



Universidad Nacional
SAN LUIS GONZAGA



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Esta licencia es la más restrictiva de las seis licencias principales Creative Commons, permitiendo a otras solo descargar sus obras y compartirlas con otras siempre y cuando den crédito, pero no pueden cambiarlas de forma alguna ni usarlas de forma comercial.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>



Recibo de pago N° 793511

Visto el Informe N° 324-2024-PIEO-UI-FIMEE-UNSLG, emitido la operaria del sistema de antiplagio se emite la siguiente constancia:

N° 306-2024

CONSTANCIA

El que suscribe, director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica y Electrónica, hace constar que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud de la **Tesis** cuyo título es:

**“ANÁLISIS DE RIESGOS ORIGINADOS POR FENÓMENOS
HIDROMETEREOLÓGICOS EN LA URBANIZACIÓN SANTA MARÍA,
DISTRITO DE ICA, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE ICA, AÑO 2022”**

Presentado por:

CHOQUE GARAMENDI, CARLOS ALBERTO

BACHILLER de la Facultad INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA – Escuela Profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA. El resultado obtenido es un porcentaje de **UNO POR CIENTO (1%)**, por el cual se le otorga el calificativo de:

APROBADO

Se adjunta al presente, el reporte de evaluación con el software de verificación de originalidad.

Ica, 19 de Diciembre del 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUIS GONZAGA"
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

Dr. José Luis Donayre Pasache
DIRECTOR DE UNIDAD

UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUIS GONZAGA"
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA



**Análisis de riesgos originados por fenómenos
hidrometeorológicos en la Urbanización Santa María, distrito de
Ica, provincia y departamento de Ica, año 2022**

Línea de investigación

Ciencias naturales, ingeniería y tecnologías sostenibles

INFORME FINAL DE TESIS

Autor:

CARLOS ALBERTO CHOQUE GARAMENDI

Ica, Perú

2024

DEDICATORIA

Dedico mi tesis a mi padres y hermanos, pues sin el apoyo de ellos no habría logrado la realización de la presente tesis, y a mis profesores por formarme como profesional, ya que gracias a ellos he podido lograr realizarme como profesional.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor de tesis, el Mg. Ing. Percy Gonzales Allauja por su apoyo y guiarme en la realización de mi tesis ya que me transmitió su experiencia y conocimientos para la culminación de la presente tesis.

A mis padres, por su apoyo moral en los momentos más difíciles, ya que sin ellos no podría concluir mi formación como profesional en ingeniería.

Índice

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos	iii
Índice.....	iv
Índice de tablas.....	vi
Índice de figuras.....	vii
Resumen.....	viii
Abstract.....	ix
I. Introducción.....	10
1.1. Realidad problemática.....	10
1.1.1. Problema general.....	11
1.1.2. Problemas específicos	12
1.2. Antecedentes de la investigación	12
1.2.1. Antecedentes internacionales	12
1.2.2. Antecedente nacional	14
1.3. Justificación e importancia de la investigación.....	15
1.3.1. Justificación	15
1.3.2. Importancia	16
1.4. Objetivos de la investigación	18
1.4.1. Objetivo general.....	18
1.4.2. Objetivos específicos	18
1.5. Hipótesis y variables de la investigación	18
1.5.1. Hipótesis general.....	18
1.5.2. Hipótesis específicas	18
1.6. Contenido de la investigación	18
II. Estrategia metodológica	19
2.1. Tipo, Nivel y Diseño de la investigación	19
2.2. Población y muestra	19
2.3. Procedimiento	19

2.4. Métodos de evaluación de riesgo originados por fenómenos hidrometeorológico	22
2.4.1. Evaluación de riesgo de inundación.....	23
2.4.2. Evaluación de riesgo de sequía	30
2.4.3. Evaluación de riesgo de ola de calor.....	37
III. Resultados	43
3.1. Presentación de resultados	43
3.2. Contrastación de hipótesis.....	48
IV. Discusión	49
V. Conclusiones	50
VI. Recomendaciones	53
VII. Referencias bibliográficas	54

Índice de Tablas

Tabla I: Resumen de revisiones pasadas relevantes sobre evaluación y gestión de riesgos para HMH	20
Tabla II: Resumen de estudios relevantes que aplican diferentes metodologías/modelos para la evaluación del riesgo de inundación y el tipo de datos requeridos	26
Tabla III: Lista de posibles NBS utilizadas frente a los riesgos originados por inundaciones, sequías y olas de calor.....	45

Índice de Figuras

Figura N°1: Figura N°1: Mapa urbanístico de la Urbanización Santa María, Ica.....	11
Figura N°2: Mapa de peligro de inundación y áreas de exposición para la ciudad de Ica.....	11
Figura N°3: Propuesta metodológica de la investigación.	19
Figura N°4: Tipos de evaluación de riesgos y sus metodologías para los riesgos hidrometeorológicos de inundaciones, sequías y olas de calor.....	23
Figura N°5: Soluciones basadas en la naturaleza utilizadas para gestionar inundaciones, sequías y olas de calor	43

Resumen

En los últimos diez años, episodios como las lluvias intensas de 2017, vinculadas al Fenómeno de El Niño, han causado inundaciones significativas en varias zonas de riesgo y alta vulnerabilidad en Ica con consecuencias devastadoras para la vida y la propiedad. El propósito de esta investigación es describir como el análisis de riesgo influye en el control del fenómeno hidrometeorológico en la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica. Se empleó una metodología de riesgo generado por fenómenos hidrometeorológicos (HMH) como las inundaciones, sequías y olas de calor, y en su gestión por parte de las soluciones basadas en la naturaleza. Se analizaron y estudiaron diferentes metodologías relacionadas con los HMH elegidos con respecto a la exposición, la vulnerabilidad y la interacción de adaptación de los elementos en riesgo. Finalmente, la promoción de soluciones basadas en la naturaleza para la gestión de riesgos; por ejemplo, los pantanos y humedales en lugar de las presas para reducir el riesgo de inundaciones y sequías, y las infraestructuras verdes para la refrigeración urbana y la lucha contra las olas de calor, son posibles soluciones basadas en la naturaleza. Es necesario seguir investigando sobre la evaluación y gestión de riesgos a través de las soluciones basadas en la naturaleza, con el fin de aumentar su importancia para la vida sostenible, la adaptación de los edificios y la resiliencia.

Palabras claves: análisis, gestión de riesgo, fenómeno hidrometeorológico.

Abstract

In the last ten years, episodes such as the heavy rains of 2017, linked to the El Niño phenomenon, have caused significant flooding in several at-risk and highly vulnerable areas in Ica with devastating consequences for life and property. The purpose of this research is to describe how risk analysis influences the control of the hydrometeorological phenomenon in the Santa Maria Urbanization, district of Ica, province and department of Ica. A methodology of risk generated by hydrometeorological phenomena (HMH) such as floods, droughts and heat waves, and their management by nature-based solutions was used. Different methodologies related to the chosen HMH were analyzed and studied with respect to exposure, vulnerability and adaptation interaction of the elements at risk. Finally, the promotion of nature-based solutions for risk management; for example, marshes and wetlands instead of dams to reduce the risk of floods and droughts, and green infrastructures for urban cooling and combating heat waves, are possible nature-based solutions. Further research on risk assessment and risk management through nature-based solutions is needed to increase their relevance for sustainable living, building adaptation and resilience.

Key words: analysis, risk management, hydrometeorological phenomenon.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática.

Durante los últimos diez años, esta región ha sido testigo de una serie de eventos hidrometeorológicos que han dejado huellas profundas en su paisaje, su infraestructura y en la vida de sus habitantes. El cambio climático ha intensificado la frecuencia y severidad de fenómenos como inundaciones, deslizamientos y vientos extremos, afectando particularmente a las áreas urbanas costeras que, han experimentado un desarrollo acelerado y, en muchos casos, desordenado. La realidad problemática en la costa peruana se caracteriza por una combinación de factores naturales y antrópicos que exacerban la vulnerabilidad de las comunidades ante fenómenos hidrometeorológicos. La urbanización acelerada, frecuentemente desprovista de planificación adecuada, ha dado lugar a asentamientos humanos en zonas de alto riesgo, donde las defensas naturales contra inundaciones, como los humedales y los cauces de ríos, han sido degradadas o eliminadas. Este patrón de desarrollo, junto con la falta de infraestructura resiliente y sistemas de drenaje adecuados, ha dejado a poblaciones enteras expuestas a desastres naturales. En los últimos diez años, episodios como las lluvias intensas de 2017, vinculadas al Fenómeno de El Niño, han causado inundaciones significativas en varias regiones costeras, incluyendo Ica, con consecuencias devastadoras para la vida y la propiedad. El distrito de Ica, y específicamente el sector ubicado en la urbanización Santa María, no son ajenos a esta problemática. Este sector ha sufrido los embates de eventos climáticos extremos que, agravados por el cambio climático, ponen en evidencia la necesidad de un análisis riguroso de los riesgos hidrometeorológicos a los que se enfrenta. En este sentido, la investigación se propone no solo como una respuesta a la situación actual, sino también como un esfuerzo para prever y mitigar los impactos futuros, contribuyendo a la resiliencia de la comunidad y la sostenibilidad del entorno. El Perú, por su geografía diversa y ubicación en una de las zonas sísmicamente más activas del mundo, enfrenta múltiples amenazas naturales. Sin embargo, en las últimas décadas, los fenómenos hidrometeorológicos se han vuelto cada vez más frecuentes e intensos debido al cambio climático, exponiendo a numerosas comunidades a riesgos considerables. La urbanización Santa María, ubicada en el distrito de Ica, es un ejemplo representativo de cómo las comunidades urbanas en el Perú se encuentran en riesgo debido a estos fenómenos. Este sector, como muchas otras áreas urbanas en la costa peruana, enfrenta amenazas significativas, tales como inundaciones, deslizamientos y vientos fuertes, que se ven agravadas por la expansión urbana desordenada y la falta de infraestructura adecuada. La investigación se centra en la evaluación de los riesgos hidrometeorológicos específicos que afectan a esta urbanización, proporcionando una

visión detallada de los peligros a los que están expuestos sus habitantes y el entorno construido.

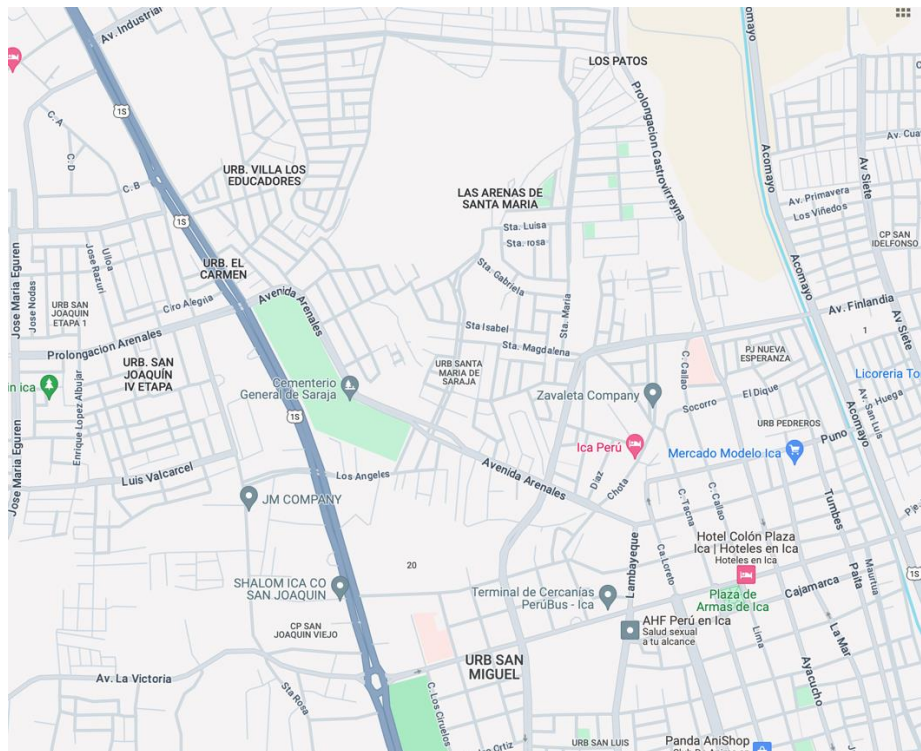


Figura N°1: Mapa urbanístico de la Urbanización Santa María, Ica.

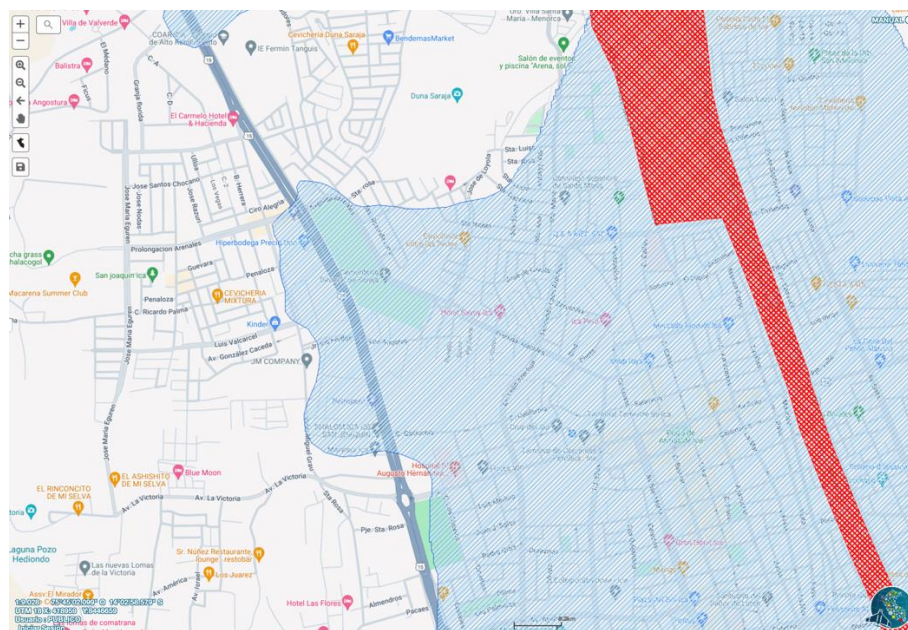


Figura N°2: Mapa de peligro de inundación y áreas de exposición para la ciudad de Ica.

1.1.1. Problema general.

La presente investigación, responde a la línea de investigación de Ciencias Naturales, Ingeniería y Tecnologías sostenibles; y se investiga respecto al siguiente “problema

general: ¿Cómo se podría influir en el control del fenómeno hidrometeorológico en la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica?

1.1.2. Problemas específicos.

PE1: ¿Cómo se podría influir en la realización de lluvias intensas de la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica?

PE2: ¿Cómo se podría influir en las inundaciones de la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica?

1.2. Antecedentes de la investigación.

1.2.1. Antecedentes internacionales.

Liao, Thedy, y Tai (2024) [1], establecieron el framework de un sistema integral y eficaz para evaluar los riesgos hidrometeorológicos relacionados con las soluciones basadas en la naturaleza (*Nature-based solutions* – NBS, en inglés) aplicada a la ingeniería. El framework propuesto tiene en cuenta los mecanismos de las catástrofes por inundaciones, los factores inciertos y los servicios ecosistémicos, integrándolos para evaluar de forma exhaustiva los beneficios de las NBS. Desarrollaron y aplicaron el análisis hidráulico bidimensional y un análisis de fiabilidad interno adaptativo basado en Kriging para establecer normas de prevención de inundaciones para NBS. Además, utilizaron InVEST, una herramienta para evaluar los servicios ecosistémicos. Demostraron la aplicabilidad del framework, se selecciona como caso de estudio la cuenca del río Baoli, situada en el condado taiwanés de Pingtung. Constataron que los NBS pueden soportar eficazmente una inundación de 25 años de período de retorno y reducir las inundaciones en las tierras agrícolas en un 46.03 %. Además, la probabilidad de inundación disminuyó del 100% al 27% para una inundación con un periodo de retorno de 20 años. Constataron que el NBS proporcionaba aproximadamente entre 1,20 y 4,65 millones de dólar taiwanés más en valor total de beneficio en comparación con la estrategia de gobernanza de ingeniería.

Fernandez, Gonzalez, y Garcia (2024) [2], presentaron una revisión de literatura de los sistemas de alerta temprana de inundaciones (*Flood early warning systems* – FEWS, en inglés) más representativos a nivel mundial, muchos de los cuales se encuentran actualmente en pleno funcionamiento, con especial atención a la componente de modelización numérica cuando ésta se desarrolla e integra en el sistema; así, desde los más básicos hasta los técnicamente más complejos, y desde las escalas de aplicación de cuenca o regional hasta las continentales o globales. Describieron un sistema integrado de sistemas y procesos de vigilancia, previsión y predicción de peligros, evaluación del riesgo de catástrofes, comunicación y actividades de preparación que permiten a las personas, comunidades, gobiernos, empresas y otros tomar medidas oportunas para reducir el riesgo de catástrofes antes de que se produzcan fenómenos peligrosos, entre

otros, el FEWS desarrollado a escala regional (cuenca fluvial), FEWS desarrollado a escala nacional, FEWS desarrollado a escala continental y mundial, y FEWS centrado en inundaciones repentinas. Finalmente, el análisis de las inundaciones mejoro y desarrollo herramientas de apoyo para ayudar en la aplicación de medidas de mitigación para reducir los daños de las inundaciones para las personas, bienes y ecosistemas y para mejorar la resiliencia de la comunidad.

Chauhan, et al. (2024) [3], evaluaron los datos hidrometeorológicos de la cuenca del río Yamuna, en Uttarakhand (India), utilizando la distribución de valores extremos del análisis de frecuencias y del método de cadena de Markov. El método evalúa la persistencia y permite realizar estimaciones de probabilidades combinatorias, como las probabilidades iniciales y transitorias. Los datos hidrológicos se generaron (in situ), y los datos meteorológicos se adquirieron del producto MERRA-2 desde los archivos de la NASA. Registraron datos de dieciséis años (2005-2020) para prever la precipitación diaria de 2020 a 2022. Los productos MERRA-2 se utilizan como valores observados y previstos para la precipitación diaria a lo largo de la estación monzónica, que va de julio a septiembre. Los resultados obtenidos de cadena de Markov y Long Short-Term Memory para 2020, 2021 y 2022, y los valores previstos para la precipitación diaria durante la estación monzónica entre julio y septiembre, demostraron que la técnica de inteligencia artificial no puede anticipar las futuras formaciones meteorológicas regionales; el coeficiente de correlación R^2 se sitúa en torno a 0.12. Obtienen datos de precipitaciones verificados aleatoriamente, el modelo de cadenas de Markov tiene un porcentaje de acierto del 79.17%, esto sugiere que los periodos de retorno prolongados deberían ser una señal de alerta para el riesgo de sequía e inundaciones en la región del Himalaya. Este estudio proporciona un mejor conocimiento del balance hídrico, la variabilidad del cambio climático y el impacto del calentamiento global, lo que en última instancia conduce a una mejor gestión de los recursos hídricos y a una mejor planificación de emergencias para el establecimiento del Sistema de Alerta Temprana para sucesos extremos como chaparrones, inundaciones repentinas, riesgos de deslizamientos de tierra en la compleja región del Himalaya.

