

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**MODELAMIENTO GEOESPACIAL PARA DELIMITACIÓN DE ZONAS
POTENCIALES DE ACUMULACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA MEDIANTE
PROCESOS DE ANÁLISIS JERÁRQUICO: CUENCA JEQUETEPEQUE, PERÚ.**

Para optar título profesional de:

Ingeniero Geólogo

Autor:

Bach. Zambrano Vásquez, Christian José

Asesor:

Dr. Ing. Lagos Manrique, Alejandro Claudio

Cajamarca – Perú

2024



CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

- Investigador:** ZAMBRANO VÁSQUEZ, CHRISTIAN JOSÉ
DNI: 70190973
Escuela Profesional: Ingeniería Geológica
- Asesor:** Lagos Manrique, Alejandro Claudio
Facultad: Ingeniería
- Grado académico o título profesional**
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
- Tipo de Investigación:**
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
- Título de Trabajo de Investigación:** MODELAMIENTO GEOESPACIAL PARA DELIMITACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE ACUMULACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA MEDIANTE PROCESOS DE ANÁLISIS JERÁRQUICO: CUENCA JEQUETEPEQUE, PERÚ.
- Fecha de evaluación:** 20 de marzo de 2024
- Software antiplagio:** TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
- Porcentaje de Informe de Similitud:** 18%
- Código Documento:** 3117:341290554
- Resultado de la Evaluación de Similitud:** 18%
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 20 de marzo de 2024

		Firmado digitalmente por: FERNANDEZ LEON Yvonne Katherine FAU 20148258001 soft Motivo: Soy el autor del documento Fecha: 20/03/2024 15:56:27-0500
FIRMA DEL ASESOR	UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI	
Nombres y Apellidos: Alejandro Claudio Lagos Manrique		
DNI: 09224934		

AGRADECIMIENTO

Al creador del universo, dador de vida y de todo lo que ocurre a nuestro alrededor.

A mi alma máter, Universidad Nacional de Cajamarca, a la Facultad de Ingeniería, con especial cariño a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica.

A los docentes, quienes nos apoyaron y guiaron en el camino de adquirir conocimientos, abriéndonos paso al desarrollo profesional.

Al Dr. Alejandro Claudio Lagos Manrique, por su constante apoyo y asesoramiento en el desarrollo de la investigación.

A mi familia, que siempre me han brindado su sincero amor y apoyo a pesar de los muchos errores cometidos.

A todos ellos, mi más profundo agradecimiento por ser parte fundamental en mi desarrollo personal y profesional.

DEDICATORIA

A mi hermana, Erika, que lo logrado con este trabajo sirva de aliciente para conseguir lo que se proponga.

A mi madre, María Lidia, por demostrarme la fortaleza y el coraje que se necesita día con día.

A mi padre, José Santiago, hoy gozando de la vida eterna, por ser el perfecto ejemplo de cuán capaz, fuerte y decidida puede ser una persona.

CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
LISTA DE TABLAS	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE FÓRMULAS	ix
LISTA DE GRÁFICOS	x
LISTA DE ABREVIACIONES	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	3
2.1. Antecedentes Teóricos de la Investigación	3
2.1.1. Internacionales	3
2.1.2. Nacionales.....	3
2.1.3. Locales.....	4
2.2. Bases Teóricas	4
2.2.1. Modelamiento Geoespacial	4
2.2.2. Proceso de Análisis Jerárquico	11
2.2.3. Hidrología.....	17
2.2.4. Hidrogeología	21
2.3. Definición de Términos Básicos	23
CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS	25
3.1. Ubicación	25

	Pág.
3.1.1. Ubicación Geográfica	25
3.1.2. Ubicación Política.....	25
3.1.3. Accesibilidad	25
3.2. Procedimiento	26
3.2.1. Etapas de la Investigación	26
3.2.2. Metodología.....	28
3.2.3. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos, Materiales y Equipos	29
3.3. Tratamiento de Datos e Información	30
3.3.1. Generalidades	30
3.3.2. Generación de la Base de Datos	37
3.3.3. Aplicación de la Metodología de Procesos de Análisis Jerárquico	65
3.3.4. Delimitación de Zonas Potenciales de Acumulación de Agua Subterránea.....	80
CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	84
4.1. Análisis y Discusión	84
4.1.1. Generación de la Base de Datos Geoespaciales.....	84
4.1.2. Procesamiento de la Información Geoespacial.....	85
4.1.3. Aplicación de la Metodología de Procesos de Análisis Jerárquico	92
4.1.4. Cálculo del Índice de Potencial de Agua Subterránea.....	93
4.1.5. Delimitación de Zonas Potenciales de Acumulación de Agua Subterránea.....	94
4.2. Contrastación de la Hipótesis	96
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97
5.1. Conclusiones.....	97
5.2. Recomendaciones.....	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
ANEXOS	104

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores aproximados en el rango del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada y su interpretación.	11
Tabla 2. Ejemplo de una Matriz Recíproca de Comparaciones Pareadas.	14
Tabla 3. Escala fundamental para las comparaciones pareadas.	15
Tabla 4. Valores del Índice de Aleatoriedad según el tamaño de la matriz.	17
Tabla 5. Acciones a tener en cuenta según el valor obtenido de Relación de Consistencia.	17
Tabla 6. Identificación de variables.	29
Tabla 7. Tipos de litología y su permeabilidad asociada.	38
Tabla 8. Valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.	42
Tabla 9. Zonificación por densidad de lineamientos estructurales reclasificados.	44
Tabla 10. Estaciones pluviométricas y su ubicación en coordenadas UTM.	47
Tabla 11. Precipitación promedio mensual y anual para la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque (periodo 1965 – 2014).	57
Tabla 12. Intervalos de precipitación anual.	59
Tabla 13. Pendiente del terreno y Unidades Morfogenéticas asociadas.	61
Tabla 14. Intervalos de densidad de drenajes.	65
Tabla 15. MRCP N° 01: comparación por pares de los criterios principales.	67
Tabla 16. MRCP N° 02: comparación de subcriterios, variable drenajes.	68
Tabla 17. MRCP N° 03: comparación de subcriterios, variable lineamientos estructurales.	69
Tabla 18. MRCP N° 04: comparación de subcriterios, variable litología.	69
Tabla 19. MRCP N° 05: comparación de subcriterios, variable pendiente del terreno.	70

	Pág.
Tabla 20. MRCP N° 06: comparación de subcriterios, variable precipitación.	71
Tabla 21. MRCP N° 07: comparación de subcriterios, variable índice de vegetación.	71
Tabla 22. Cálculo de RC, subcriterios - variable drenajes.	73
Tabla 23. Cálculo de RC, subcriterios - variable lineamientos estructurales.	74
Tabla 24. Cálculo de RC, subcriterios - variable litología.	75
Tabla 25. Cálculo de RC, subcriterios - variable pendiente del terreno.	76
Tabla 26. Cálculo de RC, subcriterios - variable precipitación.	77
Tabla 27. Cálculo de RC, subcriterios - variable índice de vegetación.	78
Tabla 28. Cálculo de RC, criterios principales.	79
Tabla 29. Resumen de valores de la Relación de Consistencia para cada matriz.	80
Tabla 30. Capas temáticas involucradas, subcriterios y pesos normalizados.	81
Tabla 31. Valores del Índice de Potencial de Agua Subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.	82
Tabla 32. Información geoespacial recopilada y fuente de origen.	84
Tabla 33. Procesamiento aplicado a la información geoespacial recopilada.	85
Tabla 34. Áreas relativas para la variable precipitación.	87
Tabla 35. Áreas relativas para la variable lineamientos estructurales.	88
Tabla 36. Áreas relativas para la variable litología.	89
Tabla 37. Áreas relativas para la variable drenajes.	90
Tabla 38. Áreas relativas para la variable pendiente del terreno.	91
Tabla 39. Áreas relativas para la variable índice de vegetación.	92
Tabla 40. Áreas relativas de acuerdo al potencial de agua subterránea.	94

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Primitivas geométricas básicas utilizadas en el modelo vectorial. Fuente: Tomado de Olaya, (2020).	7
Figura 2. Celdas de una malla ráster y valores de elevación asociados. Fuente: Adaptado de Olaya, (2020).	8
Figura 3. Jerarquía básica usada en el Proceso de Análisis Jerárquico. Fuente: Elaborado con base en Saaty, (1997).	13
Figura 4. Block diagrama de las partes de una cuenca hidrográfica alto andina. Fuente: Tomado de Vásquez et al., (2016).	18
Figura 5. Principales accesos en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.	27
Figura 6. Cartas geológicas nacionales abarcadas por la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.	32
Figura 7. Columna estratigráfica de la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque. Fuente: Modificado de Peña et al., (2015).	34
Figura 8. Asociaciones de litología según su permeabilidad.	39
Figura 9. Imágenes Landsat 8 utilizadas en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.	41
Figura 10. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.	43
Figura 11. Lineamientos estructurales identificados en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.	45
Figura 12. Densidad de lineamientos estructurales en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.	46
Figura 13. Distribución espacial de las estaciones pluviométricas.	48
Figura 14. Isoyetas (mm) en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.	58

	Pág.
Figura 15. Modelo Digital de Elevaciones para la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.	60
Figura 16. Unidades morfogenéticas según la pendiente del terreno.	62
Figura 17. Drenajes en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.	63
Figura 18. Densidad de drenajes en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.	64
Figura 19. Jerarquía utilizada en la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.	66

LISTA DE FÓRMULAS

	Pág.
Fórmula 1. Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.	10
Fórmula 2. Expresión original para resolver la Matriz Recíproca de Comparaciones Pareadas.	14
Fórmula 3. Cálculo de la Relación de Consistencia.	16
Fórmula 4. Cálculo del Índice de Consistencia.	16
Fórmula 5. Cálculo de $\lambda_{\text{máx}}$.	16
Fórmula 6. Cálculo del Índice de Potencial de Agua Subterránea.	82

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1. Curva de precipitación anual, estación Augusto Weberbauer (periodo 1965 - 2014).	49
Gráfico 2. Curva de precipitación anual, estación Chilete (periodo 1965 - 2014).	49
Gráfico 3. Curva de precipitación anual, estación Contumazá (periodo 1965 - 2014).	50
Gráfico 4. Curva de precipitación anual, estación Granja Porcón (periodo 1965 - 2014).	50
Gráfico 5. Curva de precipitación anual, estación Lives (periodo 1965 - 2014).	51
Gráfico 6. Curva de precipitación anual, estación Llapa (periodo 1965 - 2014).	51
Gráfico 7. Curva de precipitación anual, estación Magdalena (periodo 1965 - 2014).	52
Gráfico 8. Curva de precipitación anual, estación Namora (periodo 1965 - 2014).	52
Gráfico 9. Curva de precipitación anual, estación San Juan (periodo 1965 - 2014).	53
Gráfico 10. Curva de precipitación anual, estación Tembladera (periodo 1965 - 1979).	53
Gráfico 11. Curva de precipitación anual, estación Chepén (periodo 1965 - 1979).	54
Gráfico 12. Curva de precipitación anual, estación Chepén (periodo 1970 - 1983).	54
Gráfico 13. Curva de precipitación anual, estación San José (periodo 1965 - 1983).	55
Gráfico 14. Curva de precipitación anual, estación Talla (periodo 1970 - 2014).	55
Gráfico 15. Áreas relativas en porcentaje para las zonas de precipitación.	87
Gráfico 16. Áreas relativas en porcentaje para las zonas de densidad de lineamientos estructurales.	88
Gráfico 17. Áreas relativas en porcentaje para los tipos de litología según su permeabilidad.	89
Gráfico 18. Áreas relativas en porcentaje para las zonas de densidad de drenajes.	90
Gráfico 19. Áreas relativas en porcentaje para las unidades morfogénicas.	91

	Pág.
Gráfico 20. Áreas relativas en porcentaje para las zonas por valores del Índice de Vegetación.	92
Gráfico 21. Áreas relativas en porcentaje de acuerdo al potencial de agua subterránea.	95

LISTA DE ABREVIACIONES

ANA	:	Autoridad Nacional del Agua.
AHP	:	Analytic Hierarchy Process (Proceso de Análisis Jerárquico).
ASTER	:	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (Radiómetro Espacial Avanzado de Emisión y Reflexión Térmica).
C	:	Prioridad o peso normalizado de un criterio principal.
Ci	:	Prioridad relativa o peso normalizado para subcriterios.
CHJ	:	Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.
ECW	:	Enhanced Compression Wavelet (Compresión Wavelet Mejorada).
GWPI	:	Groundwater Potential Index (Índice de Potencial de Agua Subterránea).
IA	:	Índice de Aleatoriedad.
IC	:	Índice de Consistencia.
INGEMMET	:	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
K	:	Permeabilidad.
MDE	:	Modelo Digital de Elevaciones.
mm	:	Milímetros de Lluvia.
msnm	:	Metros Sobre el Nivel del Mar.
n	:	Número de Elementos que intervienen en una MRCP.
MRCP	:	Matriz Recíproca de Comparaciones Pareadas.
NDVI	:	Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada).
RC	:	Relación de Consistencia.
SIG	:	Sistemas de Información Geográfica.
UTM	:	Universal Transverse Mercator (Universal Transversal de Mercator).
WGS – 84	:	World Geodetic System 84 (Sistema Geodésico Mundial 1984).

