

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica – Geotecnia

INTEGRACIÓN DE MODELO FUZZY-AHP-TOPSIS PARA  
EVALUAR EL POTENCIAL DE AGUA SUBTERRÁNEA  
EN LA CUENCA DEL RÍO LOCUMBA, TACNA

TESIS

Presentada por:

Bach. Arleth Cristina Mendoza Chura

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO – GEOTÉCNICO

TACNA – PERÚ

2024

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**


Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica - Geotecnia

“INTEGRACIÓN DE MODELO FUZZY-AHP-TOPSIS PARA EVALUAR EL  
POTENCIAL DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CUENCA DEL RÍO  
LOCUMBA, TÁCNA”

Tesis sustentada y aprobada el día 23 de agosto de 2024 estando integrado  
el Jurado Calificador por:

**PRESIDENTE**

:   
MSc. Ing. Conrado Gabino Bedoya Jaén

**SECRETARIO**

:   
Mgr. Ing. Fredy Cleto Cabrera Olivera

**VOCAL**

:   
Mgr. Ing. Gloria Marina Choque Machaca

**ASESOR DE TESIS**

:   
Ph.D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas

## CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **Ph.D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas**, en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N° 342-2024-FIAG/UNJBG de la tesis denominada: **“INTEGRACIÓN DE MODELO FUZZY-AHP-TOPSIS PARA EVALUAR EL POTENCIAL DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CUENCA DEL RÍO LOCUMBA, TACNA”**, presentado por la Bachiller Arleth Cristina Mendoza Chura, para optar el título profesional de Ingeniero Geólogo - Geotécnico, habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software Antiplagio **TURNITIN** cuenta con el nivel de similitud cuyo porcentaje es 8%, por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis, la cual está de acuerdo al nivel **PERMITIDO**, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio Institucional.

Se emite el presente certificado con fines de continuar con los trámites respectivos para su obtención del título profesional.



Firma de Asesor de Tesis

Ph.D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas  
DNI N°: 00486621



Tesista

Bach. Arleth Cristina Mendoza Chura  
DNI N°: 73973006

## **AGRADECIMIENTOS**

Doy gracias a Dios por darme salud y vida; además, por permitir que siga mi camino apasionado a la geología y aportar mis conocimientos y experiencias en la carrera profesional.

Agradezco a mis padres por su apoyo constante en mi formación como persona y profesional, deseándome siempre los mejores deseos y siendo mi mejor motivación para cumplir mis metas.

Doy gracias a todos los docentes de mi Escuela Profesional Ingeniería Geológica-Geotecnia, por su apoyo y confianza que me brindaron tanto a nivel personal como también en mi formación profesional.

Agradecimiento al proyecto de investigación *Disponibilidad hídrica y estado de conservación de los ecosistemas dependientes de agua en la cuenca alta del río Locumba*, financiado con fondos de canon, sobrecanon y regalías mineras, VIIN, UNJBG.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a toda mi familia. A mi padre Wilber, gracias por enseñarme a ser perseverante y por impulsarme a crecer profesionalmente. A mi madre Naldy, por su incondicional apoyo y confianza, que han sido fundamentales en mi camino. A mi hermana Gianella, gracias por estar siempre a mi lado. También quiero agradecer a mi pareja Lenny, quien ha sido mi apoyo constante y fuente de motivación durante este proceso.

## CONTENIDO

Portada .....	i
Hoja de Jurados.....	ii
Certificado de Similitud .....	iii
Agradecimientos .....	iv
Dedicatoria.....	v
Contenido.....	vi
Contenido de Figuras .....	xi
Contenido de Tablas.....	xii
Contenido de Anexos .....	xiv
Resumen .....	xv
Abstract.....	xvi
Introducción.....	1
Capítulo I: Planteamiento del Problema .....	3
1.1. Descripción del Problema.....	3
1.2. Formulación del Problema .....	4
1.3. Justificación de la Investigación.....	5
1.4. Objetivos .....	5
1.4.1. Objetivo General .....	5
1.4.2. Objetivos Específicos .....	5
Capítulo II: Marco Teórico .....	6
2.1. Antecedentes del Problema .....	6
2.1.1. Internacional.....	6
2.1.2. Nacional .....	7
2.2. Bases Teóricas.....	8
2.2.1. Recursos Hídricos.....	8
2.2.1.1. Ciclo Hidrológico .....	8
2.2.2. Aguas Subterráneas .....	10
2.2.2.1. Tipos de Acuíferos .....	10

2.2.2.2. Manantiales y Fuentes .....	11
2.2.3. Aguas Superficiales .....	11
2.2.4. Precipitación.....	12
2.2.5. Permeabilidad.....	13
2.2.6. Índice de Potencia de la Corriente (SPI).....	13
2.2.7. Pendiente.....	14
2.2.8. Índice de Rugosidad Topográfica (TRI).....	15
2.2.9. Uso del Suelo y Cobertura del Suelo (LUCL).....	15
2.2.10. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....	16
2.2.11. Litología.....	17
2.2.12. Geomorfología.....	17
2.2.13. Tipos de Suelo.....	18
2.2.14. Toma de Decisiones Multi-criterio.....	18
2.2.14.1. Métodos Multi-criterio.....	19
2.2.15. Proceso de Jerarquía Analítica Difusa (Fuzzy AHP).....	20
2.2.15.1. Procedimiento Fuzzy AHP.....	22
2.2.16. Técnica para la Ordenación de Preferencias por Similitud a la Solución Ideal (TOPSIS).....	25
2.2.16.1. Procedimiento TOPSIS.....	26
2.3. Definición de Términos.....	29
Capítulo III: Marco Metodológico.....	30
3.1. Hipótesis.....	30
3.1.1. Hipótesis General.....	30
3.1.2. Hipótesis Específicas.....	30
3.2. Operacionalización de Variables.....	31
3.3. Tipo de Investigación.....	32
3.3.1. Tipo.....	32
3.3.2. Nivel.....	32
3.4. Diseño de Investigación.....	32

3.5.	Población y Muestra de Estudio .....	32
3.5.1.	Población.....	32
3.5.2.	Muestra.....	33
3.6.	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos .....	33
3.7.	Análisis de Datos.....	34
3.7.1.	Etapa 1: Recopilación de Datos .....	34
3.7.2.	Etapa 2: Aplicación del Método Fuzzy AHP - TOPSIS .....	35
3.7.3.	Etapa 3: Resultados .....	36
3.7.4.	Etapa 4: Validación e Interpretación.....	36
Capítulo IV:	Caracterización del Área de Estudio.....	37
4.1.	Ubicación .....	37
4.2.	Accesibilidad.....	38
4.3.	Hidrología .....	38
4.4.	Geología.....	39
4.4.1.	Formaciones Geológicas .....	40
4.4.1.1.	Formación Chocolate (Ji-cho) .....	40
4.4.1.2.	Formación Labra (Js-la) .....	40
4.4.1.3.	Formación Hualhuani (Ki-hu) .....	40
4.4.1.4.	Formación Matalaque (Ki-ma) .....	41
4.4.1.5.	Formación Huarancane.....	41
4.4.1.6.	Formación Paralaque .....	42
4.4.1.7.	Formación Quellaveco.....	42
4.4.1.8.	Formación Sotillo (P-so) .....	42
4.4.1.9.	Formación Tarata Superior (P-ta_s).....	43
4.4.1.10.	Formación Huilacollo (Nm-hl) .....	43
4.4.1.11.	Formación Moquegua (PN-mo_i – PN-mo_s).....	44
4.4.1.12.	Formación Huaylillas (Nm-hu).....	44
4.4.1.13.	Formación Capillune (N-ca) .....	44
4.4.1.14.	Formación Sencca .....	45

4.4.1.15. Formación Millo.....	45
4.4.2.    Depósitos Cuaternarios.....	45
4.4.2.1. Depósitos Aluviales (Qh-al) .....	46
4.4.17.2. Depósitos Biogénicos (Q-bi) .....	46
4.4.17.3. Depósitos Eólicos (Q-eo).....	46
4.4.17.4. Depósitos Glaciares (Q-gl) .....	46
4.4.17.5. Depósitos Fluviales (Q-fl) .....	46
4.4.17.6. Depósitos Proluviales (Q-pl) .....	47
4.4.17.7. Depósitos Químico – Sinter (Q-qm-s) .....	47
4.4.17.8. Depósitos Residuales (Q-re).....	47
4.4.17.9. Depósitos Volcánicos – Piroclásticos (Qp-vl-pi) .....	47
4.5.    Geomorfología .....	48
4.5.1.    Unidades Geomorfológicas .....	48
4.6.    Tipos de suelo .....	51
Capítulo V:    Aplicación Del Modelo Fuzzy AHP-TOPSIS .....	54
5.1.    Criterios que Influyen en la Recarga del Acuífero.....	54
5.2.    Método Fuzzy AHP.....	61
5.2.1.    Ponderación de Grupos.....	63
5.2.2.    Criterios Ponderados del Grupo Acuífero.....	65
5.2.3.    Criterios Ponderados del Grupo Topografía .....	67
5.2.4.    Criterios Ponderados del Grupo Superficie .....	69
5.2.5.    Análisis.....	71
5.3.    Método TOPSIS .....	74
5.3.1.    Definición de Criterios y Alternativas .....	74
5.3.2.    Matriz de Decisión y Normalización .....	75
5.3.3.    Matriz Normalizada Ponderada .....	78
5.3.4.    Coeficiente de Cercanía.....	79
5.3.5.    Análisis.....	81
Capítulo VI:    Resultados.....	83

6.1.	Resultados de la Hipótesis Específica 1 .....	83
6.2.	Resultados de la Hipótesis Específica 2 .....	83
6.3.	Resultados de la Hipótesis Específica 3 .....	84
6.4.	Resultados de la Hipótesis General .....	84
6.5.	Validación de Resultados .....	86
	Conclusiones .....	88
	Recomendaciones .....	89
	Referencias .....	90
	Anexos .....	100

## CONTENIDO DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ciclo Hidrológico .....	9
<b>Figura 2.</b> Agua subterránea y superficial.....	9
<b>Figura 3.</b> Modelo para la toma de decisión .....	19
<b>Figura 4.</b> Un número difuso triangular .....	22
<b>Figura 5.</b> Diagrama de metodología del modelo Fuzzy AHP - TOPSIS.....	36
<b>Figura 6.</b> Mapa de ubicación de la cuenca del río Locumba.....	37
<b>Figura 7.</b> Mapa de geología de la cuenca del río Locumba .....	39
<b>Figura 8.</b> Malla de muestreo de la cuenca del río locumba.....	74
<b>Figura 9.</b> Resultados de coeficiente de cercanía en el software ArcGIS.....	81
<b>Figura 10.</b> Herramienta Reclassify en el software ArcGIS.....	82
<b>Figura 11.</b> Mapa de potencial de agua subterránea.....	85
<b>Figura 12.</b> Mapa de zonas de potencial de agua subterránea y pozos existentes .....	87

## CONTENIDO DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Recarga hídrica según tipo de pendiente y relieve.....	14
<b>Tabla 2.</b> Definición lingüística y escala triangular difusa.....	21
<b>Tabla 3.</b> Valor de RI para diferentes tamaños de matriz.....	24
<b>Tabla 4.</b> Operacionalización de variables.....	31
<b>Tabla 5.</b> Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	34
<b>Tabla 6.</b> Fuente de criterios utilizados en la cuenca del río Locumba .....	35
<b>Tabla 7.</b> Distribución mensual de la precipitación.....	55
<b>Tabla 8.</b> Precipitación anual de las estaciones .....	56
<b>Tabla 9.</b> Valores de clasificación de NDVI.....	60
<b>Tabla 10.</b> Matriz de comparación por pares .....	61
<b>Tabla 11.</b> Matriz de comparación por pares del grupo acuífero.....	62
<b>Tabla 12.</b> Matriz de comparación por pares del grupo topografía .....	62
<b>Tabla 13.</b> Matriz de comparación por pares del grupo superficie .....	63
<b>Tabla 14.</b> Promedio de los tomadores de decisiones .....	63
<b>Tabla 15.</b> Matriz de decisión, matriz normalizada y ponderada .....	64
<b>Tabla 16.</b> Relación de consistencia (CR).....	64
<b>Tabla 17.</b> Cálculo de pesos ponderados mediante Fuzzy AHP.....	65
<b>Tabla 18.</b> Promedio de los tomadores de decisiones de acuífero.....	65
<b>Tabla 19.</b> Matriz de decisión, matriz normalizada y ponderada de acuífero .....	66
<b>Tabla 20.</b> Cálculo de relación de consistencia (CR) de acuífero.....	66
<b>Tabla 21.</b> Cálculo de pesos ponderados mediante Fuzzy AHP de acuífero .....	67
<b>Tabla 22.</b> Promedio de los tomadores de decisiones de topografía.....	67
<b>Tabla 23.</b> Matriz de decisión, matriz normalizada y ponderada de topografía.....	68
<b>Tabla 24.</b> Cálculo de relación de consistencia (CR) de topografía .....	68
<b>Tabla 25.</b> Cálculo de pesos ponderados mediante Fuzzy AHP de topografía.....	69
<b>Tabla 26.</b> Promedio de los tomadores de decisiones de superficie .....	69
<b>Tabla 27.</b> Matriz de decisión, matriz normalizada y ponderada de superficie .....	70
<b>Tabla 28.</b> Cálculo de relación de consistencia (CR) de superficie .....	70
<b>Tabla 29.</b> Cálculo de pesos ponderados mediante Fuzzy AHP de superficie.....	71

<b>Tabla 30.</b> Peso de los criterios de decisión y su respectivo ranking .....	72
<b>Tabla 31.</b> Matriz de decisión .....	75
<b>Tabla 32.</b> Suma de cuadrados.....	76
<b>Tabla 33.</b> Normalización de la matriz de decisión.....	77
<b>Tabla 34.</b> Matriz normalizada ponderada .....	78
<b>Tabla 35.</b> Soluciones ideales positivas y negativas .....	79
<b>Tabla 36.</b> Distancias euclidianas y coeficiente de cercanía .....	80
<b>Tabla 37.</b> Clasificación de las zonas de la cuenca del río Locumba .....	82

## CONTENIDO DE ANEXOS

<b>Anexo I.</b> Matriz de consistencia.....	101
<b>Anexo II.</b> Mapa de ubicación de la cuenca del río Locumba .....	102
<b>Anexo III.</b> Mapa de subcuencas de la cuenca del río Locumba .....	103
<b>Anexo IV.</b> Mapa de hidrogeología de la cuenca del río Locumba .....	104
<b>Anexo V.</b> Mapa de geología en la cuenca del río Locumba .....	105
<b>Anexo VI.</b> Mapa de permeabilidad en la cuenca del río Locumba.....	106
<b>Anexo VII.</b> Mapa de isoyetas en la cuenca del río Locumba.....	107
<b>Anexo VIII.</b> Mapa de índice de potencia de corriente en la cuenca del río Locumba....	108
<b>Anexo IX.</b> Mapa de pendiente en la cuenca del río Locumba.....	109
<b>Anexo X.</b> Mapa de geomorfología en la cuenca del río Locumba .....	110
<b>Anexo XI.</b> Mapa de índice de rugosidad topográfica en la cuenca del río Locumba .....	111
<b>Anexo XII.</b> Mapa de uso del suelo y cobertura del suelo en la cuenca del río Locumba	112
<b>Anexo XIII.</b> Mapa de índice de vegetación de diferencia normalizada en la cuenca del río Locumba .....	113
<b>Anexo XIV.</b> Mapa de tipo de suelo en la cuenca del río Locumba .....	114
<b>Anexo XV.</b> Pozos existentes registrados en la base de datos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) .....	115
<b>Anexo XVI.</b> Mapa de zonas de potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba .....	118
<b>Anexo XVII.</b> Mapa de validación de zonificación de potencial en la cuenca del río Locumba .....	119

## **RESUMEN**

La presente investigación tuvo como objetivo determinar las zonas de potencial de agua subterránea mediante la integración del modelo Fuzzy AHP-TOPSIS, en la cuenca del río Locumba, Tacna. Se desarrolló una metodología híbrida que permitió identificar y determinar las zonas de recarga hídrica, considerando múltiples criterios geológicos e hidrológicos.

El modelo Fuzzy AHP-TOPSIS combina dos métodos clave: el proceso de jerarquía analítica difusa (Fuzzy AHP) y la técnica para la ordenación de preferencias por similitud a la solución ideal (TOPSIS). El Fuzzy AHP se determinó mediante matrices de comparación por pares, relación de consistencia y extensión sintética difusa, lo que permitió asignar pesos específicos a cada criterio de influencia. Posteriormente, el método TOPSIS incluyó la normalización de matriz de decisión, matriz normalizada ponderada utilizando los pesos obtenidos del método Fuzzy AHP y el cálculo de las soluciones ideales a través de distancias euclidianas. Este procedimiento se aplicó para identificar las áreas con mayor potencial de recarga hídrica.

La investigación permitió zonificar el potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba en cinco categorías: 13 % para zonas muy favorables, 28 % para zonas favorables, 15 % para zonas moderadas, 28 % para zonas bajas y 16 % para zonas muy bajas. Las zonas con mayor porcentaje se identifican como las más adecuadas para la recarga hídrica. Este resultado proporcionó una información significativa para la planificación y gestión sostenible de los recursos hídricos.

Palabras clave: Fuzzy AHP, TOPSIS, recarga hídrica, agua subterránea, cuenca Locumba.

## **ABSTRACT**

The objective of this research is to determine the areas of groundwater potential by integrating the Fuzzy AHP-TOPSIS model, in the Locumba River basin, Tacna. A hybrid methodology is developed to identify and determine water recharge zones, considering multiple geological and hydrological criteria.

The Fuzzy AHP-TOPSIS model combines two key methods: the Fuzzy Analytical Hierarchy Process (Fuzzy AHP) and the Technique for Ordering Preferences by Similarity to the Ideal Solution (TOPSIS). The Fuzzy AHP was determined using pairwise comparison matrices, consistency ratio, and fuzzy synthetic extension, which allowed specific weights to be assigned to each influence criterion. Subsequently, the TOPSIS method included the normalization of the decision matrix, a weighted normalized matrix using the weights obtained from the Fuzzy AHP method and the calculation of ideal solutions through Euclidean distances. This procedure was applied to identify the areas with the greatest recharge potential. water.

The research made it possible to zone the groundwater potential in the Locumba River basin into five categories, 13% for very favorable zones, 28% for favorable zones, 15% for moderate zones, 28% for low zones and 16% for very low zones. . The areas with the highest percentage are identified as the most suitable for water recharge; this result provides significant information for the planning and sustainable management of water resources.

Keywords: Fuzzy AHP, TOPSIS, water recharge, groundwater, Locumba basin.

## **INTRODUCCIÓN**

La gestión y planificación de los recursos hídricos es un desafío crítico en regiones áridas y semiáridas como la cuenca del río Locumba en Tacna. La necesidad de identificar y evaluar el potencial de agua subterránea se ha vuelto imperativa para asegurar un suministro sostenible de este recurso vital. En este contexto, la presente investigación propone la integración de los modelos Fuzzy AHP y TOPSIS para evaluar y zonificar el potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba.

En el capítulo I, se describe la problemática proporcionando una descripción detallada, formulando las preguntas del problema, objetivos y justificación de la investigación.

En el capítulo II, se presentan los antecedentes del problema, marco teórico que sustenta la investigación. Se describen los criterios utilizados, el concepto de toma de decisiones multicriterio y se explican en detalle los métodos Fuzzy AHP y TOPSIS, además de la definición de términos clave relacionados con el estudio.

En el capítulo III, se describe el marco metodológico de la investigación, en el cual se plantean las hipótesis, se operacionalizan las variables y se definen el tipo y diseño de investigación. También se detalla la población y muestra, las técnicas e instrumentos utilizados para la recolección de datos y el análisis de datos.

En el capítulo IV, se presenta la caracterización del área de estudio, abarcando su ubicación política y geográfica, hidrología, geología, geomorfología y tipos de suelos. Se detalla el comportamiento hídrico, las formaciones geológicas, las formas del relieve y la composición de los suelos.

En el capítulo V, se centra en la aplicación del modelo Fuzzy AHP-TOPSIS. Aquí se detalla el proceso de preparación de los criterios. Se explica la implementación del método Fuzzy AHP-TOPSIS, destacando cómo se integran ambos enfoques para evaluar el potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba.

En el capítulo V, se presentan los resultados de las hipótesis específicas y la hipótesis general. Este capítulo ofrece un análisis detallado de los hallazgos de la investigación.

Finalmente, se ofrecen las conclusiones y recomendaciones, donde se resumen los principales hallazgos, se discuten sus implicaciones para la gestión de los recursos hídricos y se brindan las sugerencias para futuras investigaciones y políticas públicas en la región.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

El uso indebido de los recursos hídricos es una problemática mundial que ha incrementado la escasez de agua, afectando el desarrollo sostenible. Aproximadamente, 2,1 mil millones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de manera segura. Los recursos hídricos superficiales y subterráneos son esenciales para proveer agua potable a comunidades urbanas y rurales, así como para sostener diversas actividades humanas y ecosistemas naturales (UNESCO, 2019). Las técnicas satelitales y el uso de sensores remotos están revolucionando la forma en que se gestionan los recursos hídricos a nivel global, proporcionando datos precisos y en tiempo real para una mejor toma de decisiones (Sheffield et al., 2018).

El Perú es un país conocido por su rica biodiversidad y abundancia de recursos naturales, la escasez de agua se ha intensificado debido a la gestión ineficaz de los recursos hídricos. Este problema es particularmente preocupante en regiones áridas y semiáridas, donde la disponibilidad de agua es limitada. El Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) reporta que aproximadamente el 25 % de la población peruana no tiene acceso al agua potable, lo que afecta su calidad de vida y desarrollo económico (INEI, 2020). La identificación de zonas con potencial de aguas subterráneas es crucial para mejorar la gestión de los recursos hídricos y garantizar un suministro adecuado a todas las comunidades (Foster, et al, 2002).

La cuenca del río Locumba enfrenta desafíos significativos debido a la falta de precipitaciones y a la sobreexplotación de recursos hídricos, reduciendo la disponibilidad de agua tanto superficial como subterránea. Esta problemática genera conflictos en la zona, especialmente

en relación con el uso del agua para actividades mineras, agricultura y ganadería, que dependen fuertemente de este recurso. Estudios locales indican que la calidad del agua también se ha visto comprometida afectando la salud de la población y los ecosistemas locales (ANA, 2021).

La investigación tuvo como finalidad aplicar el modelo de análisis multicriterio “Proceso de Jerarquía Analítica Difusa” (Fuzzy AHP) y “Técnica para la Ordenación de Preferencias por Similitud a la Solución Ideal” (TOPSIS). Este modelo permitió evaluar de manera sistemática los recursos hídricos subterráneos, considerando múltiples criterios y su importancia relativa en el proceso de recarga de agua subterránea (Gómez et al., 2022). Sin embargo, es esencial abordar las limitaciones en la implementación de estos modelos, como la complejidad del proceso y la calidad de los datos de entrada, para garantizar resultados de zonificación efectivos y precisos.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### ***1.2.1. Problema General***

- ¿Cómo evaluar el potencial de agua subterránea, mediante la integración del modelo Fuzzy AHP-TOPSIS, en la cuenca del río Locumba, Tacna?

### ***1.2.2. Problemas Específicos***

- ¿Cuál es el algoritmo de modelo Fuzzy AHP-TOPSIS que permite identificar el potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba?
- ¿Qué criterios influyen de manera significativa en la recarga de agua subterránea en la cuenca del río Locumba?
- ¿Cómo zonificar el potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba?

### **1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

Desde el punto de vista social, determina el potencial de agua subterránea y permite la solución de problemas de escasez de recursos hídricos. La implementación de un modelo jerárquico ayudó a suplir las necesidades hídricas que afecta a la población.

Desde el punto de vista ambiental, contribuye a la gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos en la cuenca del río Locumba, promoviendo así la conservación del entorno natural.

Desde el punto de vista científico, esta investigación aporta nuevos conocimientos y herramientas metodológicas para el análisis de los recursos hídricos subterráneo en las cuencas que se encuentran en el sur y norte del Perú.

### **1.4. OBJETIVOS**

#### ***1.4.1. Objetivo General***

- Determinar las zonas de potencial de agua subterránea mediante la integración del modelo Fuzzy AHP-TOPSIS, en la cuenca del río Locumba, Tacna.

#### ***1.4.2. Objetivos Específicos***

- Aplicar el algoritmo de modelo Fuzzy AHP-TOPSIS permite identificar el potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba.
- Identificar los criterios influyentes en la recarga de agua subterránea en la cuenca del río Locumba.
- Zonificar el potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

##### 2.1.1. Internacional

Athsha y Venkateswaran (2012) realizaron un estudio titulado ***MAPEO DE ZONAS POTENCIALES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LA SUBCUENCA KUZHITHURAIYAR DEL RÍO KODAYAR, DISTRITO DE KANNIYAKUMARI, TAMILNADU: UTILIZANDO EL PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA (AHP) Y SIG***. Este estudio tuvo como objetivo identificar las zonas con potencial de aguas subterráneas en la subcuenca Kuzhithuraiyar del río Kodayar en Tamilnadu, India. Se creó diferentes capas temáticas como lluvia, geología, geomorfología, densidad de drenaje, suelo, pendiente, lineamientos y cobertura del suelo (LUCL), mediante herramientas, como la interpolación, líneas de contorno y clasificación en ArcGIS 10.8. El peso del tema y el rango de clase se asignaron a diferentes capas temáticas en un análisis de superposición ponderada. El resultado se validó en campo y se generó un mapa de potencial de aguas subterráneas, clasificando la zona en cuatro categorías: muy alto, alto, medio y bajo. La parte noreste de la cuenca presentó un bajo potencial, mientras que la zona sur mostró un alto potencial, cubriendo aproximadamente 388,37 km<sup>2</sup>.

Coy (2015) realizó el estudio titulado ***IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA EN LAS SUBCUENCAS DE RÍO TZUNUTZ***, cuyo objetivo principal fue determinar las regiones más propensas a la recarga hídrica en la subcuenca del río Tzunutz, utilizando un modelo metodológico que combina el análisis multivariable de factores como pendientes, tipo de suelo, cobertura vegetal, uso del suelo, estructuras geológicas, depresiones kársticas, corrientes superficiales y precipitación local. Con el uso de sistemas de

información, geográfica se realizó una estimación cuantitativa del potencial de recarga en el área de la subcuenca. Mediante técnicas de análisis de mapas y el uso de imágenes ráster de cada variable, se obtuvo un mapa en el que se identifican las áreas potenciales de recarga. Los resultados muestran una categoría para cada potencial de recarga, las categorías encontradas son: muy bajo (11,54 %), bajo (23,85 %), moderado (28,96 %), alto (23,02 %), muy alto (12,62 %).

### **2.1.2. Nacional**

Alarcón (2018) realizó el estudio titulado ***APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN PASIVA PARA LA DETERMINACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA REGIÓN ICA DURANTE EL PERIODO 2017 AL 2018***. Se enfocó en la técnica de teledetección pasiva para estimar y monitorear los recursos de agua subterránea en la región de Ica, Perú, utilizando sensores remotos que detectan la radiación electromagnética natural. Se encontró que aproximadamente el 30 % de la región de Ica presenta alto potencial de agua subterránea. Se identificó una relación inversa entre la temperatura y la presencia de agua subterránea, observando que las áreas con temperaturas más bajas albergan mayores porcentajes de este recurso. El índice de agua diferenciado normalizado (NDWI) mostró que valores cercanos a la unidad (+1) indican una mayor presencia de agua subterránea, mientras que áreas con mayor pendiente presentan una menor probabilidad de contener agua subterránea.

Cusquisiban (2019) realizó el estudio titulado ***UBICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA USANDO IMÁGENES LANDSAT 8 MEDIANTE EL MÉTODO DE ÁRBOL DE DECISIONES EN LA CUENCA DEL RÍO CHAMÁN, CAJAMARCA Y LA LIBERTAD-PERÚ***, teniendo como objetivo principal ubicar las zonas de recarga hídrica usando imágenes LANDSAT 8 mediante el método de árbol de decisiones en una población de estudio de 1.569

km<sup>2</sup> correspondiente a la cuenca Chamán. La investigación fue diseñada como no experimental, transversal, causal y se basó en técnicas espectrales para distinguir entre diferentes tipos de materiales, apoyándose en instrumentos de recolección de datos como el satélite Áster. Los resultados mostraron que los 1021 pozos de agua subterránea registrados por INGEMMET (2015), 805 representan la clase recarga hídrica favorable, lo que indica una precisión de 78,8 % en la identificación de zonas de recarga hídrica subterránea.

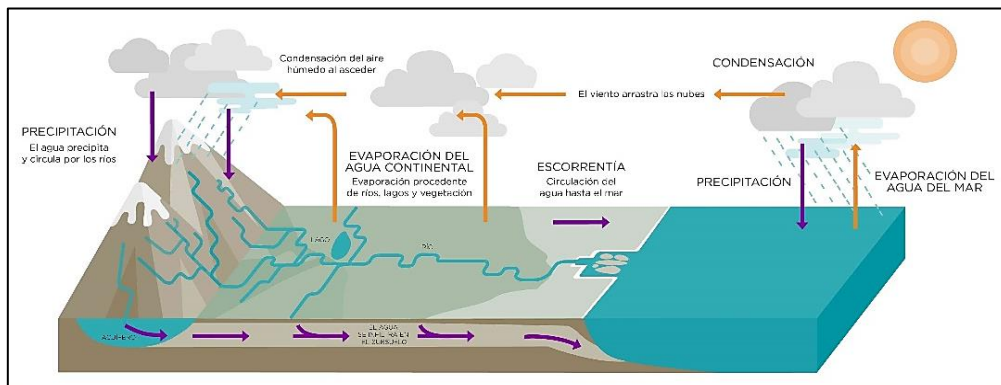
## **2.2. BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1. Recursos Hídricos**

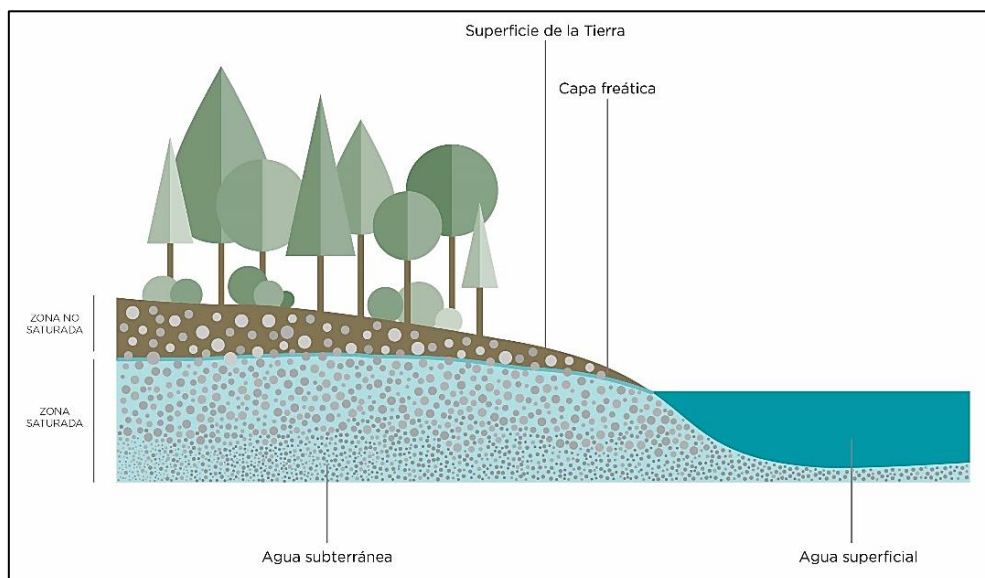
La disponibilidad de agua en un área determinada, ya sea en la superficie o subterránea, que se utiliza para diferentes propósitos como el consumo humano, la agricultura, la industria y el medio ambiente. La gestión sostenible de los recursos hídricos implica satisfacer una demanda continua y cada vez mayor, compensando la variabilidad natural y mejorando tanto la calidad como aumentando la cantidad del agua disponible (Martínez, 2006). Para preservar los procesos de mantenimiento de los recursos naturales, es imperativo alinear la sostenibilidad con parámetros ecológicos. Esta alineación crea un “puente entre la ciencia y la sociedad” (Odum et al., 1998).

