

Evaluación de peligro de inundación utilizando AHP en Corum, Turquía

Flood hazard assessment using AHP in Corum, Turkey

Derya Ozturk¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0684-3127>

Ilknur Yilmaz², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7425-5052>

Ufuk Kirbas³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2389-425X>

¹Departamento de Ingeniería Geomática, Universidad Ondokuz Mayıs, Samsun, Turquía, dozturk@omu.edu.tr

²Segunda Dirección Regional de Obras Hidráulicas del Estado, Izmir, Turquía, hm.ilknuryilmaz@gmail.com

³Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Ondokuz Mayıs, Samsun, Turquía, ufuk.kirbas@omu.edu.tr

Autor para correspondencia: Derya Ozturk, dozturk@omu.edu.tr

Resumen

En este estudio, el peligro de inundación de la provincia de Corum, Turquía, se investigó utilizando el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), que es uno de los métodos más populares de Análisis de Decisión de Criterios Múltiples (MCDA), basado en el Sistema de Información Geográfica (GIS). Como resultado del proceso AHP, la provincia de Corum se clasificó en cinco clases de peligro de inundación: muy alta, alta, media, baja y muy baja. Se determinó que el 3% del área total está bajo un peligro de inundación muy alto, y el 25% se considera un peligro de inundación alto. Para evaluar la validez del mapa de peligro de inundación, los resultados se compararon con el inventario histórico de inundaciones. Nuestro mapa de peligros era compatible con el inventario histórico de inundaciones; así, dicho mapa de peligros ahora se puede usar para estimar las áreas que están amenazadas por posibles inundaciones. Cuando las medidas estructurales existentes se superponen con el mapa de peligro en Corum, se entiende que una gran parte de las medidas estructurales llevadas a cabo hasta la fecha se han centrado en las áreas de peligro de inundación muy alto y alto en el mapa de peligro de inundación. Las medidas estructurales futuras y los estudios detallados ahora deberían abordar otras áreas identificadas como amenazadas en el mapa de peligro de inundación. Nuestros resultados sugieren que la evaluación de peligros basada en MCDA es adecuada para el mapeo de peligros de inundación.

Palabras clave: inundación, mapa de peligro, proceso de jerarquía analítica, análisis de decisiones de criterios múltiples, sistema de información geográfica, Corum.

Abstract

In this study, the flood hazard of Corum province, Turkey, was investigated using the Analytic Hierarchy Process (AHP), which is one of the most popular Multi-criteria Decision Analysis (MCDA) methods, based on Geographic Information System (GIS). As a result of the AHP process, Corum province was categorized into five flood hazard classes: very high, high, medium, low, and very low. It was determined that 3 % of the total area is under a very high flood hazard, and 25 % is considered a high flood hazard. To assess the validity of the flood hazard map, the results were compared with the historical flood inventory. Our hazard map was compatible with the historical flood inventory, and our hazard map can now be used to estimate the areas that are threatened by possible floods. When the existing structural measures are overlapped with the hazard map in Corum, it is understood that a large part of the structural measures carried out to date have focused on the areas of very high and high flood hazard in the flood hazard map. Future structural measures and detailed studies should now address other areas identified as under threat in the flood hazard map. Our results suggest that the hazard assessment based on MCDA is suitable for flood hazard mapping.

Keywords: Flood, hazard map, analytic hierarchy process, multi-criteria decision analysis, geographic information system, Corum.

Recibido: 06/08/2018

Aceptado: 25/06/2020

Introducción

Las inundaciones son fenómenos naturales y regulares, y ocurren cuando el flujo de agua excede la capacidad de la sección transversal de la corriente como resultado de lluvia excesiva y/o deshielo (Murck & Skinner, 2016; Loucks & Van Beek, 2017). Además de los efectos climáticos, otros factores que hacen que una región sea susceptible a las inundaciones incluyen la estructura topográfica, la condición del suelo y de la tierra, las políticas de uso del suelo y la red de drenaje (Zevenbergen *et al.*, 2010; Jha, Bloch, & Lamond, 2012).

El aumento de la urbanización a lo largo de ríos y llanuras de inundación, el cambio en el uso de la tierra, la industrialización invasiva y el cambio climático se han identificado como factores clave que alteran el equilibrio hidrológico y aumentan el peligro de inundación (Zhu, Lund, Jenkins, Marques, & Ritzema, 2007; Huong & Pathirana, 2013; Kundzewicz & Stoffel, 2016).

Existen muchas medidas no estructurales y estructurales que se pueden aplicar para ayudar a prevenir o reducir las inundaciones, pero primero se deben generar mapas de peligro de inundación (Price & Vojinovic, 2008; Jonkman, Gerritsen, & Marchand, 2012). Todas las medidas de prevención y mitigación deben diseñarse sobre la base de

esta información (Zevenbergen *et al.*, 2010). Los mapas de peligro de inundación se presentan clásicamente mediante el mapeo de los límites de las inundaciones históricas que se han experimentado antes, y tales áreas se consideran de peligro potencial de inundación en el futuro (National Research Council, 1996; Babister, McLuckie, Retallick, Askew, & Toniato, 2016). Este enfoque ha sido exitoso en términos de presentar el inventario de la situación actual, pero no es suficiente para hacer pronósticos para el futuro a través del inventario actual (United Nations, 1976; National Research Council, 1983; Babister *et al.*, 2016). Un enfoque alternativo es la predicción del peligro de inundación basada en modelos hidráulicos e hidrológicos. Los modelos hidráulicos e hidrológicos se basan principalmente en determinar el nivel de agua a partir de la geometría y las condiciones hidrológicas/hidrológicas del río, y el flujo más alto determinado de acuerdo con ciertos periodos de retorno de inundación (Moel & Aerts, 2008; Mai & De-Smedt, 2017). Los modelos hidráulicos e hidrológicos requieren datos a gran escala y de alta resolución, como la sección de longitud y la sección transversal de la corriente para obtener la geometría del canal (Simonovic, 2013; Ezz, 2018; Khalfallah & Saidi, 2018), y obtener tales datos por lo general requiere mucho tiempo y es costoso (Stefanidis & Stathis, 2013). Además, la posible magnitud de la inundación durante un cierto periodo de tiempo no se puede predecir por completo; por lo tanto, el problema contiene incertidumbres significativas. Debido a la naturaleza compleja de la ocurrencia de la inundación, las inundaciones potenciales deben abordarse no sólo de acuerdo con datos meteorológicos e inundaciones anteriores, sino también con base en numerosos criterios de evaluación

de conocimiento, opiniones de expertos, puntos de vista, previsión y experiencias (De-Brito & Evers, 2016).