Panagiota, y Baltas (2024) [4], aplicaron dos soluciones basadas en la naturaleza (*Nature-based solutions* – NBS, en inglés) en la cuenca del río Sarantapotamos, evaluando su eficacia mediante cálculos de hidrogramas de inundación antes y después de las SBN, y bajo escenarios climáticos futuros, abarcando condiciones inferiores, medias y superiores que representan $\pm 95\%$. Abarcaron un área de 226 km² en el Ática (Grecia) como zona de estudio, susceptible de sufrir inundaciones extremas. La investigación contribuye al conocimiento de las NBS, haciendo hincapié en la resistencia a las inundaciones y la protección de los asentamientos aguas abajo. El

cambio de la cubierta terrestre y los estanques de retención, aplicados individualmente y combinados, sirven como enfoques NBS. Los hidrogramas de inundación se calculan utilizando el método del diagrama tiempo-área en un sistema de información geográfica con el Sistema de Modelización Hidrológica del Centro de Ingeniería Hidrológica. Los resultados demuestran la eficacia de las NBS en las condiciones climáticas actuales, reduciendo la descarga máxima en un 9.3% y un 28% para el cambio de la cubierta terrestre y los estanques de retención, respectivamente. El NBS combinado consigue una reducción de la descarga máxima del 40.5% y una disminución significativa del volumen total de inundación del 15.7%. En los escenarios de cambio climático, los impactos sobre la precipitación de diseño y los hidrogramas de inundación varían. El escenario superior de cambio climático muestra un aumento del 3348% en la descarga máxima y un aumento del 600% en el volumen total de inundación, mientras que el escenario inferior ve una reducción del 44.6% en el volumen total de inundación. En el escenario medio de cambio climático, el cambio de la cubierta terrestre y los estanques de retención reducen la descarga máxima en un 9.73% y un 23.11% y el volumen total de la inundación en un 9.25% y un 2.17%, respectivamente. Concluyeron que los estanques de retención muestran una reducción sustancial de la descarga máxima, mientras que los cambios en la cubierta terrestre amplían el tiempo hasta el pico, lo que pone de relieve su potencial en la gestión del riesgo de inundaciones.

1.2.2. Antecedente nacional.

Ccopia, et al. (2023) [5], analizaron y determinaron el nivel de riesgo por inundaciones fluviales en comunidades de los Andes peruanos en términos de amenaza y vulnerabilidad, utilizando una metodología semicuantitativa y aplicando un análisis multicriterio con información vectorial y raster de la infraestructura nacional de datos espaciales que actuaron como factores desencadenantes y condicionantes, además de realizar un trabajo de campo con la aplicación de encuestas focalizadas. Posteriormente, llevaron a cabo el geoprocésamiento de mapas temáticos mediante software SIG. Los resultados de la investigación indican que prácticamente la totalidad del área de estudio, aproximadamente el 99.26%, se encuentra en un nivel de peligrosidad alto, con sólo un pequeño 0.74% clasificado como peligrosidad muy alta. En otras palabras, todo el territorio estudiado es susceptible de sufrir inundaciones. Destacaron que más del 75% de los hogares de esta zona son vulnerables a las inundaciones, por lo que el 99.15% de ellos están clasificados en un nivel de riesgo alto. Concluyeron que las inundaciones fluviales representan un riesgo potencial en amplias zonas de la comunidad altoandina debido a la existencia de diversos factores sociales, económicos y ambientales que hacen que este fenómeno sea catastrófico.

Llontop (2022) [6], propone una examiación del manejo del riesgo de desastres con relación a los fenómenos hidrometeorológicos en una ciudad de alta vulnerabilidad como Chiclayo fin de evitar pérdidas materiales y humanas, que afecte su desarrollo sostenible. Ha utilizado un enfoque de estudio de caso bsado en la revisión de múltiples fuentes secundarias y el análisis de datos primarios obtenidos mediante entrevistas semiestructuradas con seis expertos en la gestión de riesgos, incluyendo funcionarios y especialistas en el área. Obtuvo como resultado, a nivel local, la gestión prospectiva está bien respaldada por diversos mecanismos legales y normativos, aunque existe una evidente discrepancia entre las políticas declaradas y su aplicación real, limitando el estudio. Además, la gestión correctiva presento una gran deficiencia, en términos de capacidad administrativa, cultura de prevención e inversión, conllevando a repetir errores. Finalmente, al encontrarse mejor implementada la gestión reactiva utilizando un enfoque tradicional en la defensa civil con resultados a corto plazo y generadora de apoyo electoral.

1.3. Justificación e importancia de la investigación.

1.3.1. Justificación.

La investigación se justifica socialmente porque aborda la seguridad y bienestar de la población de Santa María. Las comunidades vulnerables, como la de esta urbanización, a menudo carecen de los recursos y la infraestructura necesaria para enfrentar y recuperarse de los desastres naturales. Evaluar los riesgos y proponer medidas de mitigación no solo protege vidas humanas, sino que también preserva los medios de vida, lo que es esencial en un contexto en el que muchas familias dependen de la economía local. Económicamente, en tanto destaque el impacto que los fenómenos hidrometeorológicos pueden tener sobre el desarrollo económico de la región. Los desastres naturales pueden causar daños significativos a la infraestructura pública y privada, interrumpir las actividades económicas y generar costos elevados de reconstrucción. En un país en desarrollo como el Perú, donde los recursos económicos son limitados, la prevención y mitigación de riesgos se convierten en estrategias cruciales para minimizar pérdidas económicas. La investigación, al proponer soluciones basadas en el análisis de riesgos, contribuye a la formulación de políticas públicas y planes de acción que pueden reducir los costos económicos asociados con estos fenómenos. Prácticamente, ya que se posiciona como una herramienta indispensable para los tomadores de decisiones locales y regionales. La información obtenida del análisis de riesgos puede guiar la planificación urbana, la construcción de infraestructura resistente y la implementación de sistemas de alerta temprana. En un contexto donde los fenómenos climáticos extremos son cada vez más comunes, contar con un diagnóstico preciso y actualizado de los riesgos es fundamental para la gestión

adecuada del territorio y la protección de la población. Además, la investigación permite identificar las áreas más vulnerables dentro de la urbanización, facilitando la priorización de intervenciones y recursos. Metodológicamente, debido a su enfoque integral y riguroso en la evaluación de riesgos. El uso de metodologías modernas de análisis, que incluyen tanto herramientas de modelado climático como técnicas de evaluación de vulnerabilidad, asegura que los resultados obtenidos sean precisos y relevantes. Este enfoque no solo proporciona un diagnóstico detallado, sino que también sienta las bases para estudios futuros que puedan replicarse en otras áreas del país que enfrentan riesgos similares. Además, la investigación contribuye al cuerpo de conocimiento existente sobre gestión de riesgos en el Perú, proporcionando datos valiosos y recomendaciones que pueden ser utilizadas por investigadores, académicos y profesionales en el campo. Teóricamente, se apoya en un framework conceptual que integra las teorías sobre gestión de riesgos y adaptación al cambio climático. Los riesgos hidrometeorológicos, que incluyen inundaciones, tormentas y deslizamientos, son entendidos como fenómenos naturales que, al interactuar con las condiciones sociales, económicas y ambientales de un territorio, pueden generar desastres. La teoría de la vulnerabilidad, que subraya la importancia de las condiciones preexistentes en la capacidad de una comunidad para enfrentar y recuperarse de estos eventos, es central en este análisis. En el caso de Santa María, la vulnerabilidad es exacerbada por factores como la ubicación geográfica, la falta de infraestructura adecuada y la limitada capacidad de respuesta ante emergencias. Así, el estudio adopta una perspectiva que no solo considera los peligros físicos, sino también las características socioeconómicas de la población, ofreciendo una visión integral del riesgo. Ambientalmente, por la necesidad de comprender y gestionar de manera efectiva las interacciones entre los fenómenos naturales y los patrones naturales de drenaje y ha reducido la capacidad de los ecosistemas locales para amortiguar los impactos de las lluvias intensas y otros eventos climáticos extremos. Esto ha resultado en un aumento de la frecuencia y severidad de las inundaciones y deslizamientos, que no solo afectan la infraestructura, sino que también ponen en riesgo la biodiversidad y la calidad de los recursos hídricos. La investigación, por lo tanto, no solo se enfoca en la seguridad humana, sino también en la conservación del medio ambiente, destacando la importancia de mantener y restaurar las funciones ecológicas clave para la reducción de riesgos.

1.3.2. Importancia.

La importancia de la propuesta de investigación es innegable en varios niveles, a nivel local, el estudio aborda directamente las preocupaciones y necesidades de la comunidad de Santa María, proporcionando un framework para la acción que puede mejorar significativamente la resiliencia de la urbanización frente a los fenómenos

hidrometeorológicos; ahora a nivel regional, los resultados del estudio pueden ser aplicados en otras áreas con características similares, amplificando su impacto; asimismo, a nivel nacional, el estudio contribuye a la comprensión general de los riesgos hidrometeorológicos en el Perú, ofreciendo insights que pueden influir en la formulación de políticas y estrategias a nivel macro. El estudio destaca también la necesidad de un enfoque intersectorial y colaborativo en la gestión de riesgos. Dado que los fenómenos hidrometeorológicos afectan múltiples aspectos de la vida comunitaria—desde la infraestructura y el transporte hasta la salud pública y la economía—, es esencial que diferentes sectores trabajen juntos para desarrollar soluciones integrales. La investigación no solo identifica los riesgos, sino que también aboga por la coordinación entre el gobierno local, las organizaciones no gubernamentales y la comunidad para implementar medidas de mitigación eficaces; el valor de la propuesta de investigación radica en la necesidad de proteger a la población y minimizar los daños materiales y humanos. En los últimos años, el distrito de Ica ha experimentado un aumento en la frecuencia e intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos debido, en gran medida, al cambio climático y a la variabilidad natural del clima. Este contexto incrementa la vulnerabilidad de las zonas urbanas, especialmente en áreas donde la urbanización ha avanzado de manera desordenada y sin considerar adecuadamente los riesgos ambientales. La investigación permite identificar las áreas más vulnerables y evaluar la efectividad de las medidas de prevención y respuesta existentes, ofreciendo una base sólida para la toma de decisiones y la planificación urbana sostenible; y la pertinencia de la propuesta de investigación se fundamenta en la realidad problemática que enfrentan muchas zonas urbanas, como la urbanización Santa María. Estas áreas se caracterizan por un crecimiento poblacional acelerado, el cual no siempre va acompañado de una infraestructura adecuada para manejar los riesgos asociados a fenómenos naturales. En Ica, la expansión urbana frecuentemente ocurre en zonas que no han sido debidamente evaluadas en términos de riesgo hidrometeorológico, lo que aumenta la exposición de la población a eventos extremos como inundaciones. Además, la falta de un sistema eficiente de drenaje pluvial y la deficiente gestión de recursos hídricos contribuyen significativamente a la vulnerabilidad de estas zonas ante eventos hidrometeorológicos. Finalmente, es importante fomentar una cultura de prevención y resiliencia a nivel comunitario y gubernamental. Esto implica integrar la gestión de riesgos en las políticas públicas y promover la inversión en infraestructura resiliente, además de asegurar que todas las medidas adoptadas sean sostenibles y respeten el medio ambiente. Una aproximación integral y proactiva a la gestión de riesgos hidrometeorológicos no solo protege a la población de la urbanización Santa María, sino que también contribuye al desarrollo sostenible de la región, mejorando la calidad de

vida de sus habitantes y asegurando un futuro más seguro y resiliente frente a los retos que plantea el cambio climático.

1.4. Objetivos de la investigación.

1.4.1. Objetivo general.

Describir como el análisis de riesgo influye en el control del fenómeno hidrometereologico en la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica.

1.4.2. Objetivos específicos.

OE1: Demostrar como el control del riesgo puede influir en la realización de lluvias intensas de la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica.

OE2: Averiguar como la tolerancia al riesgo puede influir en las inundaciones de la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica.

1.5. Hipótesis y Variables de la Investigación

1.5.1. Hipótesis general.

Con el análisis de riesgos se influye en los fenómenos hidrometereologicos en la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica.

1.5.2. Hipótesis específicos.

HE1: El control del riesgo influye en la realización de lluvias intensas de la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica.

HE2: La tolerancia al riesgo influye en las inundaciones de la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica.

1.6. Contenido de la investigación.

Para lograr una comprensión más completa del primer capítulo, se procede a introducir la realidad problemática, antecedentes, justificación e importancia, así como los objetivos de la investigación. En cuanto al segundo capítulo, se detalla la metodología utilizada en la investigación, se analizan los métodos de evaluación de riesgo originados por fenómenos hidrometeorológico para identificar los riesgos de inundación, sequía, y ola de calor. Basándose en estos aspectos, el tercer capítulo presenta la exposición de los resultados derivados de los análisis y métodos realizados. En el cuarto capítulo, se profundiza en la discusión de dichos resultados de la investigación. Por último, en el quinto capítulo, se exponen las conclusiones extraídas de la tesis, y en el sexto capítulo, se ofrecen recomendaciones para futuras investigaciones.

II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

2.1. Tipo, Nivel y Diseño de la investigación.

Tipo. Por su propósito el tipo de la investigación es aplicada tecnológica, porque busca la generación de conocimiento con aplicación directa al problema real

Nivel. El nivel de la investigación según su relación de causalidad es explicativo, porque estudia un fenómeno que no se han abordado en profundidad

Diseño. El diseño de la investigación cumple las condiciones metodológicas de un diseño experimental, debido a que el investigador determina como se desarrollará el experimento, en razón, que de definan las variables observadas, la relación entre ellas y su medición, finalmente analizando la información, se obtiene:

Variable independiente: Análisis de riesgos originados por fenómenos hidrometeorológicos.

Variable dependiente: Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica, año 2022.

2.2. Población y muestra. En la investigación se procedió a identificar la unidad de análisis que también es la unidad muestral, en este caso, es análisis de riesgos originados por fenómenos hidrometeorológicos en la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica, año 2022.

2.3. Procedimiento.

Se ha recopilado información de carácter geográfico, urbanístico, e infraestructura básicas en base de datos de citas y resúmenes. El alcance de este estudio cubre los peligros generados por fenómenos hidrometeorológicos (*Hydro-meteorological hazard* – HMH, en inglés) y la gestión de riesgos para la evaluación del riesgo y vulnerabilidad de la zona.

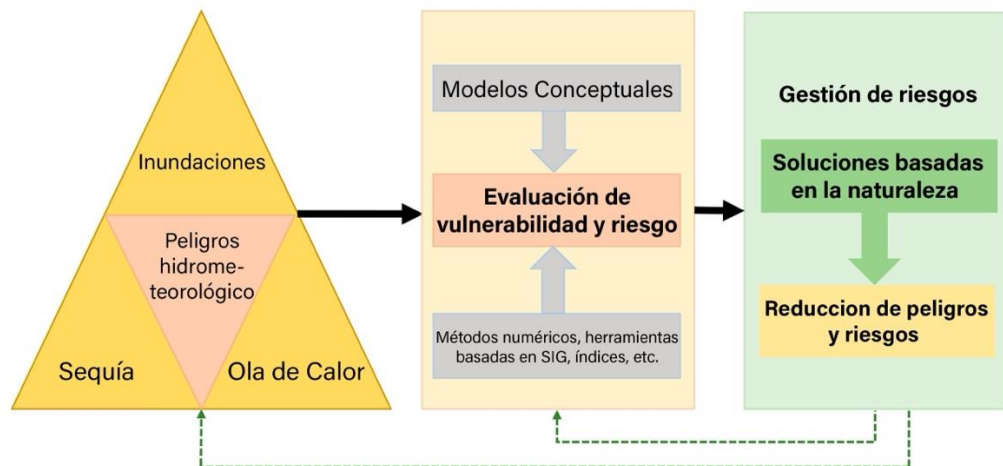


Figura N°3: Propuesta metodológica de la investigación.

Se realizó la verificación selectiva y de alcance para revisar la literatura e identificar los textos más relevantes. La búsqueda en la base de datos se enfocó en encontrar coincidencias con las palabras clave, preferiblemente en el título de los artículos como prioridad, y de esta manera nos encontramos con las siguientes limitaciones: Primero, algunos artículos aparecieron en nuestra búsqueda que tenían nuestras palabras clave en el título, pero no estaban relacionados con el tema de interés. En segundo lugar, dado que seleccionamos la literatura en función de la relevancia y la función de clasificación de la base de datos, podría haber sido posible que pasáramos por alto literatura importante donde el contenido estaba relacionado con nuestro estudio, pero el título no contenía ninguna de nuestras palabras clave, por lo tanto, podrían haber aparecido al final de los resultados de la página web.

Tabla I

Resumen de revisiones pasadas relevantes sobre evaluación y gestión de riesgos para HMH.