#### **2.2.1.1. Ciclo Hidrológico**

El ciclo hidrológico, es un proceso continuo del agua (figura 1), en sus diferentes estados en el planeta como en su forma subterránea y superficial (figura 2), su proceso de transporte recirculatorio es indefinido y permanente. Se debe fundamentalmente a dos causas: la energía del sol para la evaporación y la gravedad terrestre para la precipitación y escurrimiento (Chereque, 1989).

**Figura 1***Ciclo Hidrológico*

*Nota.* La figura representa el proceso del ciclo hidrológico. Tomado por *Story Map Journal*, 2024.

**Figura 2***Agua subterránea y superficial*

*Nota.* La figura representa el agua subterránea y superficial. Tomado por *Story Map Journal*, 2024.

### 2.2.2. Aguas Subterráneas

El agua subterránea se encuentra bajo la superficie terrestre, derivada directa o indirectamente de las lluvias (Chávez, 1994), fluye a través de los materiales porosos saturados del subsuelo hacia niveles más bajos que los de infiltración y puede volver a surgir naturalmente como manantiales y o filtraciones a cursos de agua. También puede ser recolectada mediante perforaciones, túneles o galerías de drenaje (Ordoñez, 2011). Forma parte del ciclo hidrológico y su aprovechamiento requiere comprender su movimiento en el subsuelo.

De esta manera, el agua subterránea esta almacenadas en acuíferos, ubicados a diferentes niveles de profundidad, hasta sistemas confinados que están a varios kilómetros por debajo de la superficie (Arocha, 2009). Se pueden encontrar aguas subterráneas en casi cualquier parte, trátase de zonas húmedas, áridas o semiáridas. El agua del subsuelo es un recurso importante, pero de difícil gestión, por su sensibilidad a la contaminación y a la sobreexplotación.

#### 2.2.2.1. Tipos de Acuíferos

Un acuífero es una formación geológica que almacena y transmite el agua en cantidades significativas, de modo que pueda extraerse mediante obras de captación. Los acuíferos se clasifican en lo siguiente:

- **Acuíferos Libres.** Son aquellos en los que el nivel de agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. Liberan agua por desaturación, es decir, el agua que ceden es la procedente del drenaje de sus poros.
- **Acuíferos Confinados.** Son aquellos cubiertos por una capa impermeable confinante. El nivel de agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo de la formación acuífera. El agua que ceden procede de la expansión del agua y de la descompresión de la estructura

permeable vertical, cuando se produce la depresión en el acuífero. También se les denomina acuíferos cautivos.

- ***Acuíferos Semiconfinados.*** Se pueden considerar un caso particular de los acuíferos cautivos, en los que muro, techo o ambos no son totalmente impermeables, sino que permiten una circulación vertical del agua.

#### **2.2.2.2. Manantiales y Fuentes**

El afloramiento natural de agua subterránea a la superficie terrestre se produce cuando la presencia de estratos impermeables impide el flujo subterráneo y bloquea la circulación descendente. En algunas situaciones geológicas, como la presencia de fracturas, el agua que fluye a lo largo de una pendiente puede formar pequeñas lagunas o "cochas", que son áreas de recarga de agua subterránea (Rivera, 2011).

Los manantiales son fuentes de agua subterránea que afloran a la superficie con un contenido mínimo o nulo de sedimentos en suspensión, garantizando una calidad determinada del agua para el consumo humano (García, 2011). La mayoría de los sistemas de abastecimiento de agua potable en poblaciones rurales se basan en manantiales. Sin embargo, la falta de registros hidrológicos nos obliga a realizar una investigación concienzuda de las fuentes, determinar si responden a las demandas y recolectar información sobre el rendimiento en temporadas críticas (meses de estiaje y lluvias) (Aguero, 1997).

#### **2.2.3. Aguas Superficiales**

El agua superficial se refiere al agua que se encuentra en la superficie terrestre, formando cuerpos de agua como ríos, lagos, arroyos y océanos. Este tipo de agua es una parte visible y accesible del ciclo hidrológico (León, 2016), a diferencia del agua subterránea que se encuentra

en acuíferos bajo la superficie del suelo. El agua superficial es generada a partir de precipitaciones, escorrentías, deshielo y descarga de agua subterránea, su calidad puede variar según las condiciones del entorno y el uso.

Las aguas superficiales desempeñan un papel fundamental en el mantenimiento de los ecosistemas, ya que sustentan una gran diversidad de hábitats y especies acuáticas. Además, son una fuente vital para el abastecimiento de agua potable para el consumo humano, la agricultura, la generación de energía y otras actividades socioeconómicas (Montaigne, 2002).

#### ***2.2.4. Precipitación***

La precipitación es uno de los principales componentes del ciclo hidrológico y es la principal fuente de recarga de las aguas subterráneas (Shrestha et al., 2016). Existe una fuerte correlación positiva entre ambos, ya que contribuye con la recarga de acuíferos subterráneos mediante la infiltración (Trenberth et al., 2007). El agua precipitada puede manifestarse como lluvia, nieve o granizo, penetra la superficie terrestre y se desplaza a través de los poros y fisuras del suelo y la roca, contribuyendo también a la formación de cuerpos de agua superficiales como arroyos, lagos, humedales, manantiales, humedales, y valles, así como a la existencia de glaciares (León, 2016).

La medición de la precipitación mediante instrumentos de superficie, como pluviómetros, es un método directo y eficaz para obtener datos en ubicaciones específicas. No obstante, la variabilidad en la intensidad y el tipo de precipitación presenta desafíos significativos para la obtención de datos precisos en áreas extensas y complejas, como regiones montañosas y zonas de difícil acceso. Las estaciones meteorológicas terrestres tienen una cobertura limitada, lo que dificulta la representación precisa de la precipitación en grandes superficies (Huffman et al., 2007). Para superar estas limitaciones, se utilizan tecnologías de observación remota como los

satélites, que permiten una cobertura global y continua, proporcionando datos valiosos para una descripción más completa de la distribución espacial y temporal de la precipitación a escala mundial. El uso de satélites y otras técnicas de teledetección permite superar las limitaciones de los métodos terrestres y ofrece una perspectiva global crucial para la comprensión de la hidrogeología (Kidd et al., 2011).

#### **2.2.5. Permeabilidad**

La permeabilidad es la capacidad de una roca para permitir el flujo de un fluido a través poros, fracturas y espacios vacíos en un material geológico (Bear, 1972). El tamaño de los poros del suelo influye en la tasa de filtración, que es el movimiento del agua a través de un medio poroso removiendo partículas y contaminantes; y en la tasa de percolación, que es el movimiento descendente del agua a través del suelo y las rocas, contribuyendo a la recarga de acuíferos (Hillel, 1980). Materiales como arena, caliza y grava tienen alta permeabilidad y facilitan la recarga de aguas subterráneas, mientras que arcilla, pizarra y basalto, con baja permeabilidad, dificultan el movimiento del agua (Freeze et al., 1979).

#### **2.2.6. Índice de Potencia de la Corriente (SPI)**

El índice de potencia de la corriente (SPI), proporciona información sobre la potencia asociada al flujo de agua, combinando el área de contribución específica y la pendiente del terreno, la cual influye directamente sobre la velocidad del flujo (De Rosa et al., 2019). La fórmula del SPI es la siguiente (1):

$$SPI = A \times \beta \quad (1)$$

Dónde: A representa la acumulación de flujo y  $\beta$  es la pendiente.

El SPI se emplea ampliamente en estudios geomorfológicos y de gestión de recursos hídricos, con el objetivo de comprender la dinámica fluvial y los procesos erosivos de lecho, así como la capacidad de transporte de sedimentos. Estos análisis suelen utilizar índices topográficos para predecir la erosión del suelo y la hidrología del paisaje, destacando la importancia del SPI en la identificación de zonas de alta energía de flujo y erosión (Moore et al., 1991).

### **2.2.7. Pendiente**

La pendiente influye directamente con la escorrentía superficial, afectando negativamente la infiltración y recarga del agua subterránea. A medida que la pendiente se hace más pronunciada, la velocidad del flujo superficial aumenta (Tehrany et al., 2014), como se muestra en la tabla 1. En terrenos empinados, la precipitación no tiene suficiente tiempo para infiltrarse, ya que el agua se desplaza rápidamente por la inclinación durante las lluvias intensas. Esto reduce la recarga de los acuíferos, porque el agua necesita más tiempo para penetrar en el suelo y alcanzar la zona saturada (De Reu et al., 2013).

**Tabla 1**

*Recarga hídrica según tipo de pendiente y relieve*

Relieve	Pendiente (°)	Recarga Hídrica
Plano a casi plano	< 6	Muy alta
Moderadamente ondulado o cóncavo	6 – 15	Alta
Ondulado/cóncavo	15 – 45	Moderada
Escarpado	45 – 65	Baja
Fuertemente escarpado	> 65	Muy bajo

*Nota.* En la tabla se muestra la clasificación del relieve con la pendiente del terreno y la recarga hídrica, donde  $<6^\circ$  representa una recarga hídrica muy alta y  $>65^\circ$  representa una recarga hídrica muy baja, Matus et al., 2009.

### ***2.2.8. Índice de Rugosidad Topográfica (TRI)***

El Índice de Rugosidad Topográfica (TRI) es una medida utilizada para cuantificar la variabilidad en la elevación de una superficie topográfica, reflejando el grado de ondulación o irregularidad del terreno. Este índice es especialmente relevante en áreas montañosas, donde los procesos continuos de erosión y meteorización crean un relieve complejo y accidentado. Las variaciones topográficas influyen en el flujo del agua, ya que la distribución de las elevaciones y depresiones en la superficie determina cómo se dispersa el agua durante las lluvias y modifica tanto la velocidad como la dirección del escurrimiento superficial (Sorenson et al., 2018). Una mayor rugosidad puede ralentizar el flujo superficial del agua, este proceso puede dar más tiempo para que el agua se infiltre en el suelo, especialmente en áreas donde el suelo es permeable y mejorando la recarga de aguas subterráneas.

### ***2.2.9. Uso del Suelo y Cobertura del Suelo (LUCL)***

El uso del suelo y cobertura del suelo (LUCL) es una capa de información geográfica que representa la clasificación y descripción de cómo se utiliza la superficie terrestre y qué tipo de vegetación, infraestructura, o características naturales cubren el suelo. El uso del suelo se relaciona con las actividades humanas, como la agricultura, urbanización, o conservación, mientras que la cobertura del suelo describe las características físicas de la superficie, como bosques, pastizales, cuerpos de agua, o áreas construidas (Lerner et al., 2009).

El LUCL tiene una influencia directa sobre el ciclo hidrológico y, en particular, sobre la recarga de los acuíferos. En el áreas con alta cobertura vegetal, como bosques o pastizales, favorecen la infiltración del agua de lluvia en el suelo, lo que contribuye a la recarga de agua subterránea. En cambio, el uso del suelo para la agricultura intensiva o la urbanización, con superficies impermeables como pavimento y edificaciones, reduce la infiltración y aumenta la escorrentía superficial, disminuyendo la recarga de los acuíferos (Guzha et al., 2018).

#### **2.2.10. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)**

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), es una métrica utilizada para evaluar la densidad y condición de la vegetación en una zona específica. Se calcula usando la diferencia entre las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y el rojo (RED) de las imágenes satelitales, normalizada por la suma de estas bandas, como se observa en la ecuación (2).

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (2)$$

La relación entre el NDVI y la recarga hídrica es significativa, porque la vegetación desempeña un papel crucial en el ciclo hidrológico (Jiang et al., 2006). Una vegetación densa y saludable, refleja altos valores de NDVI, favorece la infiltración del agua en el suelo, reduce la escorrentía superficial y promueve la recarga de los acuíferos. Además, la cobertura vegetal ayuda a mantener la humedad del suelo y reduce la erosión, contribuyendo así a la sostenibilidad de las fuentes de agua subterránea (Pettorelli et al., 2005).

### **2.2.11. Litología**

La litología se refiere al estudio y clasificación de las rocas según sus características físicas y mineralógicas, como su composición, textura, y estructura. Este concepto es esencial en la geología y tiene un impacto significativo, ya que las propiedades físicas de las formaciones geológicas, como la porosidad y permeabilidad, determinan el movimiento del agua subterránea (Scanlon et al., 2006).

Es uno de los factores clave en la identificación de acuíferos, ya que las rocas con alta porosidad, como las areniscas, suelen ser más favorables para la recarga y almacenamiento de acuíferos (Ayazi et al., 2010). De tal forma, contribuye a la gestión sostenible de los recursos hídricos al proporcionar información sobre la disponibilidad y calidad de agua subterránea.

### **2.2.12. Geomorfología**

La geomorfología es la rama de la geología que estudia las formas de superficie terrestre y los procesos que los originan a lo largo del tiempo geológico (Avinash et al., 2011). La relación entre la geomorfología y agua subterránea es tangible y directa. Las geoformas, como valles, llanuras, colinas y montañas, controlan la dirección y velocidad del flujo superficial y subterráneo (Wheater et al., 2010).

Por otro lado, los procesos geomorfológicos, como la meteorización, erosión y sedimentación, modifican constantemente el relieve y pueden alterar las condiciones de recarga y descarga de los acuíferos. Por ejemplo, la sedimentación en valles y llanuras puede rellenar y obstruir los acuíferos, mientras que la erosión puede exponer y drenar los sistemas acuíferos (Chowdary et al., 2009).

### **2.2.13. Tipos de Suelo**

Es la clasificación de los suelos basada en sus características físicas, químicas y biológicas, como la textura, estructura, porosidad y capacidad de retención de agua. Esta clasificación es fundamental para entender cómo el suelo interactúa con el agua, especialmente en procesos de infiltración y recarga de acuíferos (Das, 2011).

Según el Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM), la variabilidad de los tipos de suelo en una región puede influir significativamente en la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos, ya que determina la velocidad y cantidad de agua que puede infiltrarse al subsuelo (MINAM, 2014).

La importancia del tipo de suelo en los estudios hidrológicos y de manejo de recursos hídricos, señalando que su comprensión es esencial para la gestión sostenible de los acuíferos y la planificación de usos del suelo que favorezcan la conservación de los recursos hídricos (Hillel, 1980).

### **2.2.14. Toma de Decisiones Multi-criterio**

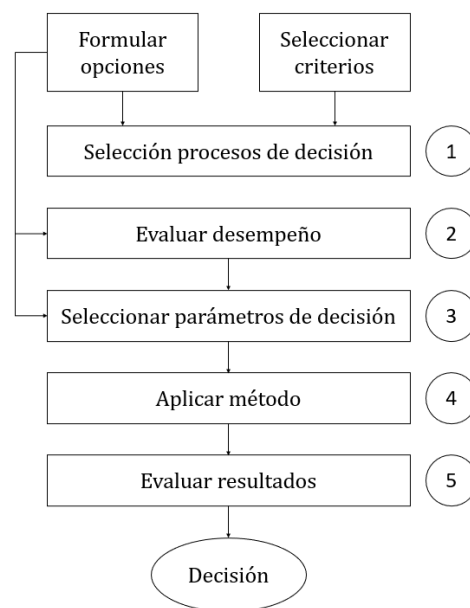
La toma de decisiones multi-criterio (MCDM) es un método racional y comprensible para resolver problemas complejos mediante la consideración de múltiples criterios simultáneamente. Este método se ha convertido en una herramienta crucial en la investigación de operaciones, utilizando algoritmos y herramientas matemáticas para facilitar la selección de la mejor alternativa entre varias opciones disponibles (Mardani et al., 2015).

Los métodos de decisión multi-criterio permiten evaluar y comparar alternativas según criterios específicos establecidos, lo que proporciona una estructura formal para el proceso de toma de decisiones (Stanujkic et al., 2014). Este proceso se clasifica en cinco etapas el proceso

de toma de decisiones, como se observa en la figura 3. Estos métodos son aplicables en una variedad de contextos, desde la gestión empresarial hasta la planificación urbana y la gestión ambiental, donde la optimización de decisiones basadas en múltiples factores es crucial para alcanzar resultados óptimos y tomar decisiones informadas (Ahmad et al., 2020).

**Figura 3**

*Modelo para la toma de decisión*



*Nota.* La figura representa el procedimiento a seguir para la toma de decisiones multi-criterio, Hernández et al., 2006.

#### 2.2.14.1. Métodos Multi-criterio

Los métodos multi-criterio para la toma de decisiones se dividen en dos ramas: toma de decisión multi-atributo (MADM), la cual considera un número limitado de alternativas para evaluación y la toma de decisión multi-objetivo (MODM) que identifican la mejor alternativa de un conjunto infinito de alternativas bajo un conjunto de constantes (Jato et al., 2014).

**a) Toma de Decisión Multi-atributo (MADM)**

Cuando el número de alternativas de decisión es finito, las alternativas se evalúan según varios criterios, y las soluciones se clasifican en categorías discretas, los principales métodos son: ponderación lineal (scoring), proceso de análisis jerárquico (AHP), utilidad multi-atributo (MAUT).

**b) Toma de Decisión Multi-objetivo (MODM)**

La función objetivo puede tomar un número infinito de valores, lo que conduce a un número infinito de alternativas posibles, las soluciones se pueden clasificar en una escala continua, algunos métodos son: planeación de recursos y optimización de procesos (Berumen et al., 2007).

**2.2.15. Proceso de Jerarquía Analítica Difusa (Fuzzy AHP)**

Es un método tradicional de toma de decisiones multi-criterio (MCDM) propuesto por Thomas L. Saaty en 1980, que permite priorizar diferentes atributos o criterios importantes en un área particular (Saaty, 1980). Los tomadores de decisiones utilizan una escala de importancia como se muestra en la Tabla 2 que emplean números difusos. Esta escala permite incorporar en un modelo jerárquico la comprensión intuitiva de problemas complejos, representando la preferencia de un criterio “i” frente a otro criterio “j” (Ahmed et al., 2019).

**Tabla 2***Definición lingüística y escala triangular difusa*

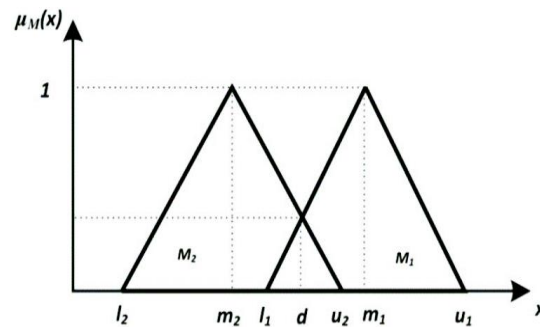
Definición lingüística	Importancia	Número triangular difuso ( $l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}$ )	Número recíproco triangular difuso ( $1/u_{ij}, 1/m_{ij}, 1/l_{ij}$ )
Igualmente, importante	1	(1,1,1)	(1,1,1)
Valor intermedio	2	(1,2,3)	(1/3,1/2,1)
Moderadamente importante	3	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)
Valor intermedio	4	(3,4,5)	(1/5,1/4,1/3)
Importante	5	(4,5,6)	(1/6,1/5,1/4)
Valor intermedio	6	(5,6,7)	(1/7,1/6,1/5)
Muy importante	7	(6,7,8)	(1/8,1/7,1/6)
Valor intermedio	8	(7,8,9)	(1/9,1/8,1/7)
Extremadamente importante	9	(9,9,9)	(1/9,1/9,1/9)

*Nota.* La tabla presenta escalas de importancia con su respectivo número difuso triangular.

Zadeh (1965) definió la teoría de conjuntos difusos para representar la vaguedad en los parámetros de la toma de decisiones. Un número difuso triangular (TFN) se define por  $M_n = (l_i, m_i, u_i)$  como se muestra en la figura 4. Cuando se quiere analizar dos números difusos triangulares, se aplica una operación aritmética como se muestra en (3) y (4). La inversa o recíproco en TFN se representa de la siguiente manera  $\overline{M}_n = (1/l_i, 1/m_i, 1/u_i)$  (Zadeh, 1965).

**Figura 4**

Un número difuso triangular



*Nota.* En la figura se muestra  $l_1, m_1, u_1$  que representa el valor para un TFN y  $l_2, m_2, u_2$  representa un segundo valor TFN.

$$M_1 \cdot M_2 = (u_1 + u_2, m_1 + m_2, l_1 + l_2) \quad (3)$$

$$M_1 \cdot M_2 = (u_{12}, m_{12}, l_{12}) \quad (4)$$

Donde:  $u_{ij}$  valor superior,  $m_{ij}$  valor medio,  $l_{ij}$  valor inferior.

### 2.2.15.1. Procedimiento Fuzzy AHP

#### Paso 1: Matriz de comparación por pares

Se construye una matriz de comparación por pares. Saaty (1980) utilizó un índice de consistencia (CI) para medir la consistencia en los veredictos de los tomadores de decisión (DM) en la matriz de comparación. De manera similar, para AHP difuso, según Kwong et al. (2003), se puede estimar el CI. Primero, se debe realizar un promedio de los TFN a números nítidos utilizando (5) y conducirán a una matriz de comparación A (6).

$$M_C = \frac{l_i + 4m_i + u_i}{6} \text{ para un TFN (M)} \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde: A es la matriz de comparación nítida, i el criterio 1 y j el criterio 2.

### Paso 2: Cálculo de relación de consistencia

El vector de prioridad o vector propio principal normalizado  $W_i$ , que muestra pesos relativos normalizados para los criterios, se puede derivar de A utilizando (7). Es el valor promedio de fila de una matriz normalizada de columna generada a partir de A. A partir de entonces, la matriz  $X_i$ , que muestra los criterios de suma ponderada, se puede obtener utilizando (8).

$$W_i = \frac{\sum_{i=1}^n (a_{ij})}{n} \quad (7)$$

$$X_i = A \times W_i \quad (8)$$

Se calcula el promedio de la matriz de consistencia  $\lambda_{\max}$  se puede calcular a partir de (9) (Saaty, 2003). Ahora, el índice de consistencia (CI) y la relación de consistencia (CR) se pueden calcular a partir de (10) y (11), respectivamente. El índice aleatorio (RI) para un tamaño n según el número de criterio se puede tomar de la Tabla 3. El valor de CR debe ser menor que 0,1; por consiguiente, si un valor calculado de CR supera el valor umbral mencionado, esto indica que el juicio tomado por el experto es inconsistente. Para calcular el valor de CR, se encuentra expresado por las siguientes ecuaciones:

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{W_i}}{n} \quad (9)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - 1}{n - 1} \quad (10)$$

$$CR = \frac{CI}{RI(n)} \quad (11)$$

**Tabla 3**

Valor de RI para diferentes tamaños de matriz

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

Nota. Valor de índice aleatorio (RI), Saaty, 1980.

### Paso 3: Determinar los equivalentes difusos

Se determina los equivalentes difusos de cada variable lingüística usada en las matrices. La siguiente ecuación representa el cálculo del promedio geométrico para el valor superior ( $u_{ij}$ ), medio ( $m_{ij}$ ) e inferior ( $l_{ij}$ ) de los equivalentes difusos basados en la función de membresía triangular.

$$\bar{r}_i = \left( \prod_{k=1}^K u_{ij} \right)^{\frac{1}{K}}, \left( \prod_{k=1}^K m_{ij} \right)^{\frac{1}{K}}, \left( \prod_{k=1}^K l_{ij} \right)^{\frac{1}{K}} \quad (12)$$

Donde:  $\prod$ , notación matemática que expresa multiplicación,  $(\prod)^{\frac{1}{K}}$  representa el promedio geométrico de una serie de términos,  $k$  es cada uno de los valores de expertos,  $K$  es el número total de expertos.

### Paso 4: Cálculo de extensión sintética difusa

En este paso, las cantidades difusas son obtenidas por medio de notaciones matemáticas definidas.

La ecuación (13) representa el cálculo de la extensión sintética difusa basada en un criterio  $i$ .

$$S_i = \sum \bar{r}_i * [\bar{r}_i]^{-1} \quad (13)$$

Donde:  $\bar{r}_i$  expresa el promedio geométrico.

#### **Paso 5: Cálculo de pesos ponderados**

Se realiza el promedio de los valores de  $S_i$ , mediante la fórmula (14). Luego, se calculó el peso ponderado como se muestra en la siguiente ecuación (15).

$$D_i = \frac{u_{\bar{r}_i} + m_{\bar{r}_i} + l_{\bar{r}_i}}{n} \quad (14)$$

$$W_p = \frac{D_{i=1}^n}{\sum D_i} \quad (15)$$

Donde:  $D_i$  promedio de valores de  $S_i$ ,  $W_p$  son los pesos ponderados de los  $n$  criterios.

#### **2.2.16. Técnica para la Ordenación de Preferencias por Similitud a la Solución Ideal (TOPSIS)**

Es un método de similitud para una solución ideal, es un método conocido y clásico de MCDA, desarrollado por primera vez en el trabajo de (Hwang et al., 1981). El método se basa en el principio de establecer una calificación sintética que tiene como objetivo determinar la distancia de cada alternativa a la solución ideal y la solución negativa (Nguyen et al., 2020).

La solución ideal se define sobre la base de valores que entre todo el conjunto de valores de cada criterio se consideran los mejores, maximiza los criterios de beneficio y minimiza los criterios de costo. La solución ideal negativa se define sobre la base de los peores valores, minimiza los criterios de beneficio y maximiza los criterios de costo (Chen et al., 2019). TOPSIS proporciona un enfoque sistemático para la toma de decisiones, considerando múltiples criterios simultáneamente (Mohamed et al., 2023).

### 2.2.16.1. Procedimiento TOPSIS

#### Paso 1: Definir la matriz de decisión

Se formula una matriz de decisión que abarca todas las alternativas disponibles junto con sus correspondientes valores de desempeño en varios criterios. La matriz de decisión según el método TOPSIS se muestra en la siguiente ecuación (16).

$$A_n = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Donde:  $A_n$  es la importancia de la alternativa  $i$  con respecto al criterio  $j$ .

#### Paso 2: Normalización de la matriz de decisión

La matriz de decisión se normaliza para eliminar cualquier diferencia de escala entre los criterios. Este paso garantiza que a todos los criterios se les dé la misma importancia en el proceso de toma de decisiones. Se puede utilizar varios métodos de normalización, como la normalización mínima-máxima o la normalización vectorial. La normalización de la matriz de decisión se puede calcular mediante la fórmula representada en la ecuación (17).

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2}} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, m ; j = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

Donde:  $m$  representa las soluciones alternativas,  $n$  los criterios y  $a_{ij}$  los valores de los criterios.

### Paso 3: Matriz normalizada ponderada

Se determina la importancia relativa o las ponderaciones de los criterios. Las ponderaciones pueden ser subjetiva, basada en el juicio de expertos o derivada mediante técnicas matemáticas como en la siguiente fórmula (18).

$$V = (V_{ij})_{m \times n} = (w_j r_{ij})_{m \times n} \quad (18)$$

Donde:  $w_j$  es el peso del criterio  $j$ .

### Paso 4: Determinación de las soluciones ideales positivas y negativas

Se identifican en función de los valores máximo y mínimo, respectivamente para cada criterio. La solución ideal positiva representa la alternativa que minimiza el beneficio y maximiza el costo, mientras que la solución ideal negativa representa la alternativa que mínima el beneficio y maximiza el costo (19) y (20).

$$V_j^+ = [( \max v_{ij} | j \in J ), ( \min v_{ij} | j \in J' )] = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\} \quad (19)$$

$$V_j^- = [( \min v_{ij} | j \in J ), ( \max v_{ij} | j \in J' )] = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \quad (20)$$

Donde:  $V$ : el valor de la solución ideal y  $j$ : el criterio específico.

### Paso 5: Cálculo de distancias euclidianas

Se realiza el cálculo de distancias euclidianas entre cada alternativa y soluciones ideales positivas (21) y negativas (22). La distancia euclidiana representa la proximidad de cada alternativa a las soluciones ideales en el espacio de criterios multidimensional.

$$S_1^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (21)$$

$$S_1^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (22)$$

Donde:  $S_+$  la distancia euclidiana desde la mejor solución ideal,  $S_-$  la distancia euclidiana desde la peor solución ideal,  $V_+$  los valores de las mejores soluciones ideales y  $V_-$ : peores soluciones ideales.

#### **Paso 6: Calcular la proximidad a las soluciones ideales**

Se calcula la solución ideal de cada alternativa a soluciones ideales positivas y negativas. Esto se puede lograr calculando el coeficiente de cercanía  $CC_i$ , que es la relación entre la distancia desde la solución ideal negativa y la suma de las distancias desde las soluciones ideales positiva y negativa. El cálculo este parámetro se muestra en la siguiente ecuación (23).

$$CC_i = \frac{S_1^-}{S_1^- + S_1^+} \quad (23)$$

Donde:  $CC_i$  coeficiente de cercanía. Cabe mencionar que los valores de  $CC_i$  varían entre 0 y 1, en los cuales cuanto mayor sea el valor de  $CC_i$ , más apropiada será la alternativa.

La clasificación de resultados es un paso crucial en este estudio. Las soluciones alternativas se clasifican según su calificación de desempeño  $CC_i$  de mayor a menor. El orden de ranking corresponde a la secuencia óptima de las ubicaciones de instalación de los depósitos de agua en función de los criterios definidos para la aplicación de la metodología TOPSIS.

### 2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

- a. **Recarga:** Nombre que se le da al proceso que permite que el agua alimente un acuífero. Este proceso ocurre de manera natural cuando la lluvia se filtra hacia un acuífero a través del suelo o roca.
- b. **Escorrentía:** Cantidad del agua de lluvia, riego o deshielo que excede la capacidad de infiltración del suelo, esta fluye en sentido longitudinal a la pendiente, es decir, aguas abajo, hacia los arroyos, quebradas, ríos, lagos, embalses y océanos.
- c. **Infiltración:** Es el proceso por el cual el agua circula a través del perfil del suelo, desde la superficie terrestre hacia abajo, reponiendo los acuíferos y manteniendo el caudal de los ríos durante los periodos de estiaje.
- d. **Jerárquico:** Se refiere a una estructura organizada en niveles o capas, donde cada nivel depende del nivel superior y es independiente del nivel inferior.
- e. **Difuso:** Se refiere a algo que no tiene límites claros o definidos, como un conjunto difuso en matemáticas, donde los elementos no pertenecen de forma clara al conjunto.
- f. **Normalizado:** Se refiere a algo que está estandarizado o normalizado según un conjunto de reglas o estándares.
- g. **Sistemático:** Método o proceso ordenado y metódico para el cálculo o análisis de variables relacionadas con el agua, como la escorrentía o el caudal.
- h. **Zonificación:** Se refiere al proceso de dividir un área en zonas o regiones según diferentes criterios o características.

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. HIPÓTESIS

##### 3.1.1. *Hipótesis General*

- Mediante la integración y aplicación de la técnica Fuzzy AHP-TOPSIS, se identificará de manera precisa las zonas con potencial de agua subterránea, en la cuenca del río Locumba, Tacna.

##### 3.1.2. *Hipótesis Específicas*

- Mediante el estudio del modelo Fuzzy AHP-TOPSIS, se puede aplicar su algoritmo para identificar el potencial de agua subterránea.
- Por medio del estudio de agua subterránea y la cuenca del río Locumba, se identificará los criterios que influyen en el potencial de agua subterránea.
- Una vez identificado el potencial de agua, se podrá realizar un mapa de zonificación de recarga hídrica en la cuenca.

### 3.2. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

**Tabla 4**

*Operacionalización de variables*

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES	INSTRUMENTO
VI: MODELO FUZZY AHP - TOPSIS	El método Fuzzy AHP consiste en formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos mediante la construcción de un modelo jerárquico.	Mediante algoritmo del modelo Fuzzy AHP, se obtuvo los pesos ponderados de criterios para la ubicación de depósitos de agua, y mediante el algoritmo de modelo TOPSIS, se obtuvo una secuencia óptima de ubicación de depósitos de agua.	- Modelo Fuzzy AHP.	- Construcción del modelo jerárquico, Fuzzy AHP.
	El método TOPSIS se basa en el principio de establecer una calificación sintética que tiene como objetivo determinar la distancia de cada alternativa a la solución ideal y la solución negativa (Nguyen et al., 2020).		- Modelo TOPSIS.	- Distancias euclidianas para una solución ideal, TOPSIS.
VD: POTENCIAL DE AGUA SUBTERRÁNEA	El agua subterránea se encuentra bajo la superficie terrestre, derivada directa o indirectamente de las lluvias (Chávez, 1994), fluye a través de los materiales porosos saturados del subsuelo hacia niveles más bajos que los de infiltración y puede volver a surgir naturalmente como manantiales y o filtraciones a cursos de agua.	Mediante la litología, geomorfología, permeabilidad, precipitación, SPI, pendiente, asperidad, LUCL, NDVI, suelo, se aplicó el modelo Fuzzy AHP – TOPSIS para obtener el potencial de agua subterránea.	Litología Permeabilidad Precipitación SPI Pendiente Geomorfología TRI LULC NDVI Tipos de suelo	GEOCATMIN ANA SENAMHI ArcGIS GEE GEOCATMIN GEE GEE GEE IGN

*Nota.* Esta tabla se realizó con ayuda de la matriz de consistencia que se muestra en el Anexo I. Donde: VI es la variable independiente y VD es la variable dependiente.

