \Omega^t,\ t \in T^e,\ e \in E \qquad \text{(A2.12)}$$

$$x_i^\omega = 0 \qquad \forall i \notin \tilde{I},\ \omega \in \Omega^t,\ t \in T^e,\ e \in E \qquad \text{(A2.13)}$$

$$\gamma s_i^\omega + r_i^\omega - \tilde{r}_i^\omega = \hat{s}_i^{t+1} \qquad \forall \omega \in \Omega^t,\ t \in T \setminus \{t = |T|\},\ i \in I \qquad \text{(A2.14)}$$

$$\hat{s}_i^t + x_i^\omega + \sum_{a \in \Gamma_i^{-\omega}} y_a^\omega = D_i^\omega - v_i^\omega + \sum_{a \in \Gamma_i^{+\omega}} y_a^\omega + s_i^\omega \qquad \forall i \in I,\ \omega \in \Omega^t,\ t \in T \qquad \text{(A2.15)}$$

$$s_i^\omega \leq \hat{s}_i^t \qquad \forall \omega \in \Omega^t,\ t \in T \qquad \text{(A2.16)}$$

$$\tilde{r}_i^\omega \leq \hat{s}_i^t \qquad \forall \omega \in \Omega^t,\ t \in T \qquad \text{(A2.17)}$$

$$r_i^\omega \leq \hat{s}_i^{t+1} \qquad \forall \omega \in \Omega^t,\ t \in T \setminus \{t = |T|\} \qquad \text{(A2.18)}$$

$$Gy_a^\omega \leq N_a^\omega \qquad \forall a \in A^\omega,\ \omega \in \Omega^t,\ t \in T \qquad \text{(A2.19)}$$

$$\hat{s}_i^t,\ x_i^\omega,\ r_i^\omega,\ \tilde{r}_i^\omega,\ s_i^\omega,\ y_a^\omega,\ v_i^\omega \in \mathbb{R}^+ \qquad \forall i \in I,\ \omega \in \Omega^t,\ a \in A^\omega,\ t \in T \qquad \text{(A2.20)}$$

La restricción (A2.3) divide el presupuesto anual entre la parte dedicada a decisiones estratégicas y la parte dedicada a decisiones tácticas y operativas.

La restricción (A2.4) define el carácter escalonado de las variables α. Cuando un almacén se habilita, permanece habilitado durante el resto del horizonte de planificación.

Las ecuaciones (A2.5) y (A2.6) obligan a que las dimensiones de los almacenes f_i^e

estén entre el mínimo y el máximo permitido, para cada nodo i. Por su parte, (A2.7) y (A2.8) hacen que esta capacidad se mantenga por lo menos igual durante todas las etapas desde la habilitación del almacén.

Por otro lado, (A2.9) asocia el coste de construcción y mantenimiento al parámetro β_F^e y (A2.10) hace lo propio para el presupuesto táctico y operativo, incluyendo la posibilidad de exceder el presupuesto mediante v_T^ω y agregando la venta del remanente como ingreso al final del horizonte de planificación.

Se emplea (A2.11) para definir el volumen máximo de mercancías que puede almacenarse en función de la capacidad disponible de las instalaciones y, de manera similar, la ecuación (A2.12) limita el volumen que puede entregarse en una situación de emergencia. El término (A2.13) limita además qué nodos pueden recibir ayuda de emergencia directamente de los proveedores.

La restricción (A2.14) hace que las mercancías que permanecen en *stock* al final de un período y, por lo tanto, disponibles para el siguiente, sean coherentes entre períodos tras considerar las cantidades usadas y repuestas.

La ecuación (A2.15) define el flujo de mercancías entre los nodos a través de los enlaces de la red de transporte, así como la demanda insatisfecha si la hubiera.

El sistema de restricciones (A2.16), (A2.17), (A2.18) impide operaciones de almacenamiento o venta en nodos que no disponen de almacén.

La ecuación (A2.19) limita la capacidad de transporte a través de los arcos en cada escenario de desastre.

Finalmente, las ecuaciones (A2.20) imponen la no negatividad natural de ciertas variables.