HMR	Resumen	Limitación o brecha	Referencia
Inundación	La evaluación de riesgos se clasificó en métodos cualitativos y cuantitativos. Se proporcionaron algunas referencias en las que el riesgo era una función del peligro, la exposición, la vulnerabilidad y, a veces, la deficiencia en la preparación o medida de capacidad.	Métodos o modelos para peligros específicos estaban ausentes.	[7]
	Se revisaron técnicas de modelado numérico que utilizan parámetros hidrológicos y de modelado de ríos, y se compararon modelos 1-D y 2-D. Se destacó la necesidad de un modelo 3-D para comprender la diferencia de elevación y la rugosidad vertical en las rejillas para entender el comportamiento dinámico de las inundaciones.	Limitación a técnicas de modelado numérico.	[8]
	Se revisó la evaluación económica del daño por inundaciones de última generación. Se describieron tres pasos: clasificación de los elementos en riesgo, cuantificación de los valores de activos expuestos y susceptibilidad en diferentes sectores, para la evaluación del daño económico directo de las inundaciones.	Limitación a la evaluación de daños económicos por inundaciones como herramienta de gestión de riesgos.	[9]
	Se revisaron los métodos para la estimación de la pérdida de vidas debido a diferentes tipos de inundaciones (por ejemplo, por rotura de presas, inundaciones costeras, tsunamis) en diferentes regiones. Se propuso un nuevo método para inundaciones en áreas bajas. Al combinar las estimaciones de pérdida de vidas con la información disponible sobre la probabilidad de ocurrencia de escenarios de inundación, se pueden estimar los riesgos de inundación.	Limitación a métodos de pérdida de vidas.	[10]
	Se revisaron tres modelos de inundación por inundaciones: modelos empíricos, conceptuales e hidrodinámicos con diferentes dimensiones (1D, 2D y 3D). Los métodos empíricos son buenos para el monitoreo de inundaciones y la evaluación posterior al desastre, pero los modelos hidrodinámicos representan la dinámica	Restricción únicamente a inundaciones por inundaciones.	[11]

	<p>detallada del flujo, lo cual es necesario para estudiar los impactos de la rotura de presas, tsunamis o inundaciones repentinas.</p> <p>Se mencionaron cuatro enfoques para evaluar el riesgo regional de inundaciones basados en investigaciones representativas de 2000 a 2017: (1) métodos estadísticos, (2) análisis multicriterio, (3) análisis basado en técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección (RS), y (4) análisis de inundación basado en escenarios, con sus limitaciones de uso. Estos enfoques han evaluado el riesgo de inundación y han destacado que el proceso de anticipación del riesgo utiliza un ciclo iterativo que incluye evaluación de riesgos, precaución, predicción y contramedidas técnicas.</p>	Falta de tipos de conjuntos de datos utilizados para los métodos y descripción menor de los métodos/modelos empleados.	[12]
Sequía	<p>Se presentaron los conceptos fundamentales de sequía, su clasificación, el monitoreo de sequías basado en índices, sequías históricas utilizando estudios paleo-climáticos y la relación entre sequías y grandes índices climáticos. En la conclusión, se propuso más investigación en el desarrollo de índices de sequía considerando las pérdidas económicas y precauciones metodológicas. Estos aspectos pueden ser explorados más a fondo, considerando las necesidades del usuario en la región y clasificando las sequías según su severidad.</p> <p>Se discutió la previsión de sequías (análisis de regresión y series temporales; modelos de probabilidad, redes neuronales artificiales y modelos híbridos), modelado basado en probabilidad (periodo de retorno y análisis de frecuencia; análisis de sequías univariado, bivariado y multivariado utilizando cópulas), análisis espacio-temporal, uso de Modelos Climáticos Globales (GCM) para escenarios de sequía utilizando modelos hidrológicos a gran escala, sistemas de asimilación de datos de tierra para modelado de sequía y planificación de sequía (análisis multicriterio, sistema de expertos/sistemas de apoyo a la decisión).</p> <p>Se presentaron los índices de sequía multivariados recientes con sus métodos de desarrollo, como la combinación de indicadores objetivos y subjetivos, el modelo de balance hídrico y el análisis estadístico multivariado, tales como variables latentes, combinación lineal, distribución multivariada y análisis de componentes principales, con sus fortalezas y limitaciones.</p>	<p>Los índices de sequía solo pueden reflejar las condiciones de sequía basadas en variables hidrometeorológicas, pero no pueden cuantificar las pérdidas económicas.</p> <p>Falta una revisión exhaustiva de cada tipo de modelado/método.</p> <p>Limitado al método de indexación</p>	[13] [14] [15]
Ola de calor	<p>Se revisaron los impactos en la salud de las olas de calor a escala global. La densidad de población global no coincidió con la ubicación de las olas de calor y los estudios de salud humana.</p> <p>Se revisó la evaluación de la identificación de grupos vulnerables y las intervenciones de salud relacionadas con el calor, como programas de divulgación activa, medidas de reducción de la exposición y monitoreo y mapeo de los grupos en riesgo para comprender la efectividad y eficiencia de esas intervenciones.</p>	<p>Faltan estudios en áreas tropicales y de altas latitudes.</p> <p>Falta el método de evaluación de riesgos.</p>	[15] [16]

	Se revisó la variación en el efecto de mortalidad debido a diferentes definiciones de olas de calor. Se propusieron definiciones locales de olas de calor como óptimas para proteger y prevenir a las personas de los impactos adversos de las olas de calor futuras.	Se centró únicamente en la mortalidad como indicador de riesgo.	[17]
	Se revisaron estudios sobre morbilidad y mortalidad relacionadas con el calor desde 1958 hasta 2012 para poblaciones de alto riesgo en EE. UU. y Europa.	Restringido únicamente a estudios humanos.	[18]
Inundaciones y flujos de escombros (gestión de HMR)	Se cubrieron métodos y técnicas para la respuesta de emergencia. Las estrategias actuales de gestión de riesgos mencionadas son la geo-información y la teledetección, los planes de emergencia y la participación local, la cooperación interinstitucional, los sistemas de alerta temprana, la concienciación y la preparación, las actividades de advertencia y respuesta, la previsión y las actividades de protección civil como sistemas de apoyo a la toma de decisiones.	El concepto de NBS estaba ausente. Se centró principalmente en métodos de gestión de riesgos de inundación y costeros.	[19]
Geofísica y gestión de HMH (HMR)	Se revisaron las metodologías de evaluación de HMR y el principio de prevención, protección y preparación para la gestión de HMR	El concepto de NBS no estaba presente.	[20]

2.4. Métodos de evaluación de riesgo originados por fenómenos hidrometeorológico.

La evaluación del riesgo hidrometeorológico (HMR) puede ser cualitativa o cuantitativa. Las evaluaciones cualitativas de riesgo son métodos basados en la observación o examen para verificar la conformidad que califican una condición de acuerdo con una legislación o norma relevante. Las evaluaciones cuantitativas de riesgo son matemáticas, probabilísticas o estocásticas, basadas en la información existente o en tiempo real que se alimenta como entrada al modelo. La mayoría de estos métodos dependen de información y predicciones sobre el clima potencial [7]. Los eventos climáticos extremos que desencadenan HMHs generalmente se describen mediante la Teoría de Valores Extremos (EVT, por sus siglas en inglés), que proporciona un marco matemático para su análisis y los periodos de retorno [21]. En EVT, se utilizan dos enfoques para extraer eventos extremos de su serie temporal completa: el método máximo/mínimo estacional/anual y el enfoque de umbral, también conocido como picos sobre un umbral (POT, por sus siglas en inglés) o mínimos bajo un umbral (LUT, por sus siglas en inglés) [21]. Las principales suposiciones en estos conjuntos de datos son: (1) la serie temporal es lo suficientemente larga, (2) la serie temporal se asume independiente y distribuida de manera idéntica (i.i.d.), y (3) la serie temporal es estacionaria. Los modelos estadísticos, incluidas las funciones univariadas y multivariadas (cópulas), se consideran adecuados para ajustar estos conjuntos de datos y estimar su frecuencia de ocurrencia o extrapolar la magnitud asociada con cualquier probabilidad de excedencia de interés. Hoy en día, una variedad de

técnicas/herramientas estadísticas se utilizan en estos procesos de minería y análisis de datos. De estas herramientas, los programas R [22] y MATLAB [23] son las herramientas más comúnmente utilizadas por investigadores y científicos de todo el mundo. Existen varios tipos de métodos de evaluación de riesgos reportados en la literatura para identificar peligros y evaluar sus riesgos; algunos de estos tratan sobre HMHs (figura N°3). La mayoría de las metodologías cuantitativas de evaluación de HMR se basan en datos históricos disponibles o en proyecciones de modelos climáticos futuros, como los modelos climáticos regionales (RCMs, por sus siglas en inglés) y los modelos de circulación general (GCMs, por sus siglas en inglés). Los GCMs se regionalizan mediante técnicas de reducción de escala dinámica o estadística [24] y, aunque han mejorado su capacidad para predecir cambios climáticos futuros en la última década, sus estimaciones aún están limitadas por representaciones incompletas o inexactas de los procesos que afectan al clima [25]. Por lo tanto, se requieren datos de alta calidad (con alta resolución espacial y temporal) y métodos/modelos competentes para una adecuada evaluación del riesgo (es decir, identificación del riesgo, análisis del riesgo y evaluación del riesgo) y gestión del riesgo. En general, la precisión de los procedimientos de gestión del riesgo depende de los tipos de conjuntos de datos de entrada, los métodos/modelos utilizados y las soluciones elegidas, como las soluciones basadas en la naturaleza (*Nature-based solutions* – NBS, en inglés).

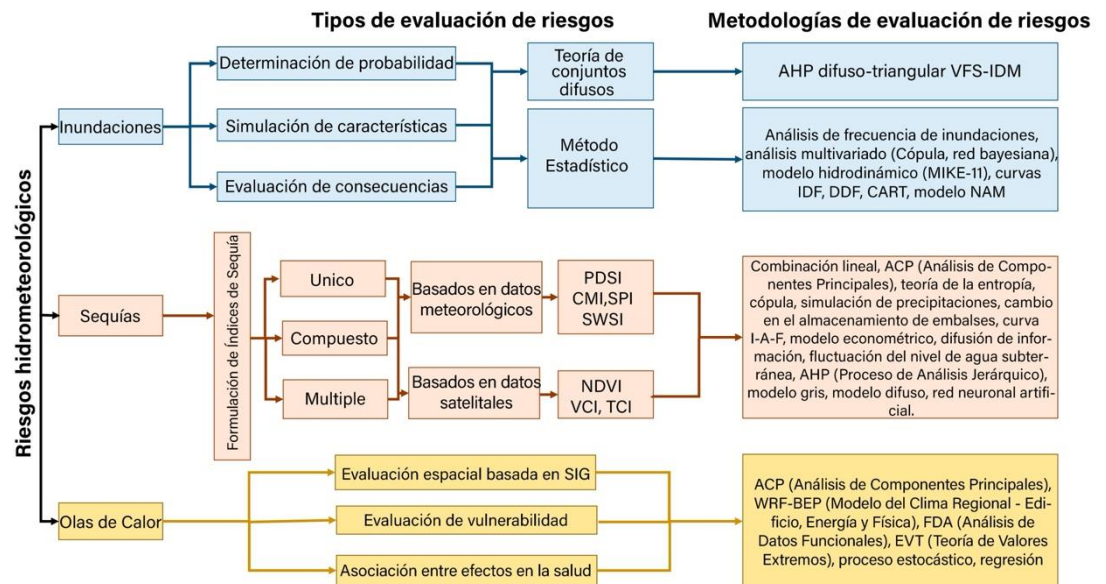


Figura N°4: Tipos de evaluación de riesgos y sus metodologías para los riesgos hidrometeorológicos de inundaciones, sequías y olas de calor.

2.4.1. Evaluación de riesgo de inundación.

La inundación es una condición en la que un paisaje queda sumergido en agua debido a lluvias intensas, marejadas ciclónicas, mareas altas u otras causas naturales de sobrecarga

de agua; esto provoca devastación a gran escala en vidas, recursos y la economía [26]. Las inundaciones se consideran uno de los desastres naturales más frecuentes, causando muchas muertes y daños cada año [27]. En Europa, entre 1980 y 2016, causaron enormes pérdidas de vidas, lesiones, daños a la propiedad, infraestructuras y ecosistemas [28]. Se espera que las inundaciones sean más frecuentes en futuras condiciones climáticas [29]. El riesgo de inundación puede describirse como la probabilidad de que ocurra un peligro de inundación que conlleve una pérdida asociada o un impacto negativo en la sociedad [30]. El riesgo de inundación no solo está determinado por la naturaleza del peligro, la exposición y la vulnerabilidad de la población y la propiedad, sino también por la adaptación, mejora y anticipación de la población afectada y el ecosistema, lo que colectivamente se denomina "resiliencia del medio ambiente". Tradicionalmente, los riesgos de inundación se han gestionado mediante infraestructuras grises, como sistemas de drenaje [31], diques fluviales, dunas, presas y otros [30].

Métodos de evaluación del riesgo de inundación.

La evaluación del riesgo de inundación puede abordarse de diferentes maneras, según [12]: (1) Los métodos estadísticos son una forma de relacionar los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia utilizando funciones de distribución de probabilidad basadas en registros históricos/proyectados a largo plazo. Estos métodos tienen en cuenta la evaluación de peligros y vulnerabilidad, requieren una gran cantidad de datos y conllevan incertidumbre en la evaluación de la distribución espacial de la inundación. (2) El análisis multicriterio, generalmente combinado con el Proceso Jerárquico Analítico Difuso o SIG, se basa en un sistema de indexación donde el riesgo de inundación es la capa objetivo y el peligro, la exposición y la vulnerabilidad son las capas de índice. La determinación de factores subjetivos en estas capas es la principal limitación de este método. (3) El sistema de información geográfica (SIG) combinado con técnicas de teledetección (RS) puede analizar el peligro, la exposición y la vulnerabilidad en la capa de salida, basándose en los datos de la capa de entrada (terreno, tormentas, etc.). El alto costo de la RS, la necesidad de datos altamente resueltos y las inexactitudes en las evaluaciones cuantitativas son algunos inconvenientes de este método. (4) El análisis de inundaciones basado en escenarios, basado en el análisis de riesgos inmediatamente antes de su ocurrencia, está restringido a una pequeña región y utiliza datos de geomorfología, topografía y sistemas de drenaje urbano. Uno de los principales desafíos en la evaluación del riesgo de inundación es desarrollar escenarios de inundación. Actualmente, la modelización de inundaciones se agrupa en dos tipos: métodos empíricos y modelos hidrodinámicos con diferentes dimensiones (1D, 2D y 3D). Los métodos empíricos son útiles para el monitoreo de inundaciones y la evaluación post-desastre, pero los modelos hidrodinámicos representan la dinámica detallada del flujo, lo cual es necesario para

estudiar el impacto de la rotura de presas, tsunamis o inundaciones repentinas [11]. Los métodos empíricos de modelización de inundaciones se basan en datos observacionales históricos recopilados a través de encuestas y mediciones, que luego se analizan para preparar un escenario robusto de inundación. Los resultados de estos modelos se utilizan generalmente para la toma de decisiones, así como para ser utilizados como insumo en otros modelos, como el análisis de la extensión de las inundaciones mediante teledetección, o para establecer puntos de referencia para los modelos hidrodinámicos [32]. Por otro lado, los modelos hidrodinámicos son modelos matemáticos computacionales que generan escenarios de inundación basados en simulaciones del movimiento del agua en áreas potencialmente propensas a inundaciones [8]. Existen técnicas numéricas en 1D, 2D y 3D para la modelización hidrodinámica que permiten identificar las causas y cambios en la topografía y el clima que conducen a inundaciones. Los modelos 1D (por ejemplo, HEC-RAS, MIKE 11) representan de manera simple el flujo de la inundación en una dimensión a lo largo de la línea central del río [33, 8], mientras que los modelos 2D (por ejemplo, FLO2D Pro) muestran el flujo de la inundación en dos dimensiones a lo largo del área longitudinal y horizontal del cauce del río [34; 35]. Los modelos 2D se aplican ampliamente en la elaboración de mapas de extensión de inundaciones y en la evaluación del riesgo de inundación [8]. Los modelos 3D, aunque se consideran altamente complejos y raramente utilizados, se desarrollaron añadiendo la profundidad del agua como tercera dimensión, lo que permite representar la inundación de características verticales durante eventos catastróficos como inundaciones por rotura de presas, inundaciones repentinas, tsunamis y rupturas de diques [8; 36].

En [37] estudiaron los patrones de desigualdad social en cuanto a la exposición al riesgo de inundaciones, su impacto y vulnerabilidad en relación con la privación, pobreza, edad y género en el Reino Unido. Encontraron que los factores responsables de estos patrones de desigualdad social eran las prácticas de gestión de inundaciones y el cambio climático, y argumentan que las desigualdades ambientales deben ser abordadas. También existen evaluaciones económicas de daños por inundaciones [9] y metodologías de evaluación que utilizan la pérdida de vidas humanas debido a las inundaciones [10] para una evaluación integral del riesgo de inundaciones. Existen algunos métodos de evaluación de riesgos múltiples, como redes bayesianas, modelos basados en agentes, modelos de dinámica de sistemas, árboles de eventos y fallos, y modelos híbridos [38], en los cuales se puede incorporar la evaluación del riesgo de inundación. Los métodos generales empleados para analizar el riesgo de inundación son la determinación de la probabilidad de inundación, la simulación de las características de la inundación y la evaluación de las consecuencias de la inundación [39]. La Tabla II proporciona un resumen de estudios relevantes que aplican diferentes metodologías/modelos para la evaluación del riesgo de

peligro de inundación. Estos pueden categorizarse en dos grandes tipos [40]: (1) métodos que utilizan la teoría de conjuntos difusos o un método de índice integral [41]; y (2) métodos que implican la teoría de probabilidad [42].

Tabla II

Resumen de estudios relevantes que aplican diferentes metodologías/modelos para la evaluación del riesgo de inundación y el tipo de datos requeridos.