### **3.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

#### ***3.3.1. Tipo***

En esta investigación, se utilizó el tipo aplicado, porque permitió el desarrollo de un modelo práctico que se utilizó para contribuir con la solución de la escasez de recursos hídricos en la cuenca del río Locumba.

#### ***3.3.2. Nivel***

La investigación es nivel predictivo, porque buscó comprender el estado actual del potencial de agua subterránea y utilizó modelos matemáticos y técnica de análisis predictivo para anticipar y clasificar las zonas con mayor potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba.

### **3.4. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN**

El diseño de investigación es descriptivo, ya que se centró en describir y analizar los procesos y características del agua subterránea en la cuenca del río Locumba. Mediante el empleo de herramientas matemáticas y metodológicas, se evaluó su potencial. Este tipo de diseño es particularmente adecuado para estudios que buscan comprender mejor la dinámica del agua subterránea y su relación con el entorno, sin requerir experimentación ni manipulación de variables.

### **3.5. POBLACIÓN Y MUESTRA DE ESTUDIO**

#### ***3.5.1. Población***

La población está representada por toda la extensión de la cuenca del río Locumba, que presentan características hidrogeológicas relevantes para la evaluación del potencial de agua

subterránea. Esta población abarca tanto zonas urbanas como rurales, considerando la diversidad geográfica y geológica de la cuenca.

### **3.5.2. Muestra**

La muestra de esta investigación está representada por toda el área del acuífero de 5742.34 km<sup>2</sup>, lo que permitió obtener datos significativos para la aplicación del Modelo Fuzzy-AHP-TOPSIS y la evaluación del potencial de agua subterránea de manera precisa y confiable.

## **3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

Se realizó un estudio previo de la cuenca, donde se evaluó las características de litología, geomorfología, hidrología y patrones de uso de agua mediante fuentes autorizadas como Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), la Autoridad Nacional del Agua (ANA), el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), el Ministerio de Agricultura (MINAM). Estas instituciones proporcionaron datos esenciales en la zona de estudio.

Se obtuvo los criterios mediante el uso de plataformas avanzadas como Geoportal de Catastro Minero Nacional (GEOCATMIN), Instituto Geográfico Nacional (IGN) y Google Earth Engine (GEE). Estas plataformas permitieron descargar y procesar datos geospaciales y satelitales de manera eficiente, lo que facilitó el análisis exhaustivo de la cuenca hidrográfica y sus recursos hídricos subterráneos mediante el software ArcGIS.

Las técnicas e instrumentos empleadas en la investigación se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5***Técnicas e instrumentos de recolección de datos*

Técnicas	Instrumentos
Revisión documental	Fichas de recolección de datos: INGEMMET, ANA, SENAMHI, MINAM.
Procesamiento de datos geoespaciales	GEOCATMIN, IGN, GEE, ArcGIS
Análisis multicriterio	Matrices de análisis, mapas temáticos

*Nota.* La técnica que tuvo más relevancia en la investigación fue el análisis multicriterio que ayudo a obtener los pesos ponderados para el modelo de integración Fuzzy AHP – TOPSIS.

### 3.7. ANÁLISIS DE DATOS

La aplicación del modelo Fuzzy AHP - TOPSIS se realizó en cuatro etapas. Utilizando un enfoque multicriterio, se siguió la siguiente metodología, como se observa en la figura 5.

#### 3.7.1. Etapa 1: Recopilación de Datos

Para la obtención de los 10 criterios, se utilizaron diferentes fuentes de acceso público. Entre los datos recolectados para este estudio, se encuentra el uso de mapas e imágenes satelitales, como se observa en la tabla 6. Las capas de litología y geomorfología provienen de la base de datos del GEOCATMIN desarrollada por el INGEMMET. El tipo de suelo se obtuvo del portal del MINAM e IGN, la permeabilidad proviene de publicaciones de la ANA. Las capas de pendiente, TRI y SPI se extrajeron del modelo digital de elevación (DEM) generado por la misión de topografía radar del transbordador (SRTM). La precipitación se obtuvo de los datos del SENAMHI, la capa LU/LC del procesamiento de imágenes Sentinel-2 y la capa de NDVI proviene del procesamiento de imágenes Landsat-8.

**Tabla 6***Fuente de criterios utilizados en la cuenca del río Locumba*

	Criterio	Fuente	Año	Plataforma/Software
C1	Litología	INGEMMET	2020	GEOCATMIN
C2	Permeabilidad	ANA	2020	GEE
C3	Precipitación	SENAMHI	2016	SENAMHI
C4	SPI	SRTM	2020	ArcGIS
C5	Pendiente	SRTM	2020	GEE
C6	Geomorfología	INGEMMET	2020	GEOCATMIN
C7	TRI	SRTM	2020	GEE
C8	LUCL	Sentinel-2	2020	GEE
C9	NDVI	Landsat-8	2020	GEE
C10	Tipo de Suelo	MINAM	2020	IGN

*Nota.* En la tabla, se muestra la base de dato que se utilizó para cada criterio.

Estos datos se ingresaron al software ArcGIS 10.8, para clasificar la información geológica e hidrológica de cada criterio. Como resultado, se generó mapas mediante imágenes satelitales de cada criterio, lo que facilitó la identificación y priorización de cada uno de ellos.

### **3.7.2. Etapa 2: Aplicación del Método Fuzzy AHP - TOPSIS**

Se utilizó el método Fuzzy AHP para determinar la importancia relativa de cada criterio en la evaluación del potencial de agua subterránea. Se estableció una jerarquía de criterios y se realizaron comparaciones por pares, asignando pesos. Se aplicó TOPSIS para calcular el coeficiente de cercanía y clasificar las diferentes zonas potenciales de agua subterránea. Esta metodología híbrida fue aplicada utilizando Microsoft Excel para el análisis de datos y cálculos, y ArcGIS para el procesamiento y visualización de la información geoespacial.

### 3.7.3. Etapa 3: Resultados

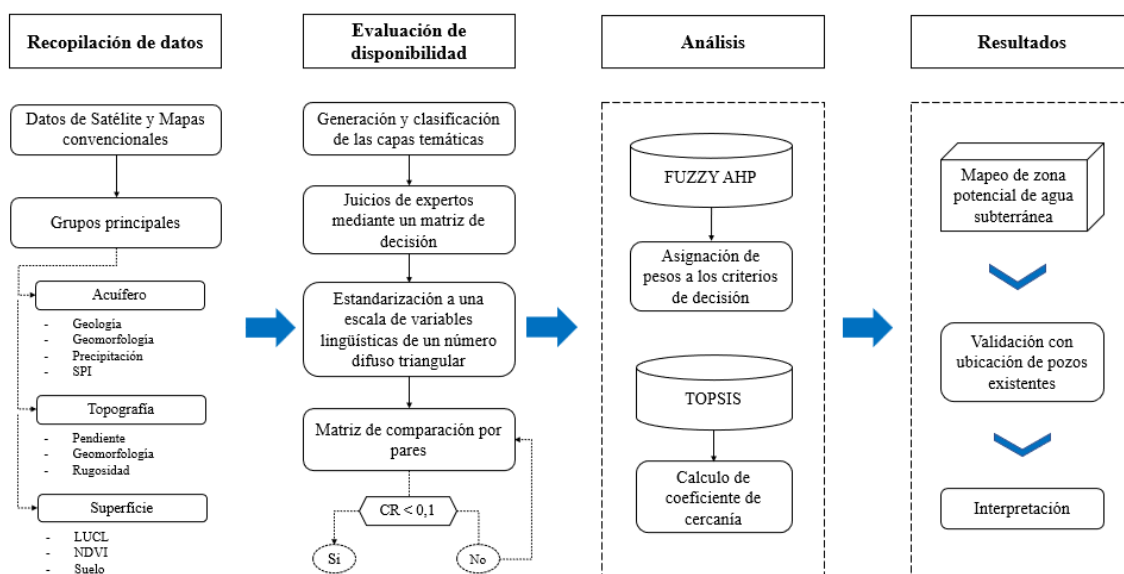
Los resultados obtenidos se analizaron para identificar las zonas con mayor potencial hídrico. Se generó un mapa mediante el software ArcGIS 10.8, lo que facilitó la visualización de las zonas favorables para la gestión de recursos hídricos.

### 3.7.4. Etapa 4: Validación e Interpretación

La metodología propuesta se validó mediante la comparación con datos de pozos existentes en la cuenca del río Locumba. Esto no solo permitió verificar la precisión del análisis, sino que confirmar la efectividad del modelo, identificando zonas con potencial de aguas subterráneas, contribuyendo significativamente a la gestión sostenible de los recursos hídricos.

## Figura 5

Diagrama de metodología del modelo Fuzzy AHP - TOPSIS



*Nota.* El diagrama representa el proceso que se desarrolló para obtener el mapeo de zona de potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba, Tacna.

## CAPÍTULO IV

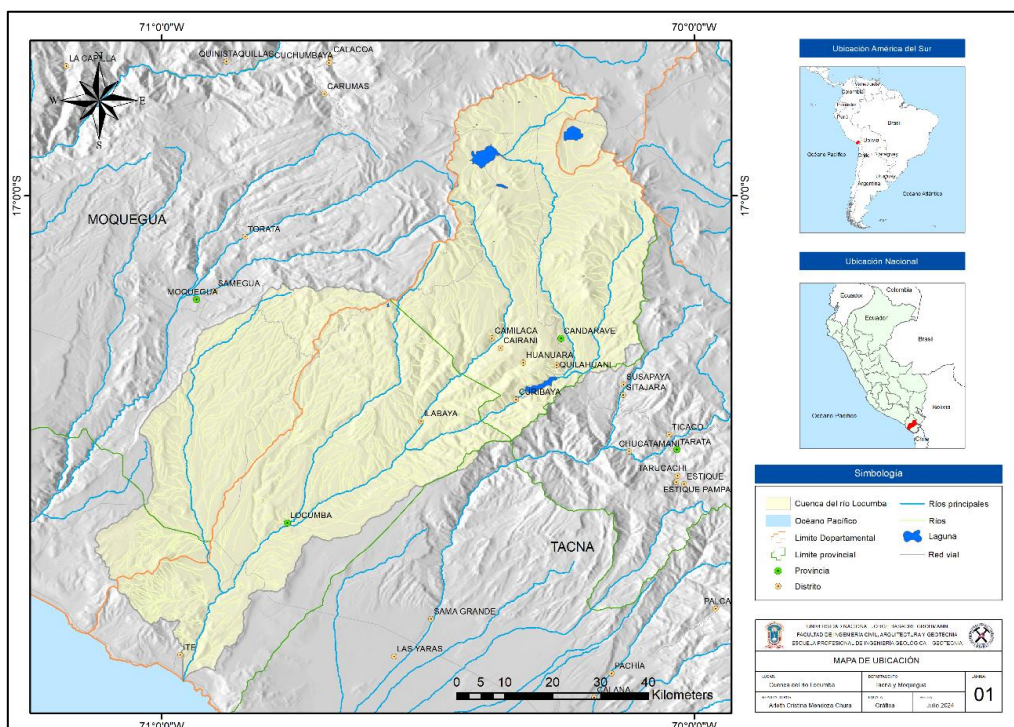
### CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

#### 4.1. UBICACIÓN

La cuenca del río Locumba se encuentra ubicada en la parte sur del Perú, políticamente entre los departamentos de Moquegua y Tacna. Ocupa parte de las provincias de Tacna, Tarata, Jorge Basadre, Candarave, Mariscal Nieto y General Sánchez Cerro, como se observa en la figura 6. La zona de estudio se extiende desde la cordillera Occidental de los Andes hasta el Océano Pacífico, con una altitud que varía desde los 5,200 msnm en las zonas altas hasta el nivel del mar en su desembocadura. Se encuentra geográficamente entre las siguientes coordenadas 70°30" y 71°30" de Longitud Oeste y 17°05" y 18°30" de Latitud Sur.

**Figura 6**

*Mapa de ubicación de la cuenca del río Locumba*



*Nota.* En el mapa, se presenta la ubicación en América del sur, nacional y regional del área de estudio. Para una visualización más detallada, este mapa se incluye en el anexo II.

#### **4.2. ACCESIBILIDAD**

La cuenca del río Locumba es accesible principalmente a través de la carretera Panamericana Sur, que conecta la ciudad de Tacna con Moquegua, en el desvío al este en el cruce que se encuentra en las inmediaciones del puente Camiara. De igual manera, por la parte alta, mediante la carretera binacional Perú – Bolivia, también la carretera Tacna – Tarata, y por la costa, se puede acceder mediante la carretera costanera.

#### **4.3. HIDROLOGÍA**

La cuenca del río Locumba tiene una forma alargada, presenta pendientes pronunciadas y su factor de forma indica que es una cuenca cuyas avenidas son bajas, por lo que tiene menos tendencia a concentrar la intensidad de las lluvias.

Según el INGEMMET, el agua superficial de nuestro territorio es la fuente principal para el abastecimiento de la población y fuente importante para la industria minera, agropecuaria y otras. La cuenca del río Locumba se ha separado en doce subcuencas: Callazas, Aricota, Ite, Quebrada Honda, Santallana, Vizcachas, Suches, Cinto, Locumba, Salado, Tacalaya – Ilabaya y Quebradilla. En el anexo III, se muestra el mapa de subcuencas de la cuenca del río Locumba.

La hidrogeología de la cuenca del río Locumba, situada en la región de Tacna, Perú, se caracteriza por un entorno árido con recursos hídricos limitados. La mayoría de las aguas subterráneas en la región provienen de la infiltración de las aguas de lluvia y del deshielo de los glaciares ubicados en las zonas altas de los Andes. El flujo subterráneo es generalmente lento y la calidad del agua puede verse afectada por la salinidad y la presencia de minerales.

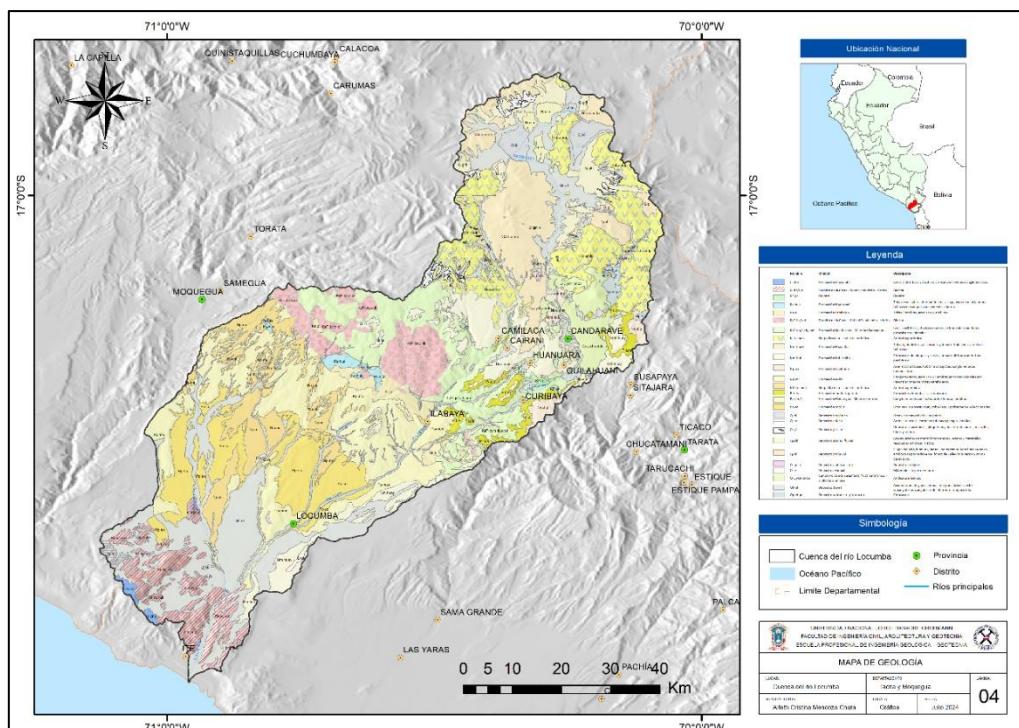
En la parte alta de la cuenca, por encima de los 3900 msnm, se encuentra una zona húmeda que realiza un importante aporte al escurrimiento superficial, debido a una mayor cantidad de lluvias. En contraste, la cuenca baja se caracteriza por una precipitación escasa. En el anexo IV, se muestra el mapa de hidrogeología de la cuenca del río Locumba.

#### 4.4. GEOLOGÍA

La descripción de la geología de la cuenca se obtuvo de las memorias descriptivas actualizadas de los cuadrángulos existentes en la base de datos del INGEMMET. Con ello, se elaboró un mapa de geología como se visualiza en la figura 7.

**Figura 7**

*Mapa de geología de la cuenca del río Locumba*



*Nota.* Para una visualización más detallada, este mapa se incluye en el anexo IV.

#### **4.4.1. Formaciones Geológicas**

##### **4.4.1.1. Formación Chocolate (Ji-cho)**

En la cuenca del río Locumba, se presenta como una secuencia de lavas andesíticas de color verdoso a chocolate, con textura afanítica o porfirítica. En ella, se encuentra dacita gris clara con estructura amigdaloides, se observan calizas claras en la parte superior de la formación y la base se encuentra intruida por granodiorita. Se encuentra expuesta en los cerros Papal y Airampal, en el cuadrángulo de Ilo; en el cuadrángulo de Locumba, se observan afloramientos en el cerro La Meca Grande.

##### **4.4.1.2. Formación Labra (Js-la)**

Son afloramientos aislados de areniscas y lutitas grises monótonas. Infrayace a delgadas capas de calizas expuestas en el río Callazas. Forma plegamientos, fallamientos e intrusiones ígneas. Al sureste del poblado de Candarave, sobre el río Callazas, los estratos de lutitas negras son gruesas y más abundantes que las areniscas. Hacia el techo, tiene algunos niveles de calizas de color marrón grisáceo, cuya extensión es muy reducida y no cartografiable. Es posible que pertenezca a la Formación Gramadal.

##### **4.4.1.3. Formación Hualhuani (Ki-hu)**

Litológicamente, está constituida por estratos de areniscas gris blanquecinas, cuarcitas blancas y areniscas gris marrón de grano grueso fino, intercaladas con lutitas carbonosas. En el sector de Yucamane, está constituido por estratos de areniscas gris blanquecinas, cuarcitas blancas y areniscas gris marrón de grano grueso a fino, intercaladas con lutitas gris a gris oscuro y marrón ocre rojizo. Forma un monoclinas de afloramiento reducido cubierto por aluvial, tobas litoclásticas de la Formación Tarata Inferior y las andesitas porfiríticas del volcán Yucamane.

#### 4.4.1.4. Formación Matalaque (Ki-ma)

Litológicamente, se encuentra conformada por rocas volcánicas tobáceas que afloran en los ríos Curibaya e Ilabaya, son tobas líticas masivas y compactas. En el sector donde se interceptan el río Ilabaya y la quebrada Huanuara, las tobas litocristalinas se diferencian de la anterior por ser menos compactas y contener menos líticos y abundancia de cristales de cuarzo, plagioclasa, líticos volcánicos afaníticos, escasos cristales de feldespato potásico y epidota, débilmente argilizadas. La edad Cretáceo inferior ha sido establecida en función de sus relaciones estratigráficas con el techo de la formación que infrayace a rocas volcánicas del grupo Toquepala del Cretáceo superior.

#### 4.4.1.5. Formación Huaracane

Esta formación, antiguamente llamada Toquepala, es un conjunto de unidades volcanoclásticas. En la cuenca Locumba, solamente afloran las siguientes dos unidades:

- ***Miembro Ks-hu/cz+fk***

Constituido por tobas bien soldadas que dan la impresión de lavas coherentes, texturas porfiríticas y cristales de cuarzo-feldespato. Afloran en los cerros Huaracane, Estuquiña, Los Ángeles, Quilliquini.

- ***Miembro Ks-hu/tbl+cz+bt***

Conformado por tobas de color gris-rosado. Las tobas constan de fragmentos subredondeados y subangulosos de cristales y líticos volcánicos, así como fragmentos de pumita y vidrio. Aflora en Colpay y Mollejaya.

#### 4.4.1.6. Formación Paralaque

Está compuesta por tobas altamente soldadas y porfiríticas, con minerales esenciales plagioclasas y cuarzo, como accesorios biotitas, fragmentos líticos, de vidrio y opacos, de color gris rojizo. Conforman farallones abruptos y extensas plataformas.

#### 4.4.1.7. Formación Quellaveco

- *Riolita Samanape (KsP-sa)*

**Miembro Inferior (KsP-sa/an):** Lavas coherentes de composición química andesítica, porfirítica, bien estratificadas, de color gris en fresco y blanquecino en afloramiento. Se intercalan tobas grises con tonos violáceos con fragmentos de plagioclasa y cuarzo, la mayoría silicificados y sericitizados. Aflora en la carretera Quellaveco-quebrada Honda, quebrada Cocotea, Cuajone y Chujulay.

**Miembro Superior (KsP-sa/tb):** Tobas-lapillo blanquecinas, bien estratificadas, que presentan en afloramiento formas redondeadas. Compuesto de fragmentos líticos, pómez en matriz tobácea bastante alterada. Se intercalan sistemas de lahares gris marrones compuestos de guijas polimícticas, la mayoría de origen volcánico englobados, matriz de arenas gruesas, intercalándose con estratos de limolitas grises y areniscas finas. Aflora en quebrada Honda (mina Toquepala), sobreyace disconforme a la unidad inferior e infrayace a la Formación Huaylillas.

#### 4.4.1.8. Formación Sotillo (P-so)

Areniscas arcóscas volcanoclásticas, se encuentra disconforme sobre rocas volcánicas jurásicas e intrusivos cretácicos. Presenta estratificación paralela y predominan lodolitas en los niveles superiores, así como capas de yeso, las que se incrementan en su tercio superior. La

transición con la Formación Moquegua está señalada por un vano de 15 a 20 centímetros de yeso. Esta formación aflora en las inmediaciones del valle de Locumba

#### **4.4.1.9. Formación Tarata Superior (P-ta\_s)**

Es una cuenca volcánica sedimentaria de amplia extensión. Al sur del pueblo de Tarata, está compuesta de sedimentos laminares (sineritas) de grano fino compuestos por bandas blancas afaníticas y oscuras laminadas, seguidos por piroclastos con plagioclasa dispersa y piroclastos de grano fino estratificado. Hacia la parte superior, aumentan los clastos subredondeados a redondeados de rocas volcánicas, niveles de ceniza, flujo lítico marrón rojizo, volcánicos en estratos gruesos, intercalación de limolitas y piroclastos, que pasan gradualmente a intercalaciones de limolitas gris marrón con calizas laminadas por más de 150 metros y hacia el techo abundan niveles de chert. Esta formación tiene un espesor aproximado de 400 metros y se asigna al Paleógeno. Aflora en los Cerros Altos de Molleraco y en la Apacheta Mogotito, también existen afloramientos en la margen derecha del río Curibaya (Alta Poquera).

#### **4.4.1.10. Formación Huilacollo (Nm-hl)**

Está conformada por roca volcánica predominantemente de flujo litoclástico, expuesta en afloramientos aislados y de litología monótona, solamente varía en el tamaño de los clastos de un afloramiento a otro, así como en la matriz y su grado de alteración. Los volcánicos al oeste de Yabroco contienen litoclastos dispersos subredondeados a subangulosos fuertemente soldados y en bancos masivos. En el cerro Chubiraca (al este de la laguna de Aricota), los bloques y clastos son menos compactos, también son masivos. En la matriz de arenas con líticos menores a 2 centímetros, contienen minerales de epidota y hornblenda. En los cerros Murmura y Arcomcollo, que está compuesto por dacitas porfiríticas cloritizadas, sericitizadas, argilizadas y por inclusiones diminutas de feldespato potásico, la silicificación se nota por la presencia de cuarzo.

#### **4.4.1.11. Formación Moquegua (PN-mo\_i – PN-mo\_s)**

Conformada por conglomerados polimícticos, con clastos de guijas y areniscas gruesas, medianamente estratificadas, intercalándose algunos niveles de tobas grises blanquecinas en las secuencias superiores (PN-mo\_s). Los clastos corresponden a andesitas y riolitas e intrusivos dioríticos. Estas secuencias presentan numerosas estructuras sedimentarias. En Mirave-Ilabaya, esta unidad está compuesta por conglomerados redondeados (PN-mo\_i) con clastos polimícticos, que presentan imbricación al suroeste, incrementándose la matriz arenosa con reducción de los materiales gruesos en dirección suroeste, originando un cambio de facies laterales que gradan a las secuencias de arenas medidas y lodolitas de la Formación Sotillo. Afloran en los cerros Blanco y Purgatorio.

#### **4.4.1.12. Formación Huaylillas (Nm-hu)**

Son flujos de tobas líticas y piroclastos de arena y ceniza moderadamente soldadas. Es un afloramiento bien expuesto que forma una superficie semiplana y acantilados en el corte de los ríos. En la carretera Cairani-Candarave, las tobas masivas fuertemente soldadas contienen biotitas débilmente oxidadas. La base en el valle de Camilaca, Huanuara y suroeste del poblado de Aricota, sobreyace a la unidad Tobas Samanape, a la Formación Huilacollo en Susapalla, a la Formación Tarata Inferior en el cerro Huarmiaque y pampa Pagrilaca, e infrayace a los piroclastos de los volcanes Chuquiananta, Tutupaca, Nazaparco y Yucamane. El espesor mejor expuesto se encuentra en el valle de Camilaca.

#### **4.4.1.13. Formación Capillune (N-ca)**

Tobas retrabajadas, conglomerados basales, brechas y areniscas tobáceas. Es una estratificación ondulante que representa sistemas lacustrinos. Aflora en el flanco sur del estrato

volcán Chuquiananta. Es asignada a una edad Pliocena. Algunos afloramientos que se encuentran entre Vallecito y Azufre Grande sobre el río Callazas, también se consideran como parte de la Formación Capillune. Los depósitos que afloran en el río Callazas constan esencialmente de varios depósitos de flujos de bloques y clastos andesíticos en matriz arenosa, tobas líticas, piroclastos de arena dispuestos en bandas blancas y oscuras, piroclastos de grano fino interestratificado con piroclastos de arena en matriz de ceniza, en horizontes bien definidos. Su edad podría corresponder al Plioceno porque infrayace a los volcánicos del Grupo Barroso.

#### **4.4.1.14. Formación Sencca**

Está compuesta por depósitos tobáceos de reducida extensión y grosor, formando pequeñas lomadas. Consiste en tobas de ceniza con líticos pequeños dispersos, menores de 2 centímetros y biotitas en proceso de alteración, varía de verde oscuro a amarillento, y contiene clastos de pómez alargados menores de 3 centímetros (foto 3.6).

#### **4.4.1.15. Formación Millo**

Conformado por una secuencia de conglomerados intercalados con niveles de tobas lapilli, de composición química riolítica. Los aluviones consisten de clastos subangulosos polimícticos, ligeramente inconsolidados, de grosor variable (10-100 metros). Las tobas de coloración pardas a marrones presentan cristales (plagioclasas) y pómez. Se le asigna una edad Pliocena Pleistocena.

#### **4.4.2. Depósitos Cuaternarios**

Dentro de la caracterización geológica del área de estudio, se han identificado depósitos aluviales, depósitos biogénicos, depósitos eólicos, depósitos glaciares, depósitos fluviales, depósitos proluviales, depósitos químico-sinter, depósitos residuales y depósitos volcánicos – piroclástico.

#### **4.4.2.1. Depósitos Aluviales (Qh-al)**

Son sedimentos no consolidados que han sido transportados y depositados por ríos y corrientes de agua. En la cuenca del río Locumba, estos depósitos pueden incluir arenas, gravas, limos y arcillas, que se acumulan en valles, terrazas fluviales y planicies de inundación.

#### **4.4.17.2. Depósitos Biogénicos (Q-bi)**

Están formados por la acumulación de materia orgánica, como restos vegetales, y organismos como diatomeas y moluscos. Estos depósitos se encuentran comúnmente en ambientes lacustres o palustres y pueden incluir turba y calizas lacustres.

#### **4.4.17.3. Depósitos Eólicos (Q-eo)**

Son sedimentos transportados y depositados por la acción del viento. En la cuenca del río Locumba, estos depósitos pueden incluir dunas de arena y loess, que se encuentran en áreas áridas o semiáridas donde la vegetación es escasa.

#### **4.4.17.4. Depósitos Glaciares (Q-gl)**

Son acumulaciones de materiales que han sido transportados y depositados por glaciares. Aunque son menos comunes en la región de Tacna, podrían incluir till (material no estratificado), morrenas y depósitos de origen glaciofluvial.

#### **4.4.17.5. Depósitos Fluviales (Q-fl)**

Similar a los aluviales, estos son sedimentos transportados y depositados por corrientes de agua en movimiento, pero suelen referirse específicamente a sedimentos depositados en canales de ríos y arroyos. En la cuenca del río Locumba, estos depósitos se encuentran en los lechos de los ríos y en sus márgenes.

#### **4.4.17.6. Depósitos Proluviales (Q-pl)**

Se forman en la base de laderas o piedemontes, donde la pendiente disminuye y los flujos de detritos y materiales arrastrados por el agua se depositan rápidamente. Estos depósitos son comunes en zonas montañosas y pueden incluir gravas, arenas y bloques de roca.

#### **4.4.17.7. Depósitos Químico – Sinter (Q-qm-s)**

Son formaciones resultantes de la precipitación de minerales a partir de soluciones acuosas. En áreas como la cuenca del río Locumba, podrían encontrarse depósitos de travertino, sinter de sílice, y otros precipitados químicos asociados a manantiales termales o aguas subterráneas ricas en minerales.

#### **4.4.17.8. Depósitos Residuales (Q-re)**

Son materiales que se han acumulado in situ como resultado de la meteorización de rocas subyacentes. Estos depósitos incluyen suelos y regolitos que se han formado directamente sobre el lecho rocoso a partir de la descomposición de minerales.

#### **4.4.17.9. Depósitos Volcánicos – Piroclásticos (Qp-vl-pi)**

Están compuestos por materiales expulsados durante erupciones volcánicas, como cenizas, lapilli, y bombas volcánicas. En la cuenca del río Locumba, podrían encontrarse depósitos de este tipo en forma de capas de ceniza y tobas volcánicas, asociadas a la actividad volcánica en la región andina.

## 4.5. GEOMORFOLOGÍA

Las siguientes unidades geomorfológicas desempeñan un papel crucial en la dinámica hidrológica de la cuenca del río Locumba, influenciando la disponibilidad y distribución del agua, tanto en la superficie como en el subsuelo.

### 4.5.1. Unidades Geomorfológicas

- **Altiplanicie Sedimentaria (AP-s)**

Las altiplanicies sedimentarias son grandes extensiones planas o ligeramente onduladas situadas a gran altitud, formadas por la acumulación de sedimentos transportados por ríos y el viento. En la cuenca del río Locumba, estas áreas se caracterizan por la presencia de depósitos de arenas, limos y arcillas. Su importancia radica en la capacidad de retener agua y facilitar la infiltración en ciertos sectores, aunque la aridez de la región puede limitar esta función.

- **Bofedales (Bo)**

Los bofedales son humedales andinos situados en áreas de altiplano, caracterizados por la presencia de vegetación adaptada a suelos saturados de agua. En la cuenca del río Locumba, los bofedales desempeñan un papel crucial en la regulación del ciclo hídrico, actuando como zonas de almacenamiento temporal de agua y liberándola gradualmente durante los períodos secos. Además, contribuyen significativamente a la recarga de acuíferos y al mantenimiento del caudal base de los ríos.

- **Colina o Lomada Piroclástica (CL-p)**

Estas formaciones están compuestas por materiales volcánicos como ceniza, lapilli y bombas volcánicas, que se han acumulado durante erupciones pasadas. Las colinas piroclásticas en la cuenca del río Locumba presentan suelos sueltos y altamente permeables, lo que facilita

la infiltración del agua. Sin embargo, la erosión es un problema común en estas áreas, especialmente en épocas de lluvias intensas.

