UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Civil



Evaluación de la susceptibilidad de inundación fluvial en la microcuenca del río Cumbaza aplicando el método Analytic Hierarchy Process (AHP)

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autor:

Bach. Angie Melissa Chaiña Mattos

Bach. Olenka Vanessa Gonzáles Rivera

Bach. Samuel Leonardo Olivera López

Asesor:

Ing. Ferrer Canaza Rojas

Lima, agosto del 2024

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Ferrer Canaza Rojas, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **"Evaluación de la susceptibilidad de inundación fluvial en la microcuenca del río Cumbaza aplicando el método Analytic Hierarchy Process (AHP)"** de los autores Angie Melissa Chaiña Mattos, Olenka Vanessa Gonzáles Rivera, y Samuel Leonardo Olivera López tiene un índice de similitud de 2 % verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 22 días del mes de agosto del año 2024.



Ing. Ferrer Canaza Rojas

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a los 13 día(s) del mes de agosto del año 2024, siendo las 09:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Lima, bajo la dirección del (de la) presidente(a): Ing. David Díaz Garamendi, el (la) secretario(a): Mg. Reymundo Jaulis Palomino y los demás miembros: Mg. Leonel Chahuares Paucar y el (la) asesor(a) Ing. Ferrer Canaza Rojas con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado: "Evaluación de la susceptibilidad de inundación pluvial en la microcuenca del río Cumbaza aplicando el método Analytic Hierarchy Process (AHP)" del(los) bachiller/es: a) Angie Melissa Chaiña Mattos b) Samuel Leonardo Olivera López c) Olenka Vanessa Gonzáles Rivera conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniero Civil

(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)/s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)/s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Angie Melissa Chaiña Mattos

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	16	B	Bueno	Muy bueno

Bachiller (b): Samuel Leonardo Olivera López

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	16	B	Bueno	Muy bueno

Bachiller (c): Olenka Vanessa Gonzáles Rivera

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	16	B	Bueno	Muy bueno

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)/s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

Presidente/a

Secretario/a

Asesor/a

Miembro

Miembro

Bachiller (a)

Bachiller (b)

Bachiller (c)

ÍNDICE

Resumen 5
Abstract 6
Introducción 7
Área de Estudio 8
Materiales y métodos 9
Factores para hallar la susceptibilidad en inundación fluvial 10
Método AHP 11
Escala Saaty 11
Matriz de comparación de pares 13
Matriz de normalización 13
Matriz de relación de consistencia 14
Índice de consistencia (IC) 14
Índice aleatorio (IA) 15
Relación de consistencia (RC) 15
Arcgis Pro 16
Resultados y discusiones 20
Conclusiones 26
Referencias 27

Artículo

Evaluación de la Susceptibilidad de Inundación Fluvial en la microcuenca del río Cumbaza aplicando el método Analytic Hierarchy Process (AHP)

Assessment of Fluvial Flood Susceptibility in the Cumbaza River Micro-basin using the Analytic Hierarchy Process (AHP) Method

Angie Chaiña[1], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1754-5299

Olenka Gonzales[2], ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0448-9993

Samuel Olivera[3], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4956-8110

[1]Universidad Peruana Unión, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Carretera Central Km 19.5 Ñaña, Chosica, Lima, Lima, Perú, angiechaina@upeu.edu.pe

[2]Universidad Peruana Unión, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Carretera Central Km 19.5 Ñaña, Chosica, Lima, Lima, Perú, olenkagonzales@upeu.edu.pe

[3]Universidad Peruana Unión, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Carretera Central Km 19.5 Ñaña, Chosica, Lima, Lima, Perú, samuelolivera@upeu.edu.pe

Resumen

Las inundaciones constituyen uno de los desastres naturales más recurrentes en la región sudamericana, ocasionando numerosos daños a propiedades y pérdidas de vidas. Dada la relevancia de este fenómeno, la presente investigación tuvo como objetivo determinar la susceptibilidad a inundaciones fluviales en la microcuenca Cumbaza, localizada en las provincias de San Martín y Lamas, Perú. Para alcanzar este objetivo, se aplicó el método Analytic Hierarchy Process (AHP) haciendo uso del software ArcGIS Pro, en primer lugar, se delimitó el área de estudio mediante un modelo digital de elevación (DEM) y se elaboraron los mapas

de factores condicionantes y desencadenantes en base a la información proporcionada por el Ministerio del Ambiente y SENAMHI. Mediante la aplicación del AHP, se asignaron ponderaciones a cada parámetro y se integración a los factores en ArcGIS Pro para obtener el mapa de susceptibilidad. Los resultados del estudio indicaron que los factores para hallar la susceptibilidad en inundación fluvial y su orden de influencia resultó ser la precipitación (1.000), pendiente (0.633), geomorfología (0.260) y geología (0.106), donde las áreas con alta susceptibilidad coinciden con las regiones que experimentaron altos niveles de precipitación durante el año del Fenómeno del Niño 2017. Los hallazgos resaltan la relevancia de los estudios para la toma de decisiones y la gestión eficaz de riesgos de desastres en la región, sirviendo de base para el desarrollo de estrategias de prevención y mitigación por parte de las autoridades competentes.

Palabras clave: inundaciones, susceptibilidad, microcuenca, Analytic Hierarchy Process (AHP), gestión de riesgos.

Abstract

Floods are one of the most recurrent natural disasters in the South American region, causing numerous damages to properties and loss of life. Given the relevance of this phenomenon, the objective of this research was to determine the susceptibility to fluvial floods in the Cumbaza micro-watershed, located in the provinces of San Martín and Lamas, Peru. To achieve this objective, the Analytic Hierarchy Process (AHP) method was applied using ArcGIS Pro software. First, the study area was delimited using a digital elevation model (DEM) and maps of conditioning and triggering factors were prepared based on information provided by the Ministry of the Environment and SENAMHI. Using AHP, weightings were assigned to each parameter and the factors were integrated into ArcGIS Pro to obtain the susceptibility map. The results of the study indicated that the factors to find the susceptibility in fluvial flooding and their order of influence turned out to be precipitation (1.000), slope (0.633), geomorphology (0.260) and geology (0.106), where the areas with high susceptibility coincide with the regions that experienced high levels of precipitation during the year of the El Niño 2017 Phenomenon. The findings highlight the relevance of the studies for decision making and effective disaster risk management in the region, serving as a basis for the development of strategies.

Keywords: floods, susceptibility, micro-basin, Analytic Hierarchy Process (AHP), risk management.

Introducción

En los últimos años, las inundaciones se han convertido en uno de los desastres naturales más prevalentes y devastadores a nivel global. La confluencia del crecimiento poblacional, el cambio climático y el calentamiento global ha intensificado significativamente los efectos dañinos de las inundaciones, resultando pérdidas económicas y sociales. (Aydin & Sevgi, 2022).

En el Perú, la ocurrencia de inundaciones, eventos de remoción en masa, como flujos de detritos y deslizamientos de tierra, está estrechamente vinculada a la temporada de lluvias. El agravamiento de estos fenómenos durante períodos de precipitaciones intensas conduce a daños y pérdidas significativas entre la población (CENEPRED, 2014).

La Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2015), ha identificado que la microcuenca del río Cumbaza, ubicada en la región de San Martín, enfrenta desafíos críticos relacionados con inundaciones. Esta área ha experimentado recurrentes desbordamientos e inundaciones, erosiones de paisajes, sedimentación de tierras de cultivo, entre otros. Un evento histórico de inundación fue en 1990-1991, donde el rio Cumbaza ha demostrado graves consecuencias, incluyendo la destrucción de cultivos, viviendas y tierras agrícolas. Además, el desarrollo urbano continuo y la expansión en la región han agravado aún más el problema, al invadir las llanuras de inundaciones naturales, obstruir el curso del río y reducir su capacidad de descarga. Esta ocupación de áreas marginales por asentamientos ha disminuido la resiliencia natural de la microcuenca ante inundaciones.

Si bien la urgencia de abordar la susceptibilidad a inundaciones en la microcuenca Cumbaza es evidente, la falta de información completa sobre esta susceptibilidad representa un desafío significativo para los esfuerzos efectivos de prevención y mitigación de desastres. Ante la continua amenaza de eventos naturales, es imperativo desarrollar estrategias que no solo evalúen la susceptibilidad a inundaciones, sino que también proporcionen una base sólida para la toma de decisiones informadas y la planificación sostenible (CENEPRED, 2014).

El presente estudio tiene como objetivo determinar la susceptibilidad a inundaciones fluviales en la microcuenca Cumbaza utilizando el método

Analytic Hierarchy Process (AHP). Mediante la aplicación de este método estructurado, que evalúa parámetros relacionados con la ocurrencia de inundaciones, se busca identificar las zonas de susceptibilidad muy alta, alta, media y baja. Además, la integración del AHP con sistemas de información geográfica (SIG), específicamente ArcGIS, permitirá crear un mapa de susceptibilidad a inundaciones que ayude a visualizar las áreas de alto riesgo y respalde la asignación de recursos para la preparación y respuesta ante desastres.

Área de Estudio

La microcuenca Cumbaza, elegida como área de estudio, pertenece a la cuenca del río Mayo y se encuentra ubicada en la zona nororiental de la selva alta peruana. Posee una extensión de 57,120 hectáreas y 124.72 kilómetros, abarcando las provincias de San Martín y Lamas, lo que representa el 1.14% de la superficie total de la región San Martín. El río Cumbaza se origina en las montañas del cerro Escalera, a más de 1,700 metros de altitud, y tiene un recorrido de noroeste a sureste, atravesando la ciudad de Tarapoto y desembocando en la margen izquierda del río Mayo (Del Castillo Morey et al., 2016).

En su jurisdicción territorial, la microcuenca Cumbaza abarca un total de 10 distritos, 3 distritos en la provincia de Lamas y 7 distritos en la provincia de San Martín. Los distritos comprendidos son: Rumizapa, San Roque de Cumbaza, Lamas, La Banda de Shilcayo, Juan Guerra, Morales, San Antonio de Cumbaza, Tarapoto, Cacatachi y Shapaja. Sus coordenadas UTM comprenden 347,129.45 metros al Este y 9,284,334.67 metros al Norte (Figura 1).

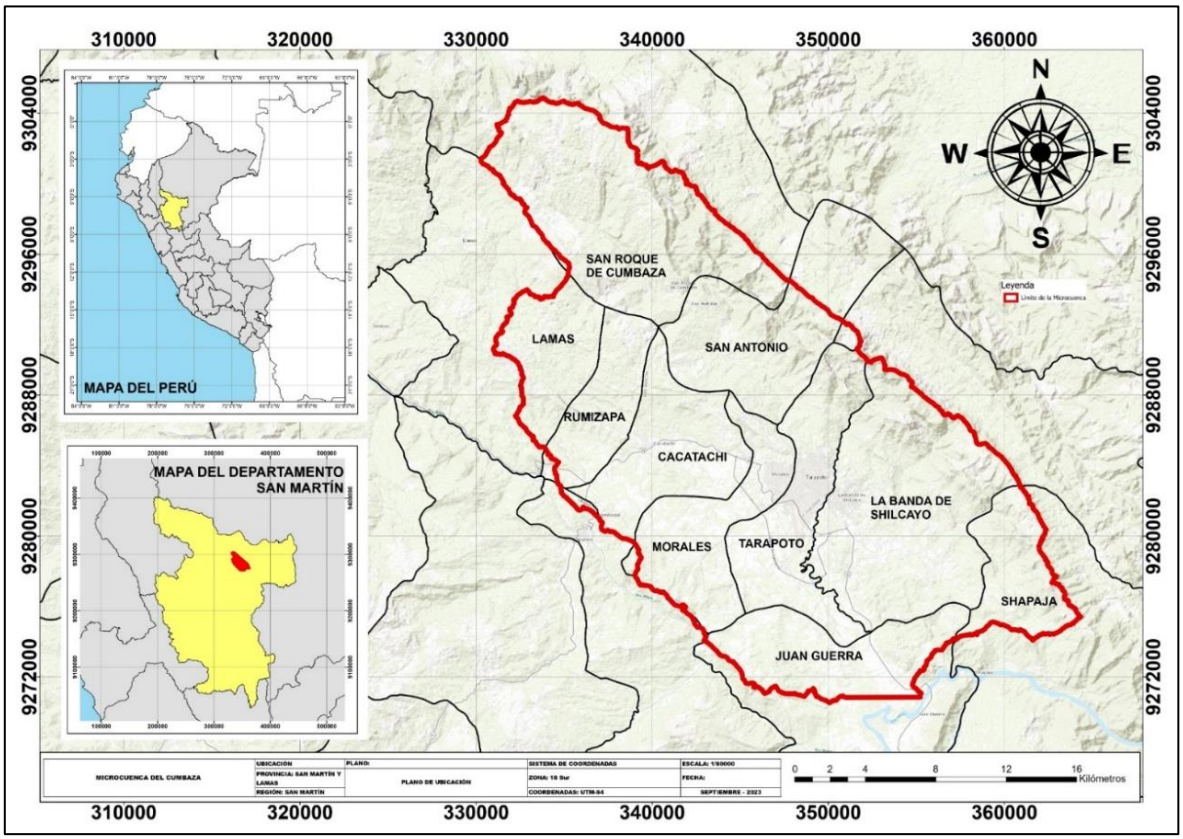


Figura 1 Plano de ubicación de la microcuenca del Cumbaza. Fuente: elaboración propia.

Materiales y métodos

El diagrama de trabajo del estudio (Figura 2) proporciona una representación visual de cómo se llevó a cabo la investigación, a fin de comprender la estructura y el proceso del estudio.