RESUMEN

Existe una creciente demanda de agua dulce para satisfacer las necesidades de la población en el ámbito de la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque; sin embargo, a la par del crecimiento de dicha demanda, existe también un aumento en la escasez del recurso hídrico; dándose que cada vez más sea necesario el aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos para satisfacer la demanda del líquido vital. Es así que la investigación desarrolla una metodología basada en modelamiento geoespacial y procesos de análisis jerárquico, cuyo objetivo es delimitar zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, interviniendo para ello las variables de drenajes, lineamientos estructurales, litología, pendiente del terreno, precipitación e índice de vegetación. Se utilizó información geoespacial como son: mapas geológicos integrados, imágenes satelitales, ortofotos, modelos digitales de elevación, red hidrográfica regional, distribución espacial de estaciones pluviométricas y datos de precipitación media anual. A partir del procesamiento de la información geoespacial en el software ArcGIS v10.8, se obtienen seis capas temáticas en formato ráster, una por cada una de las variables mencionadas, luego se aplican procesos de análisis jerárquico, estableciendo prioridades entre ellas y posteriormente se realiza el cálculo del Índice de Potencial de Agua Subterránea para la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, que es utilizado para delimitar zonas potenciales zonas de acumulación de agua subterránea. Se obtiene que 24%, 42%, 15% y 19% del área total de la cuenca, corresponden a zonas de potencial alto, moderado, bajo-moderado y bajo, respectivamente.

Palabras clave: *Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, modelamiento geoespacial, proceso de análisis jerárquico, agua subterránea, índice de potencial de agua subterránea.*

ABSTRACT

There is a growing demand for water to satisfy the needs of the population in the area of the Jequetepeque's Hydrographic Basin; however, along with the growth of said demand, there is also an increase in the scarcity of water resources; therefore, it is increasingly necessary to use groundwater resources to satisfy the demand for the vital liquid. Thus, the investigation develops a methodology based on geospatial modeling and analytic hierarchy processes, whose objective is to delimit potential zones of groundwater accumulation in the Jequetepeque's Hydrographic Basin, intervening for this purpose the variables of drainage, structural lineaments, lithology, slope of the land, rainfall and vegetation index. Geospatial information was used, such as: integrated geological maps, satellite images, orthophotos, digital elevation models, regional hydrographic network, spatial distribution of pluviometric stations and average annual precipitation data. From the processing of geospatial information in the ArcGIS v10.8 software, six thematic layers are obtained in raster format, one for each of the variables mentioned, then analytic hierarchy processes are applied, establishing priorities among them and later the calculation of the Groundwater Potential Index for the Jequetepeque Hydrographic Basin is performed, which is used to delimit potential groundwater accumulation zones. It is obtained that 24%, 42%, 15% and 19% of the total area of the basin correspond to zones of high, moderate, low-moderate and low potential, respectively.

Keywords: *Jequetepeque's hydrographic basin, geospatial modeling, analytic hierarchy process, groundwater, groundwater potential index.*

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Existe una creciente demanda de agua dulce para satisfacer las necesidades de la población en el ámbito de la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque; demanda que, casi en su totalidad, es cubierta por el aprovechamiento del agua dulce superficial. No obstante, a la par del crecimiento de dicha demanda, existe también un aumento en la escasez del mencionado recurso. Es así que nos vemos en la necesidad de extraer y aprovechar los recursos hídricos subterráneos para satisfacer la demanda del líquido vital. Sin embargo, la extracción de este recurso debe ser, inexorablemente, a través de una apropiada evaluación y gestión para garantizar su aprovechamiento sostenible en el tiempo, partiendo desde la adecuada planificación para la prospección y exploración de los recursos hídricos subterráneos y el subsecuente aprovechamiento del mismo. La investigación desarrolla una metodología basada en el proceso de análisis jerárquico y modelamiento geoespacial para delimitar zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, utilizando para ello datos e información geoespacial sobre las características propias del área de estudio, como drenajes, lineamientos estructurales, litología, pendiente del terreno, precipitación e índice de vegetación.

Por tanto, surge la siguiente interrogante: ¿Cómo las variables: drenajes, lineamientos estructurales, litología, pendiente del terreno, precipitación e índice de vegetación; influirán en la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque?

Para responder a la interrogante anterior se formula una respuesta anticipada, es decir, una hipótesis explicativa, como sigue: Las variables drenajes, lineamientos estructurales, litología, pendiente del terreno, precipitación e índice de vegetación; influirán en la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque de acuerdo a la valoración dada a cada una de ellas en el

análisis jerárquico según sea su aporte o influencia en la acumulación del recurso hídrico subterráneo.

La investigación se justifica en que los resultados obtenidos puedan servir como antecedentes para una adecuada gestión de los recursos hídricos subterráneos en el ámbito de la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque y para futuras investigaciones de similar carácter, contribuyendo al conocimiento científico.

El objetivo general de la investigación es: Delimitar las zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque. Y como objetivos específicos: Generar una base de datos geoespaciales, procesar la información geoespacial contenida en la base de datos generada, aplicar el proceso de análisis jerárquico a la información geoespacial procesada y, finalmente, calcular el Índice de Potencial de Agua Subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

Finalmente, los contenidos para la investigación han sido estructurados en cinco capítulos, como sigue:

Capítulo I, Introducción; donde se describe el planteamiento del problema y la formulación del mismo, así como la hipótesis, justificación, alcances y objetivos de la investigación. Capítulo II, Marco Teórico, consta de los antecedentes teóricos y bases teóricas consultadas y utilizadas para el desarrollo de la investigación, así como la definición de los términos básicos. Capítulo III, Materiales y Métodos; se describe y detalla el contexto de la investigación, la metodología empleada, así como los procedimientos y el tratamiento y análisis de datos. Capítulo IV, Análisis y Discusión de Resultados; en este capítulo se analizan los resultados obtenidos en la investigación; así también se realiza la contrastación de la hipótesis. Capítulo V, Conclusiones y Recomendaciones; aquí se plasman las conclusiones en función de los objetivos planteados, recomendaciones y finalmente, las referencias bibliográficas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes Teóricos de la Investigación

2.1.1. Internacionales

Arulbalaji et al. (2019), en su investigación Delineación basada en técnicas SIG y AHP de zonas potenciales de aguas subterráneas: un estudio de caso del sur de Ghats occidentales, India; delimitan zonas potenciales de agua subterránea mediante la utilización de sistemas de información geográfica y procesos de análisis jerárquico en la cuenca del río Vamanapuram, obteniendo un mapa de potencial de agua subterránea.

Hernández et al. (2020), en su investigación Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la cuenca del río Ayuquila-Armería mediante el uso de SIG y el análisis multicriterio; identifican zonas de recarga y descarga de agua subterránea en la cuenca hidrográfica del río Ayuquila-Armería, México, haciendo uso del análisis multicriterio basado en la teoría de los sistemas de flujo y en procesos de análisis jerárquico.

Macas y López (2018), en su investigación titulada Potencial para la exploración de aguas subterráneas en la Demarcación Hidrográfica Puyango Catamayo, Ecuador, utilizando un proceso de análisis jerárquico basado en SIG y teledetección; aplican técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica para realizar la cartografía de potenciales áreas para la exploración de agua subterránea en las demarcaciones hidrográficas Puyango y Catamayo, Ecuador.

2.1.2. Nacionales

Cusquisibán (2019), en su tesis para obtener Título Profesional, titulada 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, presenta una metodología para

identificar zonas de recarga hídrica subterránea utilizando imágenes satelitales Landsat 8, en la cuenca hidrográfica del río Chamán.

Mendoza y Rojas (2012), en su investigación denominada Exploración de aguas subterráneas en la región Lambayeque-Perú usando imágenes Landsat y ASTER, proponen la utilización de imágenes satelitales Landsat y ASTER como complemento a las diferentes técnicas de prospección geofísica en la aplicación para la exploración de agua subterránea en la región de Lambayeque, en la costa norte del Perú.

2.1.3. Locales

Díaz (2018), en su tesis para obtener Título Profesional, titulada Análisis multiespectral mediante imágenes satelitales para identificar zonas de recarga hídrica subterránea en la Cuenca Jequetepeque, desarrolla una metodología en la que utiliza imágenes satelitales Landsat 8 y ASTER para identificar zonas de recarga hídrica subterránea dentro de la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, al norte del Perú.

Peña et al. (2015), en el boletín N° 4 de la serie H de INGEMMET, denominado Hidrogeología de la cuenca de los ríos Jequetepeque (13774) y Chamán (137752) – Regiones Cajamarca, La Libertad y Lambayeque, desarrollan estudios hidrogeológicos regionales en la cuenca de los ríos Jequetepeque y Chamán; concluyendo que existe un acuífero poroso no consolidado y acuíferos fisurados sedimentario y volcánico.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Modelamiento Geoespacial

Rojas (2016), parte de la definición de modelo como una representación simplificada del mundo real para definir al modelamiento geoespacial; así, lo define como aquel proceso o conjunto de procesos que consiste en la utilización de las funciones de análisis geoespacial contenidas en los sistemas de información geográfica, ejecutados bajo una secuencia lógica y que es empleado para resolver problemas geoespaciales complejos.

Villafani (2017), establece que el modelamiento geoespacial es generado a partir de su propia base de datos, a partir de la cual se obtiene la información de objetos espaciales existentes en el mundo real. De esta manera, en un entorno de sistemas de información geográfica, se realizan diferentes combinaciones de métodos de análisis geoespacial para llegar a la toma de decisiones según el objetivo de un caso de estudio o proyecto específico.

La importancia del modelamiento geoespacial radica fundamentalmente en tres aspectos: el primero, permite estudiar las relaciones geoespaciales de los objetos o fenómenos reales mediante la combinación de capas temáticas y en un orden específico, las cuales se involucran en la toma de decisiones según criterios específicos de selección (Villafani, 2017); en segundo lugar, logra una fácil comprensión de los objetos, procesos y eventos geoespaciales, posibilitando de esta manera la predicción del posible comportamiento de los mismos, esto en función de los datos e información de entrada utilizados (Lima, 2018) y; por último, utiliza técnicas que simultáneamente involucran tanto a la componente geoespacial como temática de los datos para generar así nueva información y nuevos objetos geoespaciales (Rojas, 2016).

2.2.1.1. Sistemas de Información Geográfica

Según Del Bosque et al. (2012), existen tres acepciones esencialmente distintas, aunque estrechamente interrelacionadas entre sí para el concepto de Sistemas de Información Geográfica (SIG): la primera está asociada a la capacidad de crear modelos a escala de la realidad y a las herramientas que proporciona; la segunda es entendida como concepto de base de datos, poniendo especial énfasis en las distintas posibilidades de manejo de los datos y la información geoespaciales y finalmente; la tercera considera el aspecto organizativo, es decir, en donde las instituciones y/o personas que manejan la parte geográfica toman como potencial herramienta a los SIG para proveer ayuda a la gestión y toma de decisiones.

Para Bernabé y López (2012), un SIG está compuesto por un conjunto de componentes; siendo algunos de ellos más tecnológicos y otros más tradicionales, y aunque cada uno de los componentes posee identidad propia, están innegable y estrechamente relacionados entre sí, por tanto, es que el conjunto de todos ellos proporciona una herramienta con extraordinario potencial. Entre los componentes de un SIG se mencionan: hardware, software, datos, personas, organización.

Olaya (2020), resalta que la parte más importante o el pilar fundamental, y sin el cual el resto de componentes de un SIG carecen de utilidad y sentido, son los datos, de los cuales se nutre. Los datos geoespaciales, son la representación concreta de la realidad; por tanto, un conjunto de datos geoespaciales que están interrelacionados entre sí, forma una base de datos geoespacial. La información geoespacial en cambio, es el resultado del proceso interpretativo del usuario a partir de la base de datos geoespacial; es decir que, al interpretar

los datos, estos nos informan del significado que tienen; para lo cual se ha utilizado diferentes técnicas, medios o habilidades basadas en el conocimiento.

Mancebo et al. (2008), menciona que los datos geoespaciales representan fenómenos reales y/o abstractos de la realidad en base a tres características esenciales: su forma y posición respecto a un sistema de coordenadas conocido, sus atributos geoespaciales y/o temáticos relacionados con el objeto geográfico y, su topología, es decir, sus interrelaciones espaciales con los demás objetos geográficos.

Del Bosque et al. (2012) mencionan que a pesar de la heterogeneidad que puedan presentar los datos geoespaciales, estos pueden ser clasificados, básicamente, en dos tipos de modelos de datos: el modelo vectorial y el modelo ráster. Estos modelos de datos permiten la simplificación y modelización geoespacial, pues son fácilmente almacenados y manipulados en un entorno SIG.

- *Modelo Vectorial*

Los modelos de datos vectoriales representan a la realidad en forma de las denominadas primitivas geométricas, es decir, en forma de puntos, líneas y polígonos; los cuales están referenciados a un sistema de coordenadas geográfico ya conocido. El modelo de datos vectoriales es habitualmente utilizado para tratar y representar fenómenos u objetos geoespaciales por medio de datos discretos; es decir, cuando el fenómeno u objeto geoespacial puede ser representado con límites claramente diferenciables y definidos; como por ejemplo estructuras geológicas, vías de comunicación, cubiertas vegetales y demás (Bernabé y López, 2012; Del Bosque et al., 2012).

La Figura 1 muestra las primitivas geométricas, es decir, puntos, líneas y polígonos utilizados para representar los distintos tipos de entidades geoespaciales y los atributos que están asociados a ellas.

- *Modelo Ráster*

Se denomina como modelo de datos ráster, al modelo en el cual el área de interés o la zona de estudio es dividida de una forma sistemática en una serie o conjunto de unidades mínimas, proceso conocido como teselación o rasterización. El conjunto de unidades mínimas es conocido como malla; y cada una de estas unidades mínimas es denominada habitualmente como celda o pixel. Así, cada una de estas celdas, contiene información importante que la describe (Bernabé y López, 2012).

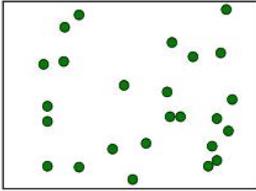
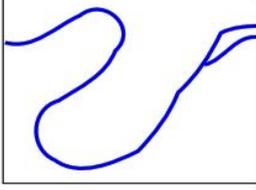
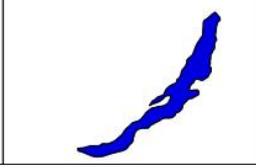
Primitiva	Entidad geoespacial	Representación	Atributos
Puntos			-Altura (m). -Diámetro normal (m).
Líneas			-Ancho máximo (m). -Calado máximo (m). -Longitud (Km).
Polígono			-Superficie (Km ²). -Profundidad máxima (m).