En los últimos años, los estudios de mapeo de peligros de inundación basados en el análisis de decisiones de criterios múltiples (MCDA) se utilizan cada vez más (Papaioannou, Vasiliades, & Loukas, 2015; De-Brito & Evers, 2016; Sakieh, 2017; Xiao, Yi, & Tang, 2017). En particular, el desarrollo de *software* que puede integrarse con los sistemas de información geográfica (GIS) y/o la adaptación de los métodos MCDA al *software GIS* permite que los análisis espaciales basados en MCDA se realicen con rapidez. En este contexto, se han integrado varios métodos MCDA con *GIS* (Linkov & Moberg, 2011; Malczewski & Rinner, 2015; Zhu, 2016), como el método de suma ponderada, método de producto ponderado, proceso de jerarquía analítica (AHP), función de valor/utilidad, TOPSIS, ELECTRE y PROMETHEE (Malczewski, 1999a; Bao, Ruan, Shen, Hermans, & Janssens, 2012; Malczewski & Rinner 2015). De estos métodos, AHP es uno de los más utilizados en la literatura y tiene un área de aplicación común en estudios de inundaciones (Sinha, Bapalu, Singh, & Rath, 2008; Fernandez & Lutz, 2010; Stefanidis & Stathis, 2013; Siddayao, Valdez, & Fernandez, 2014; Ouma & Tateishi, 2014; Nivolianitou, Synodinou, & Manca, 2015; Papaioannou *et al.*, 2015; Lyu, Sun, Shen, & Arulrajah, 2018). AHP se basa en el principio de llevar a cabo un análisis de decisión utilizando múltiples factores, como en otros métodos MCDA. Sin embargo, a diferencia de otros métodos, todos los factores se comparan entre sí para realizar una comparación por pares, y la relación de consistencia (CR) se usa para controlar la consistencia de estos juicios de comparación por pares (Saaty, 1980; Malczewski, 1999b).

Corum, en Turquía, es una provincia con muchos ríos y ha experimentado importantes inundaciones en el pasado. El peligro de inundación de Corum ha sido abordado por varios estudios científicos en los últimos años. Erdede y Öztürk (2016) determinaron el potencial de inundación utilizando índices morfométricos derivados del Modelo de Elevación Digital (DEM). Yüce y Ercan (2015), así como Ercan, Yagci, Yilmaz, Yuce y Unsal (2019) no se centraron directamente en determinar el peligro de inundación sino que modelaron la relación lluvia-escorrentía relacionada con el peligro de inundación. Kaya y Akdemir (2019) señalaron la morfología urbana y los sitios residenciales donde el peligro de inundación es alto. Estos estudios no examinan todo Corum, no evalúan múltiples factores que contribuyen a la ocurrencia de inundaciones y no producen un mapa de peligro de inundación.

Aquí describimos la situación de peligro de inundación en Corum preparando un mapa de peligro de inundación usando AHP e investigamos la compatibilidad de las medidas de protección contra inundaciones existentes con ubicaciones peligrosas. La primera etapa del estudio involucró la creación de un mapa de peligro de inundación y probó la efectividad del método AHP en el mapeo de peligro de inundación al comparar el mapa de peligro con el inventario histórico de inundaciones. El segundo paso del estudio se basó en el examen de las medidas estructurales existentes (aguas arriba y aguas abajo; estructuras de protección de la costa) en áreas peligrosas.

Área de estudio: Corum

Corum se encuentra en la parte interior de la región central del Mar Negro en Turquía (Figura 1). Corum, que consta de 14 distritos, cubre un área de 12 820 km² y la elevación promedio desde el nivel del mar es de 801 m. En general, los veranos son calurosos y secos, y los inviernos son fríos y lluviosos (Corum Governorship, 2017). La primavera es corta y el otoño es largo. Los meses más calurosos son julio y agosto, y los meses más fríos son enero y febrero. La temperatura media anual es de 10.8 °C, y la precipitación total anual es de 432.2 mm (durante el periodo de 1929 a 2019) (Turkish General Directorate of Meteorology, 2020). Según los datos del Instituto de Estadística de Turquía, en 2019, la población total de Corum era de casi medio millón de habitantes (Turkish Statistical Institute, 2020).

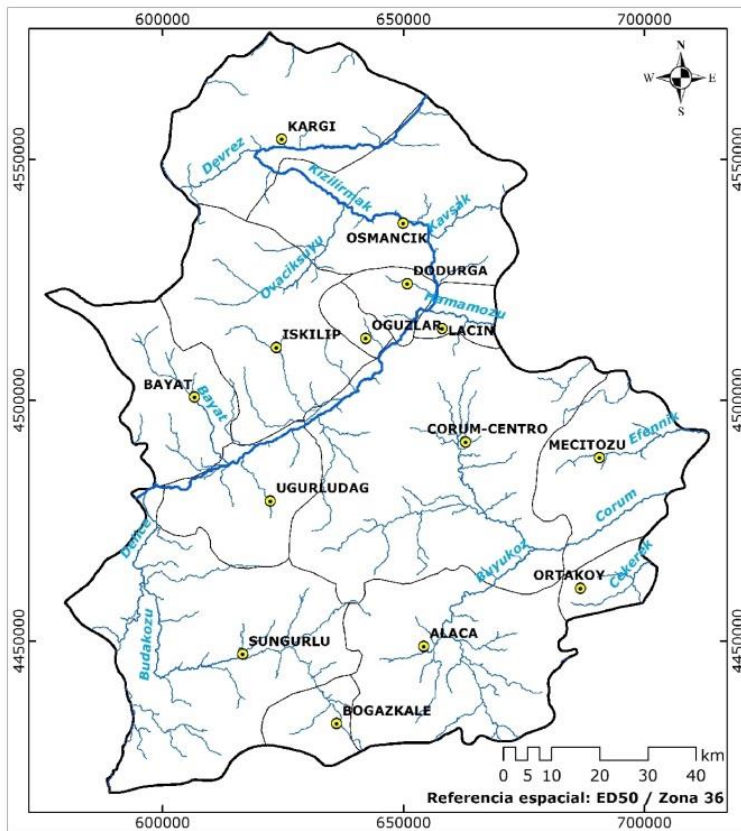


Figura 1. Área de estudio: Corum, Turquía.

La provincia de Corum tiene un área de 8 500 km² en la cuenca de Kizilirmak; la otra parte está en la cuenca de Yesilirmak (Corum Governorship, 2017). Los principales ríos de la provincia de Corum son Kizilirmak, Delice, Devrez, Ovaciksuyu, Bayat, Kavsak, Hamamozu, Budakozu, Corum, Buyukoz, Efennik y Cekerek (Kaygın & Güven, 2013). Ha sufrido gran número de inundaciones debido a la existencia de diversos ríos y a que muchos asentamientos se han construido en de los cauces de

esos cuerpos de agua. Se espera que Corum vuelva a inundarse en el futuro.

A pesar de que Corum se ha inundado en múltiples ocasiones, hay pocos datos sobre el inventario histórico de inundaciones. Esto se debe a que sólo se registraron en los informes las inundaciones que causaron daños muy graves. Desafortunadamente, se ha observado que muy pocas de las inundaciones experimentadas están representadas espacialmente por coordenadas. Los informes por lo general informan sobre las llanuras de inundación con la descripción general de la región solamente (sin coordenadas, no como datos espaciales) y no dan un valor en cuanto a la magnitud de la inundación. Sin embargo, considerando la cantidad de daños causados por las inundaciones de los informes, se entiende que las inundaciones eran más frecuentes y causaban más daños en Corum-Centro, Sungurlu y Osmancik, en comparación con otros distritos (Turkish General Directorate of State Hydraulic Works, 1998; Turkish General Directorate of State Hydraulic Works, 2017).