- **Complejo Volcánico (Co-v)**

Un complejo volcánico es una región formada por múltiples estructuras volcánicas como conos, cráteres y flujos de lava. En la cuenca del río Locumba, estas áreas volcánicas moldean la topografía y pueden crear barreras naturales que afectan la red de drenaje y el flujo de agua. Los materiales volcánicos, por su porosidad, son propensos a la infiltración, lo que puede favorecer la recarga de acuíferos subterráneos.

- **Lagunas y Cuerpos de Agua (Lg/ca)**

Las lagunas y otros cuerpos de agua son importantes elementos geomorfológicos en la cuenca del río Locumba, funcionando como reservorios naturales que almacenan agua de lluvia y deshielos. Estas lagunas pueden ser estacionales o permanentes y son vitales para la biodiversidad local. También contribuyen a la recarga de los acuíferos cuando el agua se infiltra hacia el subsuelo.

- **Montaña con Cobertura Glaciar (RM-cgl)**

Las montañas con cobertura glaciar, aunque más limitadas en la cuenca del río Locumba, son esenciales para la provisión de agua dulce. Los glaciares almacenan agua en forma de hielo y la liberan lentamente a medida que se derriten, alimentando ríos y arroyos. Sin embargo, el retroceso glaciar, vinculado al cambio climático, podría comprometer la disponibilidad de agua en el futuro.

- **Morrenas (Mo)**

Las morrenas son depósitos de materiales rocosos y sedimentos que han sido transportados y acumulados por glaciares. En la cuenca del río Locumba, las morrenas se encuentran en áreas montañosas y pueden formar barreras naturales que modifican el curso de los ríos y

arroyos, creando pequeños cuerpos de agua o humedales. Estos depósitos son a menudo porosos, lo que permite la infiltración de agua y contribuye a la recarga de acuíferos.

- **Superficie de Flujo Piroclástico (Sfp)**

Las superficies de flujo piroclástico son áreas cubiertas por depósitos de materiales volcánicos calientes, como ceniza y piedra pómez, que se han desplazado rápidamente por las laderas durante erupciones. En la cuenca del río Locumba, estas superficies suelen ser porosas, facilitando la infiltración de agua. Sin embargo, debido a su composición, pueden ser inestables y propensas a la erosión.

- **Terraza Alta Aluvial (Ta-al)**

Las terrazas altas aluviales son antiguas planicies elevadas formadas por la deposición de sedimentos aluviales por los ríos en períodos geológicos pasados. Estas terrazas, compuestas por gravas, arenas y limos, se encuentran en niveles más altos que los actuales cauces fluviales. En la cuenca del río Locumba, las terrazas aluviales son áreas clave para la agricultura debido a la fertilidad de sus suelos y su capacidad para almacenar agua subterránea.

- **Vertiente Glacio-Fluvial (V-gfl)**

Las vertientes glacio-fluviales son laderas formadas por la acción combinada de glaciares y ríos. En la cuenca del río Locumba, estas vertientes se encuentran en áreas de montaña donde el flujo de agua glaciar ha erosionado el terreno, creando valles y pendientes pronunciadas. Estas áreas pueden ser importantes para el flujo superficial del agua y para la recarga de acuíferos a través de la infiltración.

- **Vertiente o Piedemonte Aluvial (V-al)**

Estas áreas se encuentran al pie de las montañas, donde los ríos depositan materiales aluviales como gravas, arenas y limos. En la cuenca del río Locumba, las vertientes o piedemontes

aluviales son zonas clave para la recarga de agua subterránea, ya que los materiales sueltos y permeables permiten que el agua superficial infiltre hacia los acuíferos. Estas áreas también son importantes para la agricultura y la ganadería.

- **Vertiente o Piedemonte Aluvio-Torrencial (P-at)**

Similar a las vertientes aluviales, estas áreas están formadas por depósitos de materiales transportados por corrientes torrenciales, que son más intensas y rápidas. Los depósitos suelen ser más gruesos y menos clasificados, lo que puede influir en la capacidad de infiltración y en la estabilidad del terreno. En la cuenca del río Locumba, estas vertientes son importantes para la recarga hídrica, pero también pueden estar sujetas a procesos de erosión y deslizamientos.

#### **4.6. TIPOS DE SUELO**

El tipo de suelo se clasificó según la “Base Referencial Mundial para los Recursos del Suelo” (WRB), que es el sistema internacional de clasificación de suelos promovido por la “Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura” (FAO). Este sistema es ampliamente utilizado en todo el mundo para proporcionar una nomenclatura estandarizada que permita comparar y estudiar los suelos de diferentes regiones de manera uniforme.

La diversidad de suelos en la cuenca del río Locumba es un reflejo de la compleja interacción entre las características del suelo, incluyendo su origen, composición química y profundidad. Desde suelos fértiles en los valles fluviales hasta suelos delgados y rocosos en las montañas, cada tipo de suelo presenta desafíos y oportunidades únicas para la agricultura, la gestión del agua y la conservación del suelo (MINAM, 2014).

- ***Fluvisol Éútrico - Regosol Éútrico***

**Fluvisol Éútrico:** Los Fluvisoles son suelos formados a partir de materiales aluviales recientes, depositados principalmente por ríos. Son típicos de las áreas cercanas a los cauces fluviales, donde la sedimentación es activa. El término "éútrico" indica que estos suelos son ricos en bases, como calcio, magnesio, potasio y sodio, lo que los hace relativamente fértiles.

**Regosol Éútrico:** Los Regosoles, al igual que los Fluvisoles, son suelos jóvenes, con un desarrollo de horizontes escaso o nulo. Estos suelos también son ricos en bases, lo que contribuye a una fertilidad moderada, aunque están menos desarrollados y son menos profundos que los Fluvisoles.

- ***Leptosol Dístrico - Afloramiento Lítico***

**Leptosol Dístrico:** Los Leptosoles son suelos muy poco desarrollados, encontrados típicamente en terrenos rocosos o escarpados. Son suelos delgados, con poca profundidad, y su formación se ve limitada por la cercanía de la roca madre. El término "dístrico" sugiere que estos suelos son pobres en bases, lo que significa que tienen un pH más ácido y, por lo tanto, una menor fertilidad.

**Afloramiento Lítico:** Este término se refiere a áreas donde la roca madre está expuesta o se encuentra muy cerca de la superficie, lo que impide un desarrollo significativo del suelo.

- ***Leptosol Dístrico - Andosol Vítrico***

**Leptosol Dístrico:** Como se mencionó anteriormente, estos suelos son delgados, ácidos y se encuentran en terrenos montañosos o rocosos.

**Andosol Vítrico:** Los Andosoles son suelos formados a partir de cenizas volcánicas o material volcánico. El término "vítrico" se refiere a la presencia de material vítreo o vidrio volcánico en el suelo. Los Andosoles son conocidos por su alta porosidad y capacidad para retener agua, aunque también tienden a ser ácidos.

- ***Leptosol Lítico - Afloramiento Lítico***

**Leptosol Lítico:** Similar a los Leptosoles dístricos, estos suelos se caracterizan por su escasa profundidad y la proximidad de la roca madre. Sin embargo, los Leptosoles líticos están aún más limitados en términos de desarrollo del suelo, lo que los hace particularmente delgados y poco aptos para la agricultura.

**Afloramiento Lítico:** Las áreas con afloramiento lítico se caracterizan por la exposición directa de la roca madre, con prácticamente ningún suelo sobre ella.

- ***Solonchak Háplico - Leptosol Éútrico***

**Solonchak Háplico:** Los Solonchaks son suelos con alta concentración de sales, típicamente encontrados en regiones áridas o semiáridas. El término "háplico" indica que el perfil del suelo es homogéneo y que no presenta grandes diferencias en sus capas, aparte de la acumulación de sales.

**Leptosol Éútrico:** Este tipo de Leptosol, a diferencia de los dístricos, es más rico en bases, lo que lo hace menos ácido y un poco más fértil, aunque sigue siendo un suelo delgado y poco desarrollado.

## **CAPÍTULO V**

### **APLICACIÓN DEL MODELO FUZZY AHP-TOPSIS**

En el marco de esta investigación, se evaluaron diez criterios, cada uno con un impacto significativo en el potencial de recarga del acuífero. Para determinar la relevancia y prioridad de estos criterios, se desarrollaron mapas temáticos.

#### **5.1. CRITERIOS QUE INFLUYEN EN LA RECARGA DEL ACUÍFERO**

##### **a) Litología**

En la cabecera de la cuenca, se encuentra un ambiente volcánico Grupo Barroso, con formaciones dispersas de andesitas y tobas. Estas rocas, debido a su baja permeabilidad, limitan la infiltración de agua. Asimismo, en la cabecera se observa la presencia de depósitos glaciares y aluviales. En la parte media de la cuenca, se encuentra la Cordillera de los Andes, caracterizada por grandes batolitos. Mientras que, al sur-oeste de la cuenca, las zonas de menores elevaciones presentan generalmente depósitos aluviales y fluviales son predominantes, compuestos principalmente por gravas y arenas.

##### **b) Permeabilidad**

La cuenca del río Locumba presenta zonas de 10 % muy baja permeabilidad, 30 % baja permeabilidad, 20 % media permeabilidad y 40 % alta permeabilidad. El área de estudio presenta principalmente áreas de alta permeabilidad, ocupando el 40 % del área total de estudio, predominan los depósitos aluviales de origen cuaternario, ricos en gravas y arenas. Por otro lado, las zonas más desfavorables para la recarga hidráulica serían las áreas de muy baja y baja permeabilidad, estas se encuentran principalmente en las zonas central y cabecera de la cuenca. Esto se debe principalmente a la presencia de formaciones geológicas como los

Granitos del Batolito de la Costa y las Cuarcitas de la Formación Ambo, que son rocas ígneas intrusivas y metamórficas compactas, respectivamente. Estas formaciones están asociadas a las áreas montañosas, donde la estructura densa y la escasez de fracturas limitan el movimiento del agua hacia el subsuelo. En el anexo VI, se muestra el mapa de permeabilidad en la cuenca del río Locumba.

### c) Precipitación

En la cuenca alta, las precipitaciones son más intensas, alcanzando entre 300 y 400 mm anuales, lo cual es crítico para la recarga potencial, aunque la escorrentía rápida en pendientes puede limitar la infiltración. En la cuenca media, la precipitación es moderada, con valores que oscilan entre 200 y 300 mm al año, permitiendo un balance entre escorrentía e infiltración. La cuenca baja recibe menos precipitación, entre 100 y 200 mm anuales, pero la mayor permeabilidad del suelo facilita que una buena parte del agua disponible se infiltre.

Utilizando la base de datos del SENAMHI, se elaboró un mapa de isoyetas, el cual permitió calcular los valores de precipitación en toda la extensión de la cuenca. Estos datos se observan en las tablas 7 y 8. En el anexo VII, se muestra el mapa de isoyetas en la cuenca del río Locumba.

**Tabla 7**

*Distribución mensual de la precipitación*

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Ite	1,7	0,2	0,1	0,1	0,6	0,8	2,3	2,3	3,1	1,3	0,5	0,9	13,7
Sama	3,9	1,9	0,4	0,7	1,7	2,8	2,9	4,8	6,7	2,8	2,2	2,1	32,7
Ilabaya	3,8	4,1	1,3	0,2	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,1	0,0	0,8	11,1
Curibaya	9,0	12,8	3,1	0,3	0,3	0,4	0,5	1,0	0,7	0,5	0,5	1,8	30,9

Sitajara	39,2	40,9	20,1	0,9	0,1	0,4	0,7	0,7	1,2	0,7	1,2	14,3	120,3
Cairani	40,0	37,0	17,6	1,5	0,6	0,4	1,1	1,1	1,1	0,8	1,3	9,5	111,9
Susapaya	61,8	75,3	35,1	0,2	0,6	0,5	1,1	0,7	1,8	3,5	2,7	18,7	201,8
Candarave	57,7	59,9	35,9	2,3	0,3	0,8	0,8	1,2	1,3	1,7	1,7	12,8	176,4
Toquepala	36,0	34,5	20,6	4,6	0,4	0,6	0,2	0,7	0,6	0,8	2,6	18,4	119,9
Q. Honda	84,5	80,6	55,9	5,8	1,3	1,6	1,1	1,8	1,2	1,9	2,6	21,7	260,0
Chuapalca	117,4	98,9	71,6	14,7	2,4	0,9	1,1	3,0	2,2	6,7	21,7	57,0	397,5
Challapalca	99,5	80,2	67,0	11,0	2,3	3,2	1,1	4,5	1,7	6,1	20,8	63,7	361,1
Vilacota	133,8	127,4	88,9	11,6	2,2	1,6	1,1	4,1	2,7	7,0	12,2	57,0	449,6
Tacalaya	121,8	120,4	87,5	19,4	3,6	2,0	1,9	3,8	3,8	9,3	12,9	55,4	441,7
Suches	101,33	100,6	71,4	18,8	2,7	2,8	1,3	3,2	3,7	8,8	16,0	50,6	381,3
Vizcachas	113,3	114,1	76,7	17,4	1,4	0,5	1,9	8,9	1,9	11,3	14,9	69,4	431,6

**Tabla 8***Precipitación anual de las estaciones*

N°	Estación	Longitud Oeste	Latitud Sur	Z (m.s.n.m.)	P (mm)
1	Ite	70°57'46,3499"	17°51'10,3200"	150	13,7
2	Sama	70°29'22,5552"	17°47'15,7566"	532	32,7
3	Ilabaya	70°30'40,5628"	17°26'21,8663"	1425	11,1
4	Curibaya	70°16'55,4723"	17°22'46,4203"	2350	30,9
5	Sitajara	70°05'58,7345"	17°24'27,9444"	3100	120,3
6	Cairani	70°21'45,2266"	17°17'14,8707"	3205	111,9
7	Susapaya	70°07'29,1403"	17°21'28,4926"	3399	201,8
8	Candarave	70°14'29,9354"	17°14'45,8212"	3415	176,4
9	Toquepala	70°37'52,6149"	17°16'42,0199"	3650	119,9
10	Q. Honda	70°29'31,8935"	17°10'32,4427"	4200	260
11	Chuapalca	69°39'00,0128"	17°20'59,9912"	4250	397,5
12	Challapalca	69°45'49,4459"	17°13'20,0366"	4250	361,1
13	Vilacota	70°00'54,9827"	17°07'40,8992"	4390	449,6

14	Tacalaya	70°23'26,9795"	17°04'17,6551"	4400	441,7
15	Suches	70°23'12,3113"	16°54'02,8542"	4452	381,3
16	Vizcachas	70°11'32,4014"	16°53'09,6737"	4500	431,6

*Nota.* En la tabla, se observan los datos de las estaciones meteorológicas, como sus coordenadas geográficas, altitud (z) y precipitación anual (mm).

#### d) Índice de Potencia de Corriente (SPI)

El índice de potencia de corriente (SPI) en la cuenca del río Locumba varía significativamente, la capa SPI presenta rangos entre: -13,8 - -5,5 (muy bajo), -5,5 - -1,1 (bajo), -1,1 - 0,8 (moderado), 0,8 - 3,7 (alto) y 3,7 - 14,3 (muy alto). Los valores más bajos representan las zonas más favorables para la recarga hidráulica, ya que presenta condiciones ideales para la infiltración, la escorrentía es mínima y el agua tiene más tiempo para percollar, mientras que los valores altos, debido a las pendientes pronunciadas y la rápida escorrentía, representan una menor oportunidad para la infiltración de agua. El área de estudio presenta en su mayoría valores bajos de SPI, ocupando un total del 44 % del área de la cuenca. En el anexo VIII, se muestra el mapa de índice de potencia de corriente en la cuenca del río Locumba.

#### e) Pendiente

La cuenca del río Locumba presenta pendientes de 0° a 75°. Los rangos se dividieron en 5 subclases, 0° a 6° (Plana), 6° a 13° (moderadamente inclinada), 13° a 22° (fuertemente inclinada), 22° a 31° (ligeramente escarpado) y 31° a 75° (fuertemente escarpado). En la cuenca alta, las pendientes superan el 31°, lo que favorece la escorrentía superficial y limita la infiltración, aumentando el riesgo de erosión del suelo. La cuenca media presenta

pendientes moderadas, entre  $13^\circ$  y  $31^\circ$ , que permiten un equilibrio entre la escorrentía y la infiltración, facilitando una recarga moderada. En la cuenca baja, las pendientes son menores al  $13^\circ$ , lo que favorece la acumulación de agua y la infiltración en el suelo, aumentando el potencial de recarga. En el anexo IX, se muestra el mapa de pendiente en la cuenca del río Locumba.

#### **f) Geomorfología**

La geomorfología de la cuenca del río Locumba es diversa y tiene un impacto significativo en la dinámica del agua. En la cuenca alta, hay presencia de complejo volcánico, vertiente glacio-fluvial, bofedales, morrenas, lagunas y cuerpos de agua. En la cuenca media, se caracteriza por montaña con cobertura glaciaria y superficie de flujo piroclástico. En la cuenca baja, se encuentra terraza alta aluvial, vertiente o piedemonte aluvio-torrencial, colina o lomada piroclástica y altiplanicie sedimentaria. En el anexo X, se muestra el mapa de geomorfología en la cuenca del río Locumba.

#### **g) Índice de Rugosidad Topográfica (TRI)**

La capa de índice de rugosidad topográfica presenta rangos entre 0,11 a 0,88. Los rangos se dividieron en 5 subclases: 0,11 – 0,38 (muy bajo), 0,38 – 0,46 (bajo), 0,46 - 0,53 (moderado), 0,53 – 0,61 (alto) y 0,61 – 0,88 (muy alto); donde los valores más altos representan las áreas más favorables para la recarga hidráulica. En la cuenca alta, hay presencia de moderada y alta rugosidad, es resultado de un relieve accidentado y variado, que contribuye a la rápida escorrentía y menor infiltración, lo que reduce el potencial de recarga. En la cuenca media, la rugosidad es moderada, con colinas y valles que permiten una infiltración más equilibrada del agua. La cuenca baja, con una rugosidad muy alta, se

caracteriza por planicies aluviales que facilitan la infiltración y la recarga de acuíferos. En el anexo XI, se muestra el mapa de índice de rugosidad topográfica en la cuenca del río Locumba.

#### **h) Uso del Suelo y Cobertura del Suelo (LUCL)**

En la cuenca alta, predomina la vegetación natural como los pastizales y arbustos, que favorecen la infiltración y reducen la erosión del suelo. La cuenca media presenta una mezcla de arbustos y cultivos, donde la infiltración es moderada y depende de las prácticas agrícolas empleadas. En la cuenca baja, las zonas urbanas y suelo desnudo tienen un impacto negativo en la infiltración debido a superficies impermeables, aunque las prácticas de manejo sostenible pueden mitigar estos efectos. En el anexo XII, se muestra el mapa de uso de suelo y cobertura de suelo en la cuenca del río Locumba.

#### **i) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)**

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en la cuenca del río Locumba es un indicador importante de la cobertura vegetal y la salud de los ecosistemas. La capa NDVI ha sido extraída gracias al procesamiento de imágenes Land-sat-8, obteniendo rangos de índice de vegetación entre -0,53 a 0,58. Los valores se dividieron en 5 subclases, -0,53 - -0,23 (superficies sin vegetación), -0,23 - -0,04 (vegetación escasa), -0,04-0,05 (vegetación pobre), 0,05 - 0,16 (vegetación densa) y 0,16 - 0,58 (vegetación moderada). Los valores más predominantes son los rangos promedio de -0,04 a 0,05, ocupando el 65 % del área total de la cuenca. Anexo XIII se muestra el índice de vegetación de diferencia normalizada en la cuenca del río Locumba.

**Tabla 9***Valores de clasificación de NDVI*

Rangos	Vegetación	Descripción
-0,53 - -0,23	Superficies sin vegetación	Áreas sin vegetación, como cuerpos de agua, áreas urbanas, o suelos completamente expuestos.
-0,23- -0,04	Vegetación escasa	Indica zonas con muy poca cobertura vegetal, como pastizales degradados, suelos con vegetación muy escasa o en condiciones de estrés extremo.
-0,04 - 0,05	Vegetación pobre	Este rango puede representar áreas donde la vegetación está presente, pero en condiciones muy pobres, o donde hay una mezcla de suelo expuesto y vegetación débil.
0,05 - 0,16	Vegetación densa	Este rango podría indicar vegetación dispersa o en estado de regeneración, como matorrales o cultivos en crecimiento inicial.
0,16 - 0,58	Vegetación moderada	Este rango suele estar asociado a zonas con vegetación relativamente saludable y densa, como áreas agrícolas bien manejadas, pastizales en buen estado, o bosques jóvenes.

*Nota.* El NDVI varía entre -1 a 1, los valores cercanos a 1 indican una vegetación saludable (Jensen, 2007).

#### **j) Tipo de suelo**

La distribución de estos tipos de suelo en la cuenca refleja la diversidad geológica y climática de la región. El Fluvisol éutrico – Regosol éutrico se encuentran cerca del río, en las partes más bajas y cercanas al cauce del río Locumba, donde la influencia del agua y la deposición de sedimentos son dominantes. El Leptosol dístrico – Afloramiento lítico, debido a su naturaleza delgada y su formación sobre roca madre, se distribuyen en las zonas montañosas y de alta pendiente. El Leptosol dístrico – Andosol vítrico son relacionados con

depósitos volcánicos, generalmente en la parte alta de la cuenca o en zonas con depósitos piroclásticos recientes. Mientras que el Solonchak haplítico – Leptosol éutrico se encuentra en las zonas más bajas y planas de la cuenca, donde la acumulación de agua con alta salinidad puede ocurrir, formando depósitos salinos.

## 5.2. MÉTODO FUZZY AHP

Para desarrollar una estructura jerárquica, se realizó una matriz de comparación por pares mediante tres tomadores de decisiones (DM) para cada grupo y criterio. Los DM utilizaron la definición lingüística y los TFN correspondientes a la tabla 2. Los valores asignados se muestran en la tabla 7, tabla 8, tabla 9 y tabla 10.

**Tabla 10**

*Matriz de comparación por pares*

Grupos	DMs	Acuífero	Topografía	Superficie
Acuífero	DM <sub>1</sub>	(1,1,1)	(2,3,4)	(4,5,6)
	DM <sub>2</sub>	(1,1,1)	(4,5,6)	(5,6,7)
	DM <sub>3</sub>	(1,1,1)	(3,4,5)	(4,5,6)
Topografía	DM <sub>1</sub>	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(1,2,3)
	DM <sub>2</sub>	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)	(1,2,3)
	DM <sub>3</sub>	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)	(2,3,4)
Superficie	DM <sub>1</sub>	(1/7,1/6,1/5)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)
	DM <sub>2</sub>	(1/7,1/6,1/5)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)
	DM <sub>3</sub>	(1/6,1/5,1/4)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)

**Tabla 11***Matriz de comparación por pares del grupo acuífero*

G1: Acuífero	DMs	Litología	Permeabilidad	Precipitación	SPI
Litología	DM <sub>1</sub>	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1/5,1/4,1/3)	(4,5,6)
	DM <sub>2</sub>	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)	(1/5,1/4,1/3)	(3,4,5)
	DM <sub>3</sub>	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1/4,1/3,1/2)	(3,4,5)
Permeabilidad	DM <sub>1</sub>	(2,3,4)	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)	(5,6,7)
	DM <sub>2</sub>	(1,2,3)	(1,1,1)	(1,1,1)	(5,6,7)
	DM <sub>3</sub>	(2,3,4)	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)	(5,6,7)
Precipitación	DM <sub>1</sub>	(3,4,5)	(1,2,3)	(1,1,1)	(7,8,9)
	DM <sub>2</sub>	(3,4,5)	(1,1,1)	(1,1,1)	(6,7,8)
	DM <sub>3</sub>	(2,3,4)	(1,2,3)	(1,1,1)	(6,7,8)
SPI	DM <sub>1</sub>	(1/6,1/5,1/4)	(1/7,1/6,1/5)	(1/9,1/8,1/7)	(1,1,1)
	DM <sub>2</sub>	(1/5,1/4,1/3)	(1/7,1/6,1/5)	(1/8,1/7,1/6)	(1,1,1)
	DM <sub>3</sub>	(1/5,1/4,1/3)	(1/7,1/6,1/5)	(1/8,1/7,1/6)	(1,1,1)

**Tabla 12***Matriz de comparación por pares del grupo topografía*

G2: Topografía	DMs	Pendiente	Geomorfología	TRI
Pendiente	DM <sub>1</sub>	(1,1,1)	(1,2,3)	(5,6,7)
	DM <sub>2</sub>	(1,1,1)	(1,2,3)	(5,6,7)
	DM <sub>3</sub>	(1,1,1)	(1,2,3)	(6,7,8)
Geomorfología	DM <sub>1</sub>	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(3,4,5)
	DM <sub>2</sub>	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(4,5,6)
	DM <sub>3</sub>	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)	(3,4,5)
TRI	DM <sub>1</sub>	(1/7,1/6,1/5)	(1/5, 1/4,1/3)	(1,1,1)
	DM <sub>2</sub>	(1/7,1/6,1/5)	(1/6,1/5,1/4)	(1,1,1)
	DM <sub>3</sub>	(1/8,1/7,1/6)	(1/5,1/4,1/3)	(1,1,1)

**Tabla 13***Matriz de comparación por pares del grupo superficie*

G3: Superficie	DMs	LUCL	NDVI	Tipo de Suelo
LULC	DM <sub>1</sub>	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)
	DM <sub>2</sub>	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)
	DM <sub>3</sub>	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)
NDVI	DM <sub>1</sub>	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,2,3)
	DM <sub>2</sub>	(2,3,4)	(1,1,1)	(1,2,3)
	DM <sub>3</sub>	(2,3,4)	(1,1,1)	(2,3,4)
Tipo de suelo	DM <sub>1</sub>	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)
	DM <sub>2</sub>	(1,1,1)	(1/3,1/2,1)	(1,1,1)
	DM <sub>3</sub>	(1,1,1)	(1/4,1/3,1/2)	(1,1,1)

**5.2.1. Ponderación de Grupos**

Primero, luego de haber obtenido los valores de los tomadores de decisiones, se realizó un promedio como se visualiza en la tabla 11, para calcular los pesos ponderados. Segundo, para validar esta información proporcionada, se calculó la relación de consistencia (CR), lo cual indica que este parámetro  $CR < 0,1$ ; si se cumple esta condición, quiere decir que se ha ponderado razonablemente como se muestra en la tabla 12 y tabla 13. Tercero, se calcula los pesos ponderados mediante el método Fuzzy AHP en la tabla 14.

**Tabla 14***Promedio de los tomadores de decisiones*

Grupos	G1			G2			G3		
G1	1,00	1,00	1,00	3,00	4,00	5,00	4,67	4,33	6,67
G2	0,21	0,26	0,36	1,00	1,00	1,00	1,33	2,33	3,33
G3	0,15	0,18	0,22	0,31	0,44	0,83	1,00	1,00	1,00

*Nota.* G1 representa el acuífero, G2 representa la topografía, y G3 representa superficie.

**Tabla 15**

*Matriz de decisión, matriz normalizada y ponderada*

Grupos	A: Matriz de decisión			Matriz normalizada			Ponderación		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	Vector W	X=A*W	Xi/Wi
G1	1,00	4,00	4,78	0,69	0,73	0,59	0,67	2,08	3,10
G2	0,27	1,00	2,33	0,19	0,18	0,29	0,22	0,66	3,02
G3	0,18	0,49	1,00	0,12	0,09	0,12	0,11	0,34	3,02
Suma	1,45	5,49	8,11					Suma	9,15

*Nota.* En la tabla, se muestra el procedimiento mediante matrices y vectores para obtener los parámetros para calcular la relación consistencia (CR).

**Tabla 16**

*Relación de consistencia (CR)*

Descripción		Resultado
Número de criterios	n	3
Índice Aleatorio	RI	0,58
$\lambda_{\text{máx}}$	$\lambda$	3,05
Índice de consistencia	CI	0,02
Relación de consistencia	CR	0,042

*Nota.* En la tabla, se muestran el resultado  $CR = 0,042$ ; esto indica que se ha ponderado razonablemente ya que cumple la condición  $CR < 0,1$ . A medida que este valor este más alejado será un resultado ideal, ya que si supera esta 0,1 no será óptimo.

**Tabla 17**

*Cálculo de pesos ponderados mediante Fuzzy AHP*

Grupo	$\bar{r}_i$			$S_i = \sum \bar{r}_i \times r_{(inversa)}$			Di Promedio	Pesos Ponderados
	G1	G2	G3	G1	G2	G3		
G1	2,41	2,59	3,22	0,50	0,67	0,94	0,70	0,68
G2	0,65	0,85	1,06	0,13	0,22	0,31	0,22	0,21
G3	0,36	0,43	0,57	0,07	0,11	0,17	0,12	0,11
$r_{(inversa)}$	0,21	0,26	0,29	Suma			1,04	1,00

*Nota.* En la tabla, se muestran los resultados de pesos ponderados, mediante  $\bar{r}_i$  equivalentes difusos, Si extensión sintética difusa y Di promedio de valores Si.

### 5.2.2. Criterios Ponderados del Grupo Acuífero

El proceso de ponderación se llevó a cabo utilizando la misma metodología empleada en el procedimiento anterior.

**Tabla 18**

*Promedio de los tomadores de decisiones de acuífero*

G1	C1			C2			C3			C4		
C1	1,00	1,00	1,00	0,28	0,39	0,67	0,22	0,28	0,39	3,33	4,33	5,33
C2	1,67	2,67	3,67	1,00	1,00	1,00	0,56	0,67	1,00	5,00	6,00	7,00
C3	2,67	3,67	4,67	1,00	1,67	2,33	1,00	1,00	1,00	6,33	7,33	8,33
C4	0,19	0,23	0,31	0,14	0,17	0,20	0,12	0,14	0,16	1,00	1,00	1,00

*Nota.* G1 representa el acuífero, C1 criterio de litología, C2 criterio de permeabilidad, y C3 criterio de precipitación.

**Tabla 19**

*Matriz de decisión, matriz normalizada y ponderada de acuífero*

A: Matriz de decisión					Matriz normalizada				Ponderación		
G1	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	Vector W	X=A*W	
C1	1,00	0,42	0,29	4,33	0,13	0,13	0,13	0,23	0,16	0,64	4,11
C2	2,67	1,00	0,70	6,00	0,35	0,31	0,33	0,32	0,33	1,38	4,19
C3	3,67	1,67	1,00	7,33	0,48	0,51	0,47	0,39	0,46	1,96	4,21
C4	0,24	0,17	0,14	1,00	0,03	0,05	0,06	0,05	0,05	0,21	4,11
Suma	7,57	3,25	2,13	18,67						Suma	16,62

*Nota.* En la tabla se muestra el procedimiento mediante matrices y vectores para obtener los parámetros para calcular la relación consistencia (CR).

**Tabla 20**

*Cálculo de relación de consistencia (CR) de acuífero*

Descripción		Resultado
Número de criterios	n	4
Índice Aleatorio	RI	0,9
$\lambda_{\text{máx}}$	$\lambda$	4,16
Índice de consistencia	CI	0,05
Relación de consistencia	CR	0,057

*Nota.* En la tabla, se muestran el resultado  $CR = 0,057$ ; esto indica que se ha ponderado razonablemente, ya que cumple la condición  $CR < 0,1$ .

**Tabla 21**

*Cálculo de pesos ponderados mediante Fuzzy AHP de acuífero*

$\bar{r}_i$					$S_i = \sum \bar{r}_i \times r_{(inversa)}$				Di	Pesos
G1	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	Promedio	Ponderados
C1	0,67	0,83	1,08	0,67	0,10	0,15	0,25	0,10	0,17	0,16
C2	1,47	1,81	2,25	1,47	0,22	0,33	0,51	0,22	0,35	0,33
C3	2,03	2,59	3,09	2,03	0,30	0,47	0,70	0,30	0,49	0,46
C4	0,24	0,27	0,31	0,24	0,04	0,05	0,07	0,04	0,05	0,05
$r_{(inversa)}$	0,15	0,18	0,23	0,15	Suma				1,06	1,00

*Nota.* En la tabla, se muestran los resultados de pesos ponderados, mediante  $\bar{r}_i$  equivalentes difusos, Si extensión sintética difusa y Di promedio de valores Si.

### 5.2.3. Criterios Ponderados del Grupo Topografía

El proceso de ponderación se llevó a cabo utilizando la misma metodología empleada en el procedimiento anterior.