Figura 1. Primitivas geométricas básicas utilizadas en el modelo vectorial.

Fuente: Tomado de Olaya, (2020).

Uno de los parámetros fundamentales dentro del modelo ráster es la denominada resolución espacial, referido como tamaño de celda o tamaño de píxel. Así pues, además de servir para definir la estructura de la malla y para calcular las coordenadas de las celdas; el tamaño de cada una de estas permite calcular áreas, puesto que se establece el área ocupada por cada celda; de este modo, la principal importancia de la resolución espacial reside en que según sea su magnitud, esta va a definir la resolución de la capa; esto es, a mayor tamaño de celda, menor será la resolución de la capa ráster y viceversa (Olaya, 2020).

La Figura 2 muestra un ejemplo del modelo ráster; en dicha figura se observa una porción de malla ráster, en donde cada celda o píxel contiene un dato de elevación; así mismo, notamos que los límites de las celdas son visibles y evidentes.

- *Modelos Avanzados*

Para Del Bosque et al. (2012), tanto el modelo de datos vectorial como ráster, se limitan a describir el mundo real haciendo uso de entidades bidimensionales; sin embargo, existe, lo que ellos denominan como modelos avanzados, que pueden incluso representar la superficie del terreno en tres dimensiones. Esta representación digital de la superficie terrestre es conocida como Modelo Digital del Terreno (MDT), no siendo en esencia lo mismo que un Modelo Digital de Elevaciones (MDE).

132.9	133.9	135.6	139.2	140.6	144.4
126.8	128.5	131.4	133.9	135.9	139.9
122.3	124.1	125.8	128.5	131.8	135.6
118.7	119.9	121.9	124.3	128.2	131.5

Figura 2. Celdas de una malla ráster y valores de elevación asociados.

Fuente: Adaptado de Olaya, (2020).

Un MDT es un modelo o estructura numérica de datos, los cuales representan la distribución geoespacial de una variable cuantitativa y continua. El concepto de MDE es obviamente un caso particular dentro de los MDT, y es por demás útil cuando se pretende trabajar específicamente con datos de altitudes o elevaciones, pues estos describen la distribución geoespacial de la altimetría del terreno, haciendo uso de un conjunto de datos acotados.

- *Análisis Geoespacial*

El análisis geoespacial se define como el conjunto de técnicas y modelos que hacen un uso explícito de la componente geoespacial de cada dato particular que intervienen en el estudio de los fenómenos que se manifiestan en el espacio terrestre (Olaya, 2020).

En cuanto a las formas de proceder dentro del análisis geoespacial; existe una división generalizada, útil para hacer notar la gran variedad de análisis posibles y sus implicaciones. Estas no forman conjuntos aislados, sino que más bien comparten muchos aspectos y elementos comunes. Así, las clasificaciones más destacadas son: consulta geoespacial, medición, combinación, transformaciones, análisis de superficies, toma de decisiones, modelamiento (Bernabé y López, 2012).

Del Bosque et al. (2012), establecen que hay una diferencia en cuanto a la forma de abordar el análisis geoespacial según se aplique a un modelo de datos vectorial o a un modelo de datos ráster, esto por la propia naturaleza de cada uno. Mencionan, además, que por lo

general existen más funcionalidades de análisis geoespacial para los datos ráster que para los vectoriales en un entorno de trabajo de SIG, pues la aplicación de algoritmos es más sencilla en estos por su estructura en celdas. Y aunque, si bien en ambos casos, vectorial y ráster, se desarrollan análisis geoespaciales muy similares, la forma de resolver en cada uno de ellos es muy diferente.

- *Álgebra de Mapas*

Para Sarría (2006), uno de los fundamentales usos de los SIG, más allá de sus utilidades básicas, es la obtención o generación de nuevas capas de información a partir de otras que previamente ya están disponibles; para ello, se dispone de un conjunto de técnicas, procedimientos y herramientas de cálculo con matrices de datos que reciben, genéricamente, el nombre de álgebra de mapas.

Así pues, el álgebra de mapas, o, según Olaya (2020), también denominada como álgebra de capas; incluye un muy amplio conjunto de operadores, los cuales pueden ser ejecutados o aplicados ya sea sobre una o varias capas de entrada para producir u obtener una o varias capas de salida.

Cuando hablamos de un operador, Sarría (2006), explica que no es más que un algoritmo que ejecuta una misma acción u operación sobre todas las celdas que conforman a la capa ráster, así mismo, menciona que estos operadores son expresados mediante ecuaciones. Se puede definir algoritmos u operadores infinitos, sin embargo, suelen agruparse de acuerdo al tipo fundamental de función que cumplan, es decir, de acuerdo a la forma en que toman la información contenida en la o las celdas de las capas ráster de entrada, necesaria para realizar el cálculo. Así pues, clasifica a estos algoritmos en 6 grupos básicos, aunque dentro de ellos puede haber numerosas subclasificaciones. Son: algoritmos locales, de vecindad, de bloque, de área, de área extendida, globales.

2.2.1.2. Teledetección

Para Chuvieco (2008), la teledetección o sensoramiento remoto, se define como la técnica que permite la obtención de información de fenómenos u objetos localizados en la superficie del planeta, pero sin estar en contacto directo con ellos. Así, esta técnica abarca desde los procesos que tienen que ver con la obtención de las imágenes satelitales hasta el posterior tratamiento e interpretación de las mismas. El proceso que se lleva a cabo para obtener

las imágenes y su tratamiento, se basa principalmente en los principios de la propagación de la radiación electromagnética y el espectro electromagnético.

En las técnicas de teledetección, para obtener información de los objetos y/o fenómenos en cuestión, es necesario que exista una interacción entre ellos y aparatos o sensores especializados, los cuales son aerotransportados sobre plataformas específicas para dicho fin; así pues, la interacción mencionada se refiere al flujo de radiación electromagnética que es emitida por fuentes naturales o artificiales, viaja a través de la atmósfera terrestre y es reflejada por los objetos y materiales situados en la superficie terrestre, para ser finalmente recogida por el sensor; produciendo una imagen que puede tener múltiples bandas, donde cada una de estas bandas representa un segmento del espectro electromagnético (Meijerink et al., 2007).

Las aplicaciones de la teledetección son múltiples y muy variadas, puesto que actualmente hay muchas ciencias y disciplinas que requieren del tratamiento de las imágenes satelitales. De este modo, cuando interesa detectar algún aspecto o variable relevante de la superficie terrestre, se efectúan determinadas combinaciones con las bandas espectrales presentes en las imágenes satelitales. Existen numerosas combinaciones, según el objetivo que se desea alcanzar; uno de estos tipos de combinaciones son los denominados índices espectrales (Bravo, 2017).

- *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada*

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), es, según Bravo (2017), un índice espectral utilizado para medir la diferencia normalizada entre las reflectancias, es decir, la cantidad de luz reflejada, del rojo y del infrarrojo cercano en el espectro electromagnético, proporcionando, de esta manera, la medida sobre el desarrollo, cantidad y calidad de las coberturas vegetales presentes en un área de interés.

La Fórmula 1 muestra la forma de calcular el NDVI (Meijerink et al., 2007; Bravo, 2017), el cual corresponde al cociente del resultado de la resta de la reflectancia del infrarrojo cercano y la reflectancia del rojo entre el resultado de la suma de la reflectancia del infrarrojo cercano y la reflectancia del rojo; operaciones realizadas con las correspondientes bandas espectrales según el tipo de imagen satelital utilizada.

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}) / (\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}})$$

Fórmula 1. Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

En donde: $pnir$ es la reflectancia de la banda del infrarrojo cercano y, $pred$ es la reflectancia de la banda del rojo.

Finalmente, la Tabla 1 muestra valores aproximados para el NDVI, en el rango -1 a +1; valores que representan la situación de la vegetación y su descripción correspondiente.

Tabla 1. Valores aproximados en el rango del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada y su interpretación.

Valor NDVI	Descripción
< 0	Es material inanimado o muerto: carreteras, edificios, suelos o plantas muertas
0 a 0.33	Vegetación no saludable
0.33 a 0.66	Vegetación sana
> 0.66	Vegetación muy saludable
Rango normalizado:	<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> -1  +1 </div>

Fuente: Adaptado de Bravo, (2017).

2.2.2. Proceso de Análisis Jerárquico

Para Pacheco y Contreras (2008), el Proceso de Análisis Jerárquico, del inglés original Analytic Hierarchy Process (AHP), puede clasificarse como una metodología de análisis multicriterio, la cual fue desarrollada a fines de la década de 1970, por el profesor y doctor en matemáticas Thomas Saaty. Los autores señalan que los métodos de decisión multicriterio se basan fundamentalmente en los procesos de toma de decisiones, por tanto, el AHP se fundamenta también a partir de los procesos decisorios; los cuales necesitan de metodologías de comparación que logren ayudar al tomador de decisiones de forma tal que las decisiones tomadas tengan un elevado grado de consistencia en función de algún marco de racionalidad empleado.

La metodología AHP es un método que consiste en la descomposición de problemas o situaciones complejas en sus componentes, elementos o variables constitutivos, para de esta manera organizarlos en función de un orden jerárquico; obteniendo, posteriormente, ciertos valores numéricos denominados juicios o valoraciones de prioridad o preferencia.

Finalmente, las valoraciones de prioridad son sintetizadas, determinando qué componente, elemento o variable tiene mayor prioridad (Saaty, 1997).

Según Saaty (1980, 1997), el AHP logra incorporar los juicios y valoraciones personales de una manera lógica, integrando lo objetivo con lo subjetivo de una manera racional. El AHP se puede aplicar a diversos problemas del mundo real y según menciona el autor, es especialmente apropiado para planificar, asignación de recursos, resolver conflictos y demás; puesto que es una metodología multidisciplinaria en la que pueden intervenir multitud de actores y responsables.

2.2.2.1. Metodología del Proceso de Análisis Jerárquico

Saaty (1980, 1997) propone en la metodología AHP una forma lógica para organizar y ordenar el pensamiento humano analítico. Dicha forma lógica se basa principalmente en tres principios: construcción de jerarquías, establecimiento de prioridades y, consistencia lógica.

- *Construcción de Jerarquías*

Saaty (1997), menciona que las jerarquías son una herramienta inherente y fundamental en la mente humana. Estas ayudan a identificar los componentes fundamentales de un problema y/o situación, a reunir estos componentes en conjuntos iguales y, finalmente, a ordenar estos conjuntos en diferentes niveles de importancia o prioridad.

Saaty (1980), da una idea general sobre cómo elaborar una jerarquía para ser utilizada en la metodología AHP. Así, en esta idea básica, una jerarquía debería estar conformada por foco, criterios, subcriterios y alternativas; aunque indudablemente va a variar dependiendo del problema o situación abordados.

La Figura 3 muestra un modelo de una jerarquía básica utilizada en la metodología AHP, en donde se observa que el nivel superior de la jerarquía es denominado como foco, el cual consta únicamente de un único elemento, el cual es el objetivo global, es decir, el objetivo general que se desea lograr. Los niveles inferiores pueden tener, cada uno, distintos elementos, generalmente entre cinco y nueve. En el nivel inmediatamente inferior al foco se encuentran los criterios e inmediatamente después de estos, se encuentran los subcriterios.

- *Establecimiento de Prioridades*

Para Pacheco y Contreras (2008), el establecimiento de las preferencias o prioridades se efectúa en función de las denominadas comparaciones pareadas, es decir, comparaciones

entre dos elementos o variables; los cuales se comparan según a un criterio dado. De esta manera, para llevar a cabo las comparaciones pareadas se debe construir la denominada Matriz Recíproca de Comparaciones Pareadas (MRCP).

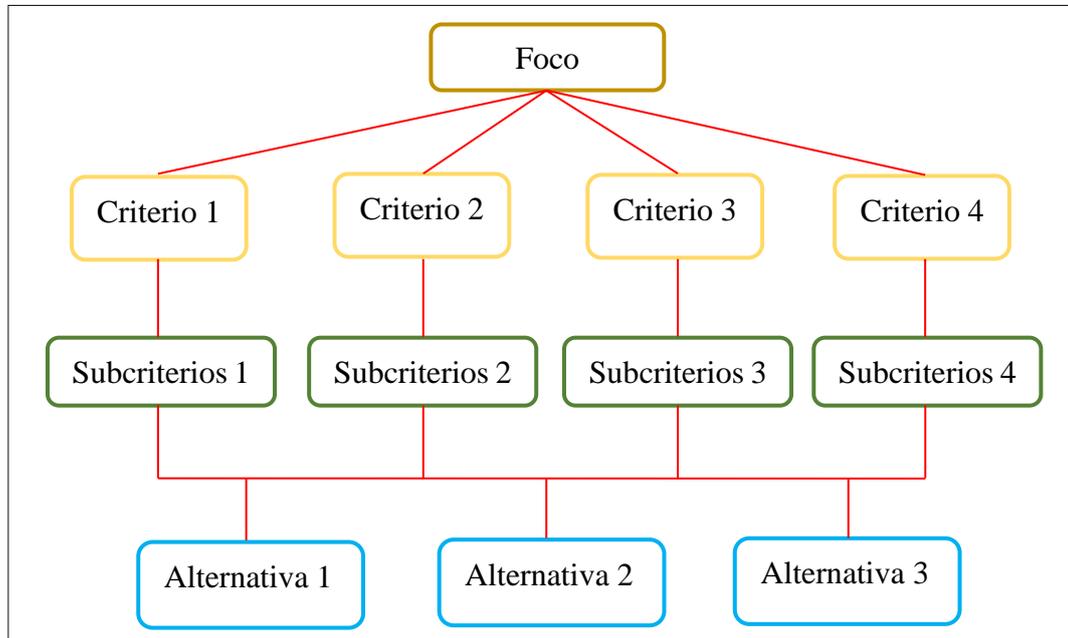


Figura 3. Jerarquía básica usada en el Proceso de Análisis Jerárquico.