Datos y métodos

AHP se utilizó en la determinación del peligro de inundación de Corum. AHP, desarrollado por Saaty en la década de 1980 para problemas de

decisión complejos, se basa en las evaluaciones de criterios múltiples y un problema se modela en un sistema jerárquico: objetivo principal, criterios, subcriterios y otras opciones (Saaty, 1980; Malczewski, 1999b). En AHP, los pesos se determinan por comparación por pares. Además, de acuerdo con la naturaleza del problema de decisión, se pueden usar comparaciones por pares para obtener los valores de importancia relativa de las opciones para un criterio. Al usar los pesos de criterio y los valores de opción para cada criterio (la importancia de las opciones entre sí), el valor de análisis AHP para cada opción se calcula como en la Ecuación (1) (Saaty & Vargas, 2012):

$$A_{AHP} = \sum_j^n a_{ij} w_j \quad (1)$$

Donde a_{ij} es el valor de la opción i para el criterio j (importancia relativa a otras opciones), y w_j es el peso del criterio j determinado por comparación por pares. El punto importante es que los pesos de los criterios deben normalizarse para ser la suma de 1, y que las capas de criterios (píxeles o vectores —polígonos, líneas, puntos— con opciones) deben tener valores estandarizados en el mismo rango de valores (Malczewski, 1999b).

En el primer paso del estudio se determinaron los factores que causaron la inundación y se estableció la jerarquía de decisión; luego se calcularon los pesos de los criterios y las subcategorías/opciones agrupadas mediante comparaciones por pares. Para los criterios con valores numéricos que tienen niveles de significancia que aumentan o disminuyen linealmente no se necesitó la comparación por pares. Para

obtener las capas de criterios estándar requeridas para que todos los criterios se procesen juntos, se normalizaron todos los criterios.

El mapa de peligro de inundación obtenido como resultado del análisis de decisión AHP, que abarcaba Corum con todos los distritos, se separó en cinco niveles de peligro y las ubicaciones de las medidas estructurales existentes de control de inundaciones se superpusieron con este mapa para examinar si existen medidas estructurales en las áreas donde el peligro de inundación es importante. El flujo de trabajo que muestra los pasos principales del estudio se muestra en la Figura 2.

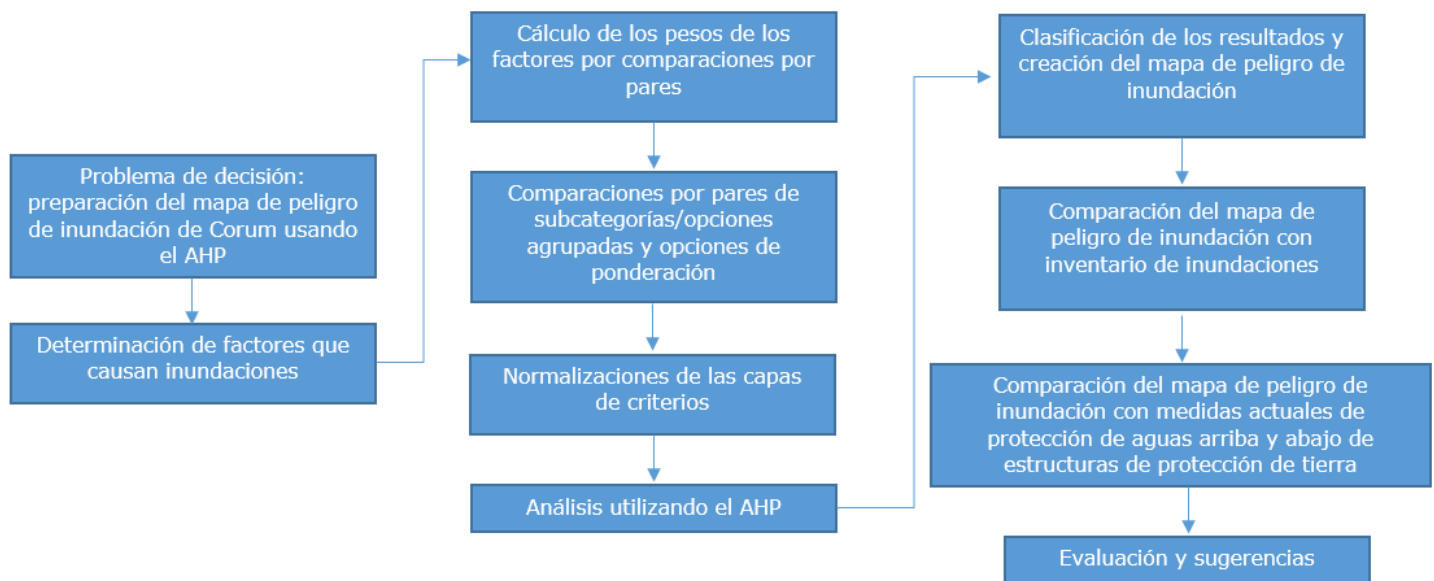


Figura 2. Flujo de trabajo del estudio.

Los datos y las especificaciones técnicas utilizadas para la preparación de las capas de criterios y los análisis en el estudio se muestran en la Tabla 1. El procesamiento de los datos y el análisis de decisión multicriterio, basado en AHP, se realizó utilizando el *software ArcGIS 10.0*. Las subcuencas y las redes de drenaje se obtuvieron de un DEM usando *ArcGIS* y la herramienta Arc Hydro.

Tabla 1. Datos y especificaciones técnicas.

Datos (fecha)	Escala/resolución	Fuente
Aster GDEM (2011)	1 arco-segundo	USGS Earth Explorer
Precipitación (promedio a largo plazo, actualizado)	1/100 000	Dirección General de Meteorología de Turquía
Geología (actualizada)	1/100 000, 1/500 000	Dirección General de Investigación y Exploración Mineral de Turquía
Estructuras de protección contra inundaciones (actualizadas)	1/1 000, 1/5 000, 1/25 000	Dirección General de Obras Hidráulicas del Estado de Turquía

Uso/cobertura del suelo (2012)	Tamaño de píxel de 100 m	Agencia Europea de Medio Ambiente
Landsat OLI (2018)	Tamaño de píxel de 30 m	USGS Earth Explorer

Determinación de factores

La determinación de los factores que causan la inundación es importante en términos de evaluación del peligro de inundación y es el primer paso en la producción de mapas de peligro de inundación. Por esta razón, los factores deben determinarse de tal manera que caractericen completamente el problema. En el presente estudio, se tuvo en cuenta literatura al respecto (Yalcin & Akyurek, 2004; Sinha *et al.*, 2008; Fernandez & Lutz, 2010; Stefanidis & Stathis, 2013; Siddayao *et al.*, 2014; Ouma & Tateishi, 2014; Xiao *et al.*, 2017); las características del área de estudio; y la accesibilidad y disponibilidad de los datos. Los factores se determinaron como: a) precipitación; b) uso/cobertura del suelo; c) geología; d) elevación; e) pendiente; f) aspecto; g) distancia a los ríos; h) tamaño de las subcuencas, e i) forma de las subcuencas.