**Tabla 22**

*Promedio de los tomadores de decisiones de topografía*

G2	C5				C6			C7		
C5	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	3,00	5,33	6,33	7,33	
C6	0,33	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	3,33	4,33	5,33	
C7	0,14	0,16	0,19	0,19	0,23	0,31	1,00	1,00	1,00	

*Nota.* G2 representa la topografía, C5 criterio de pendiente, C6 criterio de geomorfología, y C7 criterio de índice de rugosidad topográfica (TRI).

**Tabla 23**

*Matriz de decisión, matriz normalizada y ponderada de topografía*

A: Matriz de decisión				Matriz normalizada			Ponderación		
G2	C5	C6	C7	C5	C6	C7	Vector W	X=A*W	Xi/Wi
C5	1,00	2,00	6,33	0,58	0,62	0,54	0,58	1,78	3,07
C6	0,56	1,00	4,33	0,32	0,31	0,37	0,33	1,02	3,05
C7	0,16	0,24	1,00	0,09	0,07	0,09	0,08	0,26	3,05
Suma	1,72	3,24	11,67					Suma	9,18

*Nota.* En la tabla, se muestra el procedimiento mediante matrices y vectores para obtener los parámetros para calcular la relación consistencia (CR).

**Tabla 24**

*Cálculo de relación de consistencia (CR) de topografía*

Descripción		Resultado
Número de criterios	n	3
Índice Aleatorio	RI	0,58
$\lambda_{\text{máx}}$	$\lambda$	3,06
Índice de consistencia	CI	0,03
Relación de consistencia	CR	0,050

*Nota.* En la tabla, se muestran el resultado  $CR = 0,050$ ; esto indica que se ha ponderado razonablemente, ya que cumple la condición  $CR < 0,1$ .

**Tabla 25**

*Cálculo de pesos ponderados mediante Fuzzy AHP de topografía*

G2	$\bar{r}_i$			Si = $\sum \bar{r}_i \times r_{(inversa)}$			Di	Pesos
	C5	C6	C7	C5	C6	C7		
C5	1,75	2,33	2,80	0,35	0,59	0,91	0,62	0,57
C6	1,04	1,29	1,75	0,21	0,33	0,57	0,37	0,34
C7	0,30	0,33	0,39	0,06	0,08	0,13	0,09	0,08
$r_{(inversa)}$	0,20	0,25	0,32	Suma			1,08	1,00

*Nota.* En la tabla, se muestran los resultados de pesos ponderados, mediante  $\bar{r}_i$  equivalentes difusos, Si extensión sintética difusa y Di promedio de valores Si.

#### 5.2.4. Criterios Ponderados del Grupo Superficie

El proceso de ponderación se llevó a cabo utilizando la misma metodología empleada en el procedimiento anterior.

**Tabla 26**

*Promedio de los tomadores de decisiones de superficie*

G3	C8			C9			C10		
C8	1,00	1,00	1,00	0,25	0,33	0,50	1,00	1,00	1,00
C9	2,00	3,00	4,00	1,00	1,00	1,00	1,33	2,33	3,33
C10	1,00	1,00	1,00	0,31	0,44	0,83	1,00	1,00	1,00

*Nota.* G3 representa la superficie, C8 criterio de LUCL, C9 criterio de NDVI, y C10 criterio de tipo de suelo.

**Tabla 27**

*Matriz de decisión, matriz normalizada y ponderada de superficie*

A: Matriz de decisión				Matriz normalizada			Ponderación		
G3	C8	C9	C10	C8	C9	C10	Vector W	X=A*W	Xi/Wi
C8	1,00	0,35	1,00	0,20	0,19	0,23	0,21	0,63	3,06
C9	3,00	1,00	2,33	0,60	0,55	0,54	0,56	1,72	3,07
C10	1,00	0,49	1,00	0,20	0,27	0,23	0,23	0,71	3,07
Suma	5,00	1,83	4,33					Suma	9,20

*Nota.* En la tabla, se muestra el procedimiento mediante matrices y vectores para obtener los parámetros para calcular la relación consistencia (CR).

**Tabla 28**

*Cálculo de relación de consistencia (CR) de superficie*

Descripción		Resultado
Número de criterios	n	3
Índice Aleatorio	RI	0,58
$\lambda_{\text{máx}}$	$\lambda$	3,07
Índice de consistencia	CI	0,03
Relación de consistencia	CR	0,058

*Nota.* En la tabla, se muestran el resultado  $CR = 0,058$ , esto indica que se ha ponderado razonablemente, ya que cumple la condición  $CR < 0,1$ .

**Tabla 29**

*Cálculo de pesos ponderados mediante Fuzzy AHP de superficie*

G3	$\bar{r}_i$			$S_i = \sum \bar{r}_i \times r_{(inversa)}$			Di Promedio	Pesos Ponderado
	C8	C9	C10	C8	C9	C10		
C8	0,63	0,69	0,79	0,15	0,21	0,30	0,22	0,21
C9	1,39	1,91	2,37	0,34	0,57	0,88	0,60	0,56
C10	0,67	0,76	0,94	0,16	0,23	0,35	0,25	0,23
$r_{(inversa)}$	0,24	0,30	0,37	Suma			1,06	1,00

*Nota.* En la tabla, se muestran los resultados de pesos ponderados, mediante  $\bar{r}_i$  equivalentes difusos,  $S_i$  extensión sintética difusa y  $D_i$  promedio de valores  $S_i$ .

### 5.2.5. Análisis

Al analizar los pesos de los tres grupos, se observa que el grupo de mayor influencia es el acuífero con un peso de 67,51 %; siguiéndole el grupo de topografía con un peso de 21,28 % y con el menor grado de influencia el grupo de superficie con un peso de 11,22 %. Estos resultados se visualizan en la tabla 27.

Evaluando los pesos locales dentro del grupo acuífero, la precipitación presenta el mayor grado de influencia con un peso de 46,28 %; dentro del grupo topografía, el criterio que tiene mayor peso es la pendiente con un 57,42 % y, en el grupo superficie, se muestra que el NDVI tiene un peso de 56,17 %.

**Tabla 30***Peso de los criterios de decisión y su respectivo ranking*

<b>Grupo</b>	<b>Pesos</b>	<b>Criterio</b>	<b>PL</b>	<b>PG</b>	<b>Características / Clases</b>	<b>Rango</b>
Acuífero	0,67505	Litología	0,1559	0,1052	Sedimentos aluviales	5
					Depósitos fluvioglaciares	3
					Rocas intrusivas	1
					Rocas sedimentarias	4
					Rocas volcánicas	1
					Volcán sedimentario	2
		Permeabilidad	0,3324	0,2244	Alta Permeabilidad	4
					Media Permeabilidad	3
					Baja Permeabilidad	2
					Muy baja Permeabilidad	1
		Precipitación	0,4628	0,3124	11,14 – 87,11	3
					87,11 – 147,89	4
					147,89 – 225,55	5
					225,55 – 321,78	6
					321,78 – 441,64	7
		SPI	0,0490	0,0331	-13,8 - -5,3	5
					-5,3 - -1,1	4
					-1,1 – 0,8	3
					0,8 – 3,7	2
					3,7 – 14,3	1
		Topografía	0,21278	Pendiente	0,5742	0,1222
6 - 13	6					
13 - 22	5					
22 - 31	4					
31 - 75	3					
Geomorfología	0,3422			0,0728	Humedal	4
					Colina	3
					Complejo Volcán	2
					Laguna	1
					Montañas	1
					Morrenas	4
Llanuras	5					

			TRI	0,0836	0,0178	0,11 – 0,38	1
						0,38 – 0,46	2
						0,46 – 0,53	3
						0,53 – 0,61	4
						0,61 – 0,88	5
Superficie	0,11217	LUCL		0,2056	0,0231	Agua	2
						Cultivos	5
						Arbustos	3
						Zona urbana	2
						Suelo desnudo	1
			NDVI	0,5617	0,0630	-0,53 - -0,23	1
						-0,23 - -0,04	2
						-0,04 – 0,05	3
						0,05 – 0,16	4
						0,16 – 0,58	5
			Tipo de suelo	0,2327	0,0261	Fluvisol éútrico – Regosol éútrico	3
						Leptosol dístrico – Afloramiento lítico	2
						Leptosol dístrico – Andosol vítrico	4
						Leptosol lítico – Afloramiento lítico	1
						Solonchak háplico – Leptosol éútrico	5

*Nota.* La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos de los criterios mediante el cálculo del método Fuzzy AHP. Donde: PL pesos locales calculados en las tablas como pesos ponderados, PG pesos globales es la multiplicación del peso del grupo con su criterio y Rango es valor de importancia asignado según la escala de Saaty.

Adicionalmente, se tiene los pesos globales, los cuales representan el grado final de contribución de cada factor y que van a ser empleados previamente dentro del marco metodológico TOPSIS. Los resultados muestran que los criterios más influyentes es la precipitación con un 31,24 %, seguido por la permeabilidad con un 22,44 %. Por otro lado, el factor con el menor peso es el índice de rugosidad topográfica (TRI) con el valor de 1,78 %. Estos

resultados indican el grado de valor entre los 10 criterios propuestos, que posteriormente van a ser de gran utilidad para la evaluación del potencial de recarga.

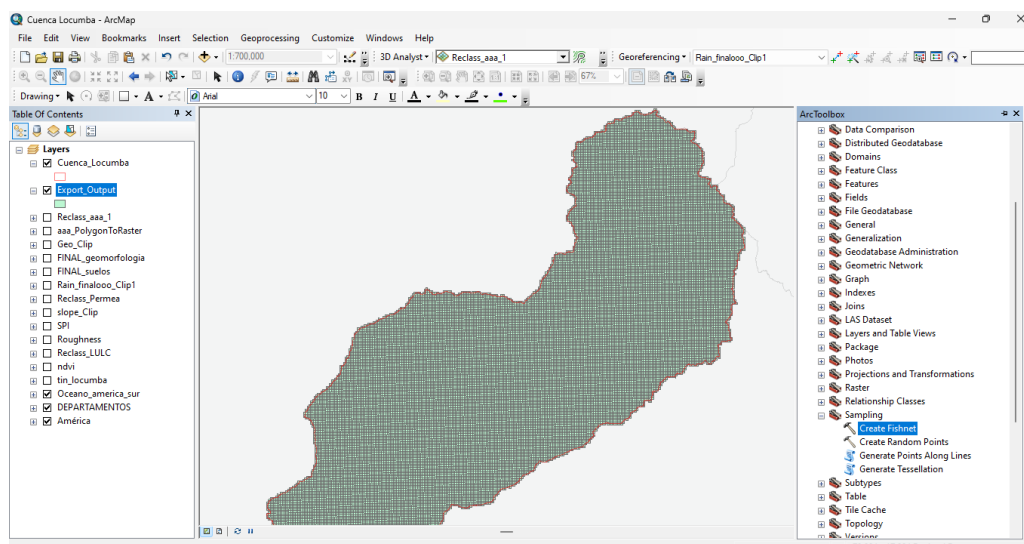
### 5.3. MÉTODO TOPSIS

#### 5.3.1. Definición de Criterios y Alternativas

Para la aplicación del método TOPSIS, se dividió la cuenca del río Locumba en un total de 37171 cuadrículas mediante el software ArcGIS 10.8 como se muestra en la figura 8, con la finalidad de obtener una mejor precisión en los rangos de valores de coeficiente de cercanía CCI. Estos valores varían en un rango de 0 – 1, donde los valores cercanos al 0 representan las soluciones ideales negativas, mientras que los valores cercanos al 1 representan las soluciones ideales positivas.

**Figura 8**

*Malla de muestreo de la cuenca del río locumba*



*Nota.* Esta malla se realizó mediante la herramienta ArcToolBox > Data Management Tools > Sampling > Create Fishnet. Se generó 37171 cuadrículas con el objetivo de poder clasificar mejor las zonas de potencial de agua subterránea.

Para definir los valores de los criterios para cada alternativa, se exportaron los datos geoespaciales desde el software ArcGIS 10.8 y luego se importaron a Microsoft Excel para su procesamiento y análisis.

### 5.3.2. Matriz de Decisión y Normalización

Se construyó una matriz de decisión que incluye todas las alternativas disponibles junto con sus respectivos valores de desempeño en los diez criterios seleccionados inicialmente. Según el método TOPSIS, esta matriz se representa con alternativas en las filas y criterios en las columnas, como se ilustra en la tabla 28.

**Tabla 31**

*Matriz de decisión*

N	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
1	26,000	5,000	1,000	3,072	3,569	7,892	2,682	1,258	3,067	1,000
2	26,000	5,000	1,000	3,000	5,000	10,000	3,833	1,000	3,000	1,000
3	26,000	5,000	1,000	4,178	4,776	9,778	3,169	2,966	3,000	1,000
4	26,000	5,000	1,000	2,918	3,440	8,165	2,929	2,022	3,047	1,000
5	26,000	5,000	1,000	3,683	4,217	10,000	3,158	1,193	3,000	1,000
6	26,000	5,000	1,000	3,000	5,000	10,000	2,600	1,000	3,000	1,000
7	26,000	5,000	1,000	4,083	4,900	9,571	2,520	1,865	3,227	1,000
8	26,000	5,000	1,000	3,440	3,912	7,160	3,066	2,000	3,107	1,000
9	26,000	5,000	1,000	3,440	3,896	9,840	3,027	1,187	3,006	1,000
10	26,000	5,000	1,000	3,556	3,375	10,350	3,211	1,125	3,000	1,000
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
37162	6,020	5,000	5,000	2,956	2,604	1,000	3,254	2,517	3,537	2,000
37163	8,260	3,924	5,000	2,453	2,522	1,000	2,952	1,777	3,449	2,000
37164	3,000	3,000	5,000	2,551	2,036	1,000	3,119	1,000	3,096	2,000
37165	3,000	3,000	5,000	3,500	2,370	1,000	3,528	1,000	3,038	2,000
37166	3,000	3,000	5,000	4,333	3,250	1,000	3,857	1,000	3,000	2,000

37167	3,000	3,000	5,000	4,500	3,250	1,000	3,700	1,000	3,000	2,000
37168	3,000	5,000	5,000	4,500	4,500	1,000	2,833	3,000	4,000	2,000
37169	5,000	3,000	5,000	4,400	3,000	1,000	3,125	3,000	3,000	2,000
37170	3,000	3,000	5,000	4,500	3,000	1,000	2,500	1,000	3,500	2,000
37171	26,000	3,000	5,000	4,500	3,000	1,000	3,000	1,000	3,500	2,000

*Nota.* En la tabla, se presentan los 10 primeros y 10 últimos datos de un total de 37171 datos en total. Donde C1 criterio litología, C2 criterio permeabilidad, C3 criterio precipitación, C4 criterio SPI, C5 criterio pendiente, C6 criterio geomorfología, C7 criterio TRI, C8 criterio LUCL, C9 criterio NDVI y C10 criterio tipo de suelo.

Seguidamente, se realizó el cálculo de suma de cuadrados de los diez criterios que se muestra en la tabla 29. Estos valores se utilizaron para la normalización de la matriz de decisión para cada alternativa en relación con el criterio que se observa en la tabla 30.

**Tabla 32**

*Suma de cuadrados*

Criterios	$\sum_{i=1}^m a_{ij}^2$
C1	10472108,794
C2	607447,154
C3	302152,884
C4	316163,191
C5	371201,203
C6	2519180,047
C7	333779,196
C8	204243,198
C9	428601,160
C10	483914,693

*Nota.*  $i$  es el criterio,  $m$  es la alternativa y  $a_{ij}$  representa la matriz de decisión de la tabla 28.

**Tabla 33***Normalización de la matriz de decisión*

N	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
1	0,008034	0,001545	0,000309	0,000949	0,001103	0,002439	0,000829	0,000389	0,000948	0,000309
2	0,008034	0,001545	0,000309	0,000927	0,001545	0,003090	0,001185	0,000309	0,000927	0,000309
3	0,008034	0,001545	0,000309	0,001291	0,001476	0,003022	0,000979	0,000916	0,000927	0,000309
4	0,008034	0,001545	0,000309	0,000902	0,001063	0,002523	0,000905	0,000625	0,000942	0,000309
5	0,008034	0,001545	0,000309	0,001138	0,001303	0,003090	0,000976	0,000369	0,000927	0,000309
6	0,008034	0,001545	0,000309	0,000927	0,001545	0,003090	0,000803	0,000309	0,000927	0,000309
7	0,008034	0,001545	0,000309	0,001262	0,001514	0,002958	0,000779	0,000576	0,000997	0,000309
8	0,008034	0,001545	0,000309	0,001063	0,001209	0,002212	0,000947	0,000618	0,000960	0,000309
9	0,008034	0,001545	0,000309	0,001063	0,001204	0,003041	0,000936	0,000367	0,000929	0,000309
10	0,008034	0,001545	0,000309	0,001099	0,001043	0,003198	0,000992	0,000348	0,000927	0,000309
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
37162	0,00186	0,00155	0,00155	0,00091	0,00080	0,00031	0,00101	0,00078	0,00109	0,00062
37163	0,00255	0,00121	0,00155	0,00076	0,00078	0,00031	0,00091	0,00055	0,00107	0,00062
37164	0,00093	0,00093	0,00155	0,00079	0,00063	0,00031	0,00096	0,00031	0,00096	0,00062
37165	0,00093	0,00093	0,00155	0,00108	0,00073	0,00031	0,00109	0,00031	0,00094	0,00062
37166	0,00093	0,00093	0,00155	0,00134	0,00100	0,00031	0,00119	0,00031	0,00093	0,00062
37167	0,00093	0,00093	0,00155	0,00139	0,00100	0,00031	0,00114	0,00031	0,00093	0,00062
37168	0,00093	0,00155	0,00155	0,00139	0,00139	0,00031	0,00088	0,00093	0,00124	0,00062
37169	0,00155	0,00093	0,00155	0,00136	0,00093	0,00031	0,00097	0,00093	0,00093	0,00062
37170	0,00093	0,00093	0,00155	0,00139	0,00093	0,00031	0,00077	0,00031	0,00108	0,00062
37171	0,00803	0,00093	0,00155	0,00139	0,00093	0,00031	0,00093	0,00031	0,00108	0,00062

*Nota.* En la tabla, presenta los 10 primeros y 10 últimos datos de un total de 37171 datos en total.

### 5.3.3. Matriz Normalizada Ponderada

Se determina las ponderaciones de los criterios para cada alternativa como se muestra en la tabla 31, realizando una multiplicación de los pesos globales (PG) obtenidos en el anterior método Fuzzy AHP.

**Tabla 34**

*Matriz normalizada ponderada*

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
PG	0,11	0,22	0,31	0,03	0,12	0,07	0,02	0,02	0,06	0,03
N	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
1	0,000884	0,000294	0,000068	0,000047	0,000187	0,000293	0,000025	0,000008	0,000057	0,000009
2	0,000884	0,000294	0,000068	0,000046	0,000263	0,000371	0,000036	0,000006	0,000056	0,000009
3	0,000884	0,000294	0,000068	0,000065	0,000251	0,000363	0,000029	0,000018	0,000056	0,000009
4	0,000884	0,000294	0,000068	0,000045	0,000181	0,000303	0,000027	0,000012	0,000057	0,000009
5	0,000884	0,000294	0,000068	0,000057	0,000222	0,000371	0,000029	0,000007	0,000056	0,000009
6	0,000884	0,000294	0,000068	0,000046	0,000263	0,000371	0,000024	0,000006	0,000056	0,000009
7	0,000884	0,000294	0,000068	0,000063	0,000257	0,000355	0,000023	0,000012	0,000060	0,000009
8	0,000884	0,000294	0,000068	0,000053	0,000206	0,000265	0,000028	0,000012	0,000058	0,000009
9	0,000884	0,000294	0,000068	0,000053	0,000205	0,000365	0,000028	0,000007	0,000056	0,000009
10	0,000884	0,000294	0,000068	0,000055	0,000177	0,000384	0,000030	0,000007	0,000056	0,000009
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
37162	0,00020	0,00029	0,00034	0,00005	0,00014	0,00004	0,00003	0,00002	0,00007	0,00002
37163	0,00028	0,00023	0,00034	0,00004	0,00013	0,00004	0,00003	0,00001	0,00006	0,00002
37164	0,00010	0,00018	0,00034	0,00004	0,00011	0,00004	0,00003	0,00001	0,00006	0,00002
37165	0,00010	0,00018	0,00034	0,00005	0,00012	0,00004	0,00003	0,00001	0,00006	0,00002
37166	0,00010	0,00018	0,00034	0,00007	0,00017	0,00004	0,00004	0,00001	0,00006	0,00002
37167	0,00010	0,00018	0,00034	0,00007	0,00017	0,00004	0,00003	0,00001	0,00006	0,00002
37168	0,00010	0,00029	0,00034	0,00007	0,00024	0,00004	0,00003	0,00002	0,00007	0,00002

37169	0,00017	0,00018	0,00034	0,00007	0,00016	0,00004	0,00003	0,00002	0,00006	0,00002
37170	0,00010	0,00018	0,00034	0,00007	0,00016	0,00004	0,00002	0,00001	0,00006	0,00002
37171	0,00088	0,00018	0,00034	0,00007	0,00016	0,00004	0,00003	0,00001	0,00006	0,00002

*Nota.* En la tabla, se presenta los 10 primeros y 10 últimos datos de un total de 37171 datos en total.

#### 5.3.4. Coeficiente de Cercanía

Se calcula la solución ideal positiva (V+) que representa la mejor solución posible y la solución ideal negativa (V-) que representa la peor solución posible en el método TOPSIS, sirviendo como puntos de referencia para evaluar y comparar las alternativas presentes en la investigación. Los valores obtenidos se visualizan en la tabla 32.

**Tabla 35**

*Soluciones ideales positivas y negativas*

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
V+	0,000034	0,000059	0,000068	0,000028	0,000053	0,000037	0,000009	0,000006	0,000020	0,000009
V-	0,000884	0,000294	0,000340	0,000077	0,000263	0,000445	0,000046	0,000031	0,000093	0,000046

*Nota.* La tabla presenta el máximo y mínimo del criterio en relación con las 37171 alternativas.

Posteriormente, se calculan las distancias euclidianas entre cada alternativa y soluciones ideales positivas (Si+) y negativas (Si-). Finalmente, se determina el coeficiente de cercanía (CCi) este parámetro varía entre 0 – 1, donde el valor más alto indica una alternativa más adecuada, los resultados se muestran en la tabla 33.

La clasificación de los resultados es un paso crucial en la investigación; las alternativas se ordenan de acuerdo a su CCi de mayor a menor. El orden de clasificación representa la secuencia

óptima para la ubicación de las zonas de potencial de agua subterránea, basándose en los criterios definidos para la aplicación del método TOPSIS.

**Tabla 36**

*Distancias euclidianas y coeficiente de cercanía*

N	Si +	Si -	CCi
1	0,000929	0,000328	0,260758
2	0,000967	0,000290	0,230474
3	0,000962	0,000290	0,231746
4	0,000931	0,000325	0,258534
5	0,000959	0,000292	0,233289
6	0,000967	0,000290	0,230918
7	0,000961	0,000293	0,233459
8	0,000925	0,000337	0,266826
9	0,000954	0,000297	0,237130
10	0,000957	0,000298	0,237767
...			
37162	0,00041	0,00080	0,66216
37163	0,00042	0,00074	0,64158
37164	0,00031	0,00091	0,74378
37165	0,00032	0,00090	0,74031
37166	0,00033	0,00090	0,72996
37167	0,00033	0,00090	0,72984
37168	0,00042	0,00088	0,68004
37169	0,00035	0,00084	0,70708
37170	0,00033	0,00090	0,73250
37171	0,00091	0,00044	0,32643

*Nota.* En la tabla presenta los 10 primeros y 10 últimos datos de un total de 37171 datos en total.

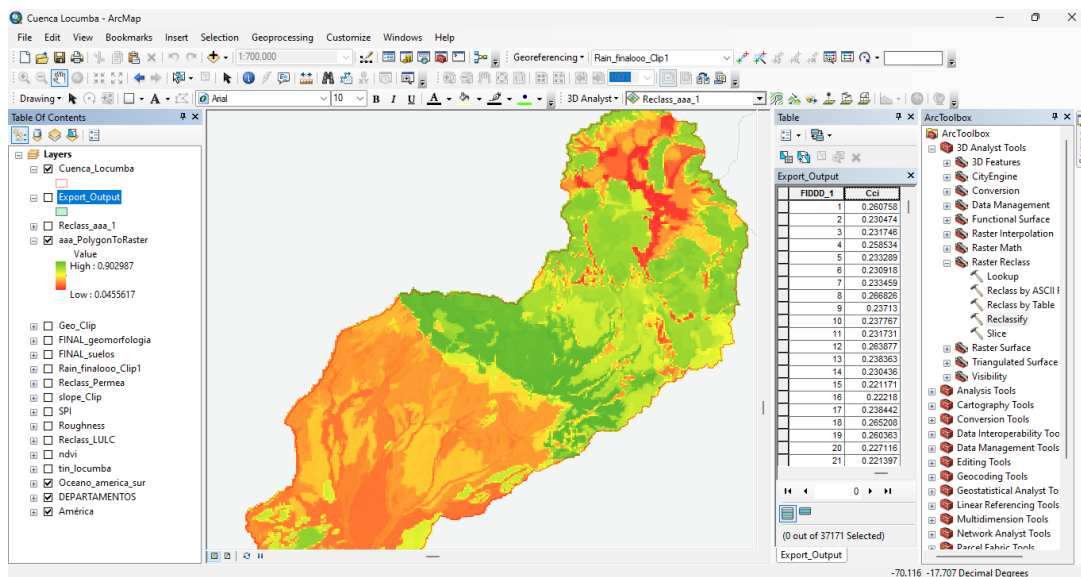
### 5.3.5. Análisis

Los resultados obtenidos mediante el método TOPSIS se importaron al software ArcGIS 10.8 para asignar una coloración específica a cada alternativa, facilitando así la visualización de las zonas con mayor potencial de agua subterránea en toda la cuenca del río Locumba, esta clasificación se observa en la figura 9.

También se utilizó la herramienta Reclassify del software ArcGIS 10.8 como se muestra en la figura 10, para categorizar los resultados en cinco categorías: muy favorable, favorable, moderada, baja y muy baja según los datos presentados en la tabla 37. Esta categorización permite una interpretación más clara y detallada de los datos, destacando las áreas prioritarias para la recarga hídrica.

## Figura 9

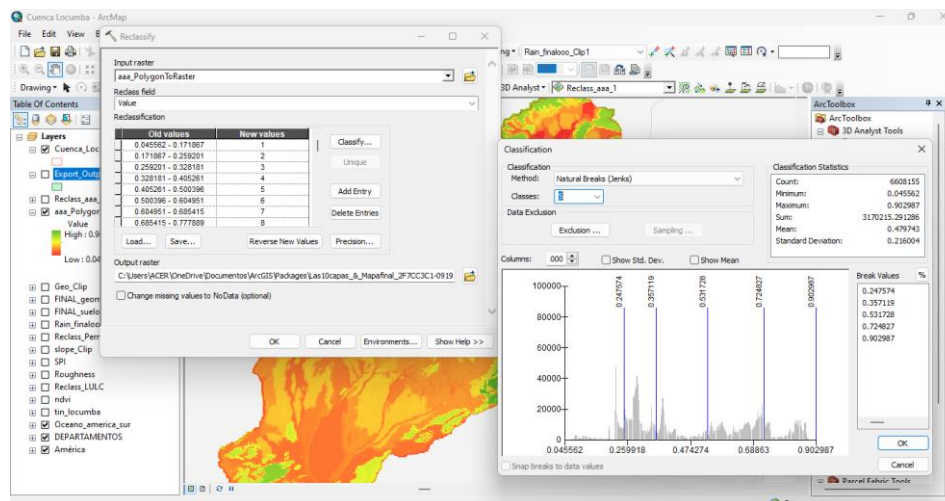
### Resultados de coeficiente de cercanía en el software ArcGIS



*Nota.* Se muestra los valores de CCi en el Open Attribute Table según su respectiva alternativa.

Figura 10

Herramienta Reclassify en el software ArcGIS



Nota. Se utilizó la herramienta ArcToolBox > Raster Reclass > Reclassify para categorizar la cuenca del río Locumba.

Tabla 37

Clasificación de las zonas de la cuenca del río Locumba

Categorías	CCi	Porcentaje
Muy favorable	0,90 – 0,72	13 %
Favorable	0,72 – 0,53	28 %
Moderada	0,53 – 0,35	15 %
Baja	0,35 – 0,24	28 %
Muy bajas	0,24 – 0,04	16%

Nota. El resultado arroja un total de 13 % para zonas muy favorables, un 28 % para zonas favorables, un 15 % para zonas medias, 28 % para zonas bajas y 16 % para zonas muy bajas.

## **CAPÍTULO VI**

### **RESULTADOS**

#### **6.1. RESULTADOS DE LA HIPÓTESIS ESPECÍFICA 1**

Para evaluar la hipótesis 1, mediante el estudio del modelo Fuzzy AHP-TOPSIS, se aplicó el algoritmo para identificar el potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba, Tacna. El método multicriterio Fuzzy AHP permitió descomponer el problema en una jerarquía de criterios y subcriterios, facilitando la asignación de pesos relativos a cada factor que influye en el potencial de agua subterránea, tales como litología, permeabilidad, precipitación, índice de potencia de corriente (SPI), pendiente, geomorfología, índice de rugosidad topográfica (TRI), uso de suelo y cobertura de suelo (LUCL), índice de vegetación diferenciada normalizada y tipo de suelo. Posteriormente, el método TOPSIS se empleó para clasificar las zonas de potencial de agua subterránea, calculando el coeficiente de cercanía (CCi). Los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo Fuzzy AHP-TOPSIS demostraron que es posible identificar las zonas de mayor potencial hídrico, validando así la hipótesis específica 1.

#### **6.2. RESULTADOS DE LA HIPÓTESIS ESPECÍFICA 2**

El modelo Fuzzy AHP - TOPSIS permitió identificar los criterios que influyen en el potencial de agua subterránea. Los criterios utilizados para la aplicación de este modelo fueron: litología, permeabilidad, precipitación, índice de potencia de corriente (SPI), pendiente, geomorfología, índice de rugosidad topográfica (TRI), uso de suelo y cobertura de suelo (LUCL), índice de vegetación diferenciada normalizada (NDVI) y suelo.

El análisis del método multicriterio Fuzzy AHP identificó que la precipitación y la permeabilidad son los factores más influyentes, con pesos de ponderación 31,24 % y 22,44 %, respectivamente.

respectivamente. Estos factores están estrechamente relacionados con las características hidrogeológicas de la cuenca y su capacidad para almacenar y transmitir agua subterránea. Mientras, el índice de rugosidad topográfica (TRI) tuvo el menor peso, con un 1,78 %, indicando una influencia menos significativa en el potencial de recarga hídrica, como se muestra en la Tabla 30. Se identificaron los pesos ponderados de los criterios más influyentes para determinar el potencial de agua subterránea, con lo cual se valida la hipótesis específica 2.

### **6.3. RESULTADOS DE LA HIPÓTESIS ESPECÍFICA 3**

Con los pesos y valores obtenidos a través del modelo Fuzzy AHP-TOPSIS, se realizó el mapa de zonificación de potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba. Este mapa es una herramienta visual que facilita la identificación de las áreas con mayor potencial para la recarga de hídrica.

Utilizando los valores de coeficiente de cercanía (CCi) obtenidos del análisis del método TOPSIS, se generó una clasificación de las zonas de la cuenca en cinco categorías: muy alta (0,90 – 0,72), alta (0,72 – 0,53), moderada (0,53 – 0,35), baja (0,35 – 0,24) y muy baja (0,24 – 0,04). Las áreas con valores de CCi cercanos a 1 fueron identificadas como las más adecuadas para la recarga de agua subterránea. Con el mapa de la figura 11, se valida la hipótesis específica 3.