Fuente: Elaborado con base en Saaty, (1997).

En la Tabla 2, observamos una MRCP en función de un criterio X, el cual consta de cinco subcriterios a comparar: A1, A2, A3, A4 y A5; y se disponen como se observa en ella. En la matriz el componente A1 de la columna izquierda se ha de comparar con cada uno de los cinco componentes de la fila superior, esto en función del criterio X; y así sucesivamente para todos los componentes presentes en la columna izquierda. Cuando comparamos un componente de una matriz consigo mismo, por ejemplo, A1 y A1, la comparación siempre dará la unidad. Por otro lado, cuando comparemos pares de componentes distintos, sus valoraciones correspondientes serán recíprocas, por ejemplo, al comparar el par A1 - A2, se estima un valor numérico de 5 en la escala fundamental y, por tanto, cuando se compare el par A2 - A1 el valor numérico ha de ser 1/5.

Sin embargo, para comparar cada uno de los componentes de la matriz entre sí, no solo asignamos números o cantidades al azar, sino que, estas cantidades están definidas en la denominada Escala Fundamental para las comparaciones pareadas (Saaty, 1980). Así pues, para completar la matriz de comparaciones por pares usamos escalares, es decir, números,

que están ordenados en una escala del uno al nueve; y que representan la importancia relativa que un componente tiene sobre el otro, en función del criterio sobre el que se están comparando. La Tabla 3 muestra la escala fundamental utilizada en el AHP para establecer los juicios o valoraciones entre los componentes de un mismo nivel jerárquico, en función del criterio inmediatamente superior.

Tabla 2. Ejemplo de una Matriz Recíproca de Comparaciones Pareadas.

X	A1	A2	A3	A4	A5
A1	1	5
A2	1/5	1			
A3	...		1		
A4	...			1	
A5	...				1

Fuente: Adaptado de Saaty, (1980, 1997).

Una vez construida la estructura jerárquica fundamental, se han emitido los juicios o valoraciones y completado la matriz de comparaciones pareadas para los diferentes niveles jerárquicos; el proceso de análisis jerárquico se reduce a un cálculo matemático de valores y vectores propios (Pacheco y Contreras, 2008), como muestra la expresión matemática contenida en la Fórmula 2.

$$A * w = \lambda * w$$

Fórmula 2. Expresión original para resolver la Matriz Recíproca de Comparaciones Pareadas.

En donde: A es la Matriz Recíproca de Comparaciones Pareadas, w es el vector propio que representa al orden de prioridades, λ es el máximo valor propio de la medida de la consistencia de los juicios.

- *Consistencia Lógica*

Para Saaty (1997), consistencia en la metodología AHP, abarca fundamentalmente dos principios: el primero, transitividad, es decir, las relaciones entre los elementos deben respetar el orden jerárquico de los mismos, esto es, si el elemento X es mayor que el elemento Y, y a su vez Y es mayor que Z, entonces lógicamente X es mayor que Z; el segundo

principio, proporcionalidad, hace referencia a que las proporciones de los juicios o valoraciones de preferencias deben darse dentro de un rango de error permitido, esto es, si el elemento X es tres veces mayor que el elemento Y, y esta a su vez es dos veces mayor que Z, entonces X debe ser seis veces mayor que Z. Por tanto, un juicio o valoración emitido es cien por ciento consistente cuando cumple a cabalidad los principios de transitividad y proporcionalidad.

Tabla 3. Escala fundamental para las comparaciones pareadas.

Juicio o valoración	Definición	Explicación
1	Igual	Ambos componentes contribuyen en igual medida al propósito general
2		Intermedia entre 1 y 3
3	Moderada	El juicio y la experiencia favorecen a un componente sobre el otro
4		Intermedia entre 3 y 5
5	Fuerte	El juicio y la experiencia favorecen fuertemente a un componente sobre el otro
6		Intermedia entre 5 y 7
7	Muy fuerte o demostrada	Un componente es mucho más favorecido que su contraparte, predominancia demostrada en la práctica
8		Intermedia entre 7 y 9
9	Extrema	Un componente es favorecido en comparación al otro totalmente

Fuente: Adaptado de Saaty, (1980).

Sin embargo, según Pacheco y Contreras (2008), la mente humana a menudo no emite juicios cien por ciento consistentes. Por lo general se espera que infrinja al principio de proporcionalidad de tal forma que no afecte de ninguna manera al principio de transitividad. Además, el error en la proporcionalidad debe estar dentro de un cierto rango, pues si sobrepasa el umbral de error los resultados obtenidos no serían válidos en el mundo real.

Así pues, Saaty (1980) mide la inconsistencia global de los juicios o valoraciones emitidos en el AHP utilizando la denominada Relación de Consistencia (RC). La Fórmula 3 muestra

la expresión matemática para el cálculo de RC, que es el cociente que resulta de dividir el denominador Índice de Consistencia (IC) entre el Índice de Aleatoriedad (IA).

$$RC = IC / IA$$

Fórmula 3. Cálculo de la Relación de Consistencia.

En donde: RC es la Relación de Consistencia, IC es el Índice de Consistencia, IA es el Índice Aleatoriedad.

En cuanto al Índice de Consistencia (IC), puede definirse como la medida del error o la desviación de la consistencia de la o las matrices recíprocas de comparaciones pareadas (Saaty 1980, 1997). La Fórmula 4 muestra la expresión utilizada por el profesor Saaty para calcular IC.

$$IC = (\lambda_{\text{máx}} - n) / (n - 1)$$

Fórmula 4. Cálculo del Índice de Consistencia.

En donde: $\lambda_{\text{máx}}$ es el máximo valor propio de la MRCP, n es el tamaño de la MRCP, el cual está en función del número de componentes, elementos o variables que se comparan en la matriz.

En un principio, Saaty (1980, 1997), determinó que una vez que la jerarquía fundamental fue establecida y la MRCP está completa, reducía el AHP a la expresión mostrada anteriormente en la Fórmula 2; sin embargo, el autor cayó en cuenta que dicha expresión era de muy compleja resolución. Por tanto, definió una relación que resulte en cálculos mucho más simples, pasando de la compleja expresión original al cálculo de $\lambda_{\text{máx}}$, mostrada en la Fórmula 5; en la que, el cálculo de $\lambda_{\text{máx}}$, es decir, del máximo valor propio de la MRCP queda expresado como el producto del vector de prioridades obtenidos de la MRCP, multiplicado por una matriz fila obtenida de la sumatoria de cada columna de la MRCP principal.

$$\lambda_{\text{máx}} = V * B$$

Fórmula 5. Cálculo de $\lambda_{\text{máx}}$.

En donde: $\lambda_{\text{máx}}$ es el máximo valor propio de la MRCP, V es el vector de prioridades, es decir, vectores propios que se obtienen de la MRCP y, B es una matriz fila obtenida de la suma de las valoraciones en cada columna de la MRCP.

El Índice de Aleatoriedad (IA) corresponde a valores estándares por Saaty (1980, 1997), que son utilizados para calcular RC. El IA está en función de n, es decir, el tamaño de la MRCP, que depende del número de elementos de dicha matriz (Saaty 1980, 1997; Pacheco y Contreras, 2008). La Tabla 4 muestra los valores del IA que son utilizados según el tamaño o número de elementos de la MRCP.

Tabla 4. Valores del Índice de Aleatoriedad según el tamaño de la matriz.

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valor de IA	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Fuente: Adaptado de Saaty, (1997) y Pacheco y Contreras, (2008).

Finalmente, Saaty (1997) y Pacheco y Contreras (2008), indican que los valores obtenidos de RC para una MRCP, ponen en evidencia la consistencia o inconsistencia de los juicios o valoraciones emitidos para completar la MRCP, lo que se traduce a que el AHP realizado tendrá o no validez en el mundo real, respectivamente. La Tabla 5 muestra las acciones que se deben tomar según los valores obtenidos al calcular RC.

Tabla 5. Acciones a tener en cuenta según el valor obtenido de Relación de Consistencia.

Valor de RC	Significado	Acciones
≤ 0.1	Existe consistencia	No es necesario reevaluar los juicios emitidos para la MRCP.
> 0.1	Existe inconsistencia	Es necesario reevaluar los juicios emitidos para la MRCP.

Fuente: Elaborado con base en Saaty, (1997) y Pacheco y Contreras, (2008).

2.2.3. Hidrología

Para Villón (2004), la hidrología es la ciencia que estudia al agua en cuanto a su ocurrencia, circulación y distribución en el planeta, en específico en la superficie terrestre; así como sus propiedades físicas y químicas y su relación con el medio ambiente.

2.2.3.1. Cuenca Hidrográfica

Para Vásquez et al. (2016), una cuenca hidrográfica se define, desde el punto de vista de la hidrología, como aquella área natural geográfica, la cual está delimitada por una divisoria topográfica o *divortium aquarum*. Así mismo, esta área natural capta las precipitaciones donde el agua o es drenada por escorrentía superficial hacia un colector común, denominado río principal o se infiltra hacia el subsuelo, llevando a cabo la formación de manantiales y almacenamiento de aguas subterráneas. Una cuenca hidrográfica, es entonces todo un sistema complejo, donde ocurre el ciclo hidrológico y, cuyos elementos naturales, ambientales, sociales y económicos tienen una estrecha interrelación, así como también son variables en el tiempo. Mencionan que una cuenca hidrográfica, en particular las cuencas hidrográficas alto andinas, es decir, las que están presentes en el territorio peruano, por lo general constan de tres partes, como muestra la Figura 4; y cada una de ellas tiene ciertas características particulares que las diferencian de las restantes.

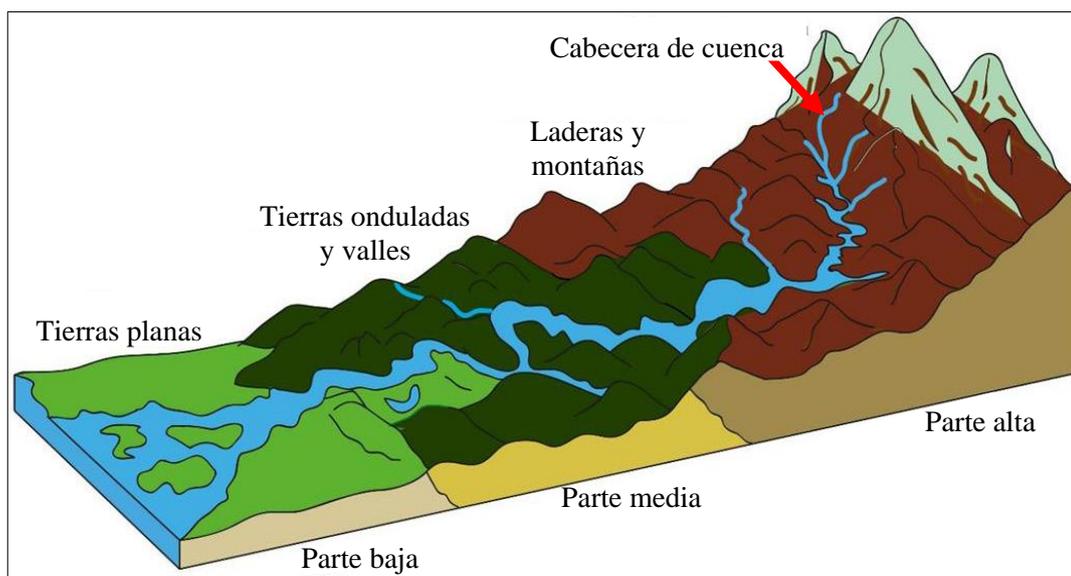


Figura 4. Block diagrama de las partes de una cuenca hidrográfica alto andina.

Fuente: Tomado de Vásquez et al., (2016).

- *Partes Altas*

Denominadas cabeceras de cuenca. Comprendidas en altitudes superiores a los 3000 msnm en adelante. Estas áreas concentran el mayor volumen de agua de la cuenca en cuestión, puesto que allí la precipitación es abundante e intensa, convirtiéndose en las zonas de mayor

disponibilidad de agua y que abastecerán, superficial y/o subterráneamente, a las partes restantes de la cuenca. En la parte alta de las cuencas la precipitación total anual varía entre 800 y 1600 mm. La topografía de estas zonas es frecuentemente accidentada y escarpada.

- *Partes Medias*

Comprendidas entre los 800 y 3000 msnm. En estas zonas las precipitaciones anuales en promedio varían entre los 100 y 800 mm. En estas zonas se encuentran los valles interandinos, siendo frecuentemente la presencia de pequeñas ciudades que se emplazan en ellas.

- *Partes Bajas*

Están comprendidas desde el nivel del mar hasta los 800 msnm. La precipitación anual promedio es muy escasa, generalmente menor a los 100 mm de lluvia. Emplazados en estas partes se encuentran amplios valles costeros, y a su vez se ubican medianas y grandes ciudades consumidoras. En estas zonas, el potencial de aguas subterráneas es alto.

2.2.3.2. *Ciclo Hidrológico*

Para Villodas (2008), se conoce como ciclo hidrológico o ciclo del agua a la sucesión de cambios que sufre el agua en la hidrosfera, obedeciendo a las leyes físicas; siendo de esta manera, un proceso continuo y perpetuo, es decir, no tiene inicio en un proceso determinado ni tampoco tiene final, es, además, el aspecto más importante de la hidrología.