Determinación de pesos de criterios

Los pesos se determinaron usando el método de comparación por pares, y la escala de preferencia AHP en la Tabla 2 se usó en estas comparaciones. Con bas en esta escala de preferencia, todos los factores se compararon en pares en el rango de 1-9. La importancia de un factor en comparación con el otro se decidió en función de la literatura, y el valor numérico que expresa este grado de importancia se determinó utilizando la Tabla 2. La matriz de comparación por pares de los factores se muestra en la Tabla 3.

Tabla 2. Escala de preferencia AHP (Saaty, 1980).

Definición	Escala AHP
Igual importancia	1
El elemento 1 es ligeramente más importante que el elemento 2	3
El elemento 1 es más importante que el elemento 2	5

El elemento 1 es muy importante en relación con el elemento 2	7
El elemento 1 es extremadamente importante en relación con el elemento 2	9
	2, 4, 6, 8 valores intermedios
	1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9 valores recíprocos

Tabla 3. Matriz de comparación por pares.

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
C1	1	2	3	4	5	5	6	6	6
C2	1/2	1	3	4	5	5	6	6	6
C3	1/3	1/3	1	2	3	3	4	5	6
C4	1/4	1/4	1/2	1	2	2	4	5	6
C5	1/5	1/5	1/3	1/2	1	2	3	4	5
C6	1/5	1/5	1/3	1/2	1/2	1	2	3	4
C7	1/6	1/6	1/4	1/4	1/3	1/2	1	2	3
C8	1/6	1/6	1/5	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2
C9	1/6	1/6	1/6	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1

C1: precipitación, C2: distancia a los ríos, C3: pendiente, C4: elevación, C5: uso/cobertura del suelo, C6: geología, C7: aspecto, C8: tamaño de las subcuencas, C9: forma de las subcuencas

Para obtener los pesos relativos de los criterios, como un peso total de 1, las sumas de columna se toman en la matriz de comparación por pares, y cada valor se divide por la suma de la columna. Los pesos relativos se calculan promediando cada línea (Tabla 4).

Tabla 4. Cálculo de peso.

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	Pesos
C1	0.335	0.446	0.342	0.317	0.289	0.262	0.224	0.185	0.154	0.284
C2	0.168	0.223	0.342	0.317	0.289	0.262	0.224	0.185	0.154	0.240
C3	0.112	0.074	0.114	0.159	0.174	0.157	0.149	0.154	0.154	0.138
C4	0.084	0.056	0.057	0.079	0.116	0.105	0.149	0.154	0.154	0.106
C5	0.067	0.045	0.038	0.040	0.058	0.105	0.112	0.123	0.128	0.079
C6	0.067	0.045	0.038	0.040	0.029	0.052	0.075	0.092	0.103	0.060
C7	0.056	0.037	0.028	0.020	0.019	0.026	0.037	0.062	0.077	0.040
C8	0.056	0.037	0.023	0.016	0.014	0.017	0.019	0.031	0.051	0.029
C9	0.056	0.037	0.019	0.013	0.012	0.013	0.012	0.015	0.026	0.023
Total	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

La relación de consistencia se calculó para determinar la consistencia de los juicios de comparación por pares. Para este propósito, los pesos y cada línea de la matriz de comparación por pares se multiplican y agregan. Estos valores se dividen por pesos. Al tomar el promedio de dichos valores, se calcula el valor promedio del vector de consistencia, λ . Luego, el índice de consistencia, CI , se calcula de acuerdo con la Ecuación (2). En esta ecuación, n es el número de criterios. La relación de consistencia, CR , se calcula dividiendo el CI por el índice de aleatoriedad RI (Tabla 5), que varía según el número de factores a comparar, como se indica en la Ecuación (3) (Malczewski, 1999b). En este estudio, el número de criterios es nueve, por lo que el RI es 1.45, de acuerdo con el Índice de aleatoriedad en la Tabla 5. La relación de consistencia se calculó como 0.05, que es menor que el valor límite de 0.10 sugerido por Saaty (1980), por lo que los juicios de comparación por pares son consistentes (Tabla 6):

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

Tabla 5. Índice de aleatoriedad (Malczewski, 1999b).

<i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>RI</i>	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Tabla 6. Cálculo de consistencia.

Paso 1	Paso 2
$1 \times 0.284 + 2 \times 0.240 + 3 \times 0.138 + 4 \times 0.106 + 5 \times 0.079 + 5 \times 0.060$ $+ 6 \times 0.040 + 6 \times 0.029 + 6 \times 0.023 = 2.849$	10.032
$1/2 \times 0.284 + 1 \times 0.240 + 3 \times 0.138 + 4 \times 0.106 + 5 \times 0.079 + 5 \times 0.060$ $+ 6 \times 0.040 + 6 \times 0.029 + 6 \times 0.023 = 2.467$	10.279
$1/3 \times 0.284 + 1/3 \times 0.240 + 1 \times 0.138 + 2 \times 0.106 + 3 \times 0.079 + 3 \times 0.060$ $+ 4 \times 0.040 + 5 \times 0.029 + 6 \times 0.023 = 1.385$	10.034
$1/4 \times 0.284 + 1/4 \times 0.240 + 1/2 \times 0.138 + 1 \times 0.106 + 2 \times 0.079 + 2 \times 0.060$ $+ 4 \times 0.040 + 5 \times 0.029 + 6 \times 0.023 = 1.027$	9.689
$1/5 \times 0.284 + 1/5 \times 0.240 + 1/3 \times 0.138 + 1/2 \times 0.106 + 1 \times 0.079 + 2 \times 0.060$ $+ 3 \times 0.040 + 4 \times 0.029 + 5 \times 0.023 = 0.754$	9.542
$1/5 \times 0.284 + 1/5 \times 0.240 + 1/3 \times 0.138 + 1/2 \times 0.106 + 1/2 \times 0.079 + 1 \times 0.060$ $+ 2 \times 0.040 + 3 \times 0.029 + 4 \times 0.023 = 0.553$	9.214
$1/6 \times 0.284 + 1/6 \times 0.240 + 1/4 \times 0.138 + 1/4 \times 0.106 + 1/3 \times 0.079 + 1/2 \times 0.060$ $+ 1 \times 0.040 + 2 \times 0.029 + 3 \times 0.023 = 0.372$	9.292
$1/6 \times 0.284 + 1/6 \times 0.240 + 1/5 \times 0.138 + 1/5 \times 0.106 + 1/4 \times 0.079 + 1/3 \times 0.060$ $+ 1/2 \times 0.040 + 1 \times 0.029 + 2 \times 0.023 = 0.271$	9.341
$1/6 \times 0.284 + 1/6 \times 0.240 + 1/6 \times 0.138 + 1/6 \times 0.106 + 1/5 \times 0.079 + 1/4 \times 0.060$	9.114

$+1/3 \times 0.040 + 1/2 \times 0.029 + 1 \times 0.023 = 0.210$	
$\lambda = 9.615$ $CI = 0.077$ $CR = 0.05$	

Preparación y normalización de las capas de criterios

Se prepararon las capas de criterio. Las opciones en cada capa de criterio se clasificaron en términos de peligro de inundación. A continuación, los procedimientos de normalización se realizaron para estandarizar todas las capas de criterios en el mismo rango de valores.