HMR	Resumen	Limitación o brecha	Referencia
Cuenca del Cross Bayou, Florida (inundación costera)	Análisis de cópulas, modelo de cuenca de enrutamiento de estanques y canales interconectados (ICPR)	Lluvia diaria, velocidad media diaria del viento, presión barométrica diaria y fase lunar para el peligro; distancia a un cuerpo de agua importante, pendiente, elevación a partir de un mapa de elevación digital (DEM), condición del suelo y porcentaje de superficie impermeable para la vulnerabilidad; datos del terreno, datos hidrológicos, datos hidráulicos y datos climáticos para la exposición y datos de resiliencia (verde-azul-gris y su respectivo tiempo de recuperación).	[30]
Tramo de Varsovia del río Vístula, Polonia	Análisis de frecuencia de inundaciones utilizando niveles de agua simulados por un modelo de enrutamiento de flujo distribuido. Estimación de Incertidumbre de Verosimilitud Generalizada (GLUE) para la incertidumbre.	Datos de geometría de canales y llanuras de inundación, datos hidrológicos (flujos máximos anuales, niveles de agua y etapas).	[42]
Cuenca del río Delaware en Port Jervis, NY, EE. UU	Enfoque basado en cópulas trivariadas.	Descarga máxima anual de picos, volumen y duración del evento de inundación (61 años: 1949 a 2009)	[43]
Río Yangtsé inferior, China	Modelo de evaluación híbrido basado en el proceso de jerarquía	Datos de DEM (modelo digital de elevación), datos de mapa ortofoto digital (DOM), datos de lluvia, datos de elevación, datos de uso del suelo y datos sociales y económicos.	[40]

	analítica difusa (AHP) y números difusos triangulares (TFN)		
Hunan, China	Modelo de regresión lineal múltiple y árbol de clasificación y regresión (CART)	Datos de pérdida económica directa, datos de precipitación total y días de tormenta, datos de condición superficial (tipo de suelo, densidad de ríos, grado de relieve de la superficie terrestre (RDLS), tipo geomorfológico predominante) y datos de vulnerabilidad (población, PIB, densidad de carreteras y diques)	[44]
China	Proceso de jerarquía analítica (AHP), método de difusión de información (IDM) y metodología de conjunto difuso variable (VFS)	Área afectada por el desastre, casas colapsadas, población fallecida, área inundada	[41]
Rio Yom, Tailandia	Modelo Nedbør-Afstrømnings (NAM), un modelo hidrológico de lluvia-escorrentía y el modelo hidrodinámico MIKE-11 con SIG, Riesgo = Factor de peligro multiplicado por el factor de vulnerabilidad	Datos de lluvia temporal, datos de escorrentía, propiedades de la cuenca, evaporación, sección transversal del río, datos de levantamiento topográfico, datos de rendimiento de cultivos y precio unitario de cada tipo de cultivo, datos de infraestructura.	[45]
Rio Mulde, Alemania	Análisis espacial multicriterio (MCA): un enfoque disyuntivo y un enfoque de ponderación	Datos de inundación, valor de activos, datos de uso del suelo, datos puntuales de puntos críticos sociales y datos de valores ambientales.	[46]

	aditiva con SIG, herramienta de software FloodCalc.		
Jiaying, China	Modelo InfoWorks ICM, Cópula	Datos de lluvia	[31]
Hirakata, Japón	Modelo de frecuencia de inundaciones basado en lluvia	Datos de lluvia	[47]

A. Metodología de lógica difusa.

La teoría de conjuntos difusos emplea un valor sintético al tener en cuenta todo tipo de indicadores para medir el nivel de riesgo; el valor puede ser una función de la mortalidad o expresarse en términos monetarios, como la pérdida económica [44]. En [40] utilizaron un modelo basado en el proceso de jerarquía analítica difusa triangular (AHP) para la clasificación de la importancia de los índices de riesgo, la predicción integral de inundaciones y el análisis de medidas de respuesta al riesgo. Se analizó el riesgo difuso de desastres por inundación y se calculó cuantitativamente el riesgo de inundación en el área del Bajo Río Yangtsé, China.

En [41] afirmaron que un modelo difuso basado en conjuntos difusos variables (VFS) y el método de difusión de información (IDM) era mejor que la estimación estadística para el riesgo de inundación, ya que el resultado del modelo VFS-IDM se acercaba más al estándar. La evaluación del riesgo de inundación se llevó a cabo mediante: (1) la determinación de los pesos de los indicadores de inundación utilizando AHP, (2) la conversión de los indicadores multidimensionales de las muestras en un valor de grado unidimensional utilizando VFS-AHP, (3) la conversión del valor de grado de la muestra en un conjunto difuso, luego obteniendo el valor de estimación de riesgo requerido por IDM, y (4) el cálculo del período de retorno de acuerdo con el valor de estimación del riesgo.

B. Análisis de frecuencia de inundaciones.

El análisis de frecuencia de inundaciones (FFA, por sus siglas en inglés) ha sido aplicado para estimar los cuantiles de inundación en [42]. Simularon los niveles de agua utilizando un modelo de enrutamiento de flujo distribuido, empleando los caudales máximos anuales de los ríos para la cuenca del Vístula en Polonia y mapearon la probabilidad de inundación según el período de retorno requerido. Las muestras de caudales históricos son inadecuadas para representar el efecto del desbordamiento de ríos aguas arriba en las frecuencias extremas de inundaciones

aguas abajo, ya que rara vez ocurre cuando las áreas aguas arriba están protegidas por sistemas de diques fluviales [47]. Especialmente en cuencas de grandes ríos que incluyen varias llanuras aluviales potenciales, el desbordamiento de ríos en áreas aguas arriba debe ser considerado al evaluar el riesgo de inundación utilizando técnicas de FFA, para evitar la sobreestimación o subestimación del riesgo de inundación aguas abajo. Además, las condiciones subyacentes de la cuenca, como el tamaño y la forma, la cobertura vegetal, el relieve y la pendiente, el número de afluentes y las condiciones antecedentes (como la profundidad de la nieve y la humedad del suelo) también pueden producir una sobreestimación o subestimación del riesgo asociado con eventos de inundación [48].

[47] utilizaron un modelo de frecuencia de inundaciones basado en precipitaciones (RFFM, por sus siglas en inglés) para examinar el impacto de la operación de presas aguas arriba y el desbordamiento de diques fluviales en la cuenca del río Yodo en Japón, y estimaron la frecuencia de inundaciones extremas más allá del nivel de diseño. En este estudio, un modelo de inundación para el área de la ciudad de Kioto fue combinado con RFFM, lo que tuvo en cuenta la probabilidad de patrones espaciales y temporales de precipitación sobre la cuenca del río.

A veces, las inundaciones son causadas por una combinación de factores, como el flujo máximo, su duración y volumen. En tales casos, se puede utilizar un método de análisis de riesgo multivariado que tenga en cuenta más de una variable. Las redes bayesianas y las copulas han sido utilizadas para analizar el FFA multivariado en aplicaciones de diseño hidráulico (por ejemplo, la estimación de un período de retorno de 100 años). En [30] utilizaron funciones copula para modelar la asociación entre el riesgo de inundación y la resiliencia de la ingeniería. El riesgo fue formulado utilizando una métrica de resiliencia dependiente del peligro, la vulnerabilidad y la exposición del área en cuestión, es decir, la cuenca hidrográfica de Cross Bayou en Florida. Una metodología copula trivariada fue utilizada en [43] para una evaluación efectiva del riesgo de inundaciones. La distribución conjunta de tres variables de inundación (flujo máximo anual, volumen y duración) se construyó en base a cuatro copulas trivariadas: tres formas totalmente anidadas de familias de copulas de Archimedean (Clayton, Gumbel–Hougaard y Frank copulas); y una familia de copulas elípticas (copula t de Student).

C. Metodología para inundaciones urbanas.

El fallo de los sistemas de drenaje urbano debido a la sobrecarga hidráulica durante lluvias intensas o eventos de tormenta puede llevar a inundaciones urbanas. Las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF), las curvas de profundidad-duración-

frecuencia (DDF) junto con las tormentas de diseño se han utilizado en el diseño de sistemas de drenaje y la evaluación del riesgo de inundaciones urbanas [31].

En [31] desarrollaron una nueva metodología de análisis probabilístico para la evaluación de riesgos de inundación urbana considerando el sistema de drenaje específico de la cuenca en Jiaxing, China. Después de extraer parámetros característicos de hietogramas aleatorios, se utilizó un modelo hidrodinámico que usa InfoWorks ICM para simular las condiciones operativas de un sistema de drenaje bajo algunas lluvias de entrada. Basado en los resultados de la simulación del modelo, se realizó un análisis de correlación entre las características de los eventos de tormenta y las inundaciones urbanas, lo que proporcionó dos parámetros más sensibles de los eventos de tormenta: la intensidad media de lluvia (I) y la intensidad máxima de lluvia en 30 minutos (30-Rp) en relación con las magnitudes de las inundaciones y sus umbrales. Se aplicaron métodos de copula para describir la distribución de probabilidad conjunta de I y 30-Rp, y el riesgo de inundación se evaluó calculando la frecuencia de ocurrencia de todos los eventos de tormenta para los cuales los parámetros sensibles superaron el umbral definido.

D. Modelado matemático.

Los factores de impacto meteorológicos, como la precipitación total y los días de lluvia en la temporada de lluvias, tienen un impacto mayor en el riesgo de inundación que otros parámetros de superficie (altitud y suelo) y vulnerabilidad (población, PIB, carreteras, diques). En [44] utilizaron un árbol de clasificación y regresión (CART) para evaluar el riesgo de inundación en la provincia de Hunan, China. CART es un modelo basado en árboles y es adecuado para la modelización de daños por inundaciones porque permite no linealidades, interacciones de predictores y el uso de variables categóricas y continuas [49]. El modelo calculó los factores de impacto principales a partir de variables complejas y determinó su umbral, que luego se utilizó para evaluar el riesgo de inundación. Utilizaron el error cuadrático medio (RMSE) como método de comparación entre los dos modelos utilizados, y el resultado mostró que el RMSE fue menor para CART que para la regresión lineal múltiple. El escurrimiento para un conjunto dado de datos de lluvia se modeló utilizando el modelo de lluvia–escurrimiento NAM [45], y el modelo hidrodinámico MIKE-11 se utilizó para simular la propagación de ondas de inundación para escenarios de inundaciones de períodos de retorno de 25, 50, 100 y 200 años, para la llanura de inundación de Phrae en la cuenca del río Yom en el norte de Tailandia. El riesgo se calculó como un producto de los factores de peligro y vulnerabilidad para inundaciones de períodos de retorno de 50, 100 y 200 años. Se creó una base de datos GIS de criterios de riesgo económicos, sociales y ambientales, y se utilizaron dos enfoques de análisis

multicriterio, un enfoque disyuntivo y un enfoque de ponderación aditiva basado en GIS, para una evaluación general del riesgo de inundación en el área del río Mulde en Sajonia, Alemania [46].

2.4.2. Métodos de evaluación del riesgo de sequía.

Los desastres naturales están aumentando a un ritmo alarmante en todo el mundo, y la sequía es una de las calamidades naturales más severas, causando un gran daño a los humanos, la producción agrícola y la sociedad [50]. Se define generalmente como un fenómeno climático recurrente caracterizado por un déficit de agua durante un período de tiempo que varía desde meses hasta años, en contraste con las inundaciones que ocurren en una escala temporal más corta. Se caracteriza por un desarrollo lento, una duración prolongada, alta severidad y áreas afectadas extensas. La sequía puede ser de cuatro tipos según sus mecanismos impulsores [51]: meteorológica, hidrológica, agrícola y socioeconómica.

La sequía meteorológica es un período de meses a años con un déficit en la precipitación o el balance hídrico climatológico (es decir, precipitación menos evapotranspiración potencial) en una región dada. Este déficit se define con respecto a la climatología a largo plazo. La sequía agrícola es un período con humedad del suelo reducida en la zona de las raíces de las plantas que resulta de una precipitación inferior a la media, menos eventos de lluvia o evaporación superior a la normal. La sequía hidrológica ocurre cuando el caudal de los ríos y los almacenes de agua en acuíferos, lagos o embalses caen por debajo de los niveles medios a largo plazo [52]. La sequía hidrológica se desarrolla más lentamente porque involucra agua almacenada que se agota, pero no se repone. La sequía socioeconómica se relaciona con la disponibilidad y los requisitos de ciertos bienes o servicios económicos combinados con las tres formas anteriores de sequía [53]. Comprender la interrelación de estos tipos de propagación de sequía podría ser una parte crucial de la evaluación de riesgos en el campo de la monitorización y gestión de sequías [54; 55]. Por ejemplo, cuando hay una precipitación muy baja, se produce una sequía meteorológica. Luego, la sequía meteorológica se propaga a una sequía agrícola, caracterizada por una baja o deficiente humedad del suelo y puede causar fracaso de cultivos y mala gestión del agua. La sequía hidrológica ocurre como resultado de uno o una combinación de factores como baja humedad del suelo, bajo caudal de ríos o nivel freático. La sequía socioeconómica es causada por una combinación de las sequías mencionadas anteriormente, por ejemplo, reducción del suministro de agua y aumento de la demanda de agua. Por lo tanto, la monitorización de la sequía es importante para la alerta temprana y la gestión del riesgo de escasez de agua.

La demanda de agua está aumentando debido a la expansión de la industria, la agricultura, la población, la urbanización, el calentamiento global y el desarrollo de la economía social, lo que está llevando a una escasez de agua y a una amenaza global de sequía [50] se espera que la sequía se vuelva más severa y frecuente [56]. El uso excesivo de los recursos hídricos, como el agua subterránea durante sequías severas, también expone a los ambientes costeros a una penetración anómala de agua salada en el agua dulce, conocida como Intrusión de Agua Salada (SWI, por sus siglas en inglés). Sin embargo, la SWI también puede ocurrir de forma natural debido a excursiones de mareas, elevación del nivel freático por el aumento del nivel del mar y disminución del caudal de los ríos debido a cambios en la geometría del cauce [12, 57]. Casi imperceptible al principio, la detección de este fenómeno suele ser tardía, por lo tanto, los costos económicos de reparación son extremadamente altos para las comunidades locales. En algunos casos, la SWI puede alcanzar niveles incontrolables, especialmente en regiones altamente afectadas por el cambio climático [58 – 61]. Por lo tanto, se requiere una evaluación precisa del riesgo de sequía para prevenir, adaptarse y mitigar los desastres por sequía. El riesgo de sequía puede reducirse con una planificación y preparación adecuadas, pero las estrategias de mitigación mal informadas conducen al desperdicio de energía, materiales y dinero. Para prevenir este mal uso de los recursos, se requiere una evaluación adecuada del riesgo y su gestión a través de Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBS, por sus siglas en inglés) amigables con el medio ambiente y rentable. Dado que las sequías son uno de los desastres naturales más costosos anualmente [62], la evaluación del riesgo de desastres por sequía es un método científico importante para analizar el riesgo de sequía y puede proporcionar información para ayudar a los responsables de políticas a formular políticas de prevención y mitigación de desastres.

Evaluación de riesgo de riesgo de sequía.

La evaluación del riesgo de sequía es una tarea difícil y complicada porque no existe una definición universalmente aceptada de sequía y es un fenómeno natural que no se comprende completamente. Factores naturales como la meteorología y la hidrología, las estructuras de cultivo y las capacidades de resistencia afectan todo el riesgo de sequía. Algunos de los métodos utilizados para la evaluación del riesgo de sequía son el análisis de componentes principales, los métodos del proceso de análisis jerárquico, los métodos de evaluación difusa, los métodos de evaluación de grises y los modelos de redes neuronales artificiales.

Las sequías influyen principalmente en la agricultura y los recursos hídricos, lo que lleva a graves retroalimentaciones socioeconómicas [63]. Por lo tanto, un modelo de gestión del riesgo de sequía debe centrarse en las necesidades sociales, económicas e

infraestructurales individuales y colectivas de una región específica [64]. Para la evaluación del riesgo de sequía, se han revisado diferentes índices de sequía. La gestión del riesgo de sequía implica la evaluación de la exposición, vulnerabilidad e impacto de la sequía, con la adición de herramientas de monitoreo y pronóstico (estaciones in situ, datos de teledetección y modelos numéricos) para las acciones de preparación y mitigación [62]. El objetivo final es proporcionar información con anticipación al inicio del período de sequía para promover acciones dentro de un plan de gestión del riesgo de sequía, con el fin de minimizar los impactos. El Informe del Plan de Gestión de Sequías de la Comisión Europea [65] ofrece dos enfoques para la gestión del riesgo de sequía: El enfoque reactivo, basado en la gestión de crisis (medidas y acciones después de que haya comenzado un evento de sequía) y el enfoque proactivo, que se basa en la gestión del riesgo de sequía e incluye medidas tomadas con antelación utilizando herramientas apropiadas y la participación de los interesados. Para apoyar una evaluación integrada del riesgo de sequía, el "Manual de Indicadores e Índices de Sequía" de la OMM [62] proporciona tres métodos principales para el monitoreo de sequías: Usar un solo indicador o índice, usar múltiples indicadores o índices y usar indicadores compuestos o híbridos. Es importante que estos índices reflejen y representen con precisión los impactos experimentados durante las sequías. A medida que el peligro evoluciona, los impactos pueden variar según la región y la temporada. En [13] revisaron los índices de sequía comúnmente utilizados, por ejemplo, SPI, CMI, PDSI, SWSI y SRI, y compararon su utilidad y limitaciones (básicamente todos usan precipitación ya sea sola o en combinación con otros elementos meteorológicos).

En [14] presentaron la construcción de principales índices multivariados de sequía como PDSI, USDM, OBNDI y VegDRI. Los métodos de desarrollo utilizados fueron un modelo de balance hídrico y análisis estadístico multivariado, como variables latentes, combinación lineal, distribución multivariada y análisis de componentes principales. Además, varios estudios intentan correlacionar el riesgo de sequía con el peligro socioeconómico y la vulnerabilidad de una región y estudiarlos en conjunto [66; 67].

A. Método de indexación.

El riesgo de sequía depende de su duración, frecuencia, severidad, extensión espacial y la capacidad socioeconómica e infraestructural de la región para enfrentar el peligro de sequía. El peligro de sequía se caracteriza por sus variables, como precipitación, humedad del suelo, temperatura del aire, etc. La formulación de índices de sequía es la base de la evaluación del riesgo de sequía y se emplea para identificar, monitorear o cuantificar un evento de sequía. Hoy en día, se han desarrollado muchos índices de

sequía en la literatura científica, como índices simples, múltiples y compuestos; estos se han utilizado para evaluar diferentes tipos de sequías según el número y tipo de variables involucradas [50]. Estos índices se han categorizado según su nivel de facilidad y país de uso, basado en el número de variables necesarias, cantidad y frecuencia de los datos requeridos, complejidad del cálculo y la disponibilidad gratuita del código para ejecutar el índice [62]. Los índices de sequía simples o múltiples solo pueden reflejar un tipo de sequía (meteorológica, hidrológica, agrícola o socioeconómica). La indexación compuesta distingue entre los diferentes tipos de sequías que ocurren simultáneamente e intenta resolver la relación complicada entre las diferentes variables. La combinación lineal, el análisis de componentes principales, el método de ponderación de entropía y las funciones copula son algunos de los métodos disponibles para construir un índice compuesto de sequía.