Vásquez et al. (2016), asume que el ciclo hidrológico se inicia con la evaporación del agua contenida en los mares, ríos, lagos y en general en cualquier parte del planeta donde exista un cuerpo de agua, por acción de los rayos solares y consecuente calentamiento de estas o por accionar del viento. El vapor de agua formado es dirigido hacia la parte superior de la atmósfera por las corrientes ascendentes de los vientos, una vez allí y debido a las bajas temperaturas, el vapor de agua se condensa y por consiguiente se forman las nubes. Estos desplazamientos ocasionan que las partículas de agua existentes en las nubes colisionen y aumenten de tamaño y peso, para que finalmente caigan en los mares y en la superficie terrestre en forma de precipitaciones, sean líquidas o sólidas. Así, una proporción de las precipitaciones que caen en la superficie terrestre fluye como escorrentía superficial; mientras que otra proporción logra infiltrarse y almacenarse en el subsuelo. A mismo tiempo, en el agua de escorrentía superficial van ocurriendo, de forma simultánea, los fenómenos de evaporación, transpiración y demás; repitiéndose el ciclo.

- *Precipitación*

Fundamentalmente la precipitación se constituye por toda el agua que precipita en sobre la superficie terrestre, consecuencia del vapor agua contenido en la atmósfera y que ha condensado. La precipitación puede ser de forma líquida, cuya forma más conocida es la lluvia; o sólida, como nieve o granizo. Siendo la lluvia; la forma más común de precipitación y que más interés representa en ingeniería, además de ser una variable fundamental en la recarga de las aguas subterráneas (Villón, 2004).

De acuerdo a Bautista (2019), la precipitación se mide generalmente en milímetros de lluvia, la cual es definida como la cantidad de precipitación, expresada en la altura de agua, por unidad cuadrada de superficie. Un milímetro de lluvia es equivalente a un litro de agua contenido en un metro cuadrado. Es común que los registros de datos de las lluvias sean sistematizados u ordenadas en función del tiempo, obteniendo así las denominadas series de tiempo de lluvia, las cuales pueden ser diarias, mensuales o anuales.

En cuanto al cálculo de la precipitación media que cae sobre una cuenca hidrográfica en particular, Vásquez et al. (2016) mencionan que se puede conocer el volumen promedio del agua precipitada en determinada cuenca hidrográfica por medio de la utilización de tres métodos: promedio aritmético, polígono de Thiessen e isoyetas. De los tres métodos mencionados, Villón (2004) y Vásquez et al. (2016) coinciden en que el método de las isoyetas es el que da mejores resultados cuando se desea calcular la precipitación media.

- *Infiltración*

Es el proceso por el cual, el agua, una vez en contacto con el suelo, penetra al interior de este, infiltrándose a través de los poros, según la permeabilidad de los materiales propios del subsuelo. Así, a medida que el suelo se humedece, por acción de la gravedad, y según las diferentes capas de subsuelo que existan, el agua seguirá avanzando hasta capas cada vez más profundas, llegando en muchos casos a ser almacenada en acuíferos. En el proceso de infiltración del agua, el nivel de permeabilidad de los materiales geológicos del subsuelo juega un rol importante; aunque también lo hacen la pendiente del terreno superficial y el nivel de cobertura vegetal. Cuando la cantidad de precipitación que cae sobre la superficie supera a la capacidad de infiltración de los suelos, se forma una lámina de agua que puede escurrir superficialmente sobre el terreno, hasta alcanzar algún curso de agua (Bautista, 2019).

2.2.4. Hidrogeología

La hidrogeología, según mencionan Escuder et al. (2009), es una ciencia de carácter multidisciplinar, en la cual se combinan conocimientos de ciencias como la geología y la química en el estudio del flujo en medio poroso y la gestión de los recursos hídricos naturales. Establecen que la hidrogeología tiene como objetivo primario, el conocimiento y evaluación de los recursos hídricos subterráneos existentes en el subsuelo, así como la posibilidad de su captación y de su explotación, todo ello dentro de un marco de gestión sostenible en el espacio y tiempo.

Martínez et al. (2006) indica que el agua subterránea, generalmente se encuentra ocupando los poros de los materiales geológicos considerados permeables, mencionando la clásica clasificación en unidades de los materiales geológicos según su comportamiento hidrogeológico, es decir, según su capacidad para almacenar el agua infiltrada y su capacidad para permitir la circulación del agua en su interior, son: acuífero, acuitardo, acuicludo, acuífugo.

2.2.4.1. Caracterización Hidrogeológica de los Materiales Geológicos

En opinión de Escuder et al. (2009), existe una gran variedad de materiales geológicos, formados a partir de distintos y complejos procesos de formación y, posteriormente, sometidos a procesos geodinámicos exógenos y/o endógenos que los modifican; configurando así determinadas características de dichos materiales y que tendrán gran incidencia en lo que se refiere a sus propiedades de almacenamiento y flujo de agua subterráneas en ellos.

- *Materiales No Consolidados*

Se consideran como materiales no consolidados a aquellos materiales geológicos cuya estructura sólida esté compuesta por los distintos materiales granulares sin cementación; litológicamente esto es: gravas, arenas, arcillas y/o limos. Así, atendiendo a su génesis, mencionan los siguientes depósitos de materiales no consolidados: aluviales, coluviales, fluviales, deltaicos, eólicos, glaciares y en general depósitos no consolidados de relleno de fosas tectónicas o cuencas sedimentarias (Escuder et al., 2009).

La conductividad hidráulica o permeabilidad en estos materiales está principalmente condicionada por la disposición geométrica y magnitud de su porosidad primaria, es decir,

intergranular; siendo generalmente la porosidad de estos materiales, superior a la de muchos materiales geológicos restantes (Meijerink et al., 2007).

- *Rocas Sedimentarias*

En términos hidrogeológicos y geológicos, son rocas sedimentarias aquellos materiales geológicos consolidados de origen detrítico y/o carbonatado, y en algunos casos particulares también de origen volcanosedimentario; originados en una cuenca sedimentaria; generalmente teniendo una historia tectonoestratigráfica relacionable y secuencial (Escuder et al., 2009).

En este tipo de materiales geológicos generalmente coexisten la porosidad primaria y secundaria, confiriéndole a estos materiales un rango de permeabilidades bastante amplios. En estos materiales inicialmente su potencial de almacenamiento de agua subterránea estaría relacionado a la porosidad primaria, sin embargo, en la actualidad y debido a los diferentes procesos generados en la cuenca sedimentaria, modificando así su estructura y comportamiento reológico iniciales, su mayor potencial de almacenamiento residiría en la porosidad secundaria, generada esta última por disolución o fracturamiento, conllevando también a una mayor importancia de la permeabilidad secundaria en dichos materiales (Meijerink et al., 2007).

- *Rocas Metamórficas e Ígneas Intrusivas*

Las rocas metamórficas e intrusivas, generalmente denominadas en conjunto como macizos cristalinos; son consideradas desde el punto de vista hidrogeológico como poco favorables para el almacenamiento de agua subterránea, esto por su baja permeabilidad. Así pues, las distintas litologías específicas dentro de las rocas ígneas intrusivas y metamórficas, como granitos, dioritas, cuarcitas, esquistos, pizarras y demás; no presentan diferencias significativas entre ellas; esto quiere decir, que son muy compactas y de muy baja porosidad primaria o intergranular, características que reducen su capacidad de almacenamiento (Martínez et al., 2006).

Por tanto, queda claro que la propiedad que regirá la capacidad de almacenamiento de agua en este tipo de materiales geológicos serán la porosidad y permeabilidad secundarias; principalmente la generación de fracturas y discontinuidades en estos macizos rocosos cristalinos (Escuder et al., 2009).

- *Rocas Ígneas Volcánicas*

Se describen a las rocas volcánicas como aquellos materiales geológicos que se originaron por el rápido enfriamiento y solidificación de un magma en la superficie terrestre o en un punto próximo a esta, o bien son producto de la violenta expulsión de magma y gases hacia la atmósfera. Así pues, estas formaciones geológicas moldean la superficie del terreno ya sea de forma individualizada o en conjunto con sedimentos ya existentes, formando rocas consideradas volcanosedimentarias (Martínez et al., 2006).

En las litologías de origen volcánico, la porosidad total es muy variable, dependiendo sobre todo del origen genético de estas litologías; siendo de hasta 50% en materiales piroclásticos extremadamente porosos, como las pumitas; descendiendo hasta un 2% para materiales de composición basáltica reciente. Así pues, las rocas volcánicas son los materiales geológicos en los cuales menos se puede lograr una proporción directa entre la porosidad y la permeabilidad de los mismos; ya que en muchos casos la porosidad total no pasa a ser una porosidad efectiva, por el hecho que los poros no están conectados entre sí; dando como resultado la variabilidad en la permeabilidad de estos materiales (Meijerink et al., 2007).

2.3. Definición de Términos Básicos

Capa Temática: Principio de organización vertical de los datos e información geoespacial en el que se basan los SIG para caracterizar y gestionar el territorio. Pueden combinarse y dar como resultado nueva información a partir de ellas (Del Bosque et al., 2012).

Densidad de Drenaje: Relación existente entre los cursos de drenaje en una cuenca hidrográfica y el área de esta. Se calcula dividiendo la longitud total de los drenajes entre el área de la cuenca hidrográfica (Sánchez, 2017).

Densidad de Lineamientos: Relación entre la longitud total de los lineamientos analizados y el área que se considere a aplicar la densidad de fracturación (Sánchez, 2017).

Imagen Satelital: Son registros digitales y en formato ráster de la radiación electromagnética generalmente de la superficie terrestre y que son capturados a través de los sensores remotos (Dávila, 2011).

Índice de Vegetación: Parámetro calculado a partir de valores de reflectancia a distintas longitudes de onda, generalmente en imágenes satelitales, siendo particularmente sensible a cubiertas vegetales (Muñoz, 2013).

Índice de Potencial de Agua Subterránea: Cantidad adimensional que se utiliza para cuantificar la probabilidad de existencia de agua subterránea en determinada zona de estudio (Macas y López, 2018).

Isoyetas: Curvas imaginarias que unen puntos de igual precipitación (Villón, 2004).

Lineamientos Estructurales: Constituyen rasgos físicos de la superficie terrestre, siendo de formas lineales, curvilíneas o combinación de ambas. Reflejan el resultado de los fenómenos estructurales del subsuelo, siendo fallas, fracturas y diaclasas (Tejada, 2019).

Modelo Geoespacial: Resultado del modelamiento geoespacial. Un modelo geoespacial se entiende como una abstracción y descripción de la realidad para representar objetos, procesos o fenómenos geoespaciales estudiados; realizando así una simulación del mundo real (Lima, 2018).

Pendiente del Terreno: Superficie inclinada del terreno (Dávila, 2011).

Permeabilidad: Capacidad de una roca o suelo para que un fluido, generalmente agua, la pueda atravesar. En muchos casos se usa como término cualitativo (Escuder et al., 2009).

Permeabilidad Primaria: Permeabilidad que presenta suelos o rocas, debido a la composición y disposición de sus granos que los componen (Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2011).

Permeabilidad Secundaria: Permeabilidad que generalmente presentan los materiales rocosos, debido a procesos tectónicos: fisuras o fracturas; también por modificaciones y disoluciones mineralógicas (Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2011).

Potencial de Agua Subterránea: Definido como la posibilidad de existencia de aguas subterráneas en una determinada zona de estudio (Macas y López, 2018).

Precipitación: Caída del agua contenida en la atmósfera hacia la superficie terrestre por cambios de la temperatura, en forma de lluvia, nieve o granizo (Dávila, 2011).

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación

3.1.1. Ubicación Geográfica

La Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque (CHJ), se encuentra en el norte del Perú, dentro de la denominada región hidrográfica o vertiente del Pacífico, entre los 78° 20' 59" y 79° 35' 26" de longitud oeste y los 6° 48' 20" y 7° 26' 13" de latitud sur, aproximadamente; como muestra el Plano 01, en Anexos.

3.1.2. Ubicación Política

La Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, políticamente está comprendida dentro de cuatro provincias del departamento de Cajamarca: San Miguel, San Pablo, Cajamarca, Contumazá; y dos provincias del departamento de La Libertad: Chepén y Pacasmayo; como muestra el Plano 02, en Anexos.

3.1.3. Accesibilidad

El acceso principal hacia la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque está constituido por la carretera asfaltada Panamericana Norte, cuyo recorrido atraviesa de sur a norte el valle del Jequetepeque, aproximadamente a la altura del Km 700, permitiendo la comunicación con el distrito de Guadalupe, provincia de Pacasmayo.

La existencia, además, de un ramal asfaltado que se dirige hacia el distrito de Cajamarca, provincia de Cajamarca, partiendo desde Ciudad de Dios, distrito de Guadalupe, provincia de Pacasmayo; y que en su recorrido atraviesa toda la cuenca del río Jequetepeque de oeste a este, es sin duda el acceso más importante hacia la cuenca. Existen numerosos caminos carrozables dentro del área que abarca la CHJ, permitiendo el acceso a distintitos centros poblados. La Figura 5 muestra en tonos azules los principales accesos asfaltados que

recorren la zona de estudio y el área circundante a la cuenca, además de los principales distritos.

3.2. Procedimiento

3.2.1. Etapas de la Investigación

La investigación consta de cuatro etapas de gabinete, como sigue:

3.2.1.1. Etapa de gabinete 1

En esta primera etapa se recopila la información geoespacial a utilizar, la cual está en función de las variables de la investigación; y, que servirá para generar la base de datos, a partir de la cual realizaremos el modelamiento geoespacial.

3.2.1.2. Etapa de gabinete 2

En esta segunda etapa, una vez construida la base de datos en un entorno SIG, procedemos al procesamiento de la información geoespacial. El resultado del procesamiento es la generación de las capas temáticas base de las variables drenajes, lineamientos estructurales, litología, pendiente del terreno, precipitación e índice de vegetación.