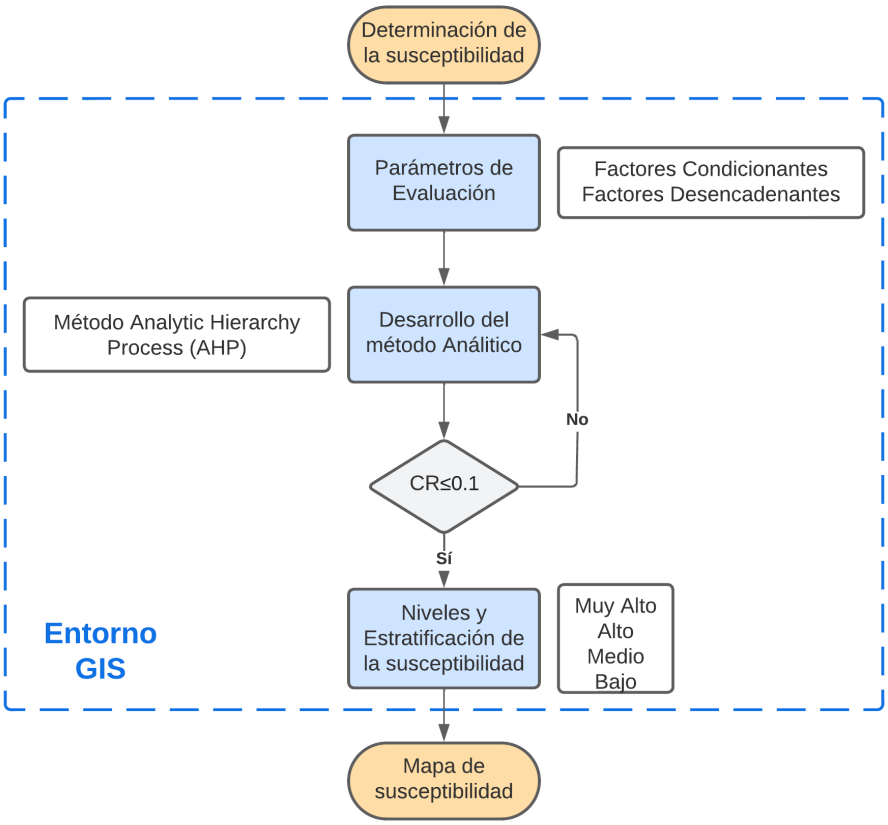


Figura 2 Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo del mapa de susceptibilidad mediante el método AHP.

Factores para hallar la susceptibilidad en inundación fluvial

En la presente investigación, se determinaron los factores de susceptibilidad a inundaciones fluviales siguiendo los criterios y directrices establecidos por el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED), una entidad del Estado peruano que proporciona y orienta información para la Gestión de Riesgos de Desastres en Perú (Tabla 1). La importancia relativa de los parámetros seleccionados se asignó en base a conocimientos empíricos y teóricos. (Vojtek & Vojteková, 2019).

Para determinar la susceptibilidad en inundación fluvial en la microcuenca del Cumbaza, se consideró los factores condicionantes y los factores desencadenantes.

Tabla 1. Factores para hallar la susceptibilidad según el tipo de peligro.

Tipo de peligro	Susceptibilidad	
	Factores condicionantes	**Factor desencadenante**
Inundación (Fluvial)	Unidades geológicas, unidades geomorfológicas y pendiente.	Precipitaciones

Para la presente investigación, los factores condicionantes son: las unidades geológicas, las unidades geomorfológicas y la pendiente. Estos factores condicionantes son elementos geofísicos que influyen en la topografía y la hidrología de la región estudiada.

Por otro lado, los factores desencadenantes hacen referencia a eventos o condiciones específicas que pueden dar lugar a las inundaciones fluviales. En el caso de este estudio, el factor desencadenante considerado es la precipitación

Método AHP

El Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) se ha vuelto popular en la evaluación de problemas de parámetros múltiples en los últimos años (Nantes, 2019). Muchos investigadores han utilizado el AHP como herramienta para analizar la evaluación de la susceptibilidad a inundaciones (Ozturk et al., 2021 & Karymbalis et al., 2021).

Escala Saaty

Para la estimación del valor de la importancia de cada uno de los indicadores, se recurre a la escala de Saaty (Tabla 2). Esta escala se aplica específicamente en las matrices de comparación de pares.

Tabla 2. Escala Saaty 1980.

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
9	Absolutamente o muchísimo más importante que ...	Al comparar un elemento con otro el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante que el segundo.
7	Mucho más importante o preferido que ...	Al comparar un elemento con otro el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante o preferido que el segundo
5	Mas importante o preferido que...	Al comparar un elemento con otro el primero se considera más importante o preferido que el segundo.
3	Ligeramente más importante o preferido que ...	Al comparar un elemento con otro, el primero es ligeramente más importante o preferido que el segundo.
1	Igual o diferente a ...	Al comparar un elemento con otro, hay indiferencia entre ellos.
1/3	Ligeramente menos importante o preferido que ...	Al comparar un elemento con otro, el primero se considera ligeramente menos importante o preferido que el segundo.
1/5	Menos importante o preferido que ...	Al comparar un elemento con otro, el primero se considera menos importante o preferido que el segundo.
1/7	Mucho menos importante o preferido que ...	Al comparar un elemento con otro, el primero se considera mucho menos importante o preferido que el segundo.

1/9	Absolutamente o muchísimo	Al comparar un elemento con otro el primero se considera absolutamente o muchísimo más importante que el segundo.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes, que se emplean cuando es necesario un término medio entre dos de las intensidades anteriores.	

Matriz de comparación de pares

En la matriz de comparación de pares, se hace uso de la escala de Saaty. Cuando se comparan dos parámetros de igual magnitud, el resultado es la unidad (1 = igual importancia) (Seejata et al., 2018). Los valores obtenidos de la escala de Saaty se introducen en las celdas de color rojo, y automáticamente se muestran los valores inversos en las celdas azules, debido a que el análisis es inverso (Tabla 3).

Tabla 3. Matriz de comparación de pares.

Parámetro	A1	A2	A3
A1	1.00	1.00	1.00
A2	1.00	1.00	1.00
A3	1.00	1.00	1.00
Suma	3.00	3.00	3.00
1/Suma	0.33	0.33	0.33

Matriz de normalización

La matriz de normalización se obtiene realizando la inversa de las sumas totales por cada elemento de su columna correspondiente. A partir de esta matriz, se determina el vector de priorización mediante el cálculo del promedio de cada fila. Es importante que la suma de los valores de la

columna sea igual a la unidad. El vector de priorización resultante indica los pesos de cada parámetro (Tabla 4).

Tabla 4. Matriz de normalización.

Parámetro	A1	A2	A3	Vector priorización
A1	0.333	0.333	0.333	0.333
A2	0.333	0.333	0.333	0.333
A3	0.333	0.333	0.333	0.333
	1.000	1.000	1.000	1.000

Matriz de relación de consistencia

Para calcular la matriz de relación de consistencia (RC) de pares, se obtiene el valor $\lambda_{MÁX}$, el cual resulta de la suma del vector de priorización y el vector suma ponderada. A partir de esto, se calcula la suma total y el promedio $\lambda_{MÁX}$ (Tabla 5).

Tabla 5. Matriz de relación de consistencia.