En [51] revisaron la evaluación del riesgo de sequía mediante la formulación de índices basada en técnicas de teledetección y SIG. Entre los índices utilizados extensamente para la evaluación del riesgo de sequía se encuentran los índices de sequía meteorológica, como el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI), el Índice de Humedad de Cultivos (CMI), el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) y el Índice de Abastecimiento de Agua Superficial (SWSI); y los índices de sequía basados en satélites, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice de Condición de Vegetación (VCI) y el Índice de Condición de Temperatura (TCI) [62]. SPI se basa en un enfoque de precipitación y probabilidad, mientras que PDSI se basa en la ecuación de balance de agua en el suelo.

En [52] utilizaron el Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado (SPEI), que considera el papel de la temperatura y la precipitación en la detección, monitoreo y evaluación de los efectos del calentamiento global en las condiciones de sequía. Se usaron datos de cuadrícula a largo plazo, base SPEI y datos de estaciones meteorológicas a mediano plazo con un método de peso inverso de distancia (IDW) para evaluar el patrón espaciotemporal de los eventos de sequía y sus intensidades en Bangladesh en diferentes intervalos de 6, 12, 24 y 48 meses.

Las funciones copula son útiles en la formulación de índices multivariados. En [50] emplearon funciones copula multidimensionales para construir un índice compuesto no lineal multivariado de sequía (NMDI) integrando índices de sequía meteorológica, hidrológica y agrícola. Basado en el NMDI construido y la teoría de corridas, se identificaron tres características de sequía (es decir, duración, pico y severidad) y se obtuvo el riesgo multivariado de sequía para la cuenca del río Wei en China.

En [68] también utilizaron funciones copula bivariadas y trivariadas para construir las distribuciones de probabilidad conjunta de variables de sequía correlacionadas

aleatoriamente (duración, severidad y flujo mínimo), para determinar el comportamiento probabilístico de las sequías hidrológicas en la cuenca del río East, China. En [69] modelaron la sequía espacialmente al calcular el SPI de 6 meses (SPI-6) en varias cuadrículas. Se utilizó la distribución conjunta basada en copulas para calcular los periodos de retorno condicionales y las curvas de intensidad-área-frecuencia (I-A-F) de la sequía.

B. Fluctuación del nivel de aguas subterráneas o embalses.

En [70] se evaluó el riesgo de sequía hidrológica analizando las tendencias de fluctuación del nivel de aguas subterráneas en escalas multi-anales y estacionales, así como los valores de niveles críticos, durante el período de estudio de 1999 a 2013 en dos ecosistemas dependientes de aguas subterráneas en la parte central del Valle del Vístula, Polonia. Los períodos en los que el nivel de aguas subterráneas cayó repetidamente por debajo del promedio de la profundidad mínima de aguas subterráneas de cada año se consideraron como períodos de sequía hidrogeológica. El riesgo de sequía de un embalse multipropósito en Corea debido al cambio climático fue analizado en [71]. Se utilizaron datos de precipitación estadísticamente reducidos para simular el escurrimiento, que a su vez se usó como entrada en un modelo de balance hídrico. La evaluación del riesgo se realizó analizando los cambios en el almacenamiento del embalse, según los escenarios de oferta y demanda de agua.

En [72] evaluaron el riesgo de sequía a corto plazo informado por el clima en Australia, basado en simulaciones estocásticas de precipitación (modelo CIMSS) condicionadas a los impulsores climáticos iniciales y al nivel de almacenamiento del embalse.

C. Evaluación de la vulnerabilidad y mapeo del riesgo.

La evaluación de la vulnerabilidad es otro método para evaluar el riesgo de eventos hidrometeorológicos extremos. En [73] calcularon un Índice de Vulnerabilidad a la Sequía (DVI) para 46 países africanos durante el período 1960-2015, basado en un análisis multidimensional de varios factores socioeconómicos divididos en seis componentes diferentes, que fueron examinados para dependencia utilizando una prueba de multicolinealidad. Se aplicaron diversas metodologías de ponderación para calcular el DVI. Se utilizó un análisis de punto de cambio para el DVI de cada país. Se ajustaron modelos de regresión a las series temporales históricas del DVI para cada país y se extrapolaron los resultados para el período 2020-2100, proporcionando tres proyecciones futuras del DVI (baja, media y alta).

En [74] combinaron los daños por sequía (DD) y la intensidad de la sequía (DS), calculados a partir del índice de precipitación estandarizado (SPI), para establecer las relaciones de vulnerabilidad entre DD y DS para el suroeste de China, utilizando

métodos de distribución y difusión de información. El riesgo de sequía se evaluó combinando la función de probabilidad de la DS y la curva de vulnerabilidad DD.

La tecnología de difusión de información también se utilizó para el análisis del riesgo de sequía agrícola por [75] en China. Estimaron la probabilidad de riesgo de desastre por sequía y la relación difusa entre la tasa anual de áreas afectadas por sequía y las pérdidas de producción de granos causadas por sequía. Se prepararon mapas de distribución espacial del riesgo de desastre por sequía para cada área principal de producción de granos.

En [76] utilizaron un marco basado en datos para calcular los índices de peligro y vulnerabilidad a la sequía para 229 distritos administrativos en Corea del Sur. Evaluaron y mapearon el riesgo de sequía como un producto de los índices de peligro y vulnerabilidad, utilizando datos hidro-meteorológicos y socioeconómicos.

En [76] produjeron una zonificación de riesgo integrada para sequía y encharcamiento en la provincia de Anhui en China, combinando el método de ponderación por combinación de entropía, GIS de cuadrícula, un método de índice de riesgo de desastres naturales y métodos de evaluación comprensiva difusa.

A escala global, en [54] propusieron una metodología para mapear la distribución global del riesgo de sequía para el período 2000-2014 utilizando un producto combinado de peligro histórico de sequía, estimaciones actuales de exposición a la sequía y vulnerabilidad. El peligro de sequía se derivó de un análisis no paramétrico de déficits históricos de precipitación a una resolución de 0.5 grados; la exposición a la sequía se basó en una agregación no paramétrica de indicadores de población y densidades de ganado, cobertura de cultivos y estrés hídrico; la vulnerabilidad a la sequía se calculó como el compuesto aritmético de factores de alto nivel de indicadores sociales, económicos e infraestructurales, recogidos a niveles nacional y subnacional. Su metodología se basó en la distribución acumulativa conjunta de los respectivos indicadores de peligro, exposición y vulnerabilidad. Por lo tanto, la magnitud del riesgo estimado no significaba pérdida absoluta o daño real a la salud humana o al medio ambiente, sino que es ideal para la clasificación y comparación de las regiones geográficas de entrada [54].

D. Identificación de Intrusión de agua salada.

Otro método para evaluar el riesgo de impacto de la sequía es la identificación de la intrusión de agua salada (SWI). Por definición, la SWI se identifica por la cantidad de sal en el agua, es decir, por su concentración de salinidad. Este parámetro puede ser monitoreado directamente en diferentes ubicaciones, períodos y niveles de profundidad. Dado que la salinidad puede expresarse como una función de la relación entre la conductividad de la muestra de agua y la solución estándar de cloruro de

potasio, es posible obtener distribuciones tridimensionales de salinidad mediante mediciones de la conductividad del agua, C (o su resistividad $R = 1/C$), en varios lugares de un cuerpo de agua [77]. Estas distribuciones permiten la detección de la interfaz entre agua dulce y salina a través de evaluaciones de superficies isohalinas. En ausencia de estaciones permanentes, las campañas dedicadas que recogen varias muestras a lo largo del cauce del río en diferentes niveles de profundidad ayudan a identificar la magnitud de la SWI y, por ende, el riesgo de impacto de la sequía.

Básicamente, la SWI es impulsada por la interacción de los sistemas hidrológicos, es decir, la conexión entre aguas subterráneas y aguas superficiales. Como se mencionó anteriormente, la mayor densidad del agua de mar tiende a desplazar el agua dulce, produciendo un contraflujo dependiente de la profundidad. La intrusión de agua de mar en los lechos fluviales persiste incluso si el nivel freático está por encima del nivel del mar. Por lo tanto, el agua dulce transportada y descargada por el río influye directamente en la intrusión salina. Además, la cantidad de precipitación en la cuenca también influye en el flujo del río, que debe ser monitoreado con precisión para obtener una estimación confiable de la distribución de salinidad mediante modelos de regresión [78]. El flujo del río se puede medir mediante estaciones permanentes o durante campañas dedicadas, mientras que los valores de precipitación se pueden recopilar fácilmente mediante estaciones meteorológicas sin ópticas cercanas. El nivel del mar es otro factor que influye en la SWI y varía debido a las condiciones meteorológicas, los efectos de las mareas y el cambio climático. Según [79], el hundimiento del terreno también contribuye al nivel del mar, dentro de una variación a largo plazo. Su estimación es crucial para evaluar el riesgo de SWI, ya que influye en el aumento global del nivel del mar y en el fenómeno del retroceso de la línea costera [80].

E. Modelado económico del riesgo.

El riesgo de sequía también puede evaluarse vinculando la escasez de agua con la productividad económica. Al introducir cambios estocásticos en los niveles de almacenamiento de los embalses en los modelos de regresión, los modelos de riesgo econométrico conectan la variabilidad hidrológica con la variabilidad económica resultante. El impacto económico de la sequía fue evaluado por [81] para diversas provincias de España, a través de patrones de cultivo observados, rendimientos, consumo de agua y precios prevalecientes en cada temporada. El riesgo de sequía en términos de impacto económico se simuló (simulación de Monte Carlo) basado en la estocasticidad de la fuente de suministro de agua de riego, para obtener funciones de distribución de probabilidad ex-ante del valor de producción económica, meses antes

del inicio de la temporada. Este método puede ayudar a los gestores de agua y tomadores de decisiones en la gestión de embalses.

En [82] también presentaron una evaluación del riesgo de impacto económico de la sequía para la agricultura de regadío en la cuenca del río Júcar, España, a través de una combinación de (1) modelado estocástico autoregresivo de series temporales para predecir los influjos y cambios en los futuros niveles de almacenamiento de los embalses del sistema al inicio de la temporada de riego; (2) simulación de la operación del sistema, utilizando regresiones para evaluar las entregas de agua basadas en influjos y almacenamientos proyectados; y (3) ajuste de un modelo econométrico para la evaluación del impacto económico de la sequía mediante la evaluación de los cambios en el valor de producción de la agricultura en función de las entregas de agua de riego y los precios de los cultivos. Se utilizaron simulaciones de Monte Carlo para establecer funciones de probabilidad de influjos, que se tradujeron en probabilidades de almacenamiento, entregas y finalmente, el valor de producción agrícola.

El alcance de cada tipo de método de evaluación del riesgo de sequía depende del tipo de sequía, el área afectada y el contexto del ecosistema afectado. El método de indexación ha sido más promovido que otros, pero su utilidad para los responsables de políticas es limitada debido a su naturaleza estática y a que no involucra las complejidades de vulnerabilidad, exposición y riesgo [83].

2.4.3. Evaluación de riesgo de ola de calor.

Hasta ahora no existe una definición universalmente aceptada de olas de calor [84] debido a que la aclimatación y adaptación de la población pueden variar según el clima y las regiones [85]. Las definiciones en la literatura han utilizado percentiles [86], niveles de umbral fijos [87] y la duración temporal de valores extremos de temperatura para definir olas de calor [88]. A menudo, estas definiciones son específicas de la región y relevantes solo para los humanos, no aplicables a todo el entorno y su ecología. Asumiendo que las condiciones atmosféricas predominantes (humedad, aerosoles ambientales, etc.) sean constantes, las olas de calor han sido definidas en la mayoría de los estudios anteriores como períodos de clima extremadamente cálido, generalmente durante más de dos o tres días, que afectan la salud humana, la socioeconomía y los sistemas naturales [89].

Métodos de evaluación del riesgo de olas de calor.

Una revisión de estudios sobre el impacto en la salud de las olas de calor a nivel global fue realizada por [15], quienes encontraron una falta de estudios en los que se identifique a la población global en mayor riesgo. En [18] realizaron una relación entre la mortalidad y la intensidad del calor, y en [17] proporcionaron diferentes definiciones de olas de calor.

En [16] revisaron estudios sobre factores de vulnerabilidad a las olas de calor y la eficacia de las intervenciones de salud pública relacionadas con el calor, señalando que existe una falta de evidencia sólida sobre la eficiencia y efectividad de estas intervenciones. [90] revisó los métodos de medición de las olas de calor, sus mecanismos impulsores, los cambios observados y proyectados, y las causas antropogénicas de estos cambios. Propusieron un marco de medición unificado de olas de calor para reducir las brechas espacio-temporales en la red global de observación, aunque faltaba un concepto de evaluación de riesgos.

Los riesgos de las olas de calor han sido evaluados por muchos investigadores basándose en datos climáticos históricos [91] o datos observacionales [92]. Algunos también han utilizado proyecciones futuras de modelos climáticos (por ejemplo, [93, 94] y han analizado el riesgo futuro de olas de calor. Algunos estudios han evaluado este riesgo relacionando la mortalidad de una ubicación específica en un período de tiempo determinado con eventos de estrés por calor.

A. Mapeo de riesgos y vulnerabilidad a olas de calor basado en SIG.

En la mayoría de los estudios revisados en este trabajo, la evaluación del riesgo de calor se realiza utilizando conjuntos de datos de temperatura máxima diaria de diferentes fuentes. Los conjuntos de datos de temperatura se obtienen de estaciones meteorológicas, satélites, simulaciones/proyecciones de modelos y otras bases de datos regionales y globales de temperatura (por ejemplo, ECMWF y otras). Por ejemplo:

En [95] utilizaron la detección remota por satélite de las temperaturas de la superficie terrestre con alta resolución espacial (1 km) para la evaluación del riesgo espacial de calor en Birmingham, Reino Unido, empleando SIG e información compilada de agencias de referencia de crédito sobre grupos como personas mayores y aquellos con mala salud, alta densidad poblacional y viviendas en altura. Se encontró que los subgrupos poblacionales con mala salud y aquellos que residían en el centro de la ciudad estaban ubicados en las áreas más cálidas y, por lo tanto, con mayor riesgo de calor. Una limitación de este estudio fue que examinó solo un conjunto de datos de temperatura de una noche durante una ola de calor, y por lo tanto no representó completamente el rango de temperaturas a las que estaba expuesta la población durante el período de la ola de calor.

[92] desarrollaron un Índice de Vulnerabilidad al Calor para Londres, utilizando un enfoque inductivo basado en el análisis de componentes principales de factores sociodemográficos relacionados con la vulnerabilidad al calor (tipo de vivienda, densidad poblacional, edad, enfermedad, estatus socioeconómico, aislamiento social y estatus de minorías étnicas), combinado con temperaturas de la superficie terrestre

derivadas de datos satelitales para las olas de calor europeas de agosto de 2003. Encontraron agrupaciones de alta vulnerabilidad en las áreas este y central de la ciudad utilizando ArcGIS. Tres variables diferentes para el riesgo de calor (UHI, edad y tipos de viviendas) se integraron para estimar la distribución espacial de la vulnerabilidad al calor en Londres utilizando SIG [96]. Con un modelo de física de edificios, que simuló las temperaturas interiores de las viviendas y monitoreó datos meteorológicos, junto con información sobre UHI modelado, tipo de vivienda y edad de la población, se encontró que el tipo de edificio y UHI tuvieron un impacto significativo en la distribución del riesgo en la ciudad durante el verano de 2006; el riesgo relativo de mortalidad derivado de [97] se calculó a nivel de distrito de la ciudad en función de su población y tasa de mortalidad.

Una metodología novedosa para el mapeo de riesgos fue presentada por [98]. El modelo WRF-BEP (Building Energy Parameterization) simuló temperaturas horarias con alta resolución espacial (1 km) y cuantificó la exposición al calor debido al UHI para las poblaciones en los Midlands Occidentales, Reino Unido, durante dos períodos de olas de calor (agosto de 2003 y julio de 2006). Este mapeo de riesgos utilizando SIG superó los estudios previos [95, 92, 96] al calcular los factores que influyen en los efectos del calor sobre la salud: la temperatura ambiental se ponderó según las distribuciones de diferentes tipos de vivienda, población (incluida la edad) y el índice de privación. Este estudio también utilizó conjuntos de datos de temperatura ambiental generados a alta resolución temporal y espacial.

En [99] utilizaron una combinación de datos satelitales e información demográfica para crear un mapa de riesgo de olas de calor (HWR) para Atlanta, Georgia, para el 29 de junio de 2012. La temperatura de la superficie terrestre (LST) obtenida de datos satelitales se convirtió en temperaturas aparentes mediante regresión para crear un mapa de peligro de ola de calor. Los datos del mapa de peligro y la información demográfica (densidad poblacional, edad y estatus económico) se combinaron en un esquema de ponderación ajustable utilizando una fórmula generalizada para producir un mapa HWR.

B. Enfoque de modelado matemático/estático.

Algunos estudios evaluaron el riesgo de olas de calor utilizando conceptos matemáticos y estadísticos más complejos y métodos computacionales. Por ejemplo, en [89] utilizaron un concepto de lógica difusa para mapear la severidad del peligro de olas de calor intraurbanas y la distribución espacial del riesgo en Atenas, Grecia. Se emplearon tecnologías avanzadas como la teledetección por satélite, la modelización del clima urbano, la inteligencia artificial y el análisis computacional avanzado para elaborar mapas de peligro y riesgo mensuales que cubren los años recientes. Las

imágenes de temperatura de la superficie terrestre obtenidas por satélite se integraron en un modelo de clima urbano simple para estimar el peligro de olas de calor en una cuadrícula de 1 km. Un modelo de lógica difusa basado en inteligencia artificial se utilizó para clasificar las olas de calor desde suaves hasta extremas, considerando su duración, intensidad y momento de ocurrencia. Se produjeron mapas mensuales de riesgo de olas de calor integrando la información geoespacial sobre la vulnerabilidad de la población a las olas de calor, calculada a partir de variables socioeconómicas.

Otro marco estadístico, que combina el análisis de datos funcionales (FDA) y el teorema de valores extremos (EVT), fue propuesto para calcular las probabilidades de olas de calor con duración temporal, extensión espacial e intensidad especificadas [84]. Las probabilidades se calcularon determinando la región espacial, la duración y la intensidad, junto con una función de pérdida. Esta metodología se puede aplicar al cálculo de probabilidades de otros eventos meteorológicos extremos, incluidos las olas de frío y las sequías.