3.2.1.3. Etapa de gabinete 3

En esta tercera etapa se desarrolla la metodología AHP aplicada a la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque; para ello, partimos de la construcción de una jerarquía que será la guía para la elaboración de matrices de comparación por pares, cuyo resultado será el establecimiento de prioridades o pesos normalizados. Finalmente, se corrobora la consistencia lógica de dichas prioridades.

3.2.1.4. Etapa de gabinete 4

En esta última etapa se realiza el cálculo del Índice de Potencial de Agua Subterránea para la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, realizado en un entorno SIG mediante una combinación lineal ponderada, usando para dicho cálculo los pesos normalizados obtenidos en la etapa anterior. Finalmente, valiéndonos de los resultados del cálculo del Índice de Potencial de Agua Subterránea, realizamos la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

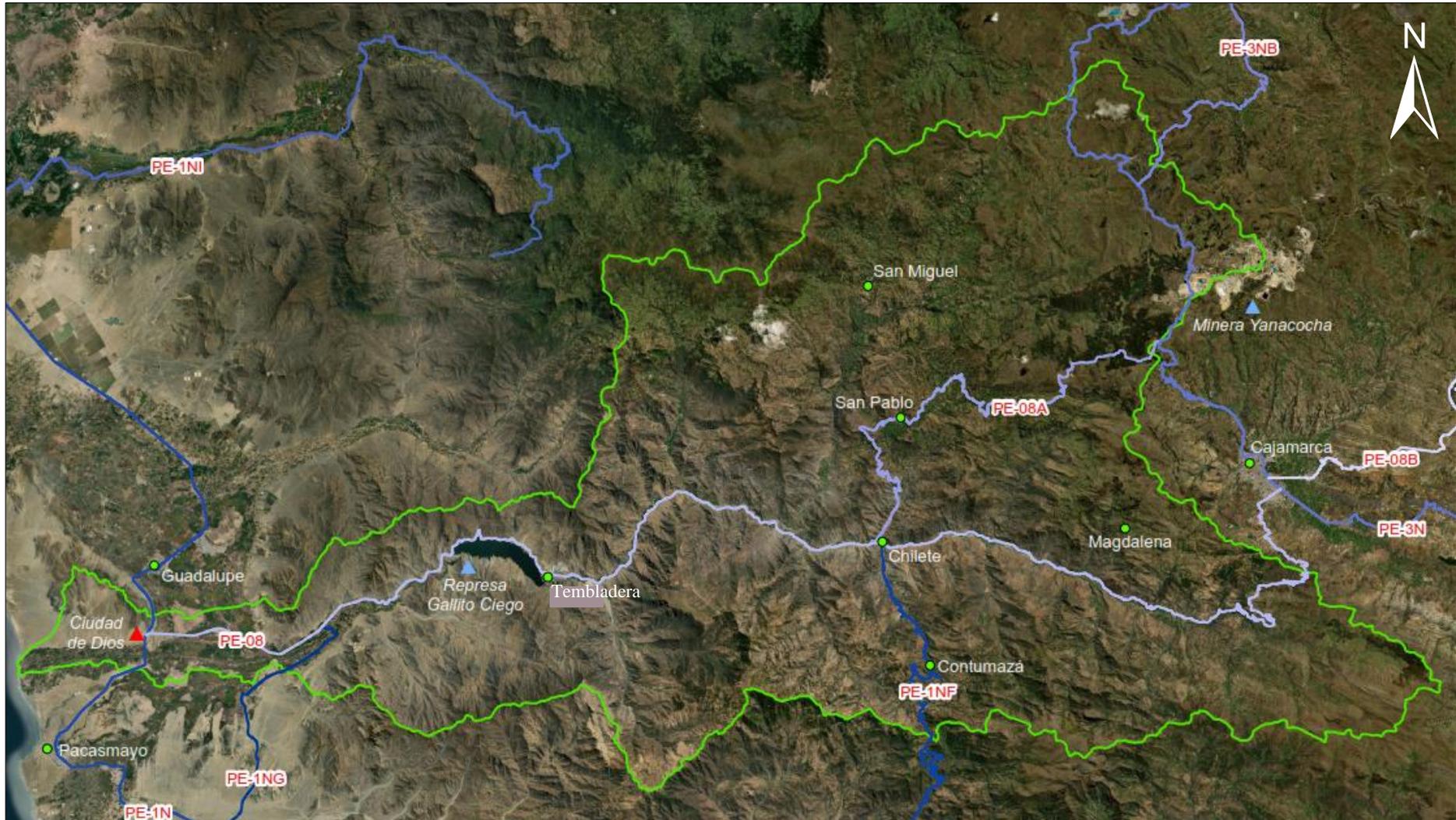


Figura 5. Principales accesos en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

3.2.2. Metodología

3.2.2.1. Tipo de Investigación

La investigación es de tipo aplicada con un enfoque mixto cuantitativo - cualitativo. Aplicada porque la investigación apunta a incrementar conocimientos que tengan aplicación en la realidad. Con enfoque mixto cuantitativo porque mediante la recolección de datos, con base en la medición de estos, se probará la hipótesis; y cualitativo puesto que se analiza las cualidades y características de los parámetros (Hernández et al., 2014).

3.2.2.2. Nivel de la Investigación

El nivel de la investigación es explicativo, pues se establece la relación causa – efecto que existe entre las variables independientes y la variable dependiente, respectivamente (Hernández et al., 2014).

3.2.2.3. Diseño de la Investigación

La investigación tiene un diseño no experimental, de tipo transversal. Es no experimental pues no habrá manipulación deliberada de las variables, y de tipo transversal pues los datos e información son recolectados en un determinado periodo de tiempo (Hernández et al., 2014).

3.2.2.4. Método de la Investigación

El método de investigación es de carácter deductivo y documental. Deductivo, pues partimos de premisas generales para llegar a un caso en particular (Hernández et al., 2014). Documental, pues se realiza una revisión y uso de documentos, registros y archivos electrónicos preparados por otros autores especializados (Caballero, 2014).

3.2.2.5. Población de Estudio

La población de estudio en la investigación abarca las capas en formato ráster de drenajes, lineamientos estructurales, litología, pendiente del terreno, precipitación e índice de vegetación en los 3 956.4 Km² de área de la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

3.2.2.6. Muestra

La muestra en la investigación abarca a cada celda o pixel de las capas en formato ráster de drenajes, lineamientos estructurales, litología, pendiente del terreno, precipitación e índice de vegetación en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

3.2.2.7. *Unidad de Análisis*

Las unidades de análisis en la presente investigación son los datos e información geoespacial de drenajes, lineamientos estructurales, litología, pendiente del terreno, precipitación e índice de vegetación en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

3.2.2.8. *Identificación de Variables*

La Tabla 6 muestra las variables independientes y dependiente de la investigación.

Tabla 6. Identificación de variables.

Variab<i>les</i> independientes	Variable dependiente
Drenajes	
Lineamientos estructurales	
Litología	Potencial de agua
Pendiente del terreno	subterránea
Precipitación	
Índice de vegetación	

3.2.3. *Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos, Materiales y Equipos*

3.2.3.1. *Técnicas de Recolección de Datos*

La principal técnica utilizada en la presente investigación es la técnica documental; pues se realiza la recopilación, revisión y aprovechamiento de la bibliografía especializada y de archivos electrónicos.

3.2.3.2. *Instrumentos de Recolección de Datos*

Los instrumentos principales utilizados en la presenten investigación son: una base de datos en SIG, hojas de cálculo Excel, planos.

3.2.3.3. *Materiales*

Los materiales utilizados en la presente investigación son principalmente de origen electrónico, a saber: Mapas geológicos integrados en escala 1:100 000, imágenes satelitales Landsat 8, ortofoto ECW del área de estudio, modelos digitales de elevaciones ASTER GDEM V3, red hidrográfica regional en formato vectorial, distribución espacial de estaciones pluviométricas y datos de precipitación media anual en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

3.2.3.4. *Equipos*

El principal equipo utilizado en la presente investigación es una computadora portátil, en la cual se ejecutan los softwares especializados para la investigación.

3.2.3.5. *Softwares*

Se hizo uso de tres softwares: ArcGIS v10.8, Excel v2021; mediante los cuales se realiza el procesamiento de datos e información geoespacial recopilada.

3.3. Tratamiento de Datos e Información

3.3.1. Generalidades

La Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, según el sistema de codificación y delimitación Pfafstetter, es una unidad hidrográfica de nivel 5, cuyo código de identificación es 13774. El área de drenaje total de la cuenca es de aproximadamente 3 956.4 Km² y sus principales afluentes, que provienen principalmente de la zona alta montañosa, son los ríos Pallac, Llaminchan, Contumazá, Huertas, Chanta, Magdalena, San Miguel, Chilete. El río principal, es decir, el río Jequetepeque, presenta una longitud de recorrido de aproximadamente 175 Km. En cuanto a las altitudes dentro de la cuenca en cuestión, varían desde los 0 m.s.n.m. hasta los 4 201 m.s.n.m., presentando una altitud media de 2 410 m.s.n.m. En cuanto a su demarcación hidrográfica, la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque limita con las siguientes cuencas: Cuenca Chancay Lambayeque e Intercuenca Alto Marañón por el norte, Cuenca Crisnejas por el este, Cuenca Chicama por el sur, Cuenca Zaña y Chamán por el oeste (MINAGRI y ANA, 2015).

3.3.1.1. *Clima y Vegetación*

La Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, debido a la gradiente altitudinal, características orográficas y los vientos húmedos que ingresan a los valles y son retenidos por la meseta andina; presenta una división climatológica claramente diferenciable en dos zonas: una parte baja y una alta. La zona alta de la cuenca es clasificada como clima húmedo, y es en esta zona donde ocurren la mayor parte de las precipitaciones, cuyo periodo húmedo es por lo general entre los meses de diciembre y abril; así mismo, debido a su altitud topográfica, la cobertura vegetal en esta zona está limitada a la vegetación altoandina característica. En cambio, la zona baja, en cambio, es considerada una zona árida, de escasa vegetación, salvo por aquellas zonas ubicadas en el valle y que cuentan con sistemas de riego. Las precipitaciones,

generalmente son escasas en esta zona, aunque pueden llegar a ser muy intensas durante la presencia del Fenómeno del Niño en el litoral norte peruano (MINAGRI y ANA, 2015).

Según Peña et al. (2015), se distingue entonces una relación directa existente entre la altitud y la precipitación, en donde a mayor altitud mayor precipitación, produciéndose un incremento de 0 a 1 200 mm. Por su parte, las temperaturas en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque varían entre los 2 hasta 30 °C. Los variados niveles de temperatura y humedad le dan a la cuenca una gran diversidad de climas, variando desde los secos y calurosos hasta los fríos y húmedos, respectivamente a nivel del mar y partes altas de la cuenca. Además, los autores mencionan que la vegetación es muy variada, asociada principalmente con la altura topográfica y el clima en donde se desarrolle, realizando una clasificación de la vegetación en donde utilizan el sistema de clasificación planteado por Holdridge en 1967; en la que, según su rango de altitud topográfica, existe tipos especies de vegetación que se asociación cada una de ellas:

- *Entre 0 a 1 000 msnm:* Mayormente la vegetación a esta zona corresponde a área agrícolas con riego, predominando especies como: arroz, papa, maíz, alfalfa, caña de azúcar, uvas, zapallos, sandía, melón. Otras especies como: sotobosque, hualtaco, palo santo, sapote, algarrobo, bichayo, overo, faique, cactus gigante.
- *Entre 1 000 a 1 900 msnm:* Generalmente esta zona está ocupada por bosques de protección, con diferentes especies de árboles, como: palo santo, molle, hualtaco, faique, tara; estos bosques ayudan a la regulación del régimen hídrico de los ríos y a la disminución de la erosión del suelo. Otras especies son: achupalla, maguey, cabuya, mito. Existen también cultivos de frijol, maíz, yuca.
- *Entre 1 900 a 2 800 msnm:* Vegetación constituida principalmente por: aliso, molle, pauca, tara, sauco, lloque. Además, se han perdido diversas especies naturales debido al desarrollo de la agricultura con cultivos antrópicos de pan llevar.
- *Entre 2 900 y 3 500 msnm:* Si bien la vegetación natural ha sido deforestada en grandes extensiones; aún se puede observar vegetación natural como: chachacomo, tarhui, cucharilla, carapacho, huaranhuay, quishuary, suro, zarzamora, aliso, manzanito, quinual, especies graminales. Además, existen grandes extensiones de pajonales consituyendo pastos naturales alto andinos de diversos géneros: Calamagrostis, Festuca y demás. En cuanto a cultivos agrícolas, generalmente se emplean plantas nativas como: papa, oca, olluco. En la zona de Granja Porcón, comprendida entre los 3 000 y 3 850 msnm, se ha reforestado grandes extensiones

con pinos, generando un microclima que favorece el desarrollo de cultivos de pan llevar.

- *Mayor a 3 750 msnm:* Se presentan cubiertas vegetales de tipo graminal mayormente, teniendo como especies representativas: *Senecio sp.*, *Hypericum laricifolium*, *Speletia sp.*, *Brachyotum sp.*

3.3.1.2. Geología Local

En cuanto a la geología local, la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque abarca las siguientes cartas nacionales: 14e Chongoyape, 14f Chota, 15d Pacasmayo, 15e Chepén, 15f Cajamarca, 15g San Marcos, como muestra la Figura 6.