	Vector suma ponderado/Vector priorización
	3.000
	3.000
	3.000
Suma	9.000
Promedio	3.000

Índice de consistencia (IC)

En la ecuación 1, el "n" representa el número de criterios, y el promedio se calcula a partir de la matriz de relación de consistencia (RC).

$$IC = \frac{Promedio - n}{n-1} 10 \qquad (1)$$

Donde:

Promedio: Valor obtenido en la matriz de relación de consistencia (RC).

n: Número de criterios.

Índice aleatorio (IA)

Los valores del índice aleatorio (IA) para los diferentes valores de "n" se obtienen mediante la simulación de 100,000 matrices (Tabla 6).

Tabla 6. Valores del índice aleatorio (CENEPRED, 2014).

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
IA	0.525	0.885	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.570	1.583	1.595

Relación de consistencia (RC)

Para la validación de la presente investigación, la relación de consistencia (RC) debe ser menor a 0.10 para que sea considerado aceptable, coherente y confiable (Ecuación 2). Cuando la relación de consistencia (RC) es mayor a 0.10, se considera que hay una inconsistencia significativa en las comparaciones de las matrices, lo que podría afectar la validez y la calidad de los resultados del proceso de AHP. En tales casos, se debe revisar y ajustar la matriz de comparación de pares para mejorar la consistencia. El valor de 0.10 es parte inherente del proceso AHP y no puede ser cambiado, ya que es la fuente que indica la veracidad de los resultados (Saaty, 1977).

Mantener la relación de consistencia por debajo de 0.10 garantiza que las preferencias del tomador de decisiones se reflejen de manera coherente en el proceso, lo que resulta en conclusiones más confiables

para la toma de decisiones (Malsawmtluanga & Vabeihmo, 2022).

$$RC = \frac{IC}{IA} < 0.10 \qquad (2)$$

Donde:

IC: Índice de Consistencia

IA: Índice Aleatorio

Por lo tanto, se concluye la aplicación del método AHP en la presente investigación. Se realizó el mismo proceso de análisis para cada una de las matrices correspondientes a los factores de evaluación. En total, se llevaron a cabo cinco (5) métodos AHP, que corresponden a:

1. Método AHP - Factores condicionantes (3 descriptores: geología, pendiente y geomorfología)
2. Método AHP - Geología (5 descriptores)
3. Método AHP - Pendiente (5 descriptores)
4. Método AHP - Geomorfología (5 descriptores)
5. Método AHP - Precipitación (5 descriptores)

De esta manera, se completó el método AHP para determinar la susceptibilidad a inundaciones en la microcuenca Cumbaza.

Arcgis Pro

Para la obtención de la delimitación de la microcuenca del Cumbaza, se generó un modelo de elevación digital (DEM) mediante el uso de ASF Alaska. Posteriormente, se delimitó la microcuenca del Cumbaza utilizando el software ArcGIS Pro (Figura 3).

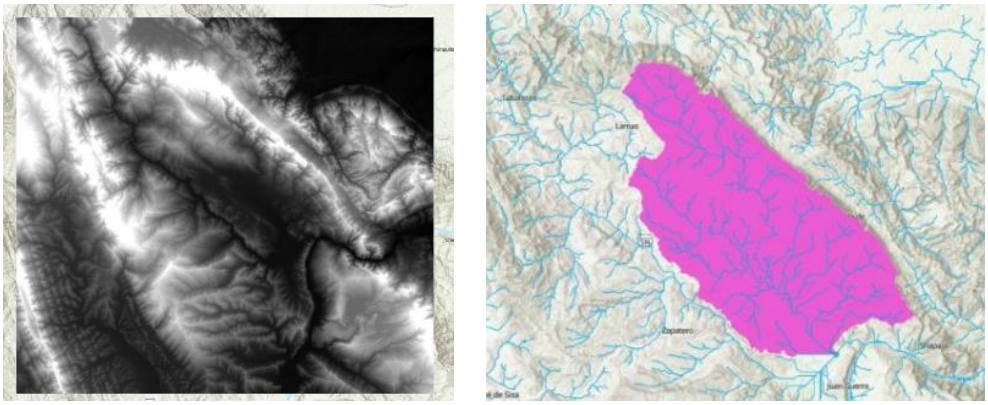


Figura 3 Modelamiento de elevación digital (DEM) y su delimitación de la microcuenca del Cumbaza.

Para la elaboración de los mapas de geología y geomorfología, se obtuvo la base de datos a través del geoservidor del Ministerio del Ambiente. Estos datos, en formato Shapefile, abarcaban todo el departamento de San Martín (Figura 4 y 5) y fueron sometidos a un proceso de análisis en ArcGIS Pro para ajustarlos a los límites de la microcuenca del Cumbaza.



Figura 4 Mapa de geología del departamento de San Martín.



Figura 5 Mapa de geomorfología del departamento de San Martín.

Para crear el mapa de pendiente, se importó el DEM en ArcGIS Pro y se realizó un proceso de reclasificación (Figura 6). Las áreas se agruparon en cinco rangos de pendiente: Muy Baja (0-5%), Baja (5-15%), Moderada (15-25%), Alta (25-45%) y Muy Alta (>45%). La clasificación de estos rangos se basó en el mapa de riesgo geológico de Unidades de Pendiente para la región de San Martín (INGEMMET).



Figura 6 Reclasificación de los rangos de pendiente.

Para elaborar el mapa de precipitación, se recopiló data hidrológica de 11 estaciones PISCO - SENAMHI más cercanas al área de estudio. Los registros de precipitación máxima anual en milímetros (mm) abarcaron

desde 1986 hasta 2021. Utilizando ArcGIS Pro, se georreferenciaron las estaciones y se generaron las isoyetas basadas en los valores del año 2017 (Figura 7), año en el que se presentó el Fenómeno del Niño con un impacto significativo en la región.

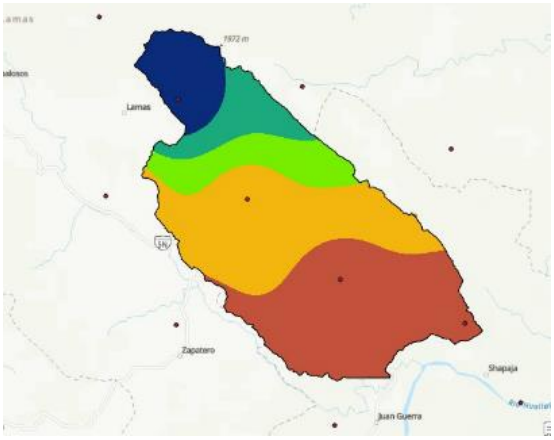


Figura 7 Mapa de Isoyetas y sus 11 estaciones hidrológica mas cercanas al área de estudio.

Finalmente, para elaborar el mapa de susceptibilidad, se integraron los pesos de los descriptores de Geología, Pendiente y Geomorfología, obtenidos de la matriz Saaty, en el software ArcGIS Pro. Posteriormente, se interceptaron todos los factores condicionantes y desencadenantes bajo el nombre "Susceptibilidad". Luego, se asignaron los rangos de susceptibilidad (Tabla 7) según lo propuesto por Tayyab et al., (2021) y se clasificaron las áreas con sus respectivos colores, obteniendo así el mapa final de susceptibilidad a inundaciones.