Preparación de capas de criterios

Todas las capas de criterios se prepararon en el marco de las fronteras de la provincia de Corum y como datos ráster de un tamaño de píxel de 100 m, considerando la escala y resolución de los datos utilizados. Los datos y métodos empleados en la preparación de las capas de criterios se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7. Datos y métodos utilizados en la preparación de capas de criterios.

Capas de criterios	Datos	Método
Precipitación	La precipitación anual promedio a largo plazo de los datos de estaciones meteorológicas	La distribución espacial de la precipitación se determinó utilizando el método de distancia inversa ponderada (IDW)
Uso/cobertura del suelo	CORINE 2012	El uso/cobertura actual del suelo se obtuvo al actualizar CORINE 2012 con la interpretación visual de los datos de Landsat OLI de 2018
Geología	Mapas geológicos a escala 1/100	El mapa geológico se clasificó en tres clases: nuevo aluvión, antiguo aluvión y otros

	000 y escala 1/500 000	
Elevación	Aster GDEM	Los datos de Aster GDEM se convirtieron en datos de tamaño de píxel de 100 m; luego los errores de sumideros y picos se eliminaron del DEM utilizando la función "Fill Sinks" en Arc Hydro, lo que resulta en datos DEM mejorados
Pendiente	Elevación	Se creó una capa de pendiente utilizando los datos DEM mejorados
Aspecto	Elevación	Se creó una capa de aspecto utilizando los datos DEM mejorados
Distancia a los ríos	Red de drenaje derivada de Aster GDEM	La capa distancia a ríos se creó utilizando la función "Euclidean Distance" del <i>software ArcGIS 10.0</i>
Tamaño de las subcuencas	Aster GDEM	Las subcuencas de las cuencas Kizilirmak y Yesilirmak en el área de estudio se obtuvieron utilizando la red de drenaje y

		la dirección del flujo. Para este propósito, la función "Catchment Grid Delineation" se utiliza en Arc Hydro. Debido a que esta función produce las subcuencas en forma de cuadrícula, los límites de la subcuenca en forma de cuadrícula se convirtieron en forma vectorial y se calculó el área de cada subcuenca
Forma de las subcuencas	Aster GDEM	La relación longitud/ancho de la subcuenca se obtuvo por la relación de la distancia en la dirección del flujo a la distancia perpendicular a ella. De acuerdo con esto, las cuencas se clasifican en tres clases, como cuencas circulares, semicirculares y alargada mediante el uso de valores umbral determinados

Cada capa de criterio se evaluó en términos de peligro de inundación y se puntuó a nivel de subcategoría. Para este propósito, el uso/cobertura del suelo, la geología, el aspecto, el tamaño de las

subcuencas y la forma de las subcuencas se subcategorizaron, y las subcategorías se ponderaron mediante el método de comparación por pares. A partir de estas capas, el uso/cobertura del suelo, la geología, el aspecto y la forma de las subcuencas tienen valores de clase con términos verbales, y dado que hay pocas subclases, se han realizado comparaciones por pares utilizando estas clases directamente. Sin embargo, dado que el número total de subcuencas es 27, es difícil evaluar el tamaño de las subcuencas por comparación por pares. Así, se hicieron comparaciones por pares para valores agrupados.

Los pesos obtenidos por las comparaciones por pares de subcategorías/opciones agrupadas para uso/cobertura del suelo, geología, aspecto, tamaño de las subcuencas y la forma de las subcuencas, y la relación de consistencia de las comparaciones por pares se resumen en la Tabla 8. Como la relación de consistencia fue inferior a 0.10 para todos los criterios, todos los juicios fueron consistentes.

Tabla 8. Los coeficientes de las subcategorías/opciones agrupadas de criterios obtenidos por comparaciones por pares y la relación de consistencia de comparaciones por pares.

Criterios	Subcategorías/opciones agrupadas de criterios	Pesos
Uso/cobertura del suelo (CR = 0.08)	Cuerpos de agua	0.342
	Humedales	0.342
	Áreas artificiales	0.216

	Áreas agrícolas	0.073
	Bosques y áreas seminaturales	0.029
Geología (CR = 0.09)	Aluvión nuevo	0.640
	Aluvión viejo	0.306
	Otro	0.054
Aspecto (CR = 0.01)	Plano	0.289
	Norte	0.197
	Noreste	0.123
	Noroeste	0.123
	Este	0.075
	Oeste	0.075
	Sureste	0.045
	Suroeste	0.045
	Sur	0.028
Tamaño de las subcuencas (km²) (CR = 0.02)	3 000-3 500	0.350
	2 500-3 000	0.237
	2 000-2 500	0.159
	1 500-2 000	0.106
	1 000-1 500	0.070
	500-1 000	0.046

	0-500	0.032
Forma de subcuencas (CR = 0.06)	Circular	0.643
	Semicircular	0.283
	Alargada	0.074

La precipitación, elevación, pendiente y distancia a los ríos estaban en forma de cuadrícula, y cada cuadrícula tenía valores diferentes. Por esta razón, en lugar de agruparse y puntuarse por comparaciones por pares, los datos se escalaron en el rango 0-1 utilizando la "transformación de escala lineal". Aquí, 1 es más propenso a las inundaciones, y 0 es el menos propenso. Las áreas cercanas a los ríos se ven más afectadas por las inundaciones, y la acumulación ocurre donde hay pendientes bajas y las elevaciones bajas están expuestas al agua desde elevaciones altas. Para este propósito, se supone que hay un cambio lineal entre la frontera con los ríos y los lugares más lejanos (1 para la frontera con los ríos y 0 para los lugares más alejados de los ríos). Del mismo modo, los datos de elevación (con el valor de elevación más bajo de 1 y el valor de elevación más alto de 0) y los datos de pendiente (con la pendiente más baja de 1 y la pendiente más alta de 0) se escalan a 0-1. Los datos de precipitación también se escalaron entre 0 y 1 (valor máximo de precipitación de 1 y valor mínimo de precipitación de 0).

Normalización de capas de criterios

La normalización se hizo para que todas las capas de criterios estuvieran dentro del mismo rango de evaluación. La suma de todos los valores de subcategorías/opciones agrupadas obtenidas mediante comparaciones por pares para uso/cobertura del suelo, geología, aspecto, tamaño de subcuencas y forma de capas de subcuencas es 1. Estos datos deben estar en el mismo rango de escala para ser procesados con precipitación, elevación, pendiente y distancia a los ríos. Para este propósito, se aplicó "transformación de escala lineal" a las capas en las que las opciones se puntuaron mediante comparaciones por pares y los valores se ajustaron en el rango 0-1. Debido a que la precipitación, elevación, pendiente y distancia a los ríos se generaron en el rango 0-1 en el paso anterior del proceso, este proceso no es necesario para éstos. Las capas de criterios normalizadas están en el intervalo 0-1, y el nivel más alto de peligro de inundación está representado por valores cercanos a 1, mientras que el nivel inferior se representa por valores cercanos a 0.