[85] propusieron un nuevo método estocástico para estimar medidas de riesgo, como la probabilidad y la duración media de las olas de calor. Este método utiliza la modelización de la dinámica de temperatura con un proceso de Ornstein–Uhlenbeck (OU) que revierte a la media. Los parámetros del proceso OU se estimaron mediante el método de los mínimos cuadrados, basado en los valores máximos diarios observados de las temperaturas. La ley del tiempo de golpeo se utilizó para obtener la función de distribución acumulativa del máximo. Las medidas de riesgo relacionadas con las olas de calor se obtuvieron analizando la dinámica de temperatura con los parámetros estimados utilizando simulaciones de Monte Carlo. Se usaron datos de temperatura observados para los veranos en París desde 1950 hasta 1984 para comparar con los datos simulados.

C. Efectos en la salud y asociación con el riesgo de olas de calor.

También se han utilizado datos sobre mortalidad y salud para evaluar el riesgo de olas de calor. La mortalidad atribuida a las olas de calor se ha cuantificado en términos de riesgo relativo; se encontró que la relación entre el aumento de la mortalidad y las olas de calor es acumulativa y distribuida con retraso [100]. En [85] utilizaron datos diarios de temperatura máxima y mortalidad de 2007 a 2013 para calcular el riesgo relativo de mortalidad con un modelo lineal generalizado de Poisson para 31 ciudades chinas, abarcando 15 definiciones de olas de calor. Se utilizó el Criterio de Información de Akaike (AIC) para evaluar el ajuste del modelo entre estas 15 definiciones de olas de calor. La misma metodología, utilizando un modelo aditivo generalizado cuasi-Poisson con un modelo no lineal con retraso distribuido, se empleó para ocho comunidades en Queensland, Australia, utilizando datos de 2013 a 2015 para

investigar los impactos de las olas de calor en las visitas a servicios de urgencias (EDVs) (Xu et al., 2019). Se realizó un meta-análisis de efectos aleatorios para investigar los efectos de las olas de calor en EDVs específicas por causa. El modelo de regresión cuasi-Poisson y el marco del modelo no lineal con retraso distribuido dependiente del tiempo también se usaron en España para estimar la relación entre temperatura y mortalidad y la efectividad de un Plan de Prevención de Salud en Calor para dos periodos: 1993–2003 y 2004–2013 [101]. Se calcularon fracciones atribuibles de mortalidad para observar los cambios temporales en la mortalidad relacionada con la temperatura.

En [102] también utilizaron modelos no lineales con retraso distribuido y meta-análisis para estimar el riesgo de mortalidad por olas de calor en Corea del Sur durante la temporada de verano de 2011–2014. Encontraron que la temperatura del globo de bulbo húmedo (WBGT) y su umbral eran mejores que otros índices de confort térmico, es decir, la temperatura del aire y el índice de calor (HI), para la estimación de riesgos de olas de calor. Utilizaron un modelo aditivo generalizado con una función de enlace y distribución cuasi-Poisson y regresiones segmentadas para estimar la temperatura umbral, es decir, la temperatura mínima de mortalidad. Al aplicar varios umbrales para cada índice, se encontró que WBGT estaba más asociado con riesgos significativos para la mortalidad por todas las causas, hospitalización debido a enfermedades respiratorias y hospitalización debido a trastornos por calor, en comparación con las otras dos definiciones de olas de calor consideradas.

En [103] calcularon las temperaturas interiores a partir de datos climáticos exteriores utilizando un modelo de edificio simple. Aunque el concepto de riesgo se definió sobre la base de la vulnerabilidad y la formulación de riesgos, se utilizaron tasas de mortalidad por todas las causas para el grupo de edad de 65 años y más en Berlín, Alemania, de 2001 a 2010 para definir el riesgo de olas de calor; se demostró que las contramedidas para el efecto de isla de calor urbano (como pavimentos frescos, espacios verdes urbanos, techos frescos, techos verdes y fachadas verdes) no necesariamente reducen el riesgo interior de olas de calor.

C. Riesgo de olas de calor para el clima futuro.

El riesgo de olas de calor para escenarios futuros también se ha estudiado utilizando proyecciones de datos de modelos climáticos. En [94] emplearon un modelo de difusión estocástica para describir la evolución de la probabilidad anual de olas de calor en vista de la evaluación de riesgos. Utilizaron datos de temperatura máxima de alta resolución de dos proyecciones de modelos climáticos entre 2006 y 2100 (95 años), basados en los escenarios del Representative Concentration Pathway (RCP4.5 y RCP8.5) presentados en el IPCC. El modelo acopló tres procesos estocásticos que

caracterizan el número anual de olas de calor (proceso de Poisson), su duración media (proceso Gamma) así como la temperatura media excedente en los días de olas de calor (proceso Gaussiano truncado). Tras usar mínimos cuadrados no lineales para la calibración del modelo, se realizaron simulaciones de Monte Carlo para medir el riesgo de temperatura extrema con fundamentos en ingeniería financiera, utilizando el Value at Risk (VaR) y el Expected Shortfall (ES). Las proyecciones de riesgo de mortalidad se realizaron con una ecuación epidemiológica.

En [104] utilizaron 50 proyecciones de modelos climáticos del Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5 (CMIP5) para el escenario de emisiones RCP8.5 para calcular escenarios de impacto bajo, medio y alto, que corresponden a los percentiles 10, 50 y 90 de los indicadores de olas de calor para 571 ciudades europeas. Dos indicadores utilizados para las olas de calor fueron los cambios en el porcentaje de días de ola de calor y los cambios en la temperatura máxima de las olas de calor entre un período futuro (2051–2100) y un período histórico (1951–2000) de mayo a septiembre (temporada de verano). Se encontró que los días de ola de calor y las temperaturas aumentan en todas las ciudades, especialmente en el sur y centro de Europa.

III. RESULTADOS

“ANÁLISIS DE RIESGOS ORIGINADOS POR FENÓMENOS HIDROMETEREOLÓGICOS EN LA URBANIZACION SANTA MARIA, DISTRITO DE ICA, PROVINCIA Y DEPARTAMENTO DE ICA, AÑO 2022”

3.1. Presentación de resultados.

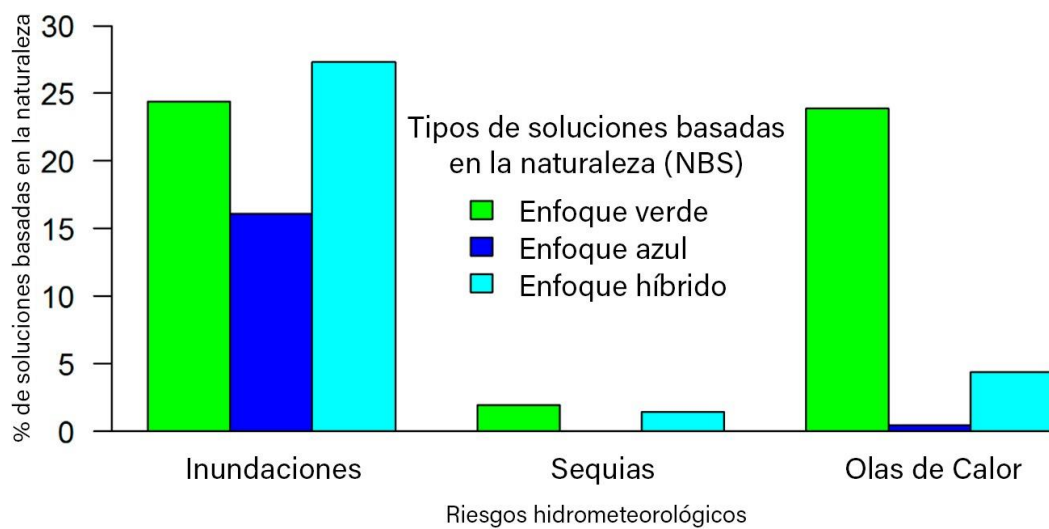


Figura N°5: Soluciones basadas en la naturaleza utilizadas para gestionar inundaciones, sequías y olas de calor

Interpretación:

La gestión de riesgos hidrometeorológicos (HMR) se realiza a través de (1) la caracterización del riesgo y su evaluación mediante metodologías apropiadas, (2) la planificación y preparación para el riesgo mediante contramedidas técnicas, (3) sistemas de alerta temprana y (4) gestión de crisis, es decir, mitigación del efecto del riesgo una vez que ha ocurrido. La planificación con anticipación y la toma de medidas necesarias en las regiones propensas a riesgos es la gestión de HMR más prioritaria. Tradicionalmente, para reducir el riesgo o sus efectos, hemos utilizado soluciones ingenieriles y construidas como presas, diques, levées, etc. para inundaciones, transporte de agua en áreas afectadas por sequías, y el uso de aire acondicionado y ventiladores para mitigar el calor. Estas soluciones de gestión de HMR son efectivas pero costosas, intensivas en energía, perjudiciales para el ecosistema y no están acopladas con el medio ambiente. Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBS, por sus siglas en inglés) para la preparación

ante riesgos en la gestión de HMR podrían ser más rentables, eficientes en energía, beneficiosas para el ecosistema y amigables con el medio ambiente, pero la evidencia de su eficacia aún es limitada. Esta revisión, por lo tanto, también presenta a las NBS como un aspecto de la gestión de HMR y proporciona una visión general de tales soluciones reportadas en la literatura.

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza son enfoques alternativos que se pueden aplicar tanto en nuevos desarrollos como en sistemas existentes (por ejemplo, infraestructuras grises), inspirados y copiados de la naturaleza y sus fundamentos. Estas soluciones buscan desalentar el desarrollo de infraestructuras de manera rentable y sostenible para abordar los desafíos de problemas sociales o ambientales, como los riesgos hidrometeorológicos (HMR) en el contexto actual. Las NBS, en consecuencia, ofrecen beneficios ambientales, sociales, económicos y múltiples beneficios ecológicos adicionales, al tiempo que abordan los HMR y fomentan la resiliencia frente a estos riesgos.

Clasificaron las NBS en dos grandes grupos: soluciones basadas en el suelo y soluciones basadas en el paisaje. Las soluciones basadas en el suelo mejoran la resiliencia y las funciones del suelo, a través de las cuales se mantienen o restauran los servicios ecosistémicos locales. Las soluciones basadas en el paisaje se centran en el concepto de conectividad. Hacer que el paisaje esté menos conectado lleva a una menor transformación de la lluvia en escorrentía y, por lo tanto, a una reducción en el riesgo de inundaciones, sequías y problemas de erosión. Se compilieron estudios de caso de diferentes regiones del mundo donde se han aplicado NBS. Muchos de estos casos tienen impactos en los riesgos de inundación, sequía y olas de calor.

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBS) tienen una funcionalidad similar a las soluciones construidas o ingenierizadas, aunque el principio puede ser diferente en algunos casos. Las NBS pueden ser basadas en agua, denominadas enfoques azules, o basadas en vegetación, denominadas enfoques verdes. Ejemplos de enfoques verdes incluyen arrecifes de ostras, marismas salinas costeras, manglares, arrecifes de coral, praderas marinas, playas de arena y dunas en el entorno costero, así como bosques, parques, árboles urbanos y praderas en tierra firme. Los enfoques azules incluyen todos los cuerpos de agua, como estanques, humedales, ríos, lagos y arroyos, así como estuarios, mares y océanos.

Cuando estos enfoques verdes y azules se utilizan en combinación con estructuras construidas, se denominan enfoques híbridos, como las biozanjas, pavimentos porosos, techos verdes, jardines de lluvia, humedales construidos y sistemas de drenaje urbano sostenible. Se analizaron 205 estudios de caso de NBS de la plataforma Natural Hazards – Nature-based Solutions (2019) relacionados con la reducción de riesgos hidro-

meteorológicos (HMR) utilizando el concepto de NBS en Europa. Se encontró que, de un total de 205 NBS, el enfoque híbrido representó el 27.3%, seguido por el enfoque verde (24.4%) y luego el enfoque azul (16.1%) para la gestión del riesgo de inundaciones; en el caso de las olas de calor, el enfoque verde fue utilizado en un 23.9%, seguido por el enfoque híbrido en un 4.4% y luego el enfoque azul en un 0.5%. Las NBS se utilizaron solo en un 3.4% (verde y híbrido) para la gestión del riesgo de sequías.

Tabla III

Lista de posibles NBS utilizadas frente a los riesgos originados por inundaciones, sequías y olas de calor.

Riesgo	Tipos de NBS	Referencias
Inundación	Humedales, incluidos estanques, ríos, lagos y pantanos.	Bridgewater (2018) Nesshover et al. (2017)
	Manglares y marismas salinas	Pregolato et al. (2016)
	Tierras verdes cóncavas	Van Coppenolle et al. (2018)
	Costas vegetadas	Vuik et al. (2018)
	Renaturalizar cuerpos de agua, reducir la canalización de los cuerpos de agua urbanos, reforestación en áreas urbanas, protección de la flora y fauna ribereñas, revitalización de llanuras de inundación, creación de cuerpos de agua artificiales para almacenamiento temporal de agua, uso de estanques de compensación para liberar agua lentamente, prevención de la compactación del suelo, manejo forestal, restauración de humedales, prevención de la erosión de riberas con vegetación corta y forestal, redireccionamiento de inundaciones hacia humedales, transformación de tierras agrícolas en praderas o plantación de franjas de amortiguamiento.	Santoro et al. (2019) Albert et al. (2019)
	Paseo Boomjes, revitalización de ríos, jardines de lluvia, parque bolsillo, bioswales, parques urbanos, áreas de juego basadas en la naturaleza, parque lineal frente al mar urbano.	Frantzeskaki (2019)

	Lagos y humedales.	Quin y Destouni (2018)
Sequía	Uso de franjas de césped para atrapar sedimentos, restauración de manglares, más puntos de riego en parques nacionales y áreas comunitarias, gestión de áreas marinas protegidas resilientes al clima y protección de bosques. Infraestructura azul-verde, agroforestería. Parque urbano, urbanización verde con infraestructura verde.	Kalantari et al. (2018) Keesstra et al. (2018) Ronchi y Arcidiacono (2019) Frantzeskaki (2019) Vieira et al. (2018) Kingsborough et al. (2017)
Olas de calor	Plantación de especies arbóreas urbanas con alto potencial de enfriamiento en áreas densamente construidas. Aumento de paredes y techos verdes.	Gillner et al. (2015) Akbari (2002) Alexandri and Jones (2008) Fioretti et al. (2010)

Interpretación:

En la tabla N°03 se presenta Lista de posibles NBS utilizadas frente a los riesgos originados por inundaciones, sequías y olas de calor, para la reducción del riesgo de inundaciones, sequías y olas de calor mediante NBS es la gestión del agua y del clima local y regional. La Tabla III proporciona un resumen de las NBS potenciales utilizadas contra los riesgos originados por fenómenos hidro-meteorológicos extremos (HMHs), como inundaciones, sequías y olas de calor. La mayoría de las soluciones empleadas mitigan o reducen múltiples riesgos. Por ejemplo, la gestión multifuncional de cuencas, la recolección de agua, la restauración de ecosistemas, la regeneración urbana, la

restauración y construcción de lagos y humedales, las infraestructuras azules y verdes, los manglares y marismas salinas, la revitalización de ríos, los jardines de lluvia y los parques de bolsillo son algunas de las NBS potenciales para la reducción y gestión del riesgo de inundaciones y sequías (Liquete et al., 2016; Raymond et al., 2017; Bridgewater, 2018; Quin y Estouni, 2018; Van Coppenolle et al., 2018; Frantzeskaki, 2019; Ronchi y Arcidiacono, 2019). Para prevenir el mal uso de los recursos debido a estrategias de mitigación de HMR desorganizadas o no alertadas, una evaluación adecuada del riesgo y su gestión a través de NBS es un enfoque óptimo. La multifuncionalidad de estas NBS debe cuantificarse para optimizar sus beneficios potenciales para el bienestar humano. Por ejemplo, la recolección de agua de lluvia puede servir para prevenir inundaciones en áreas urbanas y también puede utilizarse para la gestión de sequías en climas semiáridos. Un enfoque principal de estas NBS es aumentar la retención de agua y la capacidad de flujo de los cuerpos de agua naturales, como ríos, humedales y llanuras de inundación, además de restaurar y mejorar los servicios ecosistémicos y promover el desarrollo socioeconómico. Estas NBS también ayudan a mejorar la resiliencia del sistema socio-ecológico frente a los HMR (EC, 2017; Faivre et al., 2017; Nesshöver et al., 2017). Por lo tanto, las NBS como un enfoque de gestión de HMR ofrecen múltiples beneficios, incluidos los beneficios ambientales y de bienestar social, y ayudan a mejorar la resiliencia de manera rentable.

Berland et al. (2017) revisaron el papel de los árboles como una solución de bajo impacto para la gestión de inundaciones urbanas. Los árboles, junto con otras infraestructuras verdes como los bioswales y los suelos estructurales, pueden desempeñar un papel importante en la reducción de inundaciones mediante la interceptación de agua por el dosel, la evapotranspiración y la facilitación de la infiltración. Los árboles son un subconjunto de las NBS con potencial para la mitigación de inundaciones, pero se necesita más investigación para demostrar la efectividad de diferentes especies de árboles, su morfología y su interacción con las aguas pluviales en diferentes contextos durante períodos prolongados, tanto en contextos geográficos (suelo, paisaje, topología) como en contextos meteorológicos (estacionalidad de las precipitaciones, frecuencia e intensidad en el cambio climático).

Berland et al. (2017) también discutieron los desafíos políticos y económicos, junto con los desafíos arborícolas. Elegir especies con el máximo control de aguas pluviales y protección contra plagas de árboles, y mantener la diversidad de árboles se vuelve complicado con la expansión urbana.

Para la reducción y gestión del riesgo de olas de calor, las NBS potenciales incluyen aumentar el uso sostenible de materia y energía, aumentar la captura de carbono, la regeneración urbana (Raymond et al., 2017), los bosques urbanos y periurbanos (Davies

et al., 2017; Wai et al., 2017), los entornos naturales exteriores verdes y azules como los bosques urbanos, parques y cuerpos de agua (van den Bosch y Sang, 2017), la vegetación urbana (Vieira et al., 2018), la plantación de árboles en las calles (Gillner et al., 2015) y el aumento de muros y techos verdes (Fioretti et al., 2010). Estas NBS se centran principalmente en la gestión de la energía exterior utilizando el sombreado y el calor latente de la evapotranspiración de plantas y suelos, reduciendo los efectos de la isla de calor urbana mediante el aumento de espacios verdes que enfrían la temperatura, así como la absorción de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (Davies et al., 2017; Raymond et al., 2017).