Tabla 7. Niveles de rangos de la susceptibilidad.

Nivel de Susceptibilidad	Rango
Susceptibilidad Muy Alto	$0.259 \leq P \leq 0.446$
Susceptibilidad Alto	$0.163 \leq P \leq 0.259$
Susceptibilidad Medio	$0.110 \leq P \leq 0.163$
Susceptibilidad Bajo	$0.082 \leq P \leq 0.110$

Resultados y discusiones

En la Figura 8, el mapa de geología muestra que dentro de los límites de la microcuenca Cumbaza existen 8 descriptores geológicos, de acuerdo a la información del geoservidor del Ministerio del Ambiente. Estos descriptores geológicos son: cuerpos de agua, depósitos aluviales subrecientes, formación Chambira, formación Chonta, formación Sarayaquillo, formación Vivian, grupo Oriente y formación Yahuarango. Según el Instituto de investigaciones de la Amazonía peruana (2006), estos descriptores pertenecen al Grupo Cretácico Superior, bosques aluviales, grupos rocosos y el Grupo Paleógeno-Neógeno, los cuales son comunes en el departamento de San Martín.

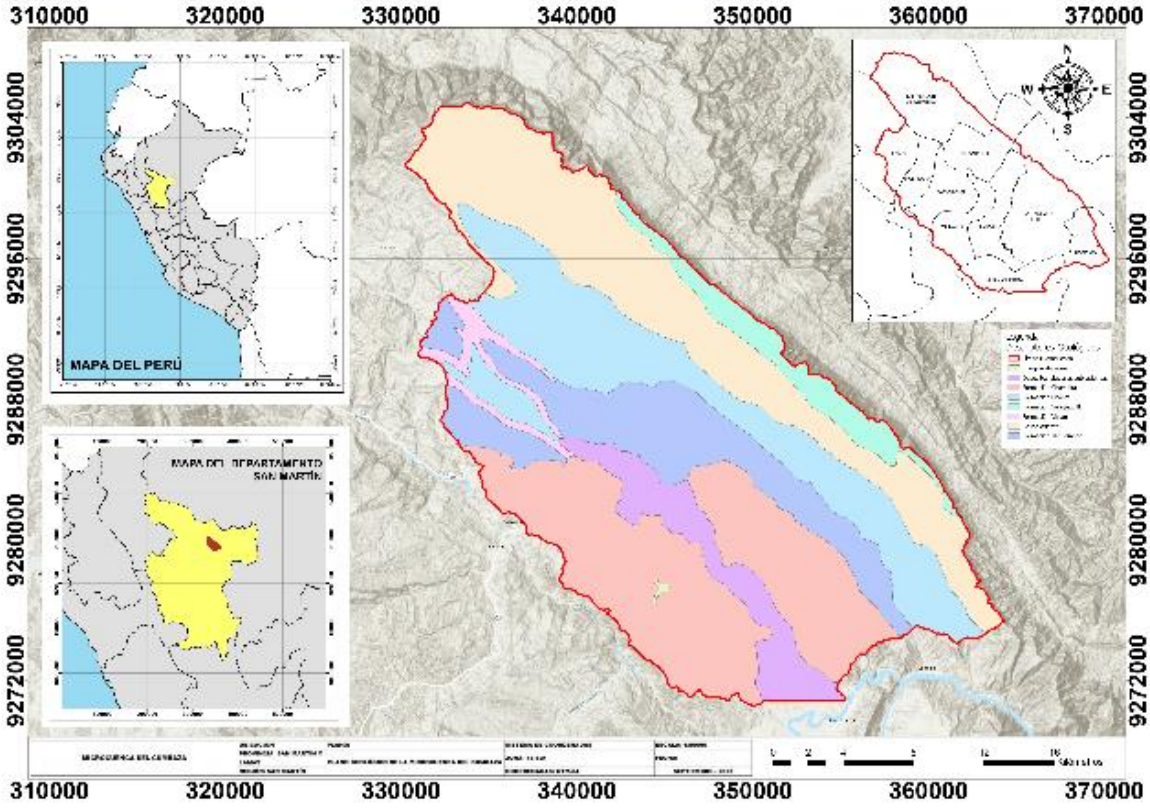


Figura 8 Mapa del factor condicionante: geología.

Como se observa en la Figura 9, el mapa de pendiente indica que los distritos de San Roque de Cumbaza, San Antonio, Tarapoto, La Banda de Shilcano y Shapaja presentan pendientes Altas (25-45%) y Muy Altas

(>45%). Por otro lado, en los distritos de Lamas y Rumizapa predominan las pendientes Moderadas (15-25%). Mientras que en los distritos de Cacatachi, Morales, en un sector de Tarapoto y Juan Guerra, se observan pendientes Muy Bajas (0-5%), Bajas (5-15%) y Moderadas (15-25%). Estos rangos de pendiente se asemejan a la clasificación presentada en el informe "Formas de Tierra y Clases de pendiente del Departamento de San Martín" del Ministerio de Agricultura (1999).