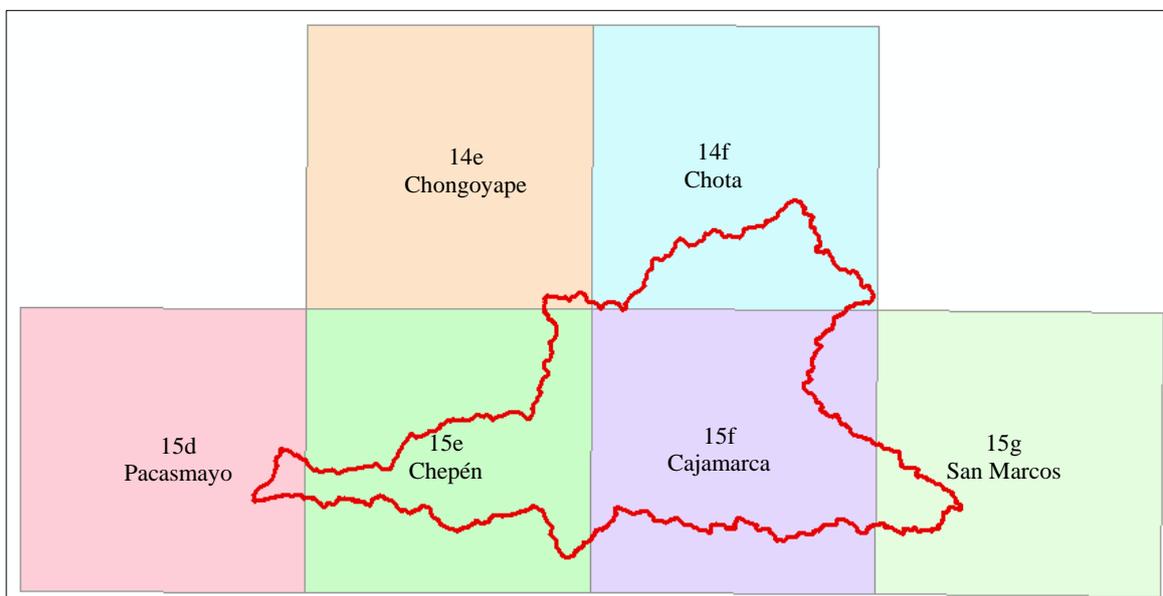


Figura 6. Cartas geológicas nacionales abarcadas por la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

La geología local abarca formaciones sedimentarias, correspondientes principalmente al Cretácico Inferior y Cretácico Superior; formaciones volcánicas, correspondientes principalmente al Paleógeno y Neógeno, cuerpos intrusivos, y depósitos cuaternarios recientes. La Figura 7 muestra la columna estratigráfica para la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

- *Mesozoico*

Las secuencias del Cretácico Inferior inician con el Grupo Goyllarisquizga; que abarca las Formaciones Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat; que litológicamente se componen de:

areniscas cuarzosas, lutitas y ocasionales mantos de carbón; lutitas grises, calizas margosas fosilíferas y areniscas de grano fino; areniscas rojizas de grano fino y lutitas grises; areniscas cuarzosas de un color blanquecino altamente fracturadas; respectivamente. Seguido a la Formación Farrat del Grupo Goyllarisquizga, le sucede la Formación Inca, compuesta de areniscas calcáreas, calizas y lutitas fosilíferas grises; Formación Chúlec, que se compone de margas, calizas arenosas y lutitas calcáreas – arenosas con gran contenido fosilífero; Formación Pariatambo, compuesta principalmente de calizas y lutitas finamente estratificadas.

Por su parte, la secuencias correspondientes al Cretácico Superior, inician con el Grupo Pulluicana, que litológicamente se conforma de una secuencia de margas y calizas con niveles de lutitas fosilíferas; seguido del Grupo Quilquiñán, que constan de una secuencia de calizas nodulares masivas con intercalaciones de lutitas y margas; finalmente, se encuentra a la Formación Cajamarca, conformada por una secuencia de calizas masivas de coloraciones grises – azuladas, aunque con ciertos niveles delgados de lutitas y margas (Reyes, 1980; Peña et al., 2015).

- *Cenozoico*

En la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque aflora gran variedad de secuencias volcánicas, denominadas en conjunto como Grupo Calipuy (Reyes, 1980; Wilson, 1984), correspondientes al periodo Paleógeno.

Según Reyes (1980), el Grupo Calipuy es el resultado del vulcanismo post – tectónico en la región cordillerana, representando de esta manera el magmatismo efusivo que sucedió al emplazamiento del batolito costero; siendo la disposición de esta secuencia generalmente sub - aérea y de gran extensión. La deposición del Grupo Calipuy se presente generalmente de forma continua, existiendo algunos periodos de inactividad; para luego ser plegada con amplia curvatura y, en lugares puntuales, con más intensidad, dando como resultado la intensa deformación sobre todo de las Formaciones inferiores.

Wilson (1984), menciona que el Grupo Calipuy está subdividido en las Formaciones Llama y Porculla, para los cuadrángulos de Chongoyape, Chota, Pacasmayo y Chepén. Por su parte, Reyes (1980), indica que, para los cuadrángulos de Cajamarca y San Marcos, el Grupo Calipuy se subdivide en las Formaciones Tembladera, Chilete y San Pablo. El Grupo Calipuy sobreyace con discordancia angular sobre la secuencia Cretácica, siendo en orden cronológico las Formaciones Tembladera, Chilete, San Pablo, Llama y Porculla.

Era	Periodo	Época	Unidad litoestratigráfica	Rocas intrusivas	
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Depósito fluvial Qh-fl		
			Depósito eólico Qh-eo		
			Depósito aluvial Qh-al		
		Pleistoceno	Depósito glaciario-fluvial Qh-gl-fl		
	Neógeno	Plioceno			
		Mioceno	Fm. Huambos Nm-huam		
	Paleógeno	Oligoceno		Fm. Porculla Po-po	
		Eoceno	Fm. Llama Pe-ll		
			Fm. San Pablo Pe-sp		
Paleoceno	Fm. Chilete Pe-ch	Diorita, tonalita Pe-di, tn			
	Fm. Tembladera Pp-te	Granodiorita Pp-gd			
Mesozoico	Cretácico Superior	Fm. Cajamarca Ks-ca	Granodiorita Ks-gd		
		Gpo. Quilquiñán Ks-qu	Diorita Ks-di		
		Gpo. Pulluicana Ks-pu	Monzonita Ks-mz		
		Gpo. Crisnejas { Fm. Pariatambo Ki-pa			
		Fm. Chúlec Ki-chu			
		Fm. Inca Ki-in			
	Cretácico Inferior	Gpo. Goyllarisquizga { Fm. Farrat Ki-fa			
			Fm. Carhuaz Ki-ca		
		Fm. Santa Ki-sa			
		Fm. Chimú Ki-chi			

Figura 7. Columna estratigráfica de la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

Fuente: Modificado de Peña et al., (2015).

La Formación Tembladera, litológicamente se constituye, hacia su parte inferior, de andesíticas y brechas de origen volcánico de coloraciones grises - verdosas, mientras que hacia su parte superior se encuentran tobas blanquecinas intercaladas con delgados lechos de areniscas y lutitas tobáceas de coloraciones verdosas y moradas.

Por su parte, la Formación Chilete, que sobreyace con discordancia angular a la Formación Tembladera, se compone litológica y principalmente de materiales piroclásticos, es decir, de intercalaciones tobáceas, areniscas tobáceas, conglomerados lenticulares y materiales de composición andesítica de coloraciones gris, verdosas, violetas. La Formación San Pablo, que sobreyace con suave discordancia erosional a la Formación Chilete, litológicamente se constituye de rocas de composición andesítica – dacítica, intercalados hacia su parte inferior con areniscas rojizas y hacia su parte superior, con aglomerados y rocas piroclásticas (Reyes, 1980).

La Formación Llama se compone litológicamente hacia su base de un conglomerado basal de coloración rojiza intercalado con secuencias de tobas andesíticas de coloración violácea y brechas de composición andesítica, conteniendo también rocas de composición dacítica y riodacítica. En cuanto a la Formación Porculla, está constituida principalmente por material volcánico piroclástico con intercalaciones de rocas volcánicas dacíticas y andesíticas (Wilson, 1984).

Consecutivamente al levantamiento andino, se depositan la secuencia de la denominada Formación Huambos, correspondiente al periodo Neógeno. Litológicamente se compone de coladas piroclásticas de composición andesítica – dacítica – traquítica, de coloraciones blancas amarillentas, con presencia de fragmentos líticos de rocas volcánicas preexistentes. Cabe resaltar que, debido a su intenso fracturamiento, estos materiales poseen una permeabilidad secundaria que los vuelve ideales para la infiltración y almacenamiento de agua subterránea (Reyes, 1980; Wilson, 1984; Peña et al., 2015).

En cuanto al periodo Cuaternario, corresponden los depósitos eólicos, aluviales, fluviales y fluvioglaciares; todos ellos de características porosas, no consolidados y detríticos. En cuanto a los depósitos eólicos, estos se ubican preferentemente en zona de playa, no constituyen gran extensión y se presentan generalmente en forma de dunas. Los depósitos aluviales por su parte se encuentran ubicados en las desembocaduras de quebradas y en las partes bajas de los cerros, predominando materiales gravosos, cantos y bloques generalmente dentro de una matriz compuesta por arcilla, limo y arena. Los depósitos fluviales se ubican

en las llanuras dejadas principalmente por el curso de ríos, los materiales predominantes son gravas, cantos y bloques de grandes dimensiones, arenas finas y gruesas y limos; estos materiales son muy favorables para el almacenamiento de agua subterránea. Finalmente, los depósitos fluvio-glaciares se encuentran en planicies elevadas, donde los depósitos de morrenas son predominantes y que son constituidos principalmente por materiales arenosos, limosos y arcillosos (Peña et al., 2015).

Rocas intrusivas de distintas composiciones afloran en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, destacando: granodioritas, monzonitas, tonalitas, dioritas. Estos cuerpos de rocas intrusivas han ido emplazándose aproximadamente desde el Cretácico Superior hasta el Paleógeno Inferior. Principalmente, estas rocas intrusivas afloran en la parte baja y media de la cuenca. Finalmente, si bien son rocas impermeables en principio, se encuentran generalmente altamente fracturadas y meteorizadas, permitiendo la infiltración del agua, aunque dicha condición disminuye con la profundidad, encontrándose cada vez más compactas y sin mucho fracturamiento (Peña et al., 2015).

3.3.1.3. Geología Estructural

Según Peña et al. (2015), la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque se encuentra ubicada en el denominado cinturón de pliegues de la Cordillera Occidental, teniendo dos características principales: las estructuras comunes son plegamientos de entre 50 a 100 kilómetros de longitud y generalmente limitados por fallas; los pliegues en general son asimétricos, alineados al suroeste, noreste y este. Los autores mencionan que podemos encontrar tres tipos de lineamientos estructurales predominantes, mayormente importantes desde el punto de vista de la infiltración del agua subterránea, son:

- La secuencia Cretácica, afectada por tectonismo Cretácico – Paleógeno de rumbo noroeste - sureste, originó plegamientos, así como intenso fracturamiento y fallamiento; es así que, tanto el eje de los plegamientos como el mayor porcentaje de fallas regionales tienen un rumbo preferente noroeste – sureste y este – oeste. Estos lineamientos estructurales son observados con mayor incidencia en la zona de la cuenca alta, al sur y de la cuenca, generalmente.
- El segundo tipo de lineamientos, interpretado como una continuación del primero tipo y descrito anteriormente, pues afecta también a la secuencia sedimentaria y presenta un rumbo en dirección este – oeste.

- El tercer tipo de lineamientos presentan una dirección de rumbo preferente noreste – suroeste, por lo que cortan casi perpendicularmente a los anteriores; son visualizados principalmente en la cuenca media y afectan, generalmente, a las secuencias volcánicas y a algunos cuerpos intrusivos. Este tipo de lineamiento estructural ha sido asociado a la Fase Quechua.

3.3.2. Generación de la Base de Datos

3.3.2.1. *Litología*

Para generar la capa temática de la variable litología hacemos uso de las Cartas Geológicas Nacionales, proporcionadas por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú, INGEMMET; las cuales pueden ser obtenidas desde la plataforma web Geocatmin. La Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque abarca las siguientes cartas nacionales: 14e Chongoyape, 14f Chota, 15d Pacasmayo, 15e Chepén, 15f Cajamarca, 15g San Marcos, por tanto, se necesitará integrar las mencionadas seis cartas nacionales en un solo archivo. Sin embargo, dentro de la plataforma Geocatmin podemos encontrar los denominados Mapas Geológicos Integrados, en una escala de 1:100 000, del año 2018.

A partir del procesamiento de los Mapas Geológicos Integrados en escala 1:100 000, se observa que en el área de la cuenca existen depósitos cuaternarios no consolidados, Formaciones sedimentarias cretácicas, depósitos volcánicos de los periodos Paleógeno – Neógeno y cuerpos intrusivos correspondientes Cretácico Superior y Paleógeno; así como también los distintos fallamientos y plegamientos.

Se realizó un proceso de reclasificación, utilizando la herramienta Reclassify, presente en el software ArcGIS; mediante el cual los distintos depósitos cuaternarios, formaciones sedimentarias, depósitos volcánicos y cuerpos intrusivos se clasificaron en cuatro tipos, atendiendo a la caracterización hidrogeológica de dichos materiales realizada por Peña et al. (2015). Según los resultados obtenidos por los autores, los depósitos cuaternarios, debido a su origen detrítico y no consolidado, son los materiales geológicos con mayor permeabilidad en la cuenca; en contraparte, las rocas ígneas intrusivas aflorantes tienen una permeabilidad muy baja, casi nula o impermeable; aunque en superficie pueden estar intensamente fracturadas y meteorizadas, al aumentar la profundidad éstas se encuentran mucho más compactas. Por otro lado, para caracterizar las rocas volcánicas y sedimentarias, los autores realizaron ensayos in situ de infiltración puntual a carga constante de tipo Lefranc, obteniendo valores aproximados de permeabilidad que luego fueron complementados con

datos de ensayos de laboratorio de diversos autores; obteniendo que para los materiales volcánicos y sedimentarios, las Formaciones Chimú, Cajamarca y Huambos presentan el más alto rango de permeabilidad: 0.2049 metros por día (m/d), 0.2066 m/d y 0.2444 m/d, respectivamente; esto debido a la naturaleza de dichas formaciones y al intenso grado de fracturamiento que presentan. Por otro lado, las Formaciones Santa, Carhuaz, Farrat, Inca, Chúlec, Pariatambo, Yumagual y el Grupo Quiquiñán presentan permeabilidades que varían entre 0.0732 m/d y 0.1551 m/d, esto debido al menor grado de fracturamiento en comparación a las Formaciones Chimú, Cajamarca y Huambos, y también por su naturaleza, pues generalmente presentan intercalaciones de areniscas y/o calizas con lutitas y margas; finalmente, los materiales volcánicos del Grupo Calipuy, es decir, de las Formaciones Tembladera, Chilete, San Pablo, Llama y Porculla presentan valores de permeabilidad entre 0.1052 m/d y 0.1276 m/d, debido a sus características de aspecto discontinuo y a su disposición, asociadas al tipo de erupción y al modo de deposición de las lavas que dieron origen a dichas rocas.