### **6.4. RESULTADOS DE LA HIPÓTESIS GENERAL**

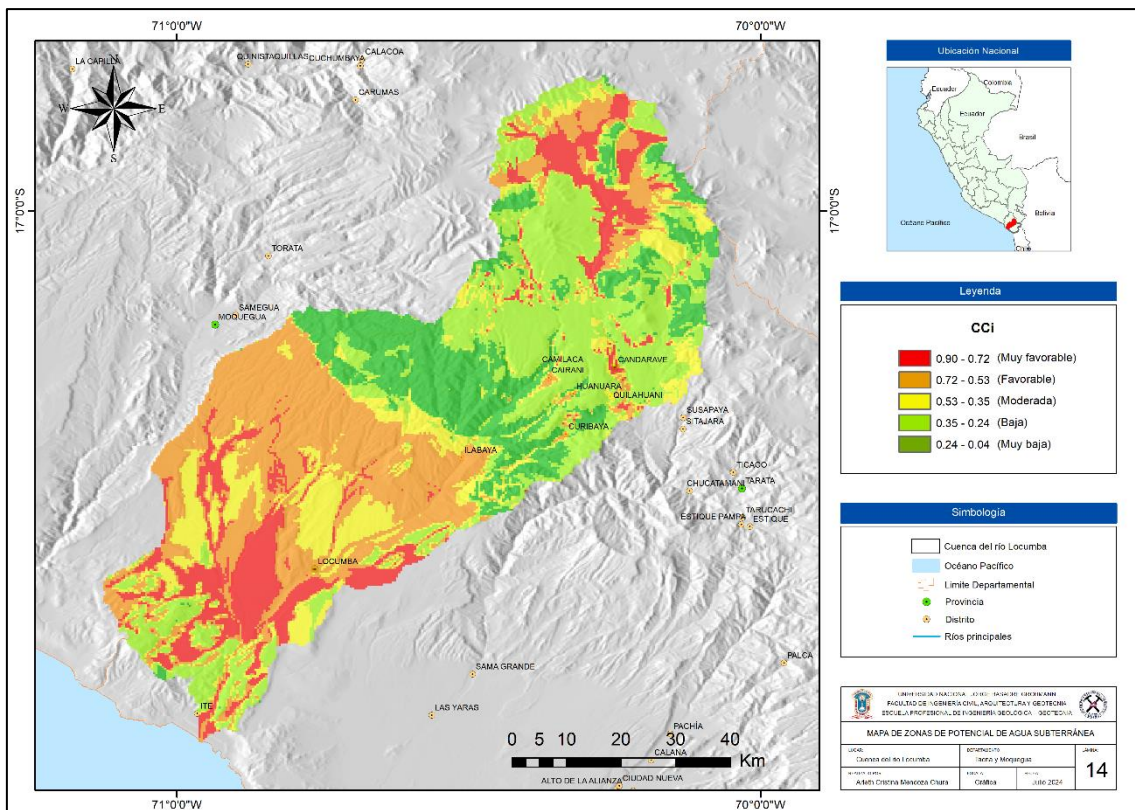
La investigación demostró que existe un potencial amplio de recarga de acuífero en la cuenca Locumba, a pesar de sus características áridas que presenta esta zona tiene la capacidad de almacenar agua subterránea gracias a sus características permeables y altas precipitaciones en la cabecera de la cuenca. La combinación de las metodologías Fuzzy AHP y TOPSIS resultó

exitosa, demostrando que la optimización de métodos primarios puede ser alcanzada por enfoques matemáticos y la combinación de dos metodologías especializadas en la toma de decisiones.

Mediante el método TOPSIS, se pudo clasificar la zona de estudio, como se muestra en la figura 11. El resultado obtenido es 13 % para zonas muy favorables, un 28 % para zonas favorables, un 15% para zonas medias, 28 % para zonas bajas y 16 % para zonas muy bajas como se muestra en la tabla 37. El propósito de este resultado busca impulsar a los conocimientos de la problemática que encuentran los pobladores de la cuenca Locumba, al igual que ser de apoyo para una mejor toma de decisiones para el gestionamiento sostenible del agua subterránea.

**Figura 11**

*Mapa de potencial de agua subterránea*



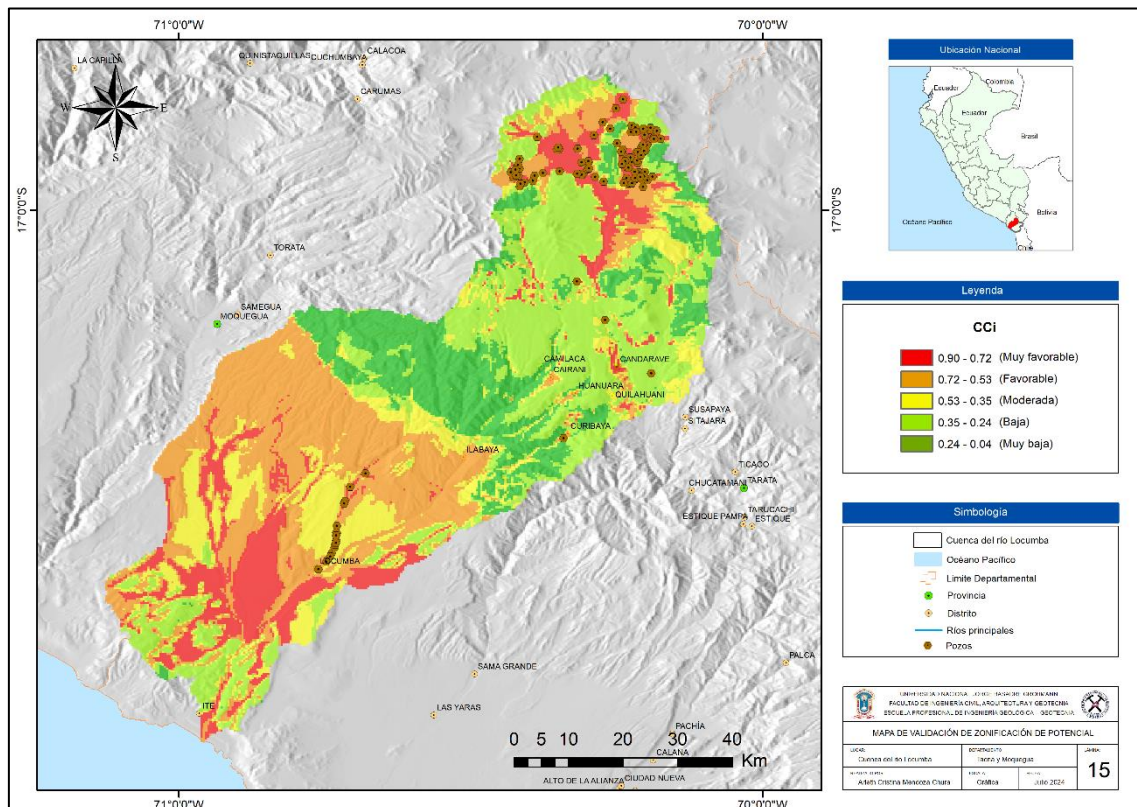
*Nota.* En la figura, se observa las zonas más potenciales de agua subterránea en la cuenca del río Locumba, mediante la integración del modelo Fuzzy AHP – TOPSIS. Para una visualización más detallada, este mapa se incluye en el anexo XVI.

### **6.5. VALIDACIÓN DE RESULTADOS**

La etapa de validación es esencial para confirmar la precisión del modelo generado. El mapa zonas de potencial de agua subterránea fue validado mediante análisis de correlación, utilizando los datos de pozos de agua existentes en la cuenca del río Locumba. Los datos utilizados fueron obtenidos de la base de datos de acceso público de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), en el anexo XV, se adjuntó la información sobre los pozos utilizados. De tal forma, se ubicaron estos datos en el mapa de zonas potenciales, tal como se muestra en la figura 12.

**Figura 12**

*Mapa de zonas de potencial de agua subterránea y pozos existentes*



*Nota.* En el mapa, se puede identificar las zonas de potencial de aguas subterráneas más favorables de color rojo y también los pozos existentes en esta zona, lo que valida la integración del modelo Fuzzy AHP - TOPSIS. Para una visualización más detallada, este mapa se incluye en el anexo XVII.

## CONCLUSIONES

- La integración del modelo Fuzzy AHP-TOPSIS en la cuenca del río Locumba, Tacna, ha permitido determinar con precisión las zonas de mayor y menor potencial de agua subterránea. Este enfoque multicriterio ha facilitado la evaluación y jerarquización de diversos criterios hidrológicos, geológicos y ambientales.
- El estudio ha demostrado que aplicando el algoritmo Fuzzy AHP-TOPSIS se identificó el potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba. Mediante la construcción de matrices de comparación por pares y la conversión de estos valores en números difusos, el modelo logró asignar pesos específicos a cada criterio de influencia, con la cual permitió determinar las zonas de potencial de agua subterránea.
- El análisis Fuzzy AHP identificó diez criterios clave que influyen en la recarga de agua subterránea: litología, permeabilidad, precipitación, SPI, pendiente, geomorfología, TRI, LUCL, NDVI y tipo de suelo. La precipitación, con un peso del 31,24 %, y la permeabilidad del suelo, con un 22,44 %, fueron identificadas como los criterios más influyentes. Este enfoque permitió una evaluación precisa y detallada de las zonas con mayor potencial de recarga hídrica.
- El modelo Fuzzy AHP - TOPSIS permitió zonificar el potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba, en cinco zonas: el 13 % se identificó como zonas muy favorables, 28 % para zonas favorables, 15 % para zonas medias, 28 % para zonas bajas y el 16 % para zonas muy bajas. Al comparar estos resultados con los datos en los registros de la ANA, se verificó una coincidencia del 70 %. Este nivel de concordancia respalda la precisión y confiabilidad del modelo, confirmando que el enfoque de multicriterio aplicado es una herramienta sólida para la gestión sostenible de recursos hídricos.

### **RECOMENDACIONES**

- Se recomienda a los futuros tesisistas la aplicación del modelo Fuzzy-AHP-TOPSIS en otras cuencas hidrográficas de la región de Tacna y del Perú, con características y desafíos similares, con el fin de ampliar la base de conocimiento y mejorar la gestión integral de los recursos hídricos subterráneos a nivel nacional.
- Se recomienda a los futuros investigadores que apliquen esta metodología Fuzzy AHP - TOPSIS realizar ensayos de campo para determinar criterios más precisos que ayuden en la optimización de esta metodología aplicada.
- Se recomienda a las autoridades del gobierno y de gestión de recursos hídricos tomen en consideración los resultados de esta investigación y lo validen con sus investigaciones para sus planes y políticas de desarrollo, a fin de garantizar el aprovechamiento sostenible de las aguas subterráneas en la cuenca del río Locumba.

## REFERENCIAS

- Aguero, R. (1997). *Agua potable para poblaciones rurales* (primera edición). Lima-Perú: SER.  
<https://cutt.ly/ETtcnBh>
- Alarcón. (2018). *Aplicación de técnicas de teledetección pasiva para la determinación de aguas subterráneas en la Región Ica en el período 2017-2018*. Universidad Cesar Vallejo.
- Ahmad, N. y Qahmash, A. (2020). Implementing Fuzzy AHP and FUCOM to evaluate critical success factors for sustained academic quality assurance and ABET accreditation. *PLoS One*, 15(9), e0239140–e0239140. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239140>
- Ahmed, F. y Kilic K. (2019). Fuzzy Analytic Hierarchy Process: A performance analysis of various algorithms. *Fuzzy Sets Systems*, 362, 110–128.  
<https://doi.org/10.1016/j.fss.2018.08.009>
- Arocha, S. (1979). *Abastecimiento de agua teoría y diseño* (primera edición). Venezuela.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2021). Informe de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del río Locumba. Autoridad Nacional del Agua.  
<https://www.ana.gob.pe/documentos/informe-gestion-rio-locumba.pdf>
- Avinash, K., Jayappa, K. y Deepika, B. (2011). Prioritization of Sub-Basins Based on Geomorphology and Morphometric Analysis Using Remote Sensing and Geographic Information System (GIS) Techniques. *Geocarto International*, 26, 569–592.
- Ayazi, M., Pirasthe, S., Pili, A., Biswajeet, P., Nikouravan, B. y Mansor, S. B. (2010). Disasters and Risk Reduction in Groundwater: Zagros Mountain Southwest Iran Using Geoinformatics Techniques. *Disaster Advances*, 3, 51–57.

- Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Courier Corporation.  
<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1563983>
- Berumen, S. A., y Llamazares, F. (2007). La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente. *Cuadernos de Administración*, 20(34), 65-87.  
[https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/cuadernos\\_admon/article/view/3376](https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/cuadernos_admon/article/view/3376)
- Chávez, R. (1994). *Hidrología para ingenieros* (primera edición). Fondo Editorial Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Chen, C. (2019). A New Multi-Criteria Assessment Model Combining GRA Techniques with Intuitionistic Fuzzy Entropy-Based TOPSIS Method for Sustainable Building Materials Supplier Selection. *Sustainability*, 11, 2265. <https://doi.org/10.3390/su11082265>
- Chowdary, V., Ramakrishnan, D., Srivastava, Y., Chandran, V. y Jeyaram, A. (2009). Integrated Water Resource Development Plan for Sustainable Management of Mayurakshi Watershed, India Using Remote Sensing and GIS. *Water Resources Management*, 23, 1581–1602. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9356-0>
- Chereque, W. (1989). *Hidrología para estudiantes de Ingeniería Civil*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Repositorio Académico de la PUCP.  
<http://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/28689>
- Cotrina, V., Vargas, V., Concha, O., Sánchez, M., Laureano, P. y Pinto, P. (2024). *Hidrogeología de la cuenca del río Locumba* [Boletín H 2]. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/369>

- Coy, M. (2015). *Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en la subcuenca del río Tzunutz*. [Título profesional, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio Académico de la USAC. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/10736/1/TIGAL-15.pdf>
- Cusquisiban, G. (2019). *Ubicación de zonas de recarga hídrica usando imágenes Landsat 8 mediante el método de árbol de decisiones en la cuenca del río Chamán, Cajamarca y La Libertad-Perú* [Título profesional, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Académico de la UPN. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/23581>
- Custodio, G. (1998). Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evolución y la incertidumbre - Madrid Instituto Tecnológico Geominero de España. *Boletín Geológico y Minero*, 109, 4.
- Darcy, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Dalmont.
- Das, D. (2011). Drainage and Lineament Analysis towards Artificial Recharge of Groundwater. In *Advances in the Research of Aquatic Environment*. Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-20069-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20069-8_4)
- De Reu, J., Bourgeois, J., Bats, M., Zwertvaegher, A., Gelorini, V., De Smedt, P., Chu, W., Antrop, M., De Maeyer, P., Finke, P., Van Meirvenne, M., Verniers, J. y Crombé, P. (2013). Application of the Topographic Position Index to Heterogeneous Landscapes. *Geomorphology*, 186, 39–49.
- De Rosa, P., Fredduzzi, A. y Cencetti, C. (2019). Stream Power Determination in GIS: An Index to Evaluate the Most 'Sensitive' Points of a River. *Water*, 11(6), 1145. <https://doi.org/10.3390/w11061145>

- Díaz, S. (2018). *Análisis multiespectral mediante imágenes satelitales para identificar zonas de recarga hídrica subterránea en la cuenca Jequetepeque* [Título profesional, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Académico de la UNC. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/2243>
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M. y Paris, M. (2002). *Protección de la calidad del agua subterránea guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. Washington: Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial.
- Freeze, R. A. y Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs.  
Retrieved from <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=1894372>
- García, J. A. (2011). *Sistemas de captaciones de agua en manantiales y pequeñas quebradas para la región andina* (primera edición, Vol. 08). Buenos Aires: INTA. <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp>
- Gómez, J., Ramirez, M., y Silva, C. (2022). Evaluación de recursos hídricos subterráneos utilizando análisis multicriterio y lógica difusa. *Revista de Gestión de Recursos Hídricos*, 14(2), 120-135. <https://doi.org/10.1016/j.rgrh.2022.01.005>
- Guzha, A. C., Rufino, M. C., Okoth, S., Jacobs, S. y Nóbrega, R. L. B. (2018). Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: Evidence from East Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15, 49-67.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2006). *Metodología de la Investigación* (Quinta Edición). McGraw Hill, México. 497p. ISBN 968-422-931-3

- Hillel, D. (1980). *Fundamentals of Soil Physics*. Academic Press, New York.  
<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1349190>
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K. P. y Stocker, E. F. (2007). The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), 38-55. <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>
- Hwang, C., y Yoon, K. (1981). *Toma de decisiones sobre atributos múltiples*; Springer: Berlín, Alemania.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2020). Acceso a servicios básicos en el Perú: Condiciones de vida en el Perú. INEI.  
[https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1744/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1744/libro.pdf)
- Jato, D., Castillo, E., Rodríguez, J. y Canteras, J. C. (2014). A Review of Application of Multi-Criteria Decision Making Methods in Construction. *Automation in Construction*, 45, 151-162. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.016>
- Jensen, J. R. (2007). *Remote sensing of the environment: An earth resource perspective* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Jiang, Z., Huete, A., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G. y Zhang, X. (2006). Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 101(3), 366-378. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.003>
- Kidd, C., y Levizzani, V. (2011). Estado de las recuperaciones de precipitación por satélite. *Hidrol. Sistema Tierra. Ciencia.*, 7, 8157–8177. <https://doi.org/10.5194/hessd-8-8157-2010>

- Kwong, C. y Bai, H. (2003). Determining the importance weights for the customer requirements in QFD using a fuzzy AHP with an extent analysis approach. *IIE Transactions*, 35: 619–626.
- León, L. (2016). *Aprovechamiento sostenible de recursos hídricos pluviales en zonas residenciales*. Lima – Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Lerner, D., Issar, A. y Simmers, I. (2009). Groundwater Recharge. International Contributions to Hydrogeology.
- Mardani, A., Jusoh, A., Khalifah, Z., Zakwan, N. y Valipour, A. (2015). Multiple criteria decision-making techniques and their applications - A review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomiska Istraživanja*, 25(1), 516-571. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2015.1075139>
- Maderey, R. (2005). *Principios de hidro geografía: estudio del ciclo hidrológico*. México, DF. Instituto de Geografía de la UNAM.
- Martínez, P., Martínez, P. y Castaño, S. (2006). *Fundamentos de la hidrogeología* (primera edición; M. Prensa, Ed.). Barcelona.
- Matus, O., Faustino, J. y Jiménez, F. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica: Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua*. <https://cenida.una.edu.ni/relectronicos/REN10M433.pdf>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2014). *Guía metodológica para la identificación y caracterización de fuentes de recarga hídrica en microcuencas*. Ministerio del Ambiente del Perú. <https://www.minam.gob.pe>

- Mohamed, R., Ekmekcioğlu, O., Ensar, E. y Özger, E. (2023). Integrated Fuzzy AHP-TOPSIS Model for Assessing Managed Aquifer Recharge Potential in a Hot Dry Region: A Case Study of Djibouti at a Country Scale. *Water*, 15(14), 2534–2534. <https://doi.org/10.3390/w15142534>
- Montaigne, F. y Essick, P. (2002). Water pressure. *National Geographic*, 202(3), 2–33.
- Moore, I., Grayson, R. y Ladson, A. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3–30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- Ndhlovu, G., Woyessa, Y. (2021) Integrated assessment of groundwater potential using geospatial techniques in southern Africa: a case study in the Zambezi River basin. *Water* 13, 2610.
- Nguyen, H.; Nguyen, A.; Ngo, A.; Phan, V.; Nguyen, T.; Do, V.; Dao, D.; Dang, D.; Nguyen, A.; Nguyen, The Kien Nguyen y Hens, L. (2020). A Hybrid Approach Using GIS-Based Fuzzy AHP–TOPSIS Assessing Flood Hazards along the South-Central Coast of Vietnam. *Applied Sciences*, 10(20), 7142. <https://doi.org/10.3390/app10207142>
- Odum, E. y Sarmiento, F. (1998). *Ecología: El puente entre ciencia y Sociedad*. México DF: McGraw-Hill.
- Ordoñez, J. (2011). *Aguas Subterráneas - Acuíferos*. Lima - Perú: Sociedad Geográfica de Lima.
- Pérez, J. L., Nardin, A. G. y Galindo, A. A. (2018). Análisis comparativo de índices de calidad del agua aplicados al río Ranchería, La Guajira-Colombia. *Información Tecnológica*, 29(3), 47-58. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000300047>

- Pettorelli, N., Vik, J., Mysterud, A., Gaillard, J., Tucker, C. y Stenseth, N. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(9), 503-510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Athsha, R. y Venkateswaran, S. (2024). Mapping of Groundwater Potential Zones in the Kuzhithuraiyar Sub Basin of Kodayar River, Kanniyakumari District, Tamilnadu: Using Analytic Hierarchy Process (AHP) and GIS. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 33(1), 178–191. <https://doi.org/10.15421/112417>
- Saaty TL. (2003). Toma de decisiones con el AHP: Por qué es necesario el vector propio principal. *Eur J Ópera Res.* 145: 85–91.
- Scanlon, B., Keese, K., Flint, A., Flint, L., Gaye, C., Edmunds, W. y Simmers, I. (2006). Global Synthesis of Groundwater Recharge in Semiarid and Arid Regions. *Hydrological Processes*, 20, 3335–3370.
- Stanujkic, D., Magdalinovic, N., Milanovic, D., Magdalinovic S. y Popovic, G. (2014). "An Efficient and Simple Multiple Criteria Model for a Grinding Circuit Selection Based on MOORA Method," *Informatica*, vol. 25, no. 1, pp. 73-93.
- Story Map Journal. (2024). *Atlas Nacional Interactivo de Argentina, Hidrografía – Aguas subterráneas y aguas superficiales*. ANIDA. <https://ide.ign.gob.ar/portal/apps/MapJournal/index.html?appid=7cc4ba9c758148f9b6176eb9cc2d79f2>
- Rivera, H. (2011). *Geología general* (tercera edición). Lima: Megabyte.
- Saaty, T. L. (1980). El proceso analítico jerárquico: planificación, establecimiento de prioridades, asignación de recursos. McGraw-Hill, Inc., Nueva York, NY.

- Sheffield, J., Wood, E. F., Pan, M., Beck, H., Coccia, G., A. Serrat-Capdevila y K. Verbist. (2018). Satellite Remote Sensing for Water Resources Management: Potential for Supporting Sustainable Development in Data-Poor Regions. *Water Resources Research*, 54(12), 9724–9758. <https://doi.org/10.1029/2017wr022437>
- Shekhar, S. y Pandey, A. C. (2015). Delineation of Groundwater Potential Zone in Hard Rock Terrain of India Using Remote Sensing, 15 Geographical Information System (GIS) and Analytic Hierarchy Process (AHP) Techniques. *Geocarto International*, 30, 402–421. <https://doi.org/10.1080/10106049.2014.894584>
- Shrestha, R. y Sthapit, A. (2016). Temporal Variation of Rainfall in the Bagmati River Basin, Nepal. *Nepal Journal of Science and Technology*, 16, 31–40.
- Sorenson, C., Guzman, J., Moriasi, D., Steiner, J., Starks, P. y Heilman, P. (2018). Evaluación del modelo APEX para modelar la calidad del agua en una cuenca dominada por pastos en las Grandes Llanuras del Sur. *Revista de la Asociación Estadounidense de Recursos Hídricos*, 54(3), 634-651.
- Strahler, A. (1964). Part II. Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. *Handbook of Applied Hydrology*, 4–39.
- Tehrany, M., Pradhan, B. y Jebur, M. (2014). Flood Susceptibility Mapping Using a Novel Ensemble Weights-of-Evidence and Support Vector Machine Models in GIS. *Journal of Hydrology*, 512, 332–343.
- Teves, B. (2016). *Estudio fisicoquímico de la calidad del agua del río Cakra, región Lima*. [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Digital de Tesis y Trabajos de Investigación PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/6797>

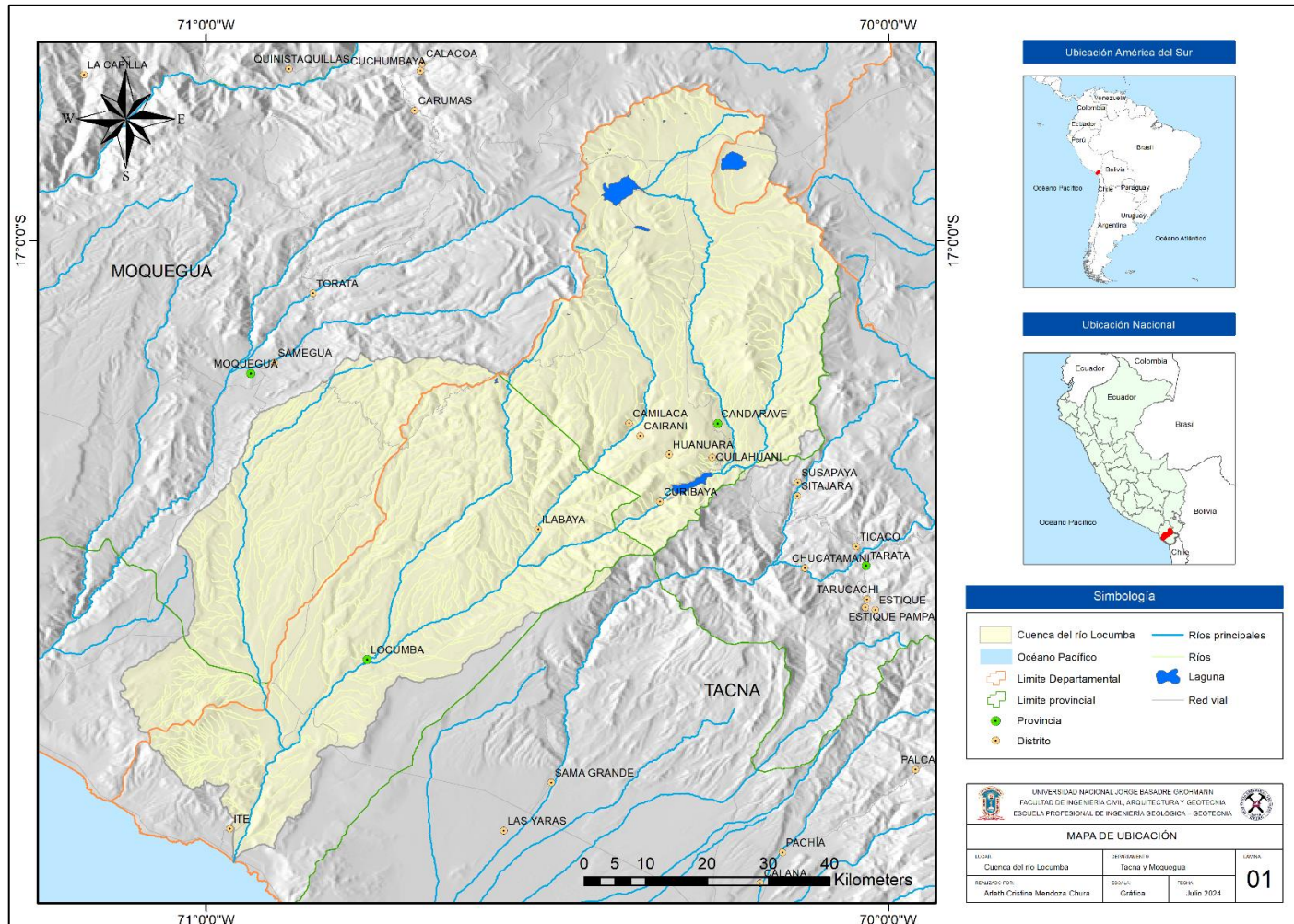
- Trenberth, K., Smith, L., Qian, T., Dai, A. y Fasullo, J. (2007). Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data. *Journal of Hydrometeorology*, 8(4), 758-769. <https://doi.org/10.1175/JHM600.1>
- UNESCO. (2019). The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind. UNESCO Publishing. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367306>
- Wheater, H., Mathias, S. y Li, X. (2010). *Groundwater Modelling in Arid and Semi-Arid Areas*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511777843>
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338–353.

# **ANEXOS**

ANEXO I. *Matriz de consistencia*

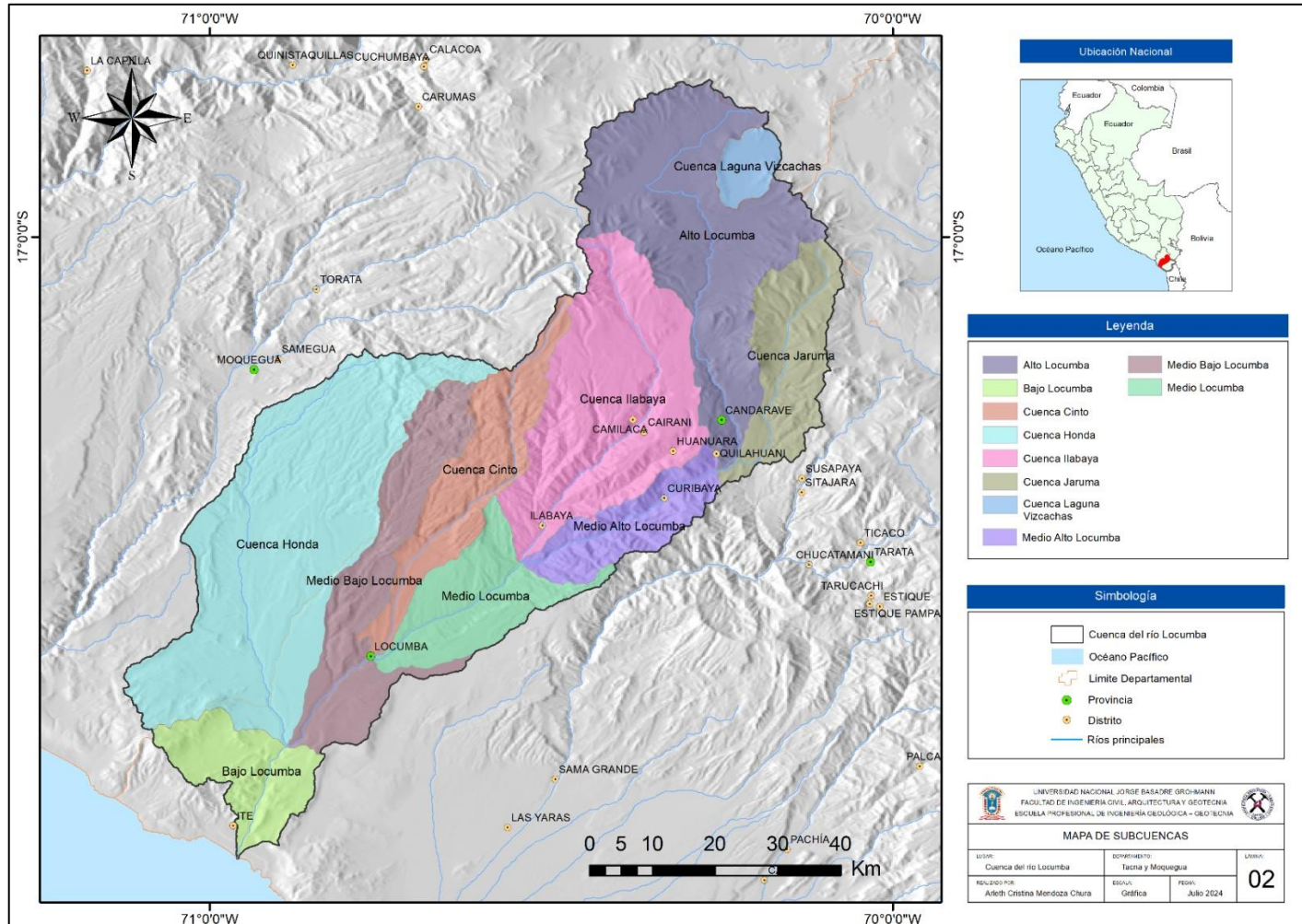
Definición del problema	Objetivos	Hipótesis	Variables e Indicadores	Metodología
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable independiente:	Tipo de investigación:
¿Cómo evaluar el potencial de agua subterránea, mediante la integración del modelo Fuzzy-AHP-TOPSIS, en la cuenca del río Locumba, Tacna?	Determinar las zonas de potencial de agua subterránea mediante la integración del modelo difuso Fuzzy AHP-TOPSIS, en la cuenca del río Locumba, Tacna.	Mediante la integración y aplicación de la técnica Fuzzy-AHP-TOPSIS, se identificará de manera precisa las zonas con potencial de agua subterránea, en la cuenca del río Locumba, Tacna.	Integración de la técnica Fuzzy-AHP-TOPSIS  Indicadores de la V.I:  -Proceso de jerarquía analítica difusa (AHP) -Técnica para la ordenación de preferencias por similitud a la solución ideal (TOPSIS)	- Aplicada  Nivel de investigación:  - Predictivo
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable dependiente:	Método:
- ¿Cuál es el algoritmo de modelo Fuzzy AHP -TOPSIS que permite identificar el potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba?	- Aplicar el algoritmo de modelo Fuzzy AHP -TOPSIS que permite identificar el potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba.	- Mediante el estudio del modelo Fuzzy AHP -TOPSIS se puede aplicar su algoritmo para identificar el potencial de agua subterránea.	Zonas con potencial de agua subterránea.	- Inductivo  - Descriptivo  - Experimental
- ¿Qué criterios influyen de manera significativa en la recarga de agua subterránea en la cuenca del río Locumba?	- Identificar los criterios influyentes en la recarga de agua subterránea en la cuenca del río Locumba.	- Por medio del estudio de agua subterránea y la cuenca del río Locumba se identificará los criterios que influyen en el potencial de agua subterránea.	Indicadores de la V.D:  - Litología - Geomorfología - Tipo de suelo - Permeabilidad - Precipitación - Pendiente - Índice de Rugosidad Topográfica (TRI)	Población:  La población está representada por toda la extensión de la cuenca del río Locumba.
- ¿Cómo zonificar el potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba?	- Zonificar el potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba.	- Una vez identificado el potencial de agua se podrá realizar un mapa de zonificación de recarga hídrica en la cuenca.	- Uso del suelo y cobertura del suelo (LULC) - Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) - Índice de Potencia de Corriente (SPI)	Muestra:  La muestra de esta investigación está representada por el área del acuífero.