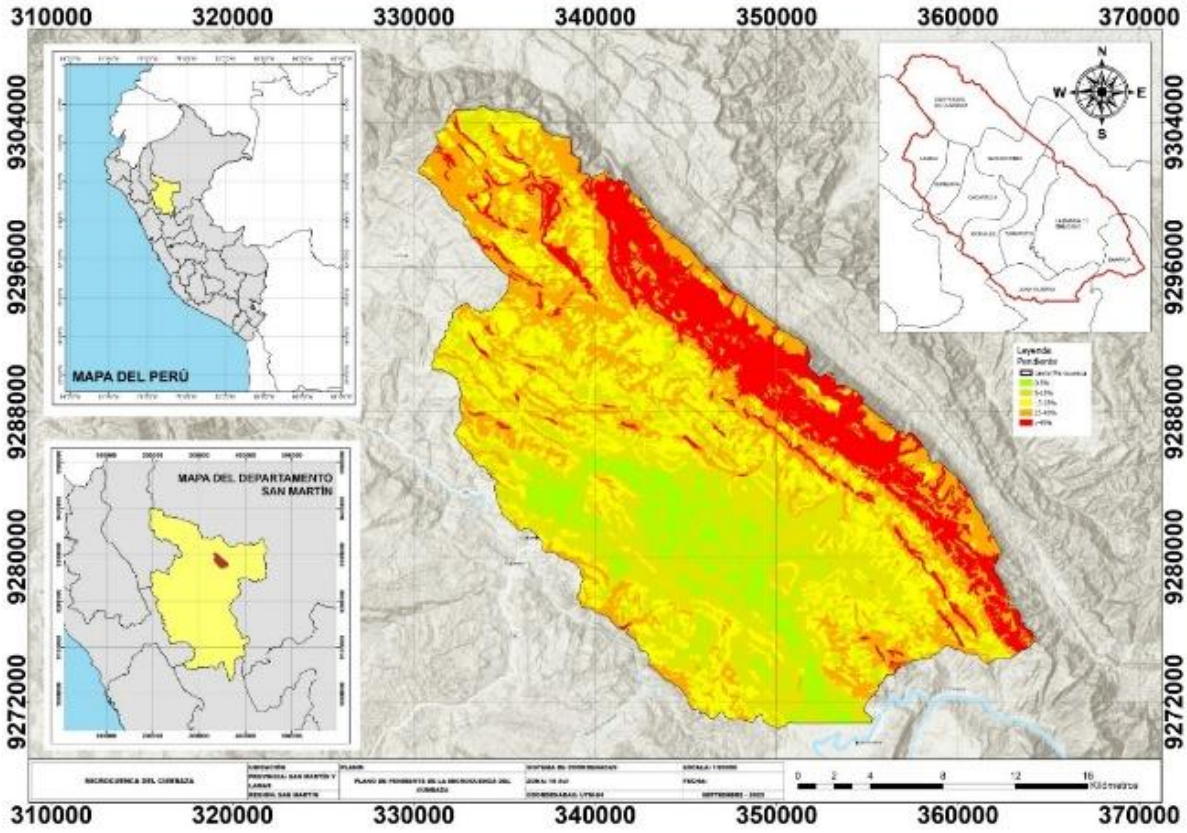


Figura 9 Mapa del factor condicionante: pendiente.

En la Figura 10, el mapa de geomorfología muestra que la microcuenca Cumbaza posee 7 descriptores geomorfológicos: colinas altas estructurales denudacionales, complejo estructural multiplegado, montañas, montañas en chevron, planicie aluviofluvial y valle de sedimentación fluvioaluvial. Estos descriptores pertenecen a la unidad morfoestructural de la Cordillera Andina y constituyen el ambiente geomorfológico de Relieve montañoso y Colinoso (Castro, 2007).

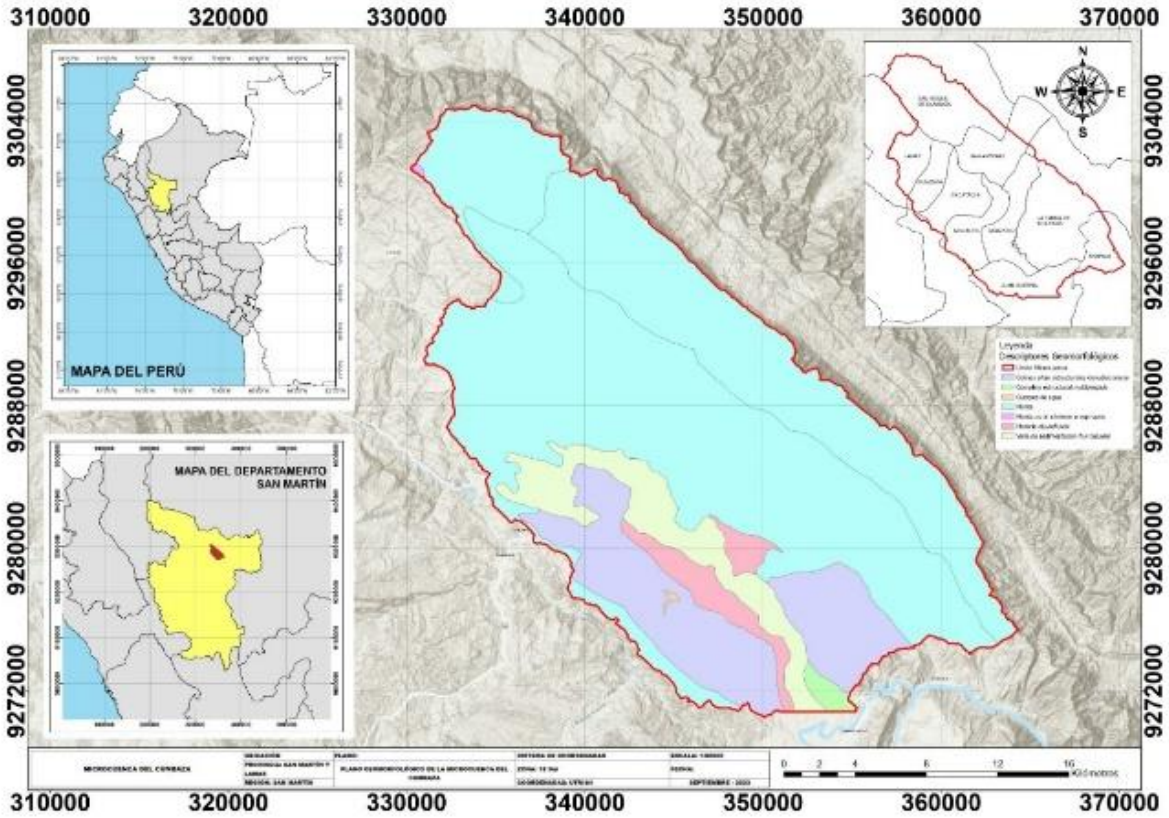


Figura 10 Mapa del factor condicionante: geomorfología.

En el mapa de isoyetas de precipitación (Figura 11) se observa que dentro de los límites de la microcuenca Cumbaza existen 5 rangos de precipitación, los cuales fueron clasificados por el software ArcGIS Pro: 47-63 mm, 63-78 mm, 78-97 mm, 97-121 mm y 121-146 mm. El distrito de San Roque de Cumbaza presenta la mayor precipitación, entre 121-146 mm. Por otro lado, los distritos de San Antonio, Lamas, Rumizapa, Cacatachi, Morales, Tarapoto, La Banda de Shilcano y una parte de San Roque de Cumbaza registran precipitaciones anuales entre 63-78 mm, 78-97 mm, 97-121 mm y 121-146 mm. Mientras que los distritos de Shapaja y Juan Guerra presentan precipitaciones entre 63-78 mm.