Aunque se han desarrollado e implementado muchas NBS en todo el mundo para reducir los HMR, todavía existen desafíos que podrían obstaculizar la sostenibilidad de los proyectos de NBS. La participación de las partes interesadas, incluyendo el gobierno local y los líderes políticos, es vital para el éxito del proyecto. La financiación a largo plazo sigue siendo una limitación importante; sin embargo, esta podría eliminarse mediante acuerdos alternativos de co-financiación con las partes interesadas, como se ha observado en muchos proyectos de NBS, por ejemplo, las NBS para la vegetación urbana y el aumento de la resiliencia en Ámsterdam, y para la conectividad verde urbana y la biodiversidad en Berlín (Oppla, 2019). Además, la condición física de los paisajes existentes limita la implementación de nuevos proyectos de NBS, particularmente en ciudades donde las autoridades locales están deseosas de crear nuevos espacios verdes con el objetivo de reducir el efecto de isla de calor urbano y la contaminación del aire, pero el obstáculo es la falta de espacio debido a la alta densidad de edificios. Las autoridades de la ciudad también enfrentan el desafío de mantener numerosos espacios verdes o abiertos fragmentados (por ejemplo, la Ciudad de Bari, Italia) (Oppla, 2019). Además, dado que las NBS son ideas/tecnologías innovadoras, su aceptación requiere una interacción a largo plazo. Las personas aceptan más fácilmente las soluciones una vez que ven y comprenden los beneficios tangibles e intangibles que pueden ofrecer.

3.2. Contrastación de hipótesis.

3.2.1. Hipótesis específicas

Muestra: Análisis de riesgos originados por fenómenos hidrometeorológicos.

Hipótesis específica 1

H_i: El control del riesgo influye en la realización de lluvias intensas de la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica.

H₀: El control del riesgo no influye en la realización de lluvias intensas de la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica.

Decisión.

El valor obtenido es menor a la región crítica $\alpha = 0,05$ (nivel de significancia 5%); entonces rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alterna.

Se concluye que el control del riesgo influye en la realización de lluvias intensas de la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica.

Hipótesis específica 2

H_i: La tolerancia al riesgo influye en las inundaciones de la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica.

H₀: La tolerancia al riesgo no influye en las inundaciones de la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica.

Decisión.

El valor obtenido es menor a la región crítica $\alpha = 0,05$ (nivel de significancia 5%); entonces rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alterna.

Se concluye que la tolerancia al riesgo influye en las inundaciones de la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica.

3.2.2. Hipótesis general

H_i: Con el análisis de riesgos se influye en los fenómenos hidrometeorológicos en la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica.

H₀: Con el análisis de riesgos no se influye en los fenómenos hidrometeorológicos en la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica.

Decisión.

El valor obtenido es menor a la región crítica $\alpha = 0,05$ (nivel de significancia 5%); entonces rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alterna.

Se concluye que Con el análisis de riesgos se influye en los fenómenos hidrometeorológicos en la Urbanización Santa María, distrito de Ica, provincia y departamento de Ica.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el estudio presentan las Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBS) como una alternativa viable para la gestión de riesgos hidro-meteorológicos (HMR). Liao Thedy y Tai (2024) enfatizan que el marco holístico propuesto se basa en la evaluación de riesgos mediante la integración de diversas dimensiones, incluyendo pérdidas económicas y emisiones de carbono. En comparación, los resultados del presente estudio también destacan la importancia de las NBS, particularmente en la reducción del impacto ambiental y los costos asociados, lo cual es consistente con la idea de soluciones más sostenibles y adaptables frente a los HMR. Sin embargo, el estudio actual complementa este marco al proporcionar evidencia de la aplicación práctica de las NBS, demostrando su funcionalidad no solo desde un enfoque predictivo, sino también en su capacidad para mitigar efectos reales, como las olas de calor, inundaciones y sequías, lo que enriquece las estrategias de adaptación propuestas por Liao y Tai.

Los resultados obtenidos sobre las NBS y su aplicación en la gestión de riesgos hidro-meteorológicos en Europa se alinean con el enfoque propuesto por Fernandez Gonzalez y Garcia (2024), quienes resaltan el uso de una herramienta marco para evaluar las NBS a través de indicadores clave de rendimiento (KPI). Si bien ambos estudios subrayan la importancia de integrar a las partes interesadas en la planificación y selección de NBS, los resultados actuales proporcionan una perspectiva más cuantitativa, demostrando que los enfoques híbridos y verdes dominan en la reducción de riesgos. Además, mientras Fernandez Gonzalez y Garcia se enfocan en la adaptación de los KPI al contexto local, los resultados aquí presentados ofrecen una validación empírica mediante el análisis de 205 estudios de caso, lo cual complementa el marco de evaluación propuesto, al proporcionar ejemplos específicos de la efectividad de las NBS en la reducción de riesgos como inundaciones y olas de calor.

En comparación con el trabajo de Chauhan et al. (2024), que subraya la necesidad de marcos que incluyan tanto los sistemas sociales como los ecológicos, los resultados actuales ofrecen un análisis práctico que responde a las limitaciones identificadas por Chauhan. Mientras el estudio de Chauhan reconoce la falta de marcos adecuados para abordar la vulnerabilidad y el riesgo de los sistemas socio-ecológicos (SES), los resultados de este estudio proporcionan una solución a través de la aplicación de NBS que consideran tanto la conectividad del paisaje como la multifuncionalidad del suelo. Al aplicar indicadores que abordan riesgos tanto ecológicos como sociales, este estudio se alinea con las recomendaciones de Chauhan al integrar enfoques basados en el suelo y el paisaje para reducir la vulnerabilidad y promover la resiliencia frente a los HMR.

V. CONCLUSIONES

Este trabajo ha considerado artículos científicos publicados y documentos que revisan una selección de métodos importantes de evaluación de riesgos y sus NBS relevantes para tres HMR: inundaciones, sequías y olas de calor. Facilita la síntesis de diferentes metodologías relacionadas con la evaluación del riesgo de inundaciones, sequías y olas de calor, considerando la interacción de exposición, vulnerabilidad y adaptación de los elementos en riesgos impulsados por HMH.

Las NBS están estrechamente vinculadas a la evaluación y gestión de riesgos. Una NBS se implementa después de haber realizado una evaluación de riesgos exhaustiva para un área propensa a HMH. El diseño y la implementación general de la solución adecuada se basan en esta evaluación. Por lo tanto, las NBS pueden considerarse como parte de las técnicas de gestión de riesgos que se utilizan para mitigar los posibles impactos de los peligros. Tras la implementación de la NBS, la evaluación de riesgos necesita ser reevaluada para tener en cuenta la reducción de los costos humanos y financieros debido a una mejor prevención de desastres.

Las conclusiones clave son:

- Se han utilizado muchos métodos y herramientas para identificar, analizar y evaluar los riesgos asociados con las inundaciones. En la actualidad se utilizan varios modelos y métodos estadísticos para este propósito. Por ejemplo, la lógica difusa como el proceso AHP y metodologías probabilísticas como FFA se aplican generalmente para la evaluación del riesgo. Las funciones copula son un método estadístico ampliamente utilizado para la evaluación del riesgo de inundaciones, junto con técnicas como redes bayesianas, curvas IDF y modelos hidrodinámicos.
- La mayoría de las evaluaciones del riesgo de sequías se basan en la formulación de diferentes tipos de índices. Se han utilizado varios tipos de índices para definir el riesgo de sequías, entre los cuales SPI, DVI, PDSI y CMI son solo algunos. PCA, AHP, IDW, teoría de la entropía, combinación lineal, curva I-A-F, simulación de precipitaciones, modelos econométricos, cambios en el almacenamiento de reservorios, el método de difusión de información, copula y evaluación difusa son algunos de los métodos reportados empleados. La elección del método a utilizar para la evaluación del riesgo de sequías depende del tipo de sequía involucrado y del propósito de la evaluación; por ejemplo, un ecosistema dependiente de aguas subterráneas necesitará el método de fluctuación de aguas subterráneas, mientras que en un lugar donde múltiples variables causan riesgo, se necesitará una evaluación del riesgo de sequía multivariante.

- Para las olas de calor, el riesgo depende del tipo de definición de ola de calor utilizada, y esto está condicionado a la ubicación de cada estudio. La cartografía basada en GIS de la propiedad y población vulnerable es una metodología ampliamente utilizada, junto con una serie de métodos estadísticos, matemáticos y computacionales, incluyendo: análisis de componentes principales, EVT, FDA, procesos estocásticos (OU, Poisson, Gamma, Gaussiano truncado), concepto de lógica difusa y la asociación de efectos en la salud con la temperatura utilizando análisis de regresión de series temporales.
- El riesgo de HMR puede ser gestionado después de una evaluación adecuada de todos los componentes posibles del riesgo de desastre, y estos se abordan mediante muchas medidas como las estructurales (es decir, diques, terraplenes, presas, levees), no estructurales (es decir, previsión y alerta temprana, preservación de estanques de retención, planificación del uso del suelo, zonificación de inundaciones, servicios de emergencia, refugios, protección contra inundaciones, lucha contra inundaciones y medidas de rehabilitación post-desastre y evacuaciones), y NBS, como enfoques verdes y azules (es decir, restauración de humedales, instalación de césped y tampones ribereños, árboles urbanos, restauración de arroyos, ríos, lagos, estanques). En este artículo, se ha revisado el potencial de las NBS como un enfoque eficiente, rentable, duradero y sostenible para la gestión de HMR. Las NBS, como las infraestructuras azul-verde, se promueven en lugar de infraestructuras grises para la mitigación del riesgo, por ejemplo, los pantanos y humedales en lugar de presas para la reducción del riesgo de inundaciones y sequías, y la infraestructura verde para el enfriamiento urbano como medida contra las olas de calor.
- Del análisis de nuestro estudio se concluye que el enfoque híbrido es el tipo de NBS más popular, seguido por los enfoques verde y azul, para la gestión de inundaciones. Para las olas de calor, las NBS se basan principalmente en enfoques verdes en comparación con los enfoques híbridos, mientras que para las sequías, se aplican en proporciones similares tanto los enfoques verdes como los híbridos. Sin embargo, el enfoque azul de las NBS se ha utilizado mínimamente para la gestión del riesgo de sequías y olas de calor (Fig. 2).
- Este estudio podría ser beneficioso para una amplia gama de lectores, como científicos, investigadores y profesionales, al proporcionar métodos de evaluación de riesgos completos (por ejemplo, copulas, modelos hidráulicos 2D y 3D), que pueden representar con precisión el riesgo desde todas las dimensiones. Aparte de esto, el artículo también ofrece un camino a seguir para reducir los HMR existentes mediante NBS, contribuyendo al fortalecimiento de la resiliencia y la reducción de pérdidas por desastres. Esta revisión está destinada a ayudar en la selección y aplicación de índices actuales para sequías y olas de calor para apoyar la preparación y respuesta. Debido al aumento en la disponibilidad de datos (por ejemplo, datos

satelitales para temperatura y vegetación) y la necesidad de una caracterización de riesgos completa, se espera que el desarrollo de índices de riesgo multivariados avance. El estudio proporciona información útil y directrices para el desarrollo de nuevos índices de riesgo multivariados en el futuro.

La investigación sobre la evaluación de HMR y soluciones utilizando NBS ayudará a construir adaptaciones y aumentar la resiliencia de la sociedad de manera costo-eficiente. Sin embargo, existen varias lagunas en la investigación. Se necesita más investigación sobre los métodos de reducción de riesgos a través de las NBS y su adopción más amplia para abordar el proceso continuo del cambio climático, que a su vez tiene implicaciones directas para HMRs. Por ejemplo, las NBS aún no están en una etapa en la que puedan competir con los enfoques y estándares establecidos en el ámbito de la ingeniería de recursos hídricos para la gestión de HMRs. Por lo tanto, los costos de mantenimiento a largo plazo, el rendimiento y la rentabilidad general de las NBS necesitan ser evaluados en la práctica, con la colaboración de investigadores y usuarios finales. Además, se necesita investigar los retornos claros que se pueden esperar de una inversión en cualquier NBS, para convencer a los responsables de políticas/decisores e inversores para financiar el ciclo de vida de los proyectos de NBS.

Se centra únicamente en tres HMRs; los estudios futuros deberían intentar consolidar las NBS potenciales para otros HMRs como huracanes y deslizamientos de tierra. Dado que el uso de NBS para la gestión de HMRs todavía está en transición de la teoría a la práctica, se requieren investigaciones futuras para explorar y construir un puente, así como comparaciones del rendimiento y la rentabilidad frente a las infraestructuras grises.

VI. RECOMENDACIONES

Futuras investigaciones deberían centrarse en la implementación y evaluación a largo plazo de las Soluciones Basadas en la Naturaleza (NBS) en una mayor diversidad de entornos geográficos y climáticos. Este enfoque permitiría profundizar en la adaptación y eficacia de las NBS frente a eventos hidro-meteorológicos extremos que varían según las condiciones locales. Asimismo, es recomendable que estos estudios se enfoquen en la monitorización continua de los resultados, evaluando tanto los beneficios ecológicos como los socioeconómicos. Esto no solo mejoraría la validación empírica de las NBS, sino que también proporcionaría una base de datos más robusta para adaptar las soluciones según las características del territorio, optimizando la resiliencia de los sistemas y reduciendo los impactos negativos. Además, se sugiere investigar la efectividad de las combinaciones de infraestructura verde y gris, para potenciar aún más los beneficios de las NBS en diversos contextos.

Para optimizar la efectividad de las NBS, futuras investigaciones deben profundizar en el desarrollo de indicadores de rendimiento (KPI) más precisos y adaptados a diferentes contextos climáticos y sociales. Es crucial investigar cómo los KPI pueden ser personalizados para regiones con características específicas, asegurando que se midan adecuadamente los impactos y beneficios de las NBS en distintos entornos. Además, se recomienda explorar la integración de tecnologías avanzadas, como sensores remotos y modelos predictivos, que permitan una mejor monitorización y análisis de los resultados en tiempo real. La combinación de métodos cuantitativos y cualitativos en la evaluación de las NBS ofrecería una visión más integral y ajustada a las necesidades locales, facilitando una toma de decisiones más informada y mejorando la efectividad de estas soluciones a nivel global.

Es recomendable que futuras investigaciones exploren más a fondo la integración de las NBS con sistemas socio-ecológicos, desarrollando enfoques interdisciplinarios que incluyan a expertos en ecología, economía, y ciencias sociales. Se sugiere ampliar el estudio de la multifuncionalidad del suelo y la conectividad del paisaje para identificar mejores prácticas que maximicen la resiliencia tanto de los ecosistemas como de las comunidades humanas. Al mismo tiempo, es importante investigar cómo las NBS pueden ser adaptadas para abordar la equidad social, asegurando que las soluciones implementadas no solo mitiguen los riesgos hidro-meteorológicos, sino que también beneficien a las poblaciones más vulnerables. Incluir el conocimiento local y la participación comunitaria en las futuras investigaciones enriquecerá las soluciones, garantizando que las NBS sean culturalmente apropiadas y socialmente inclusivas, además de ecológicamente eficientes.

VII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] L. Brogno et al., “A novel framework for the assessment of hydro-meteorological risks taking into account nature-based solution”, *Environmental Research Letters*, vol. 19, nro. 7, pp. 1 – 18, 2024.
- [2] G. Caroppi et al., “A comprehensive framework tool for performance assessment of NBS for hydro-meteorological risk management”, *Journal of Environmental Planning and Management*, vol. 19, nro. 7, pp. 1231 – 1257, 2023.
- [3] M. Shah et al., “A review of hydro-meteorological hazard, vulnerability, and risk assessment frameworks and indicators in the context of nature-based solutions”, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 50, 2020.
- [4] Z. Amirzada et al., “Reducing hydro-meteorological risk through nature-based solutions: A comprehensive review of enabling policy frameworks in the European Union”, *Nature-Based Solutions*, vol. 4, nro. 10, pp. 1 – 10, 2023.
- [5] G. Llontop, “Análisis de la gestión del riesgo de desastres ante fenómenos hidrometeorológicos en Chiclayo”, Tesis de licenciatura, Univ. Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Perú, pp. 1 – 109, 2020.
- [6] O. L. de Moraes, “An impact-based forecast system developed for hydrometeorological hazards”, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 93, nro. 103803, jul. 2023.
- [7] C. Mikellidou et al., “Energy critical infrastructures at risk from climate change: a state-of-the-art review”, *Saf.*, vol. 110, pp. 110 – 120, 2018.
- [8] M. Anees et al., “Numerical modeling techniques for flood analysis”, *J. Afr. Earth*, vol. 124, pp. 478 – 486, 2016.
- [9] B. Merz et al., “Review article “assessment of economic flood damage”, *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 10, nro. 8, pp. 1697 – 1724, 2010.
- [10] S. Jonkman et al., “Methods for the estimation of loss of life due to floods: a literature review and a proposal for a new method”, *Nat. Hazards*, vol. 46, nro. 3, pp. 353 – 389, 2008.
- [11] J. Teng et al., “Flood inundation modeling: a review of methods, recent advances and uncertainty analysis”, *Environ, Model Softw*, vol. 90, pp. 201 – 216, 2017.
- [12] B. Liu et al., “The characteristics and causes of increasingly severe saltwater intrusion in Pearl River Estuary”, *Estuar, Coast, Shelf*, vol. 220, pp. 54 – 63, 2019.
- [13] A. Mishra y V. Singh, “A review of drought concepts”, *J. Hydrol*, vol. 391, pp. 202 – 216, 2010.
- [14] Z. Hao, V. Singh, “Drought characterization from a multivariate perspective: a review”, *J. Hydrol*, vol. 527, pp. 668 – 678, 2015.