A3. Formulación del modelo de generación de escenarios de demanda global

Conjuntos

- K: número total de escenarios considerados.
- Λ: conjunto de propiedades estadísticas que se desean ajustar en la distribución discreta de escenarios.

Parámetros

- V_λ: valor empírico de la propiedad estadística λ, estimado a partir de los datos históricos de afectados.
- f_λ: función no lineal que calcula el valor de la propiedad estadística λ.
- w_λ: importancia asignada al ajuste de la propiedad estadística λ dentro del conjunto Λ.
- ε: tolerancia máxima permitida en el ajuste agregado de las propiedades estadísticas consideradas.
- $V_{\text{máx}}$: número máximo de afectados observado en los registros históricos.
- $\hat{p}$: probabilidad mínima asignada a cada escenario.
- H: número total de registros históricos disponibles.

Variables de decisión

- D^k: número total de afectados en el escenario k, con $k = 1, \ldots, K$.
- p^k: probabilidad asociada al escenario k.
- κ: factor de dispersión entre escenarios consecutivos.

- ΔV_λ^+: desviación positiva entre el valor calculado f_λ y el valor empírico V_λ de la propiedad estadística λ.
- ΔV_λ^-: desviación negativa entre el valor calculado f_λ y el valor empírico V_λ de la propiedad estadística λ.

Formulación lineal

$$\max_{D,p,\kappa} \quad \kappa \tag{A3.1}$$

$$\text{s.a.} \quad f_{\text{mean}} = \sum_{k=1}^{K} p^k \cdot D^k \tag{A3.2}$$

$$f_{\text{var}} = \sum_{k=1}^{K} p^k \cdot (f_{\text{mean}} - D^k)^2 \tag{A3.3}$$

$$f_{\text{skew}} = \sum_{k=1}^{K} p^k \cdot \left(\frac{f_{\text{mean}} - D^k}{\sqrt{f_{\text{var}}}} \right)^3 \tag{A3.4}$$

$$f_\lambda - V_\lambda = \Delta V_\lambda^+ - \Delta V_\lambda^-, \quad \forall \lambda \in \{\text{mean}, \text{var}, \text{skew}\} \tag{A3.5}$$

$$\sum_{\lambda \in \Lambda} w_\lambda \cdot \left(\Delta V_\lambda^+ + \Delta V_\lambda^- \right) \leq \varepsilon \tag{A3.6}$$

$$D^k \geq \kappa \cdot D^{k-1}, \quad \forall k = 2, \ldots, K \tag{A3.7}$$

$$D^K \geq V_{\text{máx}}, \quad p^K \geq p_{\text{máx}} \tag{A3.8}$$

$$\sum_{k=1}^{K} p^k = 1 \tag{A3.9}$$

$$p^k \geq \hat{p}, \quad \forall k = 1, \ldots, K \tag{A3.10}$$

$$D^k \geq 0, \quad \forall k = 1, \ldots, K \tag{A3.11}$$

$$\Delta V_\lambda^+, \ \Delta V_\lambda^- \geq 0, \quad \forall \lambda \in \{\text{mean}, \text{var}, \text{skew}\} \tag{A3.12}$$

Maximizar κ fuerza una separación exponencial entre escenarios, promoviendo diversidad y una adecuada representación de eventos extremos.

La restricción (A3.2) define la media de la distribución discreta de escenarios, mientras que (A3.3) establece la varianza y (A3.4) el coeficiente de asimetría de la distribución. La restricción (A3.5) establece la diferencia entre el valor calculado de cada propiedad estadística y su valor empírico, y (A3.6) acota la desviación total ponderada en el ajuste de las propiedades estadísticas.

Por su parte, (A3.7) impone una separación exponencial mínima entre escenarios consecutivos, controlada por el factor de dispersión κ.

Se asegura a través de (A3.8) que el escenario de mayor magnitud sea al menos tan severo como el mayor registro histórico observado y que dicho escenario tenga una probabilidad mínima asignada.

La ecuación (A3.9) garantiza que las probabilidades asociadas a los escenarios formen una distribución válida al sumar la unidad, mientras que (A3.10) impone una cota inferior a las probabilidades de todos los escenarios.

El término (A3.11) garantiza la no negatividad de las magnitudes de afectados y (A3.12) la de las variables auxiliares de desviación.