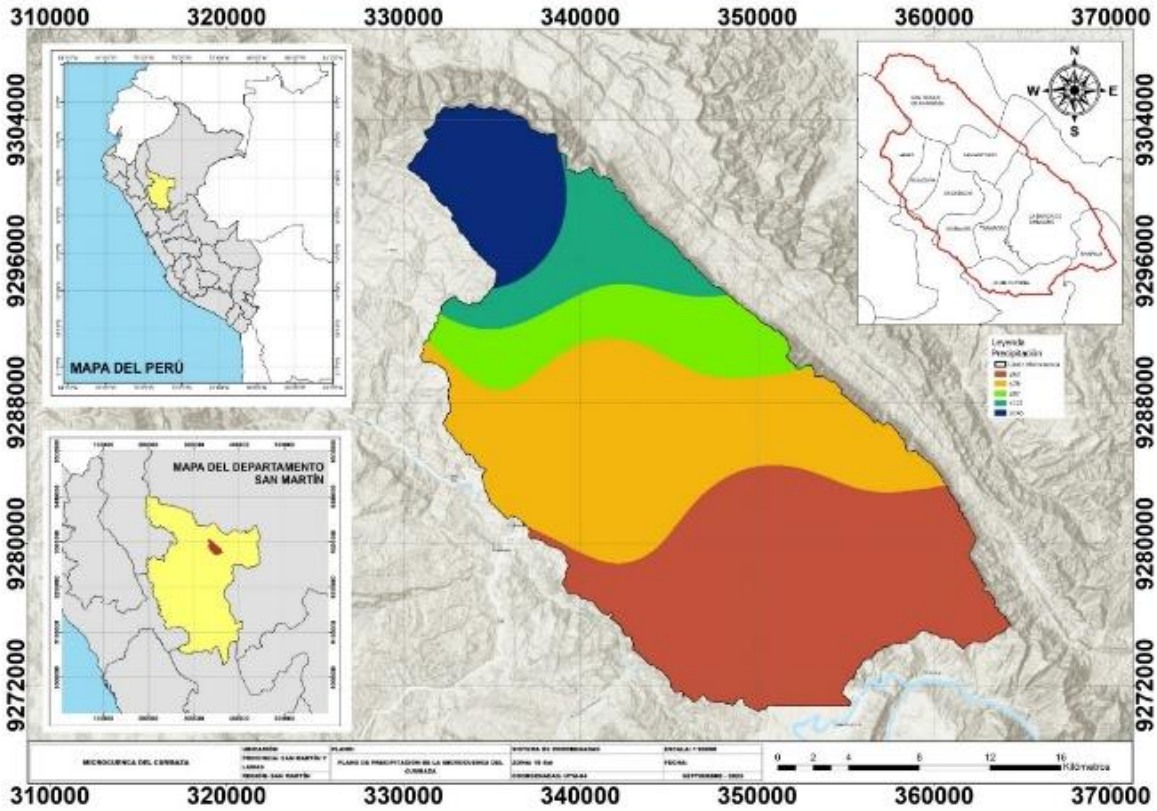


Figura 11. Mapa isoyeta del factor desencadenante: precipitación.

Con los resultados obtenidos para cada parámetro (factor condicionante y factor desencadenante), se determinaron los pesos de cada descriptor. De acuerdo al grado de importancia, se agruparon en 5 descriptores por cada parámetro, tal como se observa en la Tabla 8, con el fin de mantener una relación de consistencia (RC) aceptable en la matriz de Saaty (Malsawmtluanga & Vabeihmo, 2022).

Tabla 8. Descriptores de cada parámetro de evaluación con sus pesos.

Parámetro	Descriptores	Peso
Pendiente	Muy baja (0-5°)	0.496
	Baja (5-15°)	0.258
	Moderada (15-25°)	0.138
	Alta (25-45°)	0.072
	Muy alta (>45°)	0.036

Geomorfología	Colinas altas estructurales denudacionales	0.490
	Planicie aluviofluvial	0.259
	Valle de sedimentación fluvioaluvial	0.140
	Montañas en chevron o espinazos	0.073
	Cuerpos de agua	0.038
Geología	Formación Chonta	0.483
	Grupo Oriente	0.261
	Formación Chambira	0.141
	Depósitos aluviales subrecientes	0.074
	Cuerpos de agua	0.040
Precipitación	47-63 mm/día	0.416
	63-78 mm/día	0.262
	78-97 mm/día	0.161
	97-121 mm/día	0.099
	121-146 mm/día	0.062

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante el método AHP, se observó que, en el factor desencadenante, el peso de la precipitación fue de 1.000, en los factores condicionantes, la pendiente obtuvo un peso de 0.633, la geomorfología un peso de 0.260, y la geología un peso de 0.106 (Tabla 9). Esto significa que el orden de influencia de los parámetros resultó ser: precipitación, pendiente, geomorfología y geología, respectivamente.

Tabla 9. Valores finales de pesos

Factor	Parámetro	Peso
Desencadenante	Precipitación	1.000
Condicionante	Pendiente	0.633
	Geomorfología	0.260
	Geología	0.106

De acuerdo con Seenirajan et al., (2017), se integraron todos los mapas de los factores condicionantes y desencadenantes en el software ArcGIS Pro para obtener como resultado el mapa de susceptibilidad a inundaciones de la microcuenca Cumbaza, tal como se observa en la Figura 12.

El mapa generado muestra que las áreas con alta susceptibilidad se alinean con las regiones que experimentaron mayores niveles de precipitación durante el año del Fenómeno del Niño. Esto se traduce en una mayor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos de tierra, inundaciones y otros eventos naturales en estas zonas. Por otro lado, las áreas con susceptibilidad media suelen encontrarse en zonas más altas, como las montañas, lo que sugiere una menor exposición a estos eventos.

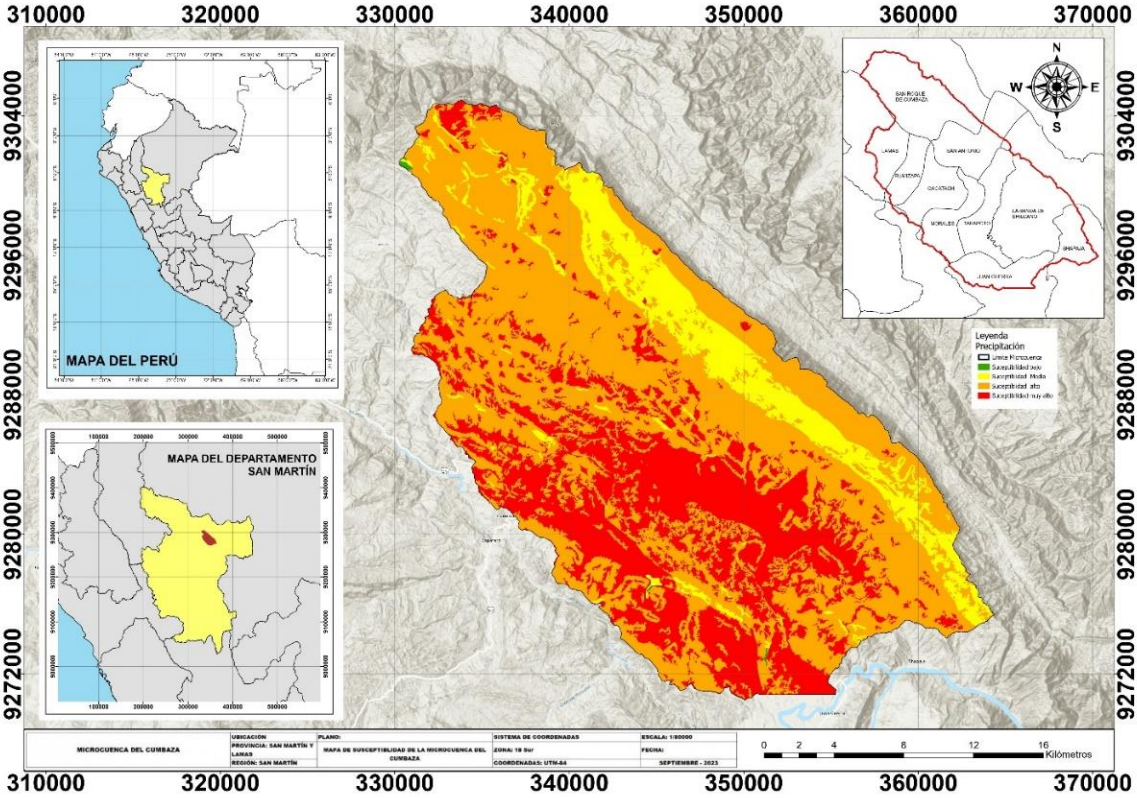


Figura 12. Mapa de susceptibilidad de la microcuenca Cumbaza.
Fuente: elaboración propia.