- [15] S. Campbell et al., “Heatwave and health impact research: a global review”, *Health Place*, vol. 53, pp. 210 – 218, 2018.
- [16] E. Mayrhuber et al., “Vulnerability to heatwaves and implications for public health interventions — a scoping review”, *Environ. Res.*, vol. 166, pp. 42 – 54, 2018.
- [17] Z. Xu et al., “Impact of heatwave on mortality under different heatwave definitions: a systematic review and meta-analysis”, *Environ. Int.*, pp. 89 – 90, 193 – 203, 2016.
- [18] J. Kravchenko et al., “Minimization of heatwave morbidity and mortality”, *Am. J. Prev. Med.*, vol. 44, nro. 3, pp. 274 – 282, 2013.
- [19] V. Cortes et al., “Review of the current risk management strategies in Europe for hydro-meteorological hazards at protection and emergency level”, *Comprehensive flood risk management*, pp. 971 – 980, 2013.
- [20] G. Cirella et al., “Natural Hazard Risk Assessment and Management Methodologies Review: Europe”, Linkov, I. (Ed.), *Sustainable Cities and Military Installations*, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Springer, Dordrecht, pp. 329 – 358, 2014.
- [21] S. Coles, “An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values”, Springer, London, 2001.
- [22] R Core Team, “R: A Language and Environment for Statistical Computing”, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019.
- [23] MATLAB y Statistics Toolbox Release, “The MathWorks”, Inc., Natick, Massachusetts, United States, 2012.
- [24] E. Gaitán et al., “Projection of temperatures and heat and cold waves for Aragón (Spain) using a two-step statistical downscaling of CMIP5 model outputs”, *Sci. Total Environ.*, vol. 650, pp. 2778 – 2795, 2019.
- [25] IPCC 2007, “The Physical Science Basis”, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007.
- [26] IPCC, “Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation”, A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, UK y New York, NY, USA, pp. 555 – 564, 2012.
- [27] G. Varlas et al., “A multi-platform hydro-meteorological analysis of the flash flood event of 15 November 2017 in Attica”, *Greece, Remote Sens.*, vol. 11, nro. 45, 2019.
- [28] European Economic Area (EEA), “Mapping the impacts of recent natural disasters and technological accidents in Europe: An Overview of the last decade”, *EEA Environmental Issue Report*, nro. 35, 2010.

- [29] V. Norén et al., “Flood risk assessment practices in flood prone Swedish municipalities”, *International Journal of Disaster Risk Reduction* 18, pp. 206 – 217, 2016.
- [30] J. Joyce et al., “Coupling infrastructure resilience and flood risk assessment via copulas analyses for a coastal green-grey-blue drainage system under extreme weather events”, *Environ. Model. Softw.*, vol. 100, pp. 82 – 103, 2018.
- [31] Y. Zhou et al., “Urban flood risk assessment using storm characteristic parameters sensitive to catchment-specific drainage system”, *Sci. Total Environ.*, vol. 659, pp. 1362 – 1369, 2019.
- [32] L. Smith, “Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: a review”, *Hydrol. Process.*, vol. 11, pp. 1427 – 1439, 1997.
- [33] G. Brunner, “HEC-RAS River Analysis System-User's Manual Version 5.0”, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC), USA, 2016.
- [34] DHI, “MIKE21-2D Modelling of Coast and Sea”, DHI Water & Environment Pty Ltd, 2012.
- [35] L. Roberts et al., “Elevating the Behavioral and Social Sciences in Premedical Training: MCAT2015”, 2015.
- [36] J. Monaghan, “Simulating free surface flows with SPH”, *J. Comput. Phys.* Vol. 110, pp. 399 – 406, 1994.
- [37] Walker, G., Burningham, K., 2011. Flood risk, vulnerability and environmental justice: evidence and evaluation of inequality in a UK context. *Crit. Soc. Policy* 31 (2), 216–240.
- [38] S. Terzi et al., “Multirisk assessment in mountain regions: a review of modelling approaches for climate change adaptation”, *J. Environ. Manag.*, vol. 232, pp. 759 – 771, 2019.
- [39] S. Jonkman et al., “Flood risk assessment in the Netherlands: a case study for dike ring South Holland”, *Risk Anal*, vol. 28 nro. 5, pp. 1357 – 1373, 2008.
- [40] Yang, X. ling, Ding, J. hua, Hou, H., 2013. Application of a triangular fuzzy AHP approach for flood risk evaluation and response measures analysis. *Nat. Hazards* 68 (2), 657–674.
- [41] Li, Q., Zhou, J., Liu, D., Jiang, X., 2012. Research on flood risk analysis and evaluation method based on variable fuzzy sets and information diffusion. *Saf. Sci.* 50 (5), 1275–1283.
- [42] Romanowicz, R.J., Kiczko, A., 2016. An event simulation approach to the assessment of flood level frequencies: risk maps for the Warsaw reach of the River Vistula. *Hydrol. Process.* 30 (14), 2451–2462.

- [43] Ganguli, P., Reddy, M.J., 2013. Probabilistic assessment of flood risks using trivariate copulas. *Theor. Appl. Climatol.* 111 (1–2), 341–360.
- [44] Ji, Z., Li, N., Xie, W., Wu, J., Zhou, Y., 2013. Comprehensive assessment of flood risk using the classification and regression tree method. *Stoch. Env. Res. Risk A.* 27 (8), 1815–1828
- [45] Tingsanchali, T., Karim, F., 2010. Flood-hazard assessment and risk-based zoning of a tropical flood plain: case study of the Yom River, Thailand. *Hydrol. Sci. J.* 55 (2), 145–161.
- [46] Meyer, V., Scheuer, S., Haase, D., 2009. A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde river, Germany. *Nat. Hazards* 48 (1), 17–39.
- [47] Tanaka, T., Tachikawa, Y., Iachikawa, Y., Yorozu, K., 2017. Impact assessment of upstream flooding on extreme flood frequency analysis by incorporating a flood-inundation model for flood risk assessment. *J. Hydrol.* 554, 370–382.
- [48] Merz, R., Blöschl, G., 2003. Regional flood risk-what are the driving processes, water resources systems — hydrological risk management and development. *International Association of Hydrological Sciences (IAHS)* 281, 49–58.
- [49] Sieg, T., Vogel, K., Merz, B., Kreibich, H., 2017. Tree-based flood damage modeling of companies: damage processes and model performance. *Water Resour. Res.* 53, 6050–6068.
- [50] Yang, J., Chang, J., Wang, Y., Li, Y., Hu, H., Chen, Y., Huang, Q., Yao, J., 2018. Comprehensive drought characteristics analysis based on a nonlinear multivariate drought index. *J. Hydrol.* 557, 651–667.
- [51] Belal, A.A., El-Ramady, H.R., Mohamed, E.S., Saleh, A.M., 2014. Drought risk assessment using remote sensing and GIS techniques. *Arab. J. Geosci.* 7 (1), 35–53.
- [52] Miah, M.G., Abdullah, H.M., Jeong, C., 2017. Exploring standardized precipitation evapo- transpiration index for drought assessment in Bangladesh. *Environ. Monit. Assess.* 189 (11), 547.
- [53] American Meteorological Society (AMS), 2004. Statement on meteorological drought.
- [54] Carrão, H., Naumann, G., Barbosa, P., 2016. Mapping global patterns of drought risk: an empirical framework based on sub-national estimates of hazard, exposure and vulnerability. *Glob. Environ. Chang.* 39, 108–124.
- [55] Huang, S., Li, P., Huang, Q., Leng, G., Hou, B., Ma, L., 2017. The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors. *J. Hydrol.* 547, 184–195.
- [56] Huang, S., Huang, Q., Chang, J., Chen, Y., Xing, L., Xie, Y., 2015. Copulas-based drought evolution characteristics and risk evaluation in a typical arid and semi-arid region. *Water Resour. Manag.* 29 (5), 1489–1503.

- [57] Tian, R., 2019. Factors controlling saltwater intrusion across multi-time scales in estuaries, Chester River, Chesapeake Bay. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 223, 61–73.
- [58] Paul, B.G., Vogl, C.R., 2011. Impacts of shrimp farming in Bangladesh: challenges and alter- natives. *Ocean & Coastal Management* 54 (3), 201–211.
- [59] Le, T.V.H., Nguyen, H.N., Wolanski, E., Tran, T.C., Haruyama, S., 2007. The combined impact on the flooding in Vietnam's Mekong River delta of local man-made structures, sea level rise, and dams upstream in the river catchment. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 71, 110–116.
- [60] Bhattachan, A., Jurjonas, M.D., Moody, A.C., Morris, P.R., Sanchez, G.M., Smart, L.S., Taillie, P.J., Emanuel, E.R., Seekamp, E.L., 2018. Sea level rise impacts on rural coastal social- ecological systems and the implications for decision making. *Environ. Sci. Pol.* 90, 122–134.
- [61] Pham, V.H.T., Febriamansyah, R., Afrizal, A., Tran, T.A., 2018. Government intervention and farmers' adaptation to saline intrusion: a case study in the Vietnamese Mekong Delta. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology* 8, 2142–2148.
- [62] WMO and GWP, 2016. World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), Handbook of Drought Indicators and Indices (M. Svoboda and
- [63] B.A. Fuchs). *Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2*. Geneva
- [64] Rahman, R., Lateh, H., 2016. Meteorological drought in Bangladesh: assessing, analyzing and hazard mapping using SPI, GIS and monthly rainfall data. *Environ. Earth Sci.* 75, 1–20.
- [65] Vogt, J.V., Naumann, G., Masante, D., Spinoni, J., Cammalleri, C., Erian, W., Pischke, F., Pulwarty, R., Barbosa, P., 2018. Drought Risk Assessment. A Conceptual Framework. EUR 29464 EN. Publications Office of the European Union, Luxembourg 978-92-79- 97469-4 2018. (doi:10.2760/057223, JRC113937).
- [66] EC, 2007. European Commission Report: Drought Management Plan Report, Including Agricultural, Drought Indicators and Climate Change Aspects. Technical Report 2008–023. Water Scarcity and Droughts Expert Network, DG Environment.
- [67] Pei, W., Fu, Q., Li, D.L.T., 2016. Assessing agricultural drought vulnerability in the Sanjiang Plain based on an improved projection pursuit model. *Nat. Hazards* 82, 683–701.
- [68] Zhang, K., Kimball, J.S., Nemani, R.R., Running, S.W., 2010. A continuous satellite-derived global record of land surface evapotranspiration from 1983 to 2006. *Water Resour. Res.* 46 (W09522).

- [69] Chen, Y.D., Zhang, Q., Xiao, M., Singh, V.P., 2013. Evaluation of risk of hydrological droughts by the trivariate Plackett copula in the East River basin (China). *Nat. Hazards* 68 (2), 529–547.
- [70] Reddy, M.J., Ganguli, P., 2013. Spatio-temporal analysis and derivation of copula-based intensity-area-frequency curves for droughts in western Rajasthan (India). *Stoch. Env. Res. Risk A* 27 (8), 1975–1989.
- [71] Krogulec, E., 2018. Evaluating the risk of groundwater drought in groundwater-dependent ecosystems in the central part of the Vistula River Valley, Poland. *Ecohydrol. Hydrobiol.* 18 (1), 82–91.
- [72] Kim, S., Kwak, J., Noh, H.S., Kim, H.S., 2014. Evaluation of drought and flood risks in a mul- tipurpose dam under climate change: a case study of Chungju Dam in Korea. *Nat. Hazards* 73 (3), 1663–1678.
- [73] Henley, B.J., Thyer, M.A., Kuczera, G., 2013. Climate driver informed short-term drought risk evaluation. *Water Resour. Res.* 49 (5), 2317–2326.
- [74] Jiang, S., Yang, R., Cui, N., Zhao, L., Liang, C., 2018. Analysis of drought vulnerability characteristics and risk assessment based on information distribution and diffusion in Southwest China. *Atmosphere* 9 (7), 239.
- [75] Xie, Z., Xu, J., Deng, Y., 2016. Risk analysis and evaluation of agricultural drought disaster in the major grain-producing areas, China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 7 (5), 1691–1706.
- [76] Sun, Z., Zhang, J., Zhang, Q., Hu, Y., Yan, D., Wang, C., 2014. Integrated risk zoning of drought and waterlogging disasters based on fuzzy comprehensive evaluation in Anhui Province, China. *Nat. Hazards* 71 (3), 1639–1657.
- [77] Stewart, R.H., 2008. *Introduction to Physical Oceanography*. Department of Oceanography, Texas A & M University.
- [78] Saenger, C., Cronin, T., Thunell, R., Vann, C., 2006. Modelling river discharge and precipi- tation from estuarine salinity in the northern Chesapeake Bay: application to Holo- cene palaeoclimate. *Holocene* 16, 467–477.
- [79] Kim, K.W., Johnson, B.H., 2007. *Salinity Re-validation of the Delaware Bay and River 3-D Hydrodynamic Model with Applications to Assess the Impact of Channel Deepening, Consumptive Water Use, and Sea Level Change*. Tech. rep. U.S. Army Research and De- velopment Center, Vicksburg, MS.
- [80] Nicholls, R.J., Cazenave, A., 2010. Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science* 328, 1517.
- [81] Gil, M., Garrido, A., Gómez-Ramos, A., 2011. Economic analysis of drought risk: an application for irrigated agriculture in Spain. *Agric. Water Manag.* 98 (5), 823–833.

- [82] Lopez-Nicolas, A., Pulido-Velazquez, M., Macian-Sorribes, H., 2017. Economic risk assessment of drought impacts on irrigated agriculture. *J. Hydrol.* 550, 580–589.
- [83] Hagenlocher, M., Meza, I., Anderson, C., Min, A., Renaud, F.G., Walz, Y., Siebert, S., Sebesvari, Z., 2019. Drought vulnerability and risk assessments: state of the art, persistent gaps, and research agenda. *Environ. Res. Lett.* 14, 083002.
- [84] French, J., Kokoszka, P., Stoev, S., Hall, L., 2019. Quantifying the risk of heat waves using extreme value theory and spatio-temporal functional data. *Computational Statistics and Data Analysis* 131, 176–193.
- [85] Yang, J., Yin, P., Sun, J., Wang, B., Zhou, M., Li, M., Tong, S., Meng, B., Guo, Y., Liu, Q., 2019. Heatwave and mortality in 31 major Chinese cities: definition, vulnerability and implications. *Sci. Total Environ.* 649, 695–702.
- [86] Stefanon, M., Dandrea, F., Drobinski, P., 2012. Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. *Environ. Res. Lett.* 7 (1), 014023.
- [87] Hatvani-Kovacs, G., Belusko, M., Pockett, J., Boland, J., 2016. Assessment of heatwave impacts. *Procedia Engineering* 169, 316–323.
- [88] Chen, K., Bi, J., Chen, J., Chen, X., Huang, L., Zhou, L., 2015. Influence of heat wave definitions to the added effect of heat waves on daily mortality in Nanjing, China. *Sci. Total Environ.* 506–507, 18–25.
- [89] Keramitsoglou, I., Kiranoudis, C.T., Maiheu, B., De Ridder, K., Daglis, I.A., Manunta, P., Paganini, M., 2013. Heat wave hazard classification and risk assessment using artificial intelligence fuzzy logic. *Environ. Monit. Assess.* 185 (10), 8239–8258.
- [90] Blanchet-Scalliet, C., Dorobantu, D., Gay, L., Maume-Deschamps, V., Ribereau, P., 2018. Risk assessment using suprema data. *Stoch. Env. Res. Risk A.* 32 (10), 2839–2848.
- [91] Ouzeau, G., Soubeyroux, J.M., Schneider, M., Vautard, R., Planton, S., 2016. Heat waves analysis over France in present and future climate: application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble. *Climate Services* 4, 1–12.
- [92] Wolf, T., McGregor, G., 2013. The development of a heat wave vulnerability index for London, United Kingdom. *Weather and Climate Extremes* 1, 59–68.
- [93] Hajat, S., Vardoulakis, S., Heaviside, C., Eggen, B., 2014. Climate change effects on human health: projections of temperature-related mortality for the UK during the 2020s, 2050s and 2080s. *J. Epidemiol. Community Health* 68, 641–648.
- [94] Abadie, L.M., Chiabai, A., Neumann, M.B., 2019. Stochastic diffusion models to describe the evolution of annual heatwave statistics: a three-factor model with risk calculations. *Sci. Total Environ.* 646, 670–684.

- [95] Tomlinson, C.J., Chapman, L., Thornes, J.E., Baker, C.J., 2011. Including the urban heat island in spatial heat health risk assessment strategies: a case study for Birmingham. UK. *International Journal of Health Geographics* 10 (42), 118–124
- [96] Taylor, J., Wilkinson, P., Davies, M., Armstrong, B., Chalabi, Z., Mavrogianni, A., Symonds, P., Oikonomou, E., Bohnenstengel, S.I., 2015. Mapping the effects of urban heat island, housing, and age on excess heat-related mortality in London. *Urban Clim.* 14, 517–528.
- [97] Armstrong, B.G., Chalabi, Z., Fenn, B., Hajat, S., Kovats, S., Milojevic, A., Wilkinson, P., 2011. Association of mortality with high temperatures in a temperate climate: England and Wales. *J. Epidemiol. Community Health* 65 (1), 340–345.
- [98] Macintyre, H.L., Heaviside, C., Taylor, J., Picetti, R., Symonds, P., Cai, X.M., Vardoulakis, S. 2018. Assessing urban population vulnerability and environmental risks across an urban area during heatwaves — implications for health protection. *Sci. Total Environ.* 610–611, 678–690.
- [99] Jedlovec, G., Crane, D., Quattrochi, D., 2017. Urban heat wave hazard and risk assessment.
- [100] Guo, Y., Gasparri, A., Armstrong, B.G., Tawatsupa, B., Tobias, A., Lavigne, E., Coelho, M.D.S.Z.S., Pan, X., Kim, H., Hashizume, M., Honda, Y., 2017. Heat wave and mortality: a multicountry, multicomunity study. *Environ. Health Perspect.* 125, 087006.
- [101] Martínez-Solanas, È., Basagaña, X., 2019. Temporal changes in temperature-related mortality in Spain and effect of the implementation of a Heat Health Prevention Plan. *Environ. Res.* 169, 102–113.
- [102] Heo, S., Bell, M.L., Lee, J.T., 2019. Comparison of health risks by heat wave definition: applicability of wet-bulb globe temperature for heat wave criteria. *Environ. Res.* 168, 158–170.
- [103] Buchin, O., Hoelscher, M.T., Meier, F., Nehls, T., Ziegler, F., 2016. Evaluation of the health-risk reduction potential of countermeasures to urban heat islands. *Energy and Buildings* 114, 27–37.
- [104] Guerreiro, S.B., Dawson, R.J., Kilsby, C., Lewis, E., Ford, A., 2018. Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities. *Environ. Res. Lett.* 13, 034009.