ANEXO II. Mapa de ubicación de la cuenca del río Locumba



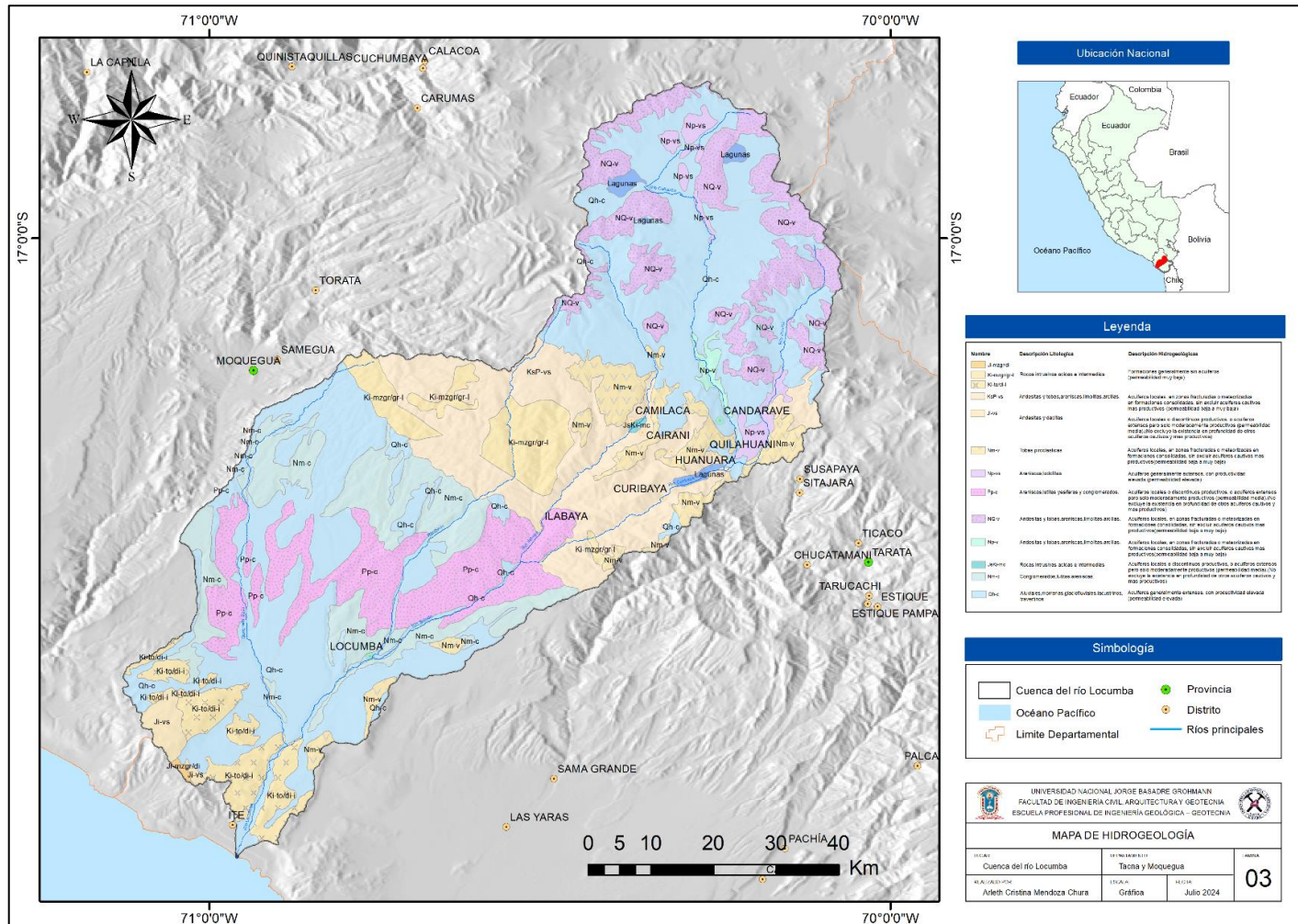
Nota. El mapa fue elaborado con datos proporcionados por INGEMMET.

ANEXO III. Mapa de subcuencas de la cuenca del río Locumba



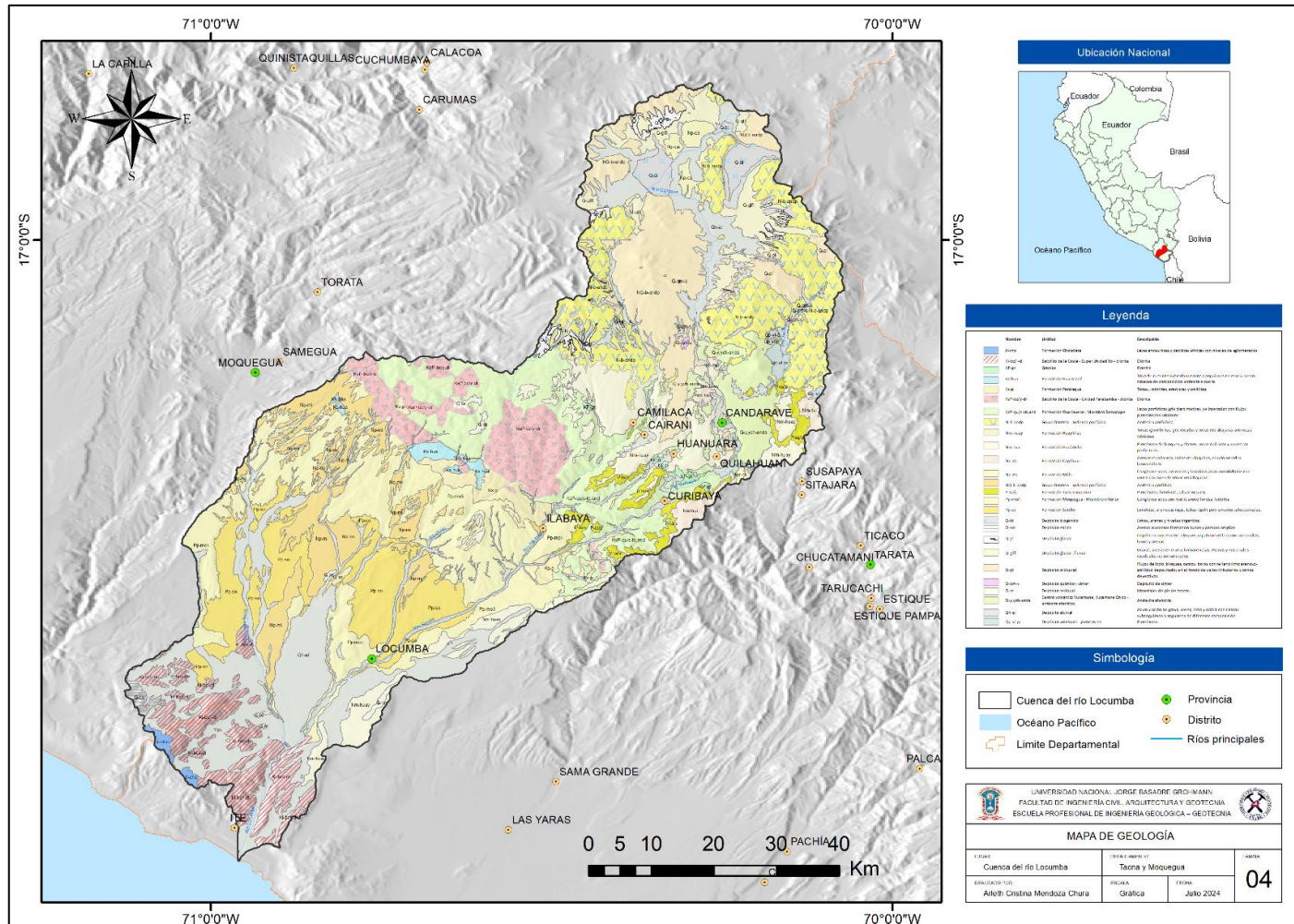
Nota. El mapa fue elaborado con datos proporcionados por INGEMMET.

ANEXO IV. Mapa de hidrogeología de la cuenca del río Locumba



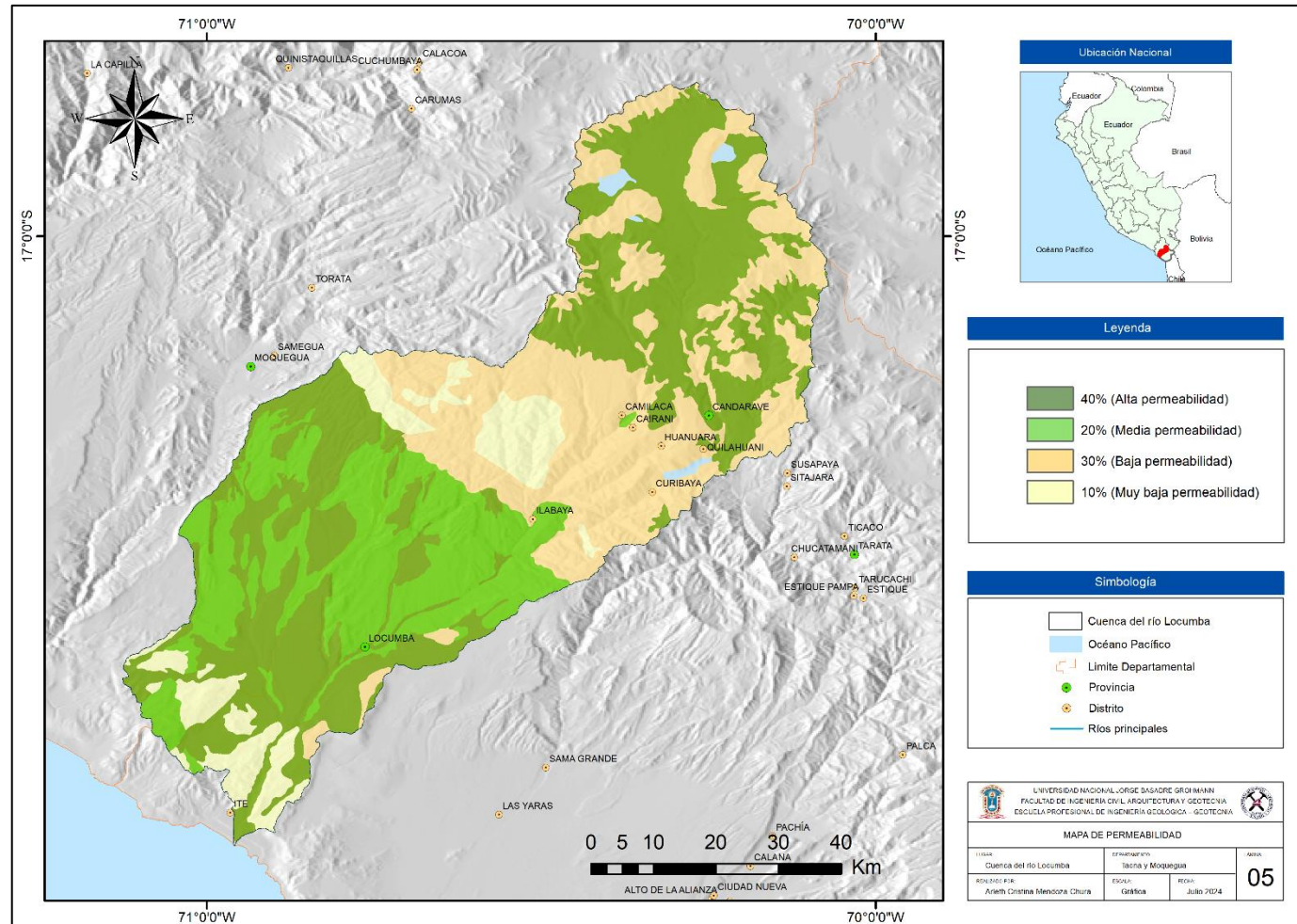
Nota. El mapa fue elaborado con datos proporcionados por INGENMET.

ANEXO V. Mapa de geología en la cuenca del río Locumba



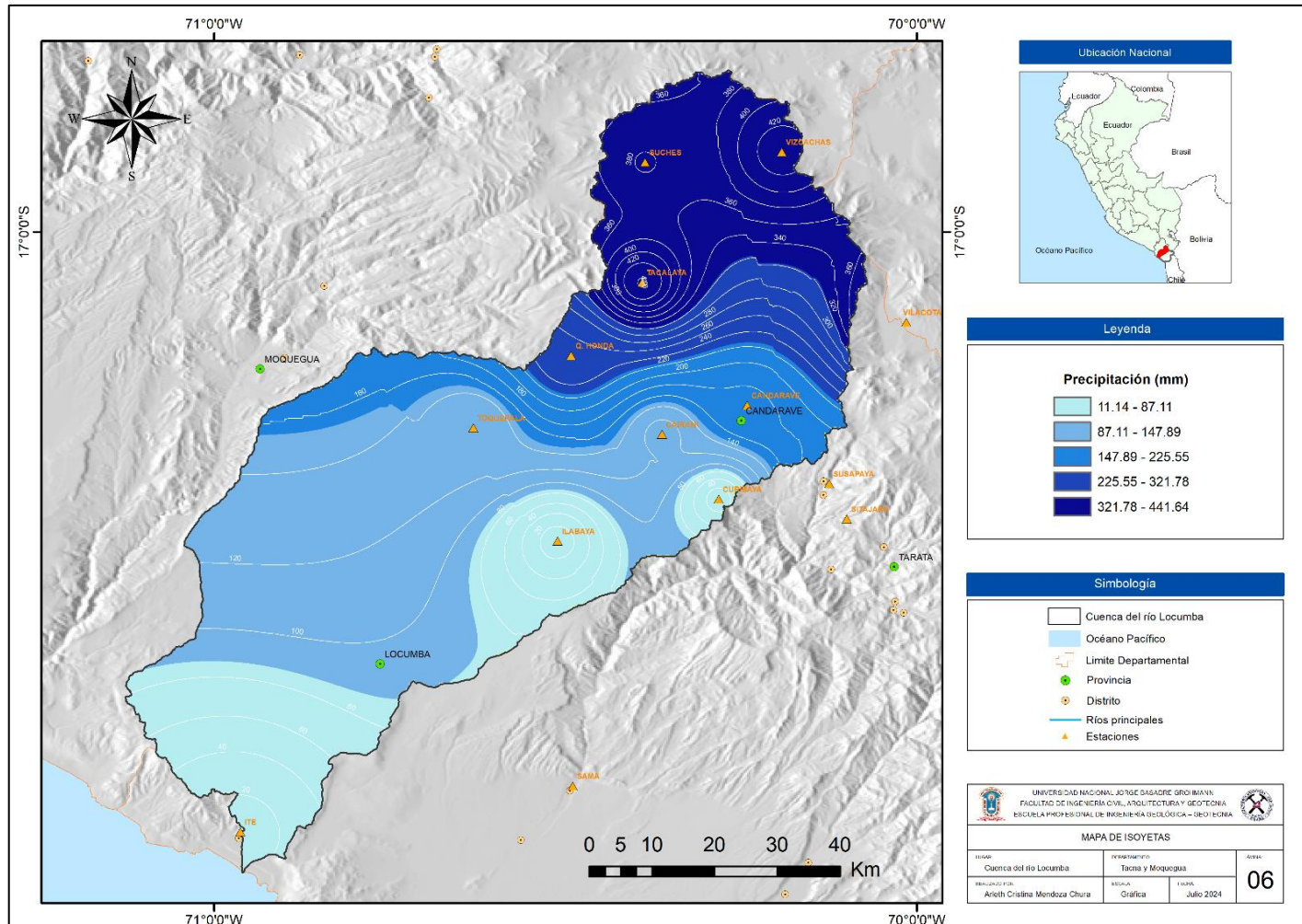
Nota. El mapa fue elaborado con datos proporcionados por INGEMMET.

ANEXO VI. Mapa de permeabilidad en la cuenca del río Locumba



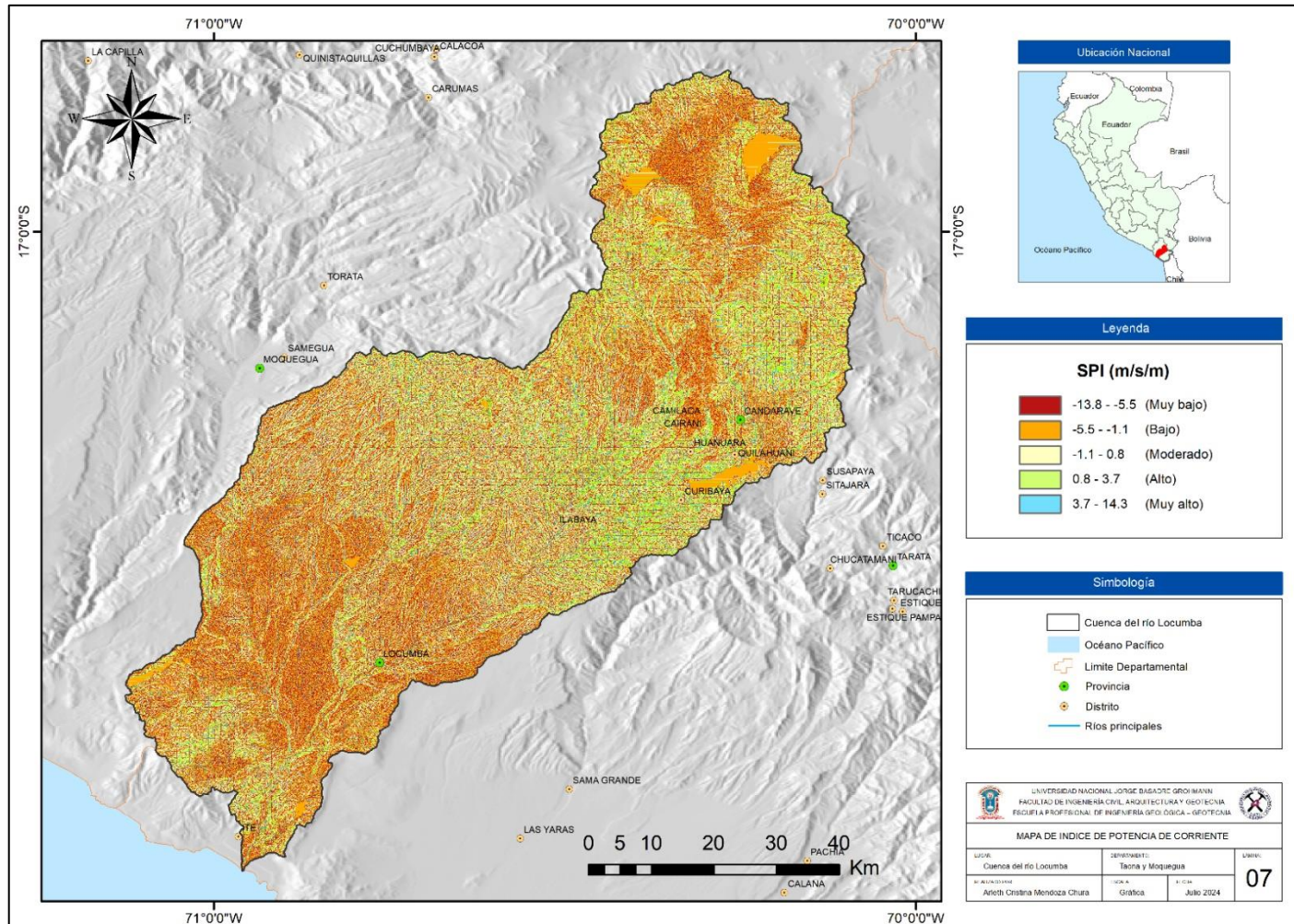
Nota. El mapa fue elaborado con datos proporcionados por ANA.

ANEXO VII. Mapa de isoyetas en la cuenca del río Locumba



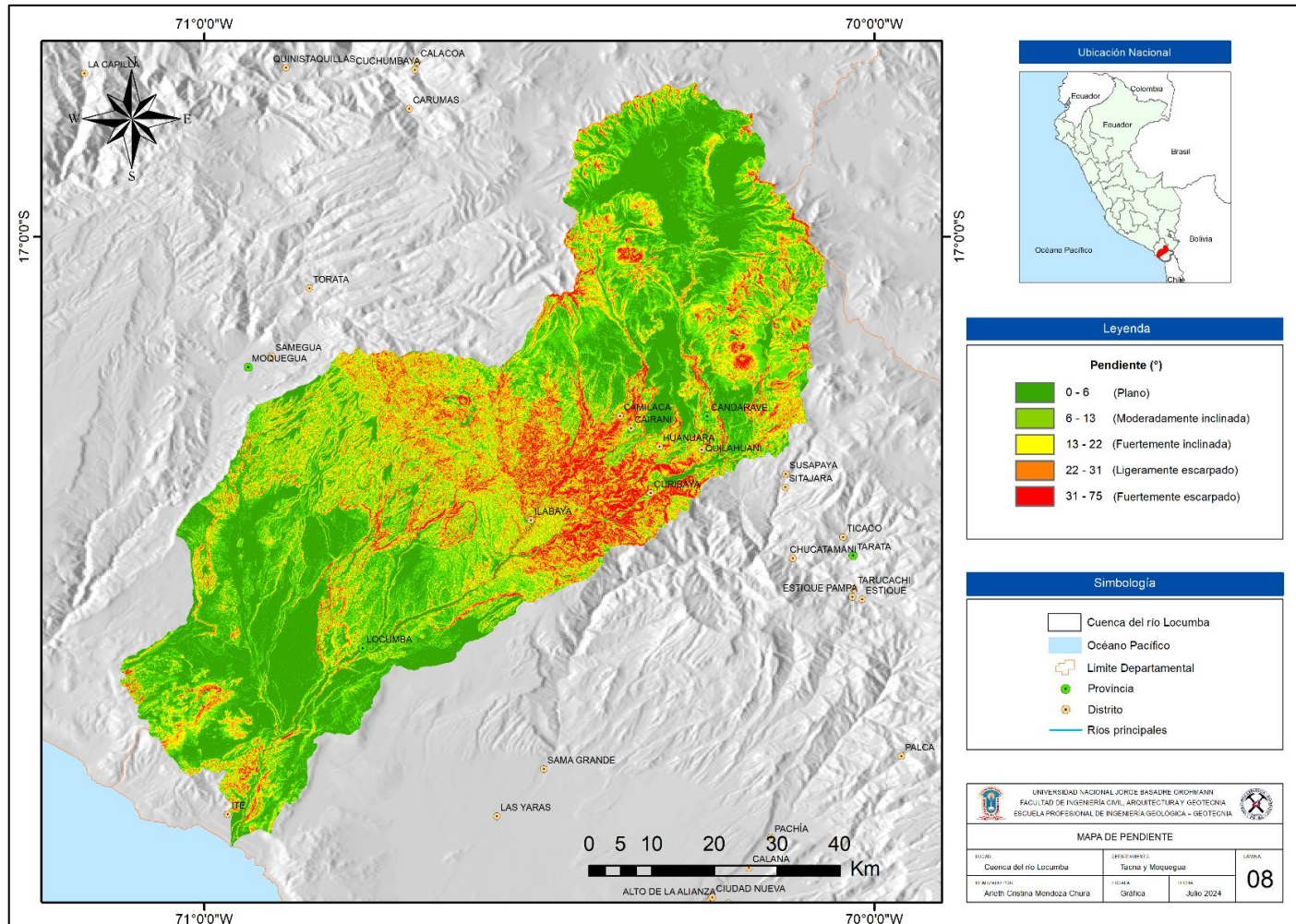
Nota. El mapa fue elaborado con datos proporcionados por SENAMHI.

ANEXO VIII. Mapa de índice de potencia de corriente en la cuenca del río Locumba



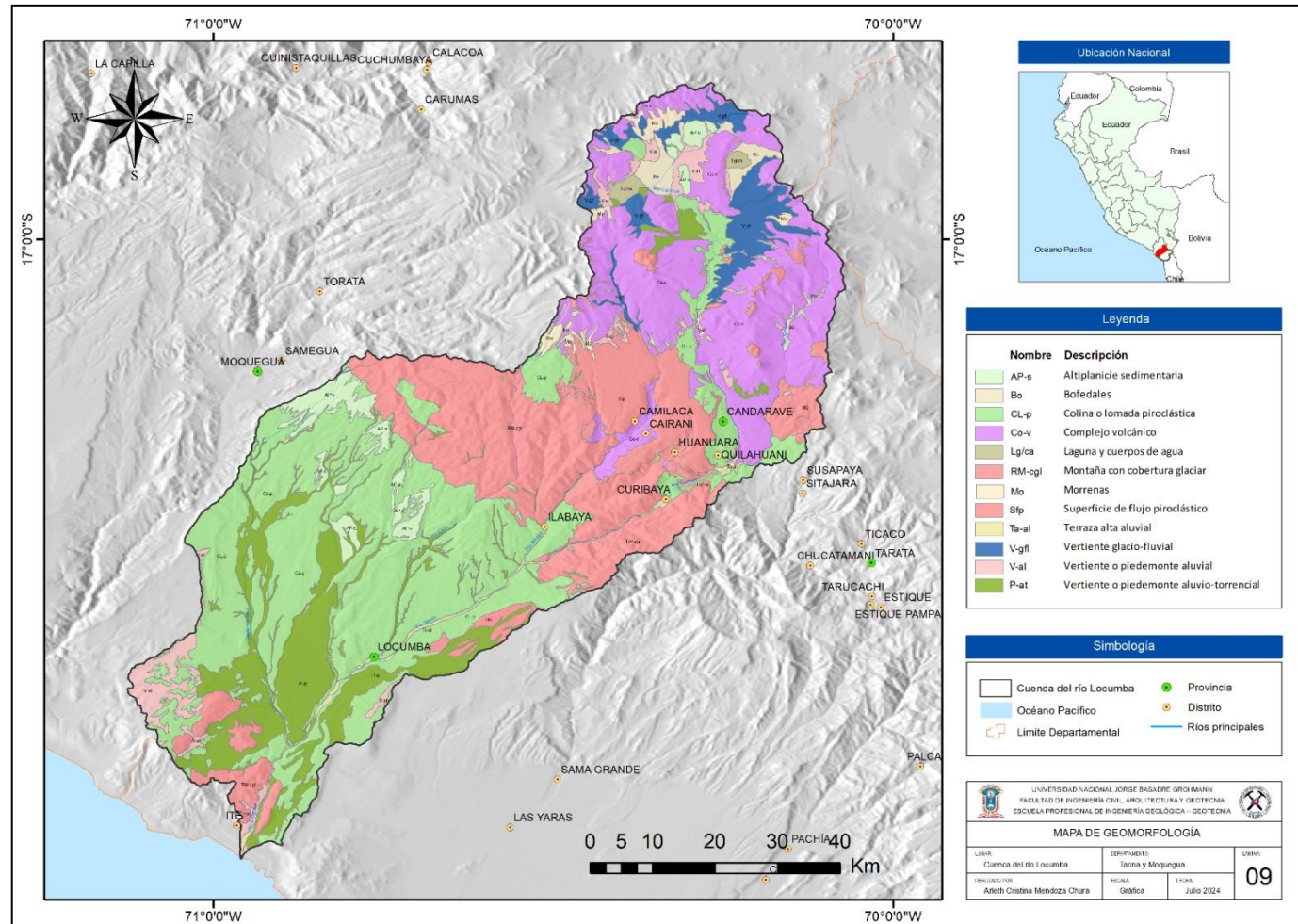
Nota. El mapa fue elaborado en el software ArcGIS, con datos proporcionados por GEE.

ANEXO IX. Mapa de pendiente en la cuenca del río Locumba



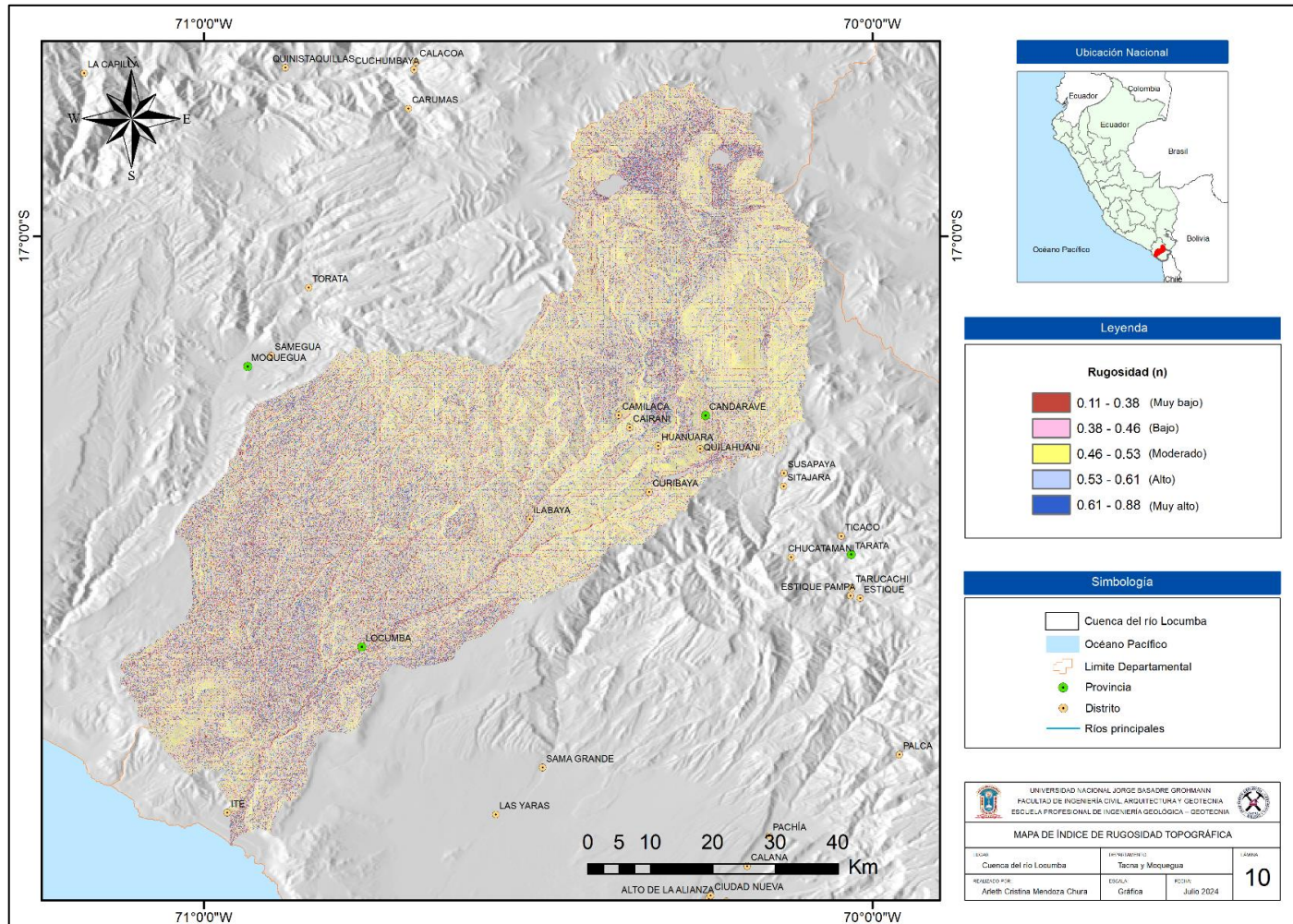
Nota. El mapa fue elaborado en el software ArcGIS, con datos proporcionados por GEE.