Aplicación de análisis de decisión con AHP

El análisis de decisión se realizó con AHP utilizando pesos de criterios determinados por la técnica de comparación por pares y capas de criterios normalizados, y se creó un mapa de peligro. Este mapa se comparó con la información del inventario de inundaciones de la provincia de Corum, y se verificó la validez del estudio. Además, examinamos la compatibilidad de las ubicaciones de las medidas de protección contra inundaciones existentes y planificadas en Corum con el mapa de peligros. Los resultados del análisis con AHP, la clasificación de los resultados, la compatibilidad del mapa de peligro con el inventario de inundaciones, y el examen de las medidas existentes y planificadas se discuten en detalle en la sección de "Resultados y discusión".

Resultados y discusión

El rango de valores del mapa de peligro generado por AHP fue de 0.38 a 0.92. Los valores más altos indican un mayor nivel de peligro de inundación. Para proporcionar una visualización más interpretable de los resultados del análisis obtenidos por el AHP, se empleó un método de "clasificación por intervalos iguales" en el entorno *ArcGIS 10.0*, y el peligro de inundación se clasificó en cinco grupos: "1: Muy alto"; "2: Alto";

“3: Medio”; “4: Bajo”, y “5: Muy bajo” (Figura 3). Los resultados de la clasificación sugieren que el 3 % del área de Corum (385 km²) exhibió un nivel de peligro de inundación muy alto; 25 % (3 205 km²) mostró un alto nivel de peligro de inundación; 49 % (6 282 km²) medio; 21% (2 692 km²) bajo, y 2 % (256 km²) muy bajo.

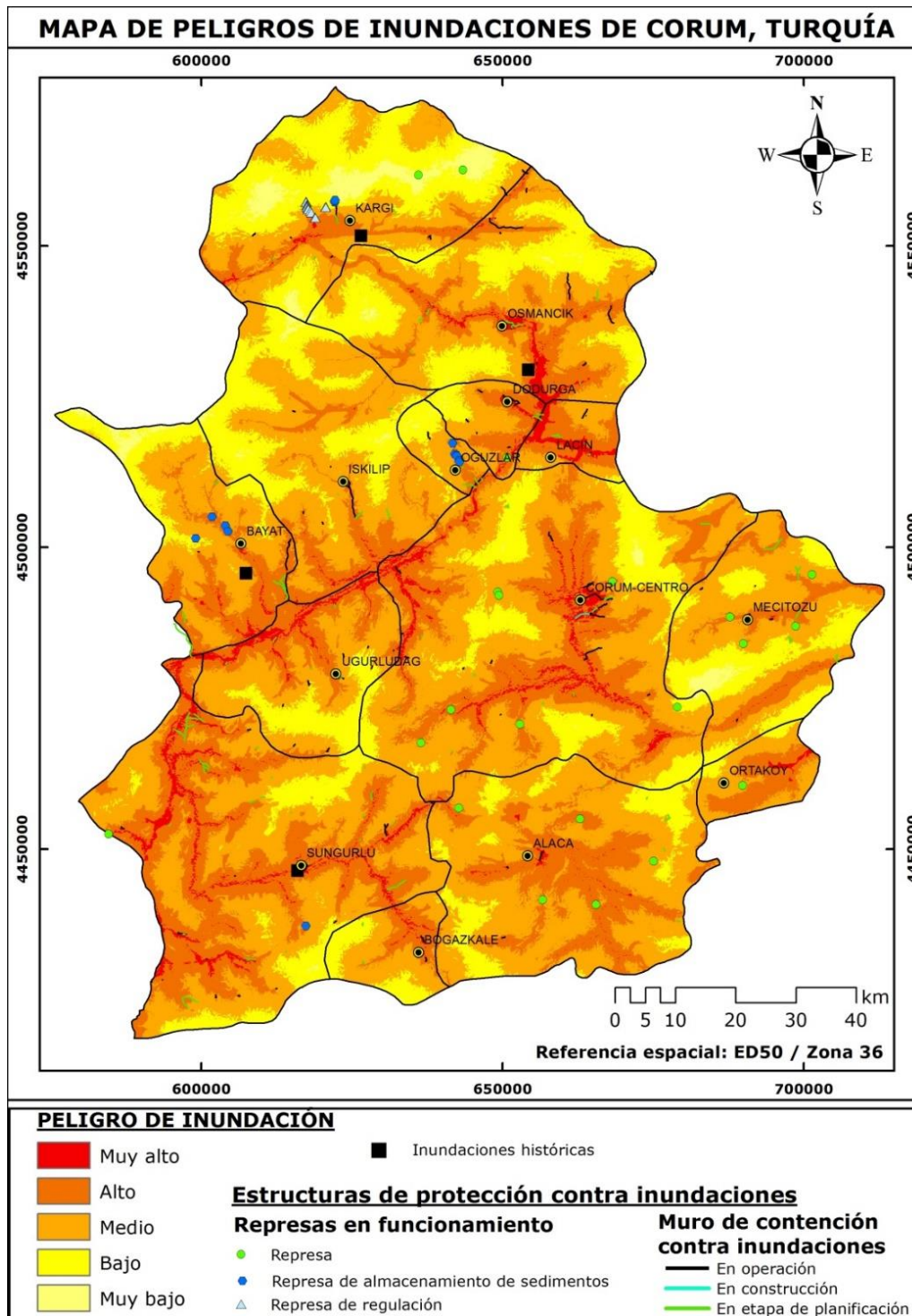


Figura 3. Mapa de peligro de inundación.

Para probar la precisión de la evaluación del peligro de inundación obtenida por AHP, los resultados del análisis se compararon con el inventario de inundaciones en Corum, y se determinó que el inventario existente y el mapa de peligro son compatibles (Figura 3). Sin embargo, el principal problema en esta comparación fue que sólo un número limitado de inundaciones históricas tenía datos coordinados. Por esta razón, el mapa de peligro de inundación también se superpuso con los límites de los distritos de Corum y se obtuvo la distribución del área de superficie de las áreas donde el peligro de inundación es importante (la categoría de peligro de inundación es muy alta y alta) para los distritos. Como resultado de este proceso, los valores más altos estaban en Sungurlu, Corum-Centro y Osmancik, respectivamente; tal situación estaba en línea con los informes de inundaciones de Corum. Por lo tanto, como resultado de dichas comparaciones, se cree que los resultados del análisis obtenido proporcionarán una representación realista de las áreas en peligro de inundación.

Para determinar el estado de uso/cobertura del suelo de las áreas con niveles de peligro de inundación muy alto y alto, que pueden considerarse como las zonas más vulnerables en posibles inundaciones, los mapas de peligro y el uso/cobertura del suelo se han superpuesto, y se ha obtenido la información de uso espacial de las áreas con niveles de peligro de inundación muy alto y alto. De acuerdo con esto, se ha determinado que aproximadamente 43.64 km² del área artificial tiene un nivel de peligro de inundación muy alto, y 87.61 km² del área artificial tiene un nivel de peligro de inundación alto en Corum (Tabla 9).

Tabla 9. Uso espacial de áreas con niveles de peligro de inundación muy alto y alto en Corum (km²).