Este mapa de susceptibilidad a inundaciones de la microcuenca Cumbaza es un valioso insumo para la planificación y toma de decisiones en la gestión de riesgos de desastres en la región de San Martín. Ayuda a identificar las áreas con mayor probabilidad de ser afectadas por eventos naturales como inundaciones, deslizamientos de tierra y otros, facilitando así la implementación de medidas preventivas y de mitigación apropiadas.

Además, el análisis de la información del año 2017, que presenta una relación con el Fenómeno del Niño, destaca la importancia de prepararse

adecuadamente para eventos climáticos extremos y sus potenciales impactos en la región. Este tipo de herramientas cartográficas son fundamentales para fortalecer la resiliencia de las comunidades y mejorar la gestión integral de riesgos de desastres.

Conclusiones

El presente estudio se centró en la evaluación de la susceptibilidad a inundaciones en la microcuenca del Cumbaza, ubicada en la región de San Martín, Perú. Esta área ha experimentado inundaciones recurrentes, causando daños significativos en los terrenos, pérdida de vidas y degradación del entorno, debido al crecimiento urbano desordenado y al cambio climático.

Para evaluar la susceptibilidad a inundaciones, se utilizó el método del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), el cual permite asignar pesos a diferentes factores condicionantes y desencadenantes relacionados con las inundaciones, como la geología, la geomorfología, la pendiente y la precipitación. Los resultados del estudio indican que la precipitación es el factor desencadenante más influyente, seguido de la pendiente, la geomorfología y la geología.

El orden de influencia de los parámetros resultó ser: precipitación (1.000), pendiente (0.633), geomorfología (0.260) y geología (0.106).

Mediante la integración del AHP con sistemas de información geográfica (SIG), específicamente ArcGIS Pro, se generaron mapas de susceptibilidad a inundaciones que resaltan las áreas de alto riesgo y proporcionan información valiosa para la toma de decisiones en la gestión de riesgos de desastres.

El mapa de susceptibilidad resultante muestra que las áreas con alta susceptibilidad coinciden con las regiones que experimentaron altos niveles de precipitación durante el año del Fenómeno del Niño 2017, siendo más propensas a deslizamientos de tierra, inundaciones y otros eventos naturales. Por otro lado, las áreas con susceptibilidad media se ubican en zonas más elevadas, lo que sugiere una menor exposición a estos eventos.

En resumen, este estudio contribuye a identificar las zonas de susceptibilidad muy alta, alta, media y baja a inundaciones en la microcuenca Cumbaza, proporcionando una base para la planificación de medidas preventivas y de mitigación. Esto permite que las autoridades y comunidades locales de la provincia de San Martín y Lamas estén informadas para proteger vidas y evitar pérdidas económicas en las zonas vulnerables. Además, se destaca la importancia de la preparación para eventos climáticos extremos, como el Fenómeno del Niño, en la región.

Agradecimientos

Se agradece de forma especial a nuestro asesor el Ing. Ferrer Canaza de la Universidad Peruana Unión por su enseñanza en la metodología de investigación y el Ing. Junior Calvo Montañez de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por su orientación en el proceso de los resultados.

Referencias

ANA. (2015). *Tratamiento del cauce del río Cumbaza para el control de inun daciones*.

Aydin, M. C., & Sevgi, B. E. (2022). Flood risk analysis using gis-based analytical hierarchy process: a case study of Bitlis Province. *Applied Water Science*, *12*(6), 1–10. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01655-x

Castro, W. (2007). *ESTUDIOS TEMÁTICOS PARA ZONIFICACIÓN ECOLÓGICA Y ECONÓMICA DEL DEPARTAMENTO DE SAN MARTÍN*.

CENEPRED. (2014). Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales. *Cenepred*, 1–245. http://www.sigpad.gov.co/sigpad/paginas_detalle.aspx?idp=112

Del Castillo Morey, M., Nunta Guimaraes, R., & Carlos Gómez, G. M. C. (2016). Plan de adaptación al cambio climático en la microcuenca del Cumbaza. In *USAID* (Issue Marzo).

Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana. (2006). Estrategia

Regional de la Diversidad Biológica de San Martín. *Biodamaz Perú*, 119. https://www.cbd.int/doc/nbsap/sbsap/pe-sbsap-san-martín-es.pdf

Karymbalis, E., Andreou, M., Batzakis, D. V., Tsanakas, K., & Karalis, S. (2021). Integration of gis-based multicriteria decision analysis and analytic hierarchy process for flood-hazard assessment in the megalo rema river catchment (East Attica, Greece). *Sustainability (Switzerland)*, *13*(18). https://doi.org/10.3390/su131810232

Malsawmtluanga, & Vabeihmo, C. (2022). Assessment of Flood Hazard Zonation Using Geographic Information System and Analytical Hierarchy Process: A Case Study of Tlawng River Watershed in Sairang, Mizoram, India. *Nature Environment and Pollution Technology*, *21*(1), 101–109. https://doi.org/10.46488/NEPT.2022.v21i01.011

Ministerio de Agricultura. (1999). *Formas de tierra y clases de pendiente del Departamento de San Martin*.

Nantes, E. (2019). El método Analytic Hierarchy Process para la toma de decisiones. Repaso de la Metodología y Aplicaciones. *Revista de La Escuela de Perfeccionamiento En Investigación Operativa*, *27*(46), 54–73.

Ozturk, D., Yilmaz, I., & Kirbas, U. (2021). Flood hazard assessment using AHP in Corum, Turkey. *Tecnologia y Ciencias Del Agua*, *12*(2), 1–26. https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2021-02-08

Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, *15*(3), 234–281. https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5

Seejata, K., Yodying, A., Wongthadam, T., Mahavik, N., & Tantanee, S. (2018). Assessment of flood hazard areas using Analytical Hierarchy Process over the Lower Yom Basin, Sukhothai Province. *Procedia Engineering*, *212*, 340–347. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.01.044

Seenirajan, M., Natarajan, M., Thangaraj, R., & Bagyaraj, M. (2017). Study and Analysis of Chennai Flood 2015 Using GIS and Multicriteria Technique. *Journal of Geographic Information System*, *09*(02), 126–140. https://doi.org/10.4236/jgis.2017.92009

Tayyab, M., Zhang, J., Hussain, M., Ullah, S., Liu, X., Khan, S. N., Baig, M. A., Hassan, W., & Al-Shaibah, B. (2021). Gis-based urban flood resilience assessment using urban flood resilience model: A case study of peshawar city, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Remote Sensing*, *13*(0), 1–32. https://doi.org/10.3390/rs13101864

Vojtek, M., & Vojteková, J. (2019). Flood susceptibility mapping on a national scale in Slovakia using the analytical hierarchy process. *Water (Switzerland)*, *11*(2). https://doi.org/10.3390/w11020364