ANEXO X. Mapa de geomorfología en la cuenca del río Locumba



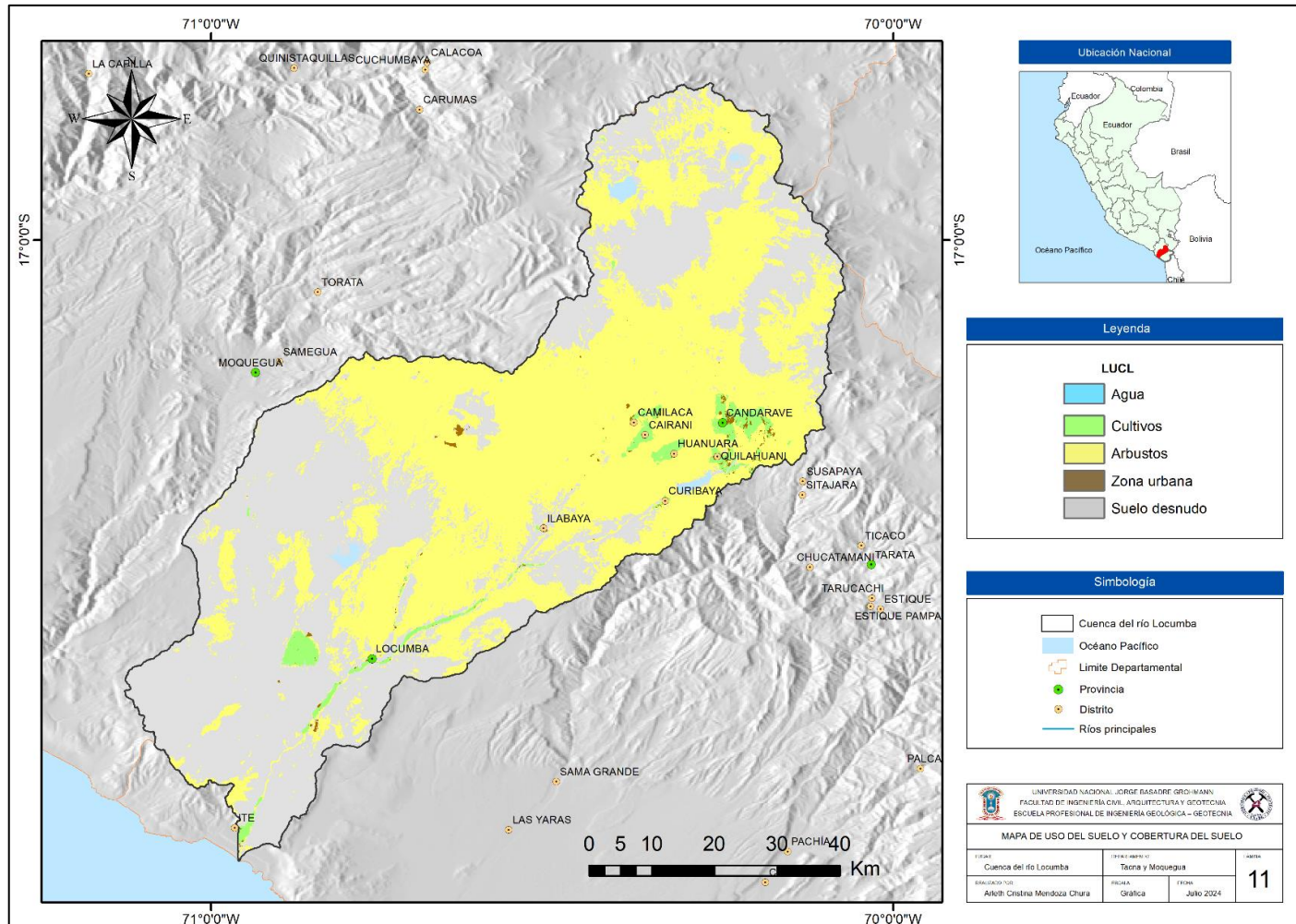
Nota. El mapa fue elaborado con datos proporcionados por INGEMMET.

ANEXO XI. Mapa de índice de rugosidad topográfica en la cuenca del río Locumba



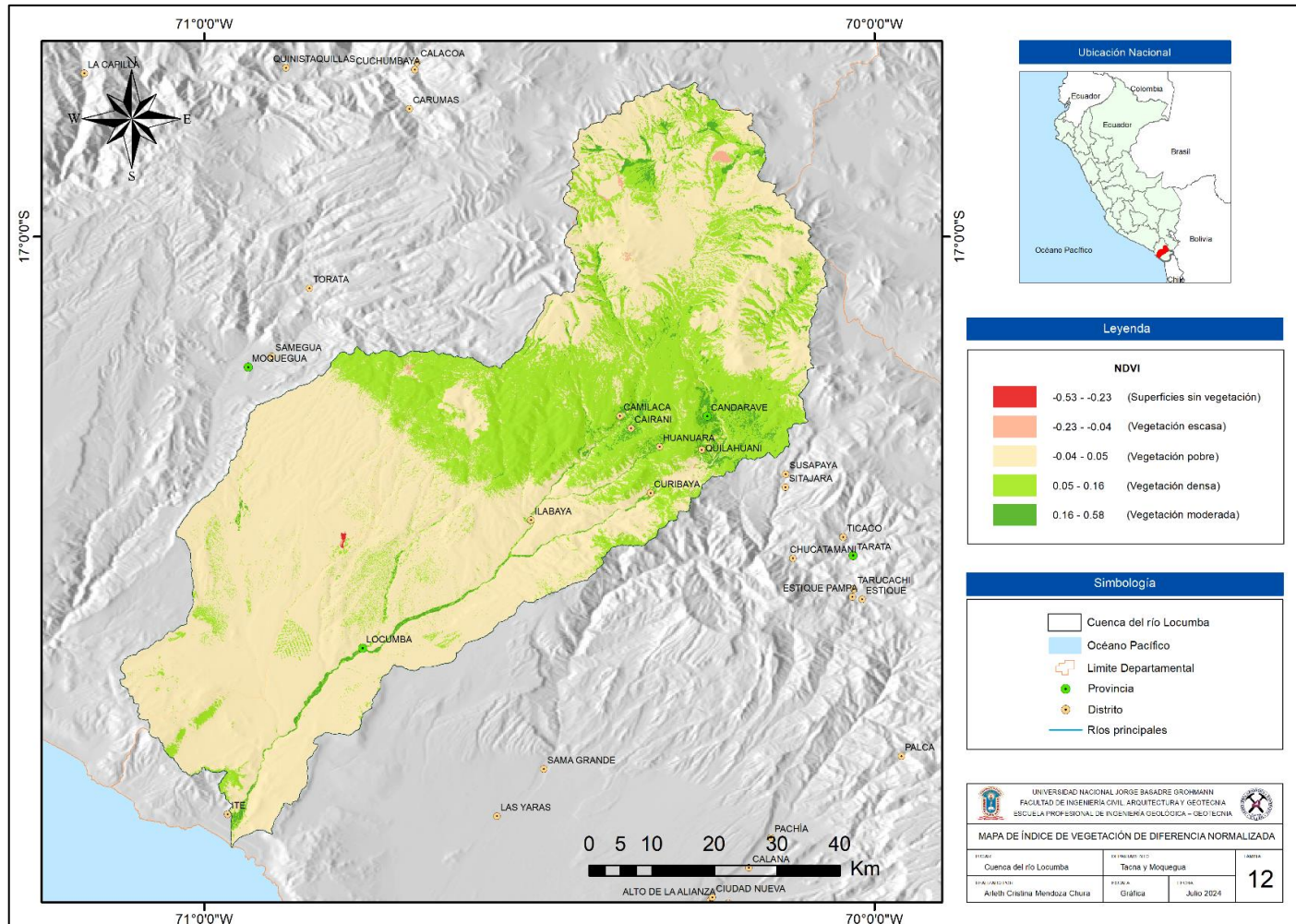
Nota. El mapa fue elaborado en el software ArcGIS, con datos proporcionados por GEE.

ANEXO XII. Mapa de uso del suelo y cobertura del suelo en la cuenca del río Locumba



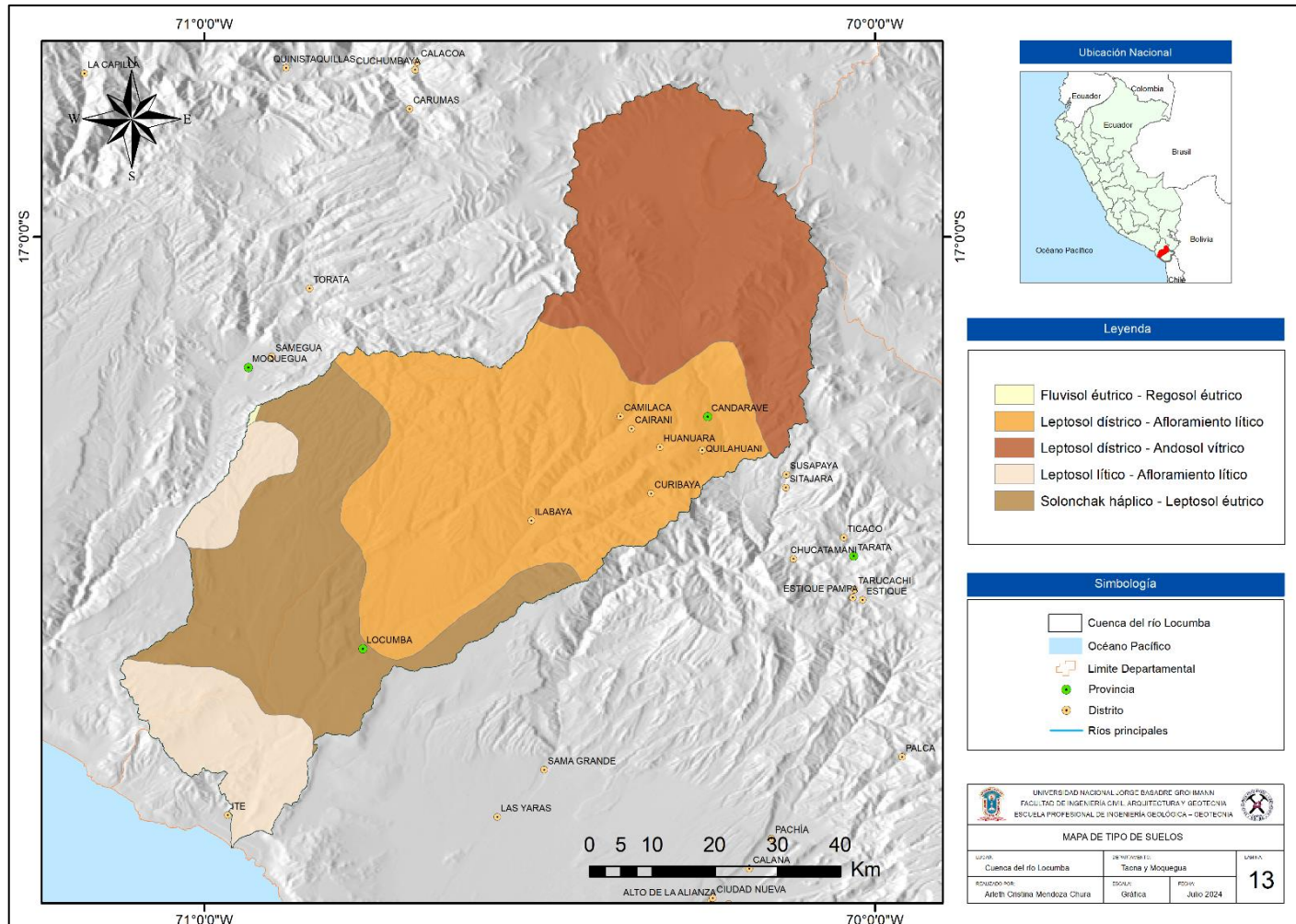
Nota. El mapa fue elaborado en el software ArcGIS, con datos proporcionados por GEE.

ANEXO XIII. Mapa de índice de vegetación de diferencia normalizada en la cuenca del río Locumba



Nota. El mapa fue elaborado en el software ArcGIS, con datos proporcionados por GEE.

ANEXO XIV. Mapa de tipo de suelo en la cuenca del río Locumba



Nota. El mapa fue elaborado con datos proporcionados por IGN.

## ANEXO XV. Pozos existentes registrados en la base de datos de la Autoridad Nacional del Agua (ANA)

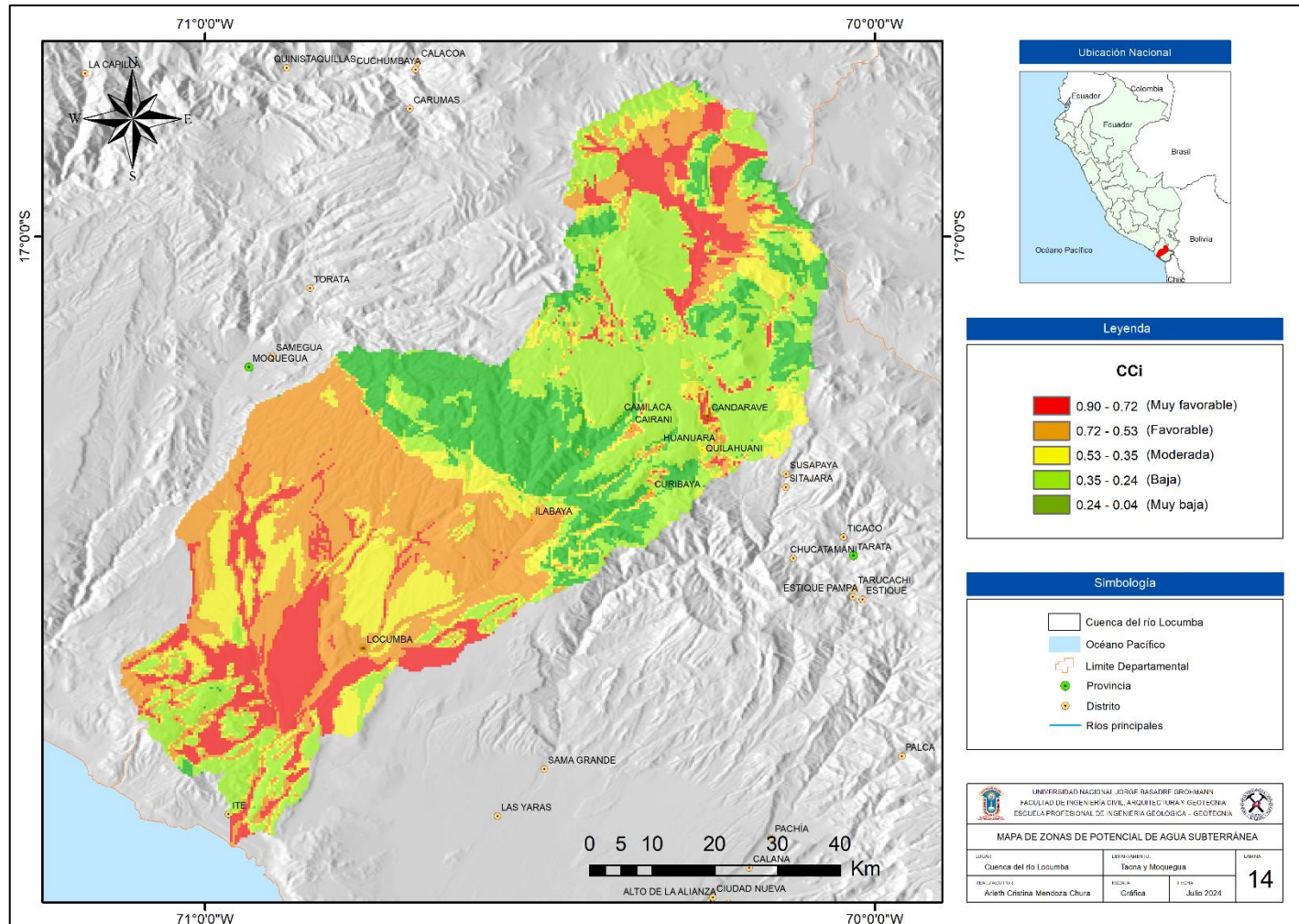
N°	CODIGO	TIPO	LATITUD	LONGITUD	N°	CODIGO	TIPO	LATITUD	LONGITUD
1	IRHS-23-03-01-Pozo Cinto N°2	Pozo tubular	-17.49822	-70.715514	65	IRHS-23-02-01-C-75	Pozo tajo abierto	-16.944994	-70.233317
2	IRHS-23-03-01-Pozo Cinto N°3	Pozo tubular	-17.5022	-70.717105	66	IRHS-23-02-01-VW-4	Pozo tubular	-16.913226	-70.233326
3	IRHS-23-03-01-Pozo tres Piedras	Pozo tubular	-17.587284	-70.738341	67	IRHS-040310-SCI-1	Pozo tajo abierto	-17.450922	-70.680456
4	IRHS-23-02-01-C-81	Pozo tajo abierto	-16.922107	-70.419168	68	IRHS-23-03-01-Pozo Cinto N°1	Pozo tubular	-17.473767	-70.706826
5	IRHS-23-02-01-C-78	Pozo tajo abierto	-16.934761	-70.422718	69	IRHS-23-03-01-Pozo Cinto N°4	Pozo tajo abierto	-17.540547	-70.729692
6	IRHS-23-02-01-C-01	Pozo tajo abierto	-16.809922	-70.239469	70	IRHS-23-02-01-C-95	Pozo tajo abierto	-16.912065	-70.416689
7	IRHS-23-02-01-C-106	Pozo tajo abierto	-16.903262	-70.24003	71	IRHS-23-02-01-C-51	Pozo tajo abierto	-16.928748	-70.416758
8	IRHS-23-02-01-C-48	Pozo tajo abierto	-16.917796	-70.297988	72	IRHS-23-02-01-C-83	Pozo tajo abierto	-16.94119	-70.418409
9	IRHS-23-02-01-TP-9	Pozo tajo abierto	-16.918756	-70.299102	73	IRHS-23-02-01-TDV-4	Pozo tajo abierto	-16.899731	-70.242467
10	IRHS-23-02-01-C-47	Pozo tajo abierto	-16.92782	-70.299343	74	IRHS-23-02-01-TP-6A	Pozo tajo abierto	-16.871262	-70.289241
11	IRHS-23-02-01-C-30	Pozo tajo abierto	-16.937265	-70.30768	75	IRHS-23-02-01-C-109	Pozo tajo abierto	-16.858608	-70.192293
12	IRHS-23-02-01-C-15	Pozo tajo abierto	-16.937253	-70.309586	76	IRHS-23-02-01-C-35	Pozo tajo abierto	-16.872257	-70.201362
13	IRHS-23-02-01-TP-5	Pozo tubular	-16.939247	-70.310135	77	IRHS-23-02-01-PV-4	Pozo tajo abierto	-16.860805	-70.203007
14	IRHS-23-02-01-C-90	Pozo tajo abierto	-16.93767	-70.317804	78	IRHS-23-02-01-TDV-6	Pozo tajo abierto	-16.914944	-70.21502
15	IRHS-23-02-02-STU-1A	Pozo tajo abierto	-17.121643	-70.318445	79	IRHS-23-02-01-TDV-2	Pozo tajo abierto	-16.899483	-70.216001
16	IRHS-23-02-01-C-92	Pozo tajo abierto	-16.933198	-70.348101	80	IRHS-23-02-01-PL-2	Pozo tajo abierto	-16.854669	-70.224274
17	IRHS-23-02-01-PV-8	Pozo tubular	-16.875954	-70.187333	81	IRHS-23-02-01-TDV-3	Pozo tajo abierto	-16.915667	-70.236131
18	IRHS-23-02-01-C-34	Pozo tajo abierto	-16.868328	-70.20099	82	IRHS-23-03-01-Pozo Monte grande N°2	Pozo tajo abierto	-17.553006	-70.72981
19	IRHS-23-02-01-VW-3	Pozo tubular	-16.892534	-70.208249	83	IRHS-23-02-01-C-91	Pozo tajo abierto	-16.89559	-70.35263
20	IRHS-23-02-01-PV-2	Pozo tubular	-16.916798	-70.214807	84	IRHS-23-02-01-PL-9	Pozo tajo abierto	-16.923314	-70.23757
21	IRHS-23-02-01-PV-5	Pozo tubular	-16.899483	-70.216067	85	IRHS-23-02-01-C-108	Pozo tajo abierto	-16.920886	-70.241507
22	IRHS-23-02-01-C-107	Pozo tajo abierto	-16.917005	-70.224141	86	IRHS-23-02-01-TP-4	Pozo tajo abierto	-16.825575	-70.251526

23	IRHS-23-02-01-C-117	Pozo tajo abierto	-16.956147	-70.230282	87	IRHS-23-02-01-C-122	Pozo tajo abierto	-16.849177	-70.27429
24	IRHS-23-02-01-C-104	Pozo tajo abierto	-16.925344	-70.233659	88	IRHS-23-02-01-TP-9A	Pozo tubular	-16.94299	-70.287146
25	IRHS-23-02-01-C-80	Pozo tajo abierto	-16.930975	-70.422652	89	IRHS-23-02-01-TP-14	Pozo tubular	-16.937579	-70.317823
26	IRHS-23-02-01-TP-8	Pozo tubular	-16.92971	-70.300558	90	IRHS-23-02-01-TP-3A	Pozo tubular	-16.892359	-70.350476
27	IRHS-23-02-01-C-123	Pozo tajo abierto	-16.8947	-70.317233	91	IRHS-23-02-01-PC-3	Pozo tajo abierto	-16.888442	-70.198639
28	IRHS-23-02-01-C-19	Pozo tajo abierto	-16.894059	-70.349014	92	IRHS-23-02-01-C-120	Pozo tajo abierto	-16.960076	-70.20498
29	IRHS-23-02-01-PV-7	Pozo tubular	-16.863438	-70.183942	93	IRHS-23-02-01-C-43A	Pozo tajo abierto	-16.887247	-70.205099
30	IRHS-23-02-01-C-118	Pozo tajo abierto	-16.948513	-70.197779	94	IRHS-23-02-01-PV-10	Pozo tubular	-16.946442	-70.20725
31	IRHS-23-02-01-C-110	Pozo tajo abierto	-16.888536	-70.205792	95	IRHS-23-02-01-TDV-13	Pozo tajo abierto	-16.857887	-70.218119
32	IRHS-23-02-01-PV-9	Pozo tubular	-16.934789	-70.212359	96	IRHS-23-02-01-TDV-11	Pozo tajo abierto	-16.93416	-70.219369
33	IRHS-23-02-01-PL-3	Pozo tajo abierto	-16.865964	-70.226177	97	IRHS-23-03-01-Pozo Monte grande N°1	Pozo tajo abierto	-17.552015	-70.730526
34	IRHS-23-02-01-PL-4	Pozo tajo abierto	-16.953686	-70.227796	98	IRHS-23-03-01-Pozo La India Ahorcada	Pozo tajo abierto	-17.572922	-70.732712
35	IRHS-23-03-01-Pozo Palacios	Pozo tubular	-17.565783	-70.730685	99	IRHS-23-03-01-Pozo Conostoco	Pozo tubular	-17.602074	-70.747644
36	IRHS-23-03-01-Pozo Tres Molles	Pozo tubular	-17.578021	-70.733373	100	IRHS-23-02-01-C-93	Pozo tajo abierto	-16.94414	-70.426845
37	IRHS-23-03-01-Pozo la Machorrta	Pozo tubular	-17.593108	-70.740781	101	IRHS-23-02-01-C-84	Pozo tajo abierto	-16.954435	-70.414903
38	IRHS-23-02-01-TP-15	Pozo tubular	-16.940458	-70.423559	102	IRHS-23-02-04-SCU-1	Pozo tajo abierto	-17.390533	-70.34113
39	IRHS-23-02-01-C-98	Pozo tajo abierto	-16.936188	-70.376722	103	IRHS-23-02-01-TDV-7	Pozo tajo abierto	-16.86395	-70.18141
40	IRHS-23-02-01-C-111	Pozo tajo abierto	-16.949383	-70.393935	104	IRHS-23-02-01-TDV-14	Pozo tajo abierto	-16.877929	-70.186594
41	IRHS-23-02-01-PL-8	Pozo tajo abierto	-16.895536	-70.239689	105	IRHS-23-02-01-PL-10	Pozo tajo abierto	-16.942321	-70.188763
42	IRHS-23-02-01-C-103	Pozo tajo abierto	-16.885218	-70.2496	106	IRHS-23-02-01-STO-1	Pozo tajo abierto	-17.279183	-70.191045
43	IRHS-23-02-01-C-119	Pozo tajo abierto	-16.950555	-70.272549	107	IRHS-23-02-01-C-97	Pozo tajo abierto	-16.941902	-70.203174
44	IRHS-23-02-01-C-50	Pozo tajo abierto	-16.915694	-70.298818	108	IRHS-23-02-01-PV-6	Pozo tubular	-16.900335	-70.214082
45	IRHS-23-02-01-C-88	Pozo tajo abierto	-16.917772	-70.310343	109	IRHS-23-02-01-C-76	Pozo tajo abierto	-16.944702	-70.218789
46	IRHS-23-02-01-TP-3	Pozo tajo abierto	-16.896343	-70.349444	110	IRHS-23-03-01-Pozo Monte grande N°3	Pozo tajo abierto	-17.556952	-70.731138

47	IRHS-23-02-01-TDV-10	Pozo tajo abierto	-16.876291	-70.186978	111	IRHS-23-03-01-Pozo Los Carzos	Pozo tajo abierto	-17.569689	-70.731438
48	IRHS-23-02-01-VW-2	Pozo tubular	-16.862018	-70.193469	112	IRHS-23-03-01-Pozo EPS Locumba	Pozo tubular	-17.614707	-70.761412
49	IRHS-23-02-01-PV-3	Pozo tubular	-16.887617	-70.197507	113	IRHS-23-02-01-C-82	Pozo tajo abierto	-16.93479	-70.431497
50	IRHS-23-02-01-C-105	Pozo tajo abierto	-16.897457	-70.201071	114	IRHS-23-02-01-TP-12	Pozo tubular	-16.921952	-70.419279
51	IRHS-23-02-01-TDV-12	Pozo tajo abierto	-16.945195	-70.211881	115	IRHS-23-02-01-C-94	Pozo tajo abierto	-16.940455	-70.422667
52	IRHS-23-02-01-C-72	Pozo tajo abierto	-16.918902	-70.213694	116	IRHS-23-02-01-TP-11	Pozo tubular	-16.930399	-70.423549
53	IRHS-23-02-01-TDV-1	Pozo tajo abierto	-16.944178	-70.218682	117	IRHS-23-02-01-TP-16	Pozo tajo abierto	-16.940637	-70.391045
54	IRHS-23-02-01-C-71	Pozo tajo abierto	-16.909442	-70.226814	118	IRHS-23-02-01-C-73	Pozo tajo abierto	-16.95338	-70.237898
55	IRHS-23-02-01-C-96	Pozo tajo abierto	-16.951925	-70.408067	119	IRHS-23-02-02-SCA-1	Pozo tajo abierto	-17.187934	-70.270276
56	IRHS-23-02-01-C-79	Pozo tajo abierto	-16.958891	-70.416185	120	IRHS-23-02-01-C-49	Pozo tajo abierto	-16.928076	-70.29742
57	IRHS-23-02-01-C-2	Pozo tajo abierto	-16.874132	-70.386793	121	IRHS-23-02-01-VW-1 (TP-7)	Pozo tubular	-16.870695	-70.202582
58	IRHS-23-02-01-C-102	Pozo tajo abierto	-16.860284	-70.261215	122	IRHS-23-02-01-PL-12	Pozo tajo abierto	-16.898375	-70.20317
59	IRHS-23-02-02-STU-1B	Pozo tajo abierto	-17.121643	-70.318445	123	IRHS-23-02-01-TDV-5	Pozo tajo abierto	-16.86037	-70.204835
60	IRHS-23-02-01-PL-6	Pozo tajo abierto	-16.877545	-70.174661	124	IRHS-23-02-01-C-77	Pozo tajo abierto	-16.905619	-70.208633
61	IRHS-23-02-01-PL-11	Pozo tajo abierto	-16.934183	-70.201688	125	IRHS-23-02-01-C-74	Pozo tajo abierto	-16.942631	-70.209902
62	IRHS-23-02-01-PV-1	Pozo tubular	-16.946014	-70.218497	126	IRHS-23-02-01-L-33	Pozo tajo abierto	-16.865622	-70.216826
63	IRHS-23-02-01-PL-5	Pozo tajo abierto	-16.953709	-70.223824	127	IRHS-23-02-01-C-70	Pozo tajo abierto	-16.927183	-70.229953
64	IRHS-23-02-01-PL-1	Pozo tajo abierto	-16.85563	-70.223876					

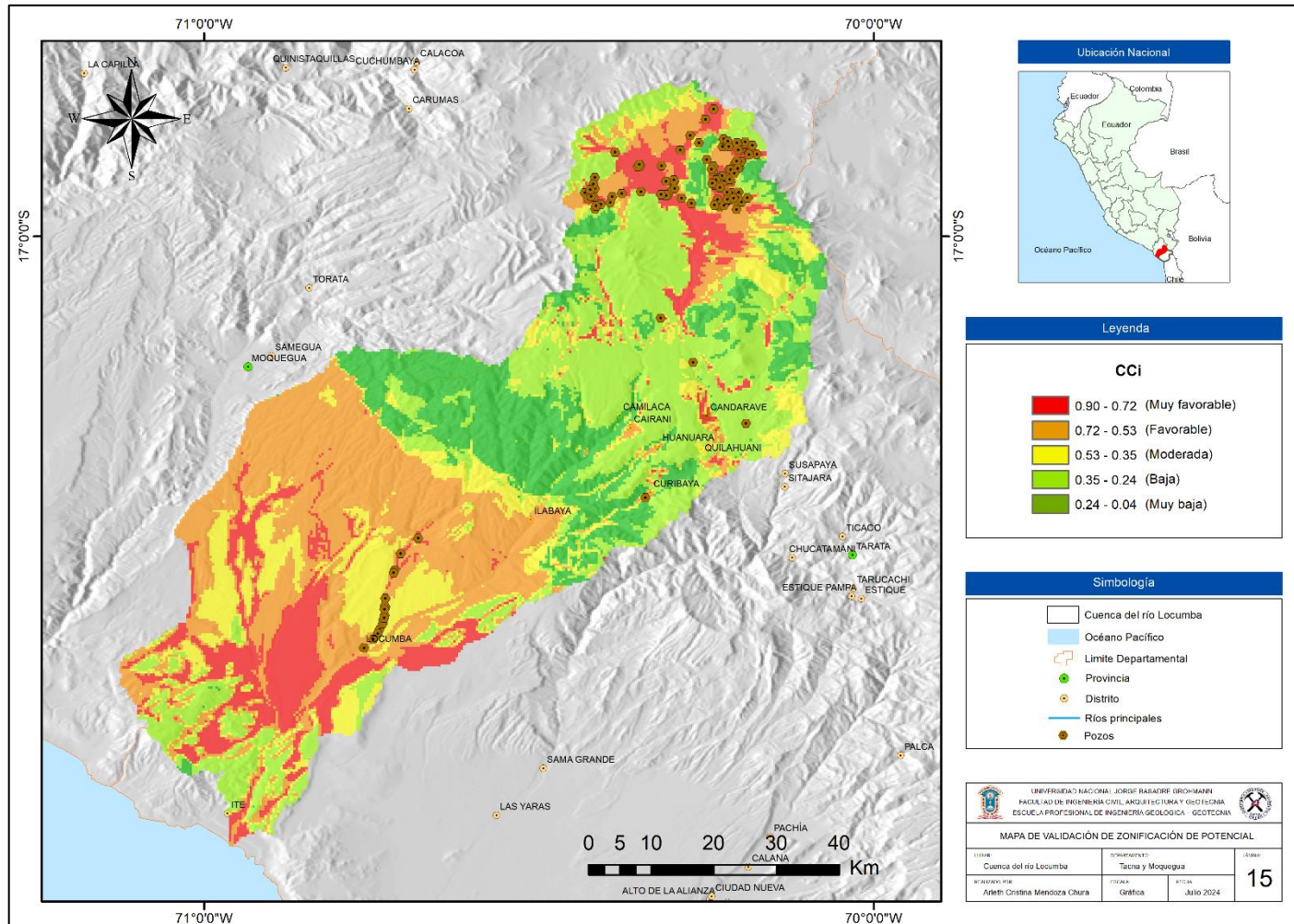
---

ANEXO XVI. Mapa de zonas de potencial de agua subterránea en la cuenca del río Locumba



Nota. El mapa fue elaborado en el software ArcGIS.

ANEXO XVII. Mapa de validación de zonificación de potencial en la cuenca del río Locumba



Nota. El mapa fue elaborado en el software ArcGIS, y los datos utilizados para la validación fueron los pozos registrados en el ANA.