	Áreas artificiales	Áreas agrícolas	Bosques y áreas seminaturales
Peligro muy alto	43.64	283.82	11.57
Peligro alto	87.61	2 418.93	717.42

Se ha construido un gran número de estructuras de protección contra inundaciones debido a las posibles y experimentadas inundaciones en Corum. Hay un total de 14 represas de almacenamiento de sedimentos y 17 represas de regulación. El número total de represas y pequeñas represas en operación es de 6 y 15, respectivamente. Se han llevado a cabo un total de 206 proyectos para muros de contención de control de inundaciones, estructuras de control de erosión y sedimentos, de los cuales 85 están en operación, 1 está en construcción y 120 están en la etapa de planificación. Las ubicaciones de las represas de almacenamiento de sedimentos, muros de contención contra inundaciones, represas de regulación, represas y pequeñas represas superpuestas con el mapa de peligro se muestran en la Figura 3.

En la Figura 3 se ve que se han construido o planeado estructuras de protección contra inundaciones en muchos lugares con un nivel de peligro de inundación muy alto en el mapa de peligro existente. Esto demuestra que el mapa de peligro presenta áreas problemáticas con

precisión. Al respecto, en sitios donde existe un peligro de inundación muy alto y alto, y no se han tomado medidas de protección contra inundaciones, es necesario preparar mapas de peligro basados en modelos hidráulicos-hidrológicos y, en consecuencia, crear proyectos de protección contra inundaciones; tales proyectos deben concretarse lo antes posible. Estas medidas son costosas, deben construirse principalmente para comenzar desde asentamientos; las áreas con niveles de peligro muy altos y altos deben ser monitoreadas de cerca, y las medidas requieren completarse de manera oportuna. Junto con esto, el establecimiento de nuevos asentamientos y estudios de zonificación deben llevarse a cabo con cuidado en lugares peligrosos donde no se toman precauciones.

Según nuestros hallazgos, la integración de MCDA y GIS se puede utilizar de manera efectiva para determinar el peligro de inundación. Los pesos de los criterios y las subcategorías/opciones agrupadas se determinaron mediante la técnica de comparación por pares de acuerdo con el método AHP. MCDA es subjetivo e introduce un riesgo de sesgo. Para reducir este sesgo potencial, se calculó la relación de consistencia de las comparaciones por pares, y se verificó que las relaciones de consistencia estuvieran por debajo del valor umbral de 0.10 sugerido por Saaty (1980).

Los resultados de este estudio se compararon con estudios previos en Corum y se encontró que eran compatibles. Erdede y Öztürk (2016) declararon que el peligro de inundación es mayor alrededor de los segmentos de corrientes de séptimo orden de Strahler en la cuenca de Kizilirmak. En nuestro estudio, se identificó que esta región tiene un nivel

de peligro de inundación muy alto. Además, se observó que las áreas donde el peligro de inundación es importante (áreas de peligro de inundación muy alto y alto) en Corum-Centro son compatibles con las áreas indicadas en Kaya y Akdemir (2019).

Conclusión

Evalúamos el peligro de inundación de la provincia de Corum y se preparó un mapa de peligro de inundación. En la preparación del mapa de peligro de inundación se utilizó AHP —método MCDA— y el análisis se realizó ponderando los factores que afectan las inundaciones. Mediante tal enfoque, se determinó que el 3 % de Corum tiene un nivel de peligro de inundación muy alto, y el 25 % tiene un nivel de peligro de inundación alto. El mapa de peligro producido es compatible con inundaciones históricas, lo cual sugiere que el mapa de peligro proporciona una representación realista de las áreas que pueden verse afectadas por posibles inundaciones futuras.

Cuando se compararon las medidas estructurales con el mapa de peligro de inundación en la provincia de Corum, una gran parte de las medidas existentes corresponden a las áreas de peligro de inundación

muy alto y alto. Por lo tanto, es importante llevar a cabo investigaciones detalladas y tomar las medidas necesarias para otras áreas donde el peligro de inundación es importante.

A partir de nuestros hallazgos, proponemos que la evaluación de peligro basada en el MCDA proporciona una visión realista; maneja correctamente los factores que afectan las inundaciones, y puede ser útil para determinar lugares donde se requiere una evaluación de peligros sustentada en modelos hidrológico-hidrológicos (los modelos hidráulico-hidrológicos requieren datos de alta resolución y gran escala; necesitan mucho tiempo y son costosos; por tanto, no son aplicables a todos los campos). En este contexto, recomendamos que los estudios de evaluación del peligro de inundación se realicen principalmente por MCDA a escala general, y luego por modelos hidráulico-hidrológicos basados en las áreas priorizadas por el MCDA.

Referencias

- Babister, M., McLuckie, D., Retallick, M., Askew, E., & Toniato, A. (2016). Spatially defining flood risk. In: Constantinescu, G., Garcia, M., & Hanes, D. (eds.). *River flow 2016* (pp. 1982-1989). London, UK: Taylor & Francis Group.
- Bao, Q., Ruan, D., Shen, Y., Hermans, E., & Janssens, D. (2012). TOPSIS and its extensions: Applications for road safety performance evaluation. In: Kahraman, C. (ed.). *Computational intelligence systems in industrial engineering: With recent theory and applications* (pp. 109-130). Paris, France: Atlantis Press.

- Corum Governorship. (2017). *Environmental status report of Corum province for 2016 (Çorum ili 2016 yılı çevre durum raporu)*. Corum, Turkey: Environmental Impact Assessment and Permit Branch Office (Çevresel Etki Değerlendirme ve İzin Şube Müdürlüğü) (in Turkish).
- De-Brito, M. M., & Evers, M. (2016). Multi-criteria decision-making for flood risk management: A survey of the current state of the art. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(4), 1019-1033. DOI: 10.5194/nhess-16-1019-2016
- Ercan, B., Yagci, A. E., Yilmaz, A. S., Yuce, M. I., & Unsal, M. (2019). Annual runoff modelling of Kizilirmak Basin by artificial intelligent techniques. *Fresenius Environmental Bulletin*, 8(9), 6651-6660.
- Erdede, B., & Öztürk, D. (2016). Evaluation of flood potential of Kizilirmak Basin using linear, areal and relief morphometric indices (Kizilirmak havzasının taşkın potansiyelinin çizgisel, alansal ve rölyef morfometrik indisler kullanılarak değerlendirilmesi). *6th Remote Sensing - GIS Symposium (UZAL-CBS 2016)*, Adana, Turkey, 5-7 October 2016 (in Turkish).
- Ezz, H. (2018). Integrating GIS and HEC-RAS to model Assiut plateau runoff. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(3), 219-227. DOI: 10.1016/j.ejrs.2017.11.002
- Fernandez, D. S., & Lutz, M. A. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, 111(1-4), 90-98. DOI: 10.1016/j.enggeo.2009.12.006

- Huong, H. T. L., & Pathirana, A. (2013). Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), 379-394, DOI: 10.5194/hess-17-379
- Jha, A. K., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). *Cities and flooding a guide to integrated urban flood risk management for the 21st century*. Washington, DC, USA: The World Bank.
- Jonkman, N. S., Gerritsen, H., & Marchand, M. (2012). Coastal storm. In: Wisner, B., Gaillard, J. C., & Kelman, I. (eds.). *Handbook of hazards and disaster risk reduction and management*. New York, USA: Taylor & Francis.
- Kaya, A. Y., & Akdemir, İ.O. (2019). *Urban morphology of Corum (Çorum kent morfolojisi)*. İstanbul, Turkey: Hiperlink Yayınları (in Turkish).
- Kaygın, E., & Güven, B. (2013). *SWOT analysis for Corum province (Çorum ili SWOT analizi)*. İstanbul, Turkey: Veritas Yayıncılık (in Turkish).
- Khalfallah, C. B., & Saidi, S. (2018). Spatiotemporal floodplain mapping and prediction using HEC-RAS-GIS tools: Case of the Mejerda river, Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 142, 44-51, DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2018.03.004
- Kundzewicz, Z. W., & Stoffel, M. (2016). Anatomy of flood risk. In: Kundzewicz, Z., Stoffel, M., Niedźwiedź, T., & Wyżga, B. (eds.). *Flood risk in the Upper Vistula Basin* (pp. 39-52). Cham, Switzerland: Springer.

- Linkov, I., & Moberg, E. (2011). *Multi-criteria decision analysis: Environmental applications and case studies*. New York, USA: CRC Press.
- Loucks, D. P., & Van Beek, E. (2017). *Water resource systems planning and management: An introduction to methods, models, and applications*. Cham, Switzerland: Springer.
- Lyu, H. M., Sun, W. J., Shen, S. L., & Arulrajah, A. (2018). Flood risk assessment in metro systems of mega-cities using a GIS-based modeling approach. *Science of the Total Environment*, 626, 1012-1025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.138
- Mai, D. T., & De-Smedt, F. (2017). A combined hydrological and hydraulic model for flood prediction in Vietnam applied to the Huong river basin as a test case study. *Water*, 9(11), 879. DOI:10.3390/w9110879
- Malczewski, J. (1999a). Spatial multicriteria decision analysis. Thill, J. -C. (ed.). *Decision making and analysis: A geographic information sciences approach* (Part 1). New York, USA: Ashgate.
- Malczewski, J. (1999b). *GIS and multicriteria decision analysis*. New York, USA: John Wiley and Sons.
- Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science*. New York, USA: Springer.
- Moel, H. & Aerts, J. C. J. H. (2008). Flood risk mapping in Europe: A comparative evaluation of methods, availability and applications. *IV. International Symposium on Flood Defence*, Toronto, Canada, May 6-8, 2008.

- Murck, B. W. & Skinner, B. J. (2016). *Visualizing geology*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons.
- National Research Council. (1996). *Alluvial fan flooding*. Washington, DC, USA: National Academies Press.
- National Research Council. (1983). *Improving the flood insurance study process*. Washington, DC, USA: The National Academies Press.
- Nivolianitou, Z., Synodinou, B., & Manca, D. (2015). Flood disaster management with the use of AHP. *International Journal of Multicriteria Decision Making*, 5(1-2), 152-164. DOI: 10.1504/IJMCDM.2015.067943
- Ouma, Y. O., & Tateishi, R. (2014). Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: Methodological overview and case study assessment. *Water*, 6(6), 1515-1545. DOI: 10.3390/w6061515
- Papaioannou, G., Vasiliades, L., & Loukas, A. (2015). Multi-criteria analysis framework for potential flood prone areas mapping. *Water resources management*, 29(2), 399-418. DOI: 10.1007/s11269-014-0817-6
- Price, R. K., & Vojinovic, Z. (2008). Urban flood disaster management. *Urban Water Journal*, 5(3), 259-276, DOI: 10.1080/15730620802099721
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. New York, USA: McGraw-Hill Comp.

- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process* (vol. 175). New York, USA: Springer Science & Business Media.
- Sakieh, Y. (2017). Understanding the effect of spatial patterns on the vulnerability of urban areas to flooding. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 25, 125-136. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2017.09.004
- Siddayao, G. P., Valdez, S. E., & Fernandez, P. L. (2014). Analytic hierarchy process (AHP) in spatial modeling for floodplain risk assessment. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 4(5), 450-457. DOI: 10.7763/IJMLC.2014.V4.453
- Simonovic, S. P. (2013). *Floods in a changing climate: Risk management*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Sinha, R., Bapalu, G. V., Singh, L. K., & Rath, B. (2008). Flood risk analysis in the Kosi river basin, north Bihar using multi-parametric approach of Analytical Hierarchy Process (AHP). *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 36(4), 335-349. DOI: 10.1007/s12524-008-0034-y
- Stefanidis, S., & Stathis, D. (2013). Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using analytic hierarchy process (AHP). *Natural Hazards*, 68(2), 569-585. DOI:10.1007/s11069-013-0639-5
- Turkish General Directorate of Meteorology. (2020). *Official statistics (Resmî istatistikler)*. Recuperado de

<https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=CORUM>, May 1, 2020 (in Turkish).

Turkish General Directorate of State Hydraulic Works. (1998). *Flood yearbook of Turkey's river basins (Türkiye akarsu havzaları taşkın yıllığı)*. Ankara, Turkey: DSİ Yayınları (in Turkish).

Turkish General Directorate of State Hydraulic Works. (2017). *Official archive*. Corum, Turkey (in Turkish).

Turkish Statistical Institute. (2020). *Statistical indicators (İstatistik göstergeler)*. Recuperado de <http://www.tuik.gov.tr/>, May 2, 2020 (in Turkish).

United Nations, Department of Economic and Social Affairs. (1976). *Guidelines for flood loss prevention and management in developing countries*. New York, USA: United Nations Publication.

Xiao, Y., Yi, S., & Tang, Z. (2017). Integrated flood hazard assessment based on spatial ordered weighted averaging method considering spatial heterogeneity of risk preference. *Science of the Total Environment*, 599-600, 1034-1046. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.218 0048-9697

Yalcin, G., & Akyurek, Z. (2004). Analysis flood vulnerable areas with multicriteria evaluation. *XXth International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress*, Istanbul, Turkey, July 12-23, 2004.

Yüce, M. İ. & Ercan, B. (2015). Determination of rainfall-runoff relationship in Kızılırmak Basin (Kızılırmak havzası yağış-akış ilişkisinin belirlenmesi). *4th Water Structures Symposium (4. Su*

Yapıları Sempozyumu), Antalya, Turkey, 19-21 November 2015, Proceedings, pp. 410-418 (in Turkish).

Zevenbergen, C., Cashman, A., Evelpidou, N., Pasche, E., Garvin, S., & Ashley, R. (2010). *Urban flood management*. Boca Raton, USA: CRC Press.

Zhu, T., Lund, J. R., Jenkins, M. W., Marques, G. F., & Ritzema, R. S. (2007). Climate change, urbanization, and optimal long-term floodplain protection. *Water Resources Research*, 43(W06421), 1-11, DOI: 10.1029/2004WR003516

Zhu, X. (2016). *GIS for environmental applications: A practical approach*. New York, USA: Routledge.