La Tabla 7 muestra los tipos de litología agrupados en base a las permeabilidades que presentan los distintos materiales geológicos que afloran en la cuenca. Así mismo, la distribución de los cuatro tipos de litología puede observarse en la Figura 8, y a mayor detalle en el Plano 04, en Anexos.

Tabla 7. Tipos de litología y su permeabilidad asociada.

Tipo	Litología abarcada	Permeabilidad (m/d)
Tipo I	Depósitos aluviales, fluviales, fluvio-glaciares, eólicos.	> 0.25
Tipo II	Formaciones Chimú, Santa, Carhuaz, Pariatambo, Cajamarca, Huambos.	0.15 a 0.25
Tipo III	Formaciones Farrat, Inca, Chúlec; Grupo Pulluicana, Grupo Quiquiñán, Grupo Calipuy.	0.05 a 0.15
Tipo IV	Rocas ígneas intrusivas: diorita, tonalita, granodiorita, monzonita.	< 0.05, impermeable

Fuente: Elaborado con base en Peña et al., (2015).

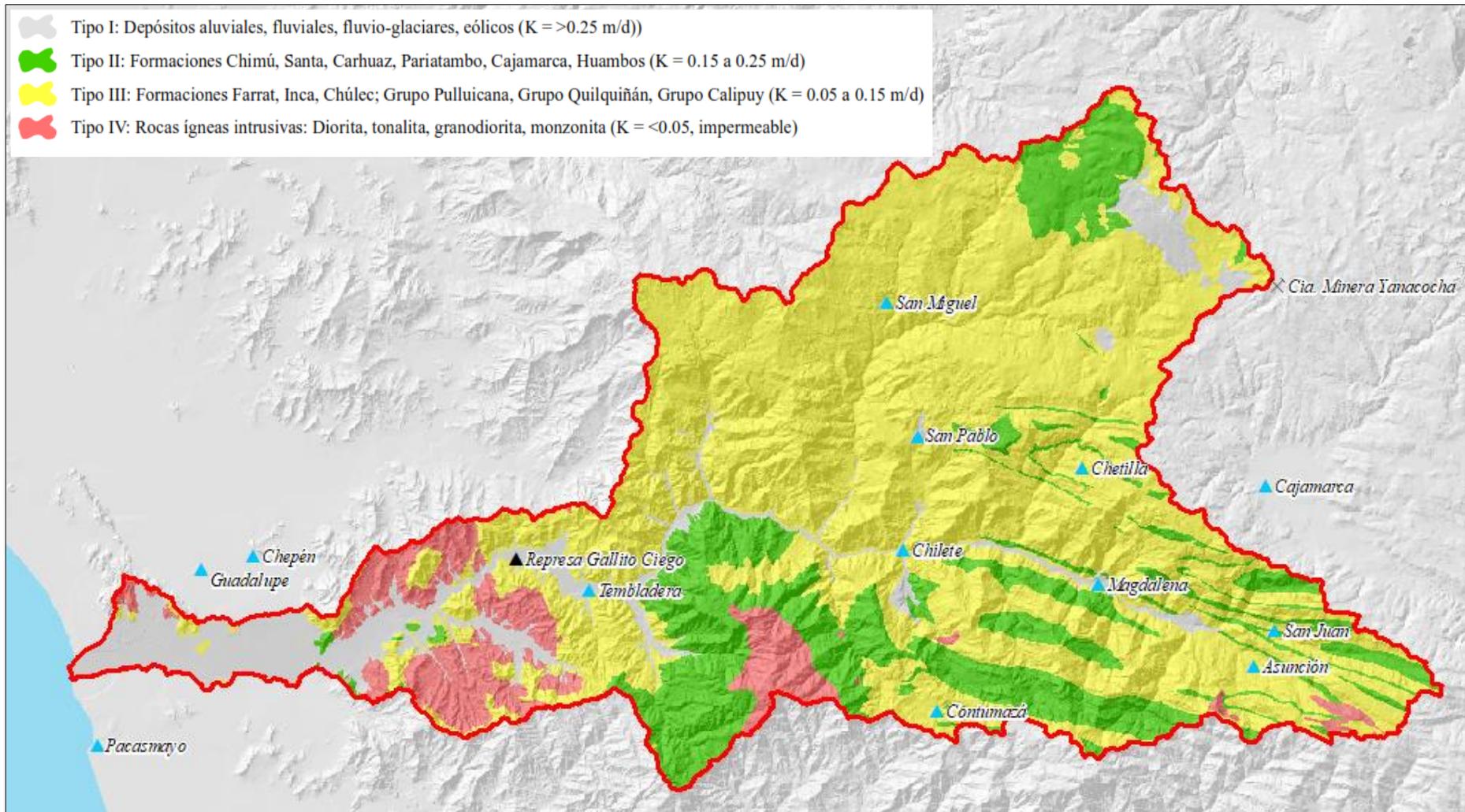


Figura 8. Asociaciones de litología según su permeabilidad.

3.3.2.2. Índice de Vegetación

Para generar la capa temática de la variable índice de vegetación, hacemos uso de imágenes satelitales Landsat 8, las cuales pueden ser descargadas gratuitamente de la plataforma web EarthExplorer, perteneciente al Servicio Geológico de los Estados Unidos, o USGS por sus siglas en inglés.

Se utilizó dos imágenes Landsat 8, como sigue:

- *Imagen satelital 1:* LC08_L1TP_010065_20220529_20220603_02_T1.
- *Imagen satelital 2:* LC08_L1TP_009065_20220522_20220525_02_T1.

Ambas imágenes satelitales tienen fecha de adquisición en mayo de 2022, con tamaño de celda de treinta por treinta metros. La primera imagen tiene Path/Row de 010/065, mientras que la segunda de 009/065.

La Figura 9 muestra ambas imágenes satelitales, en una composición de bandas 4-3-2, es decir, mostrándose en color natural. Una vez obtenidas ambas imágenes satelitales, procedemos a unir las en un solo archivo, resultando en una sola imagen satelital que facilitará el procesamiento. Unidas las imágenes satelitales realizamos el proceso de corrección atmosférica, para lo cual hacemos uso de la herramienta Geobias Landsat 8, la cual puede ser descargada gratuitamente de la web y agregada a la caja de herramientas del software ArcGIS. El proceso de corrección atmosférica se realiza con el propósito de eliminar o en todo caso disminuir significativamente el efecto negativo de la radiancia intrínseca y de aerosoles que pueden colarse por el sensor y que se verá reflejado en las imágenes satelitales; todo ello producto de la interacción entre la atmósfera terrestre y el sensor. Así pues, con el proceso de corrección atmosférica se mejora la calidad visual de las imágenes y se logra eliminar el componente intrusivo de la atmósfera.

Realizados los procesos de unión y corrección atmosférica de las imágenes satelitales, procedemos al cálculo en sí de los valores para la variable índice de vegetación, utilizando en nuestro caso el NDVI. Al ser las imágenes utilizadas de tipo Landsat 8, utilizaremos las bandas 4 y 5, las cuales corresponden al rojo e infrarrojo cercano, respectivamente. Hacemos uso de la herramienta Raster Calculator, del software ArcGIS, introduciendo la expresión matemática correspondiente; recordando que las bandas 4 y 5 corresponden al rojo e infrarrojo cercano, respectivamente.



Figura 9. Imágenes Landsat 8 utilizadas en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

Una vez ejecutada la expresión matemática en la herramienta Raster Calculator, obtenemos un archivo ráster con valores de NDVI que varían desde -0.27875 a 0.617972. Haciendo uso de la herramienta Reclassify, del software ArcGIS, realizamos una clasificación de estos valores, obteniendo cuatro intervalos definidos, como muestra la Tabla 8. Así mismo, la distribución de los valores de NDVI pueden observarse en la Figura 10, y a mayor detalle en el Plano 05, en Anexos.

Tabla 8. Valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

Zona	Descripción	Valores NDVI
Zona I	Cuerpos de agua	-1 a -0.07
Zona II	Materiales geológicos con escasa vegetación	-0.07 a 0.15
Zona III	Vegetación saludable	0.15 a 0.33
Zona IV	Vegetación abundante y saludable	> 0.33

Fuente: Elaborado con base en Bravo, (2017).

3.3.2.3. *Lineamientos Estructurales*

Para generar la capa temática de la variable lineamientos estructurales hacemos uso de los Mapas Geológicos Integrados, en una escala de 1:100 000, del año 2018; un MDE, resultante de la unión de cuatro imágenes ASTER GDEM, así como también se usó una ortofoto, adquirida desde la plataforma gratuita SASPlanet; usada para identificar lineamientos y complementar la información proporcionada por los Mapas Geológicos Integrados y el MDE. La Figura 11 muestra los distintos lineamientos estructurales identificados en la CHJ.

Identificados los lineamientos estructurales, los cuales se encuentran en formato tipo vector; utilizamos la herramienta Line Density, del software ArcGIS, para realizar el cálculo de la densidad de lineamientos expresados en Km/Km². La información de densidad de lineamientos estructurales estará en formato tipo ráster.

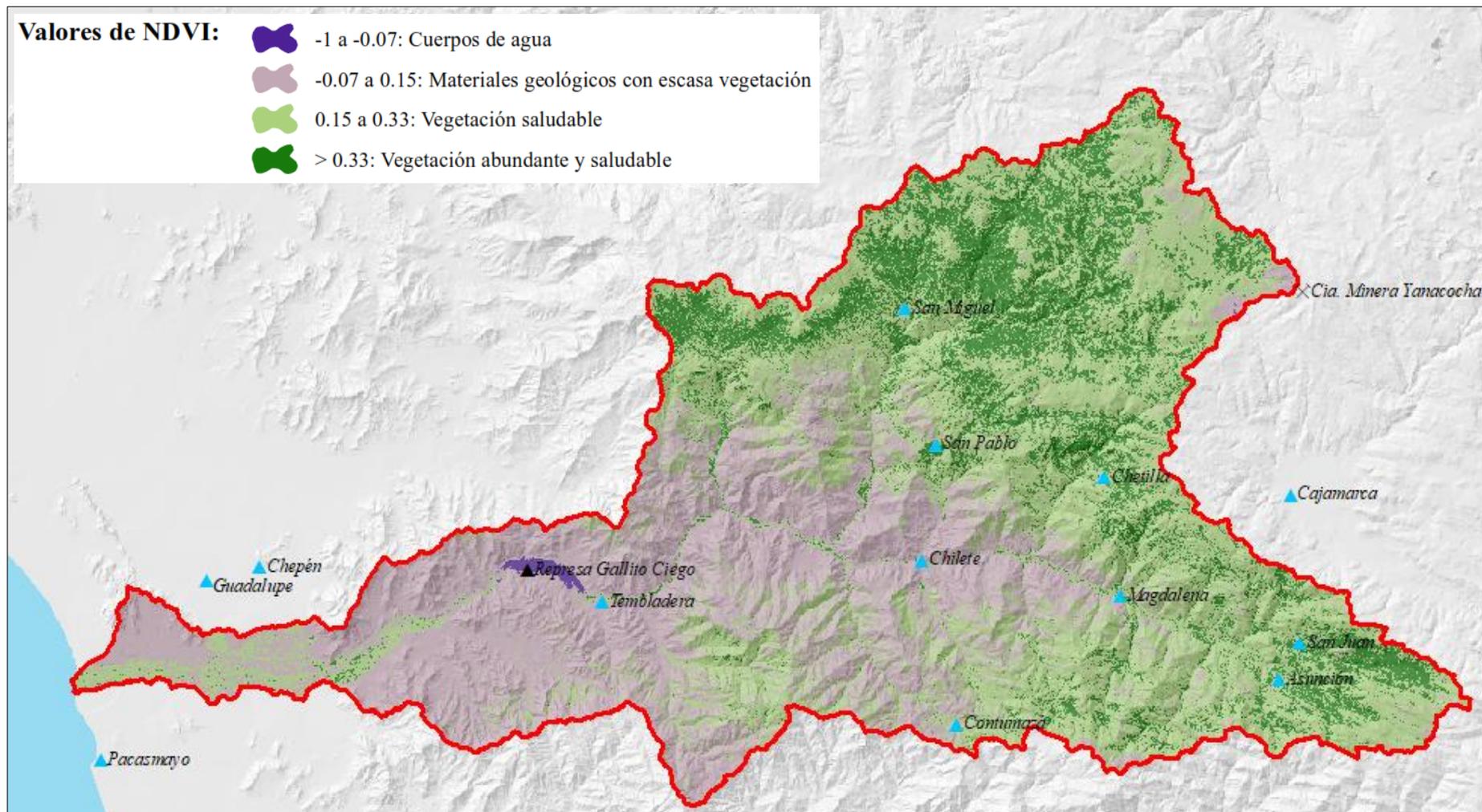


Figura 10. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

Ejecutada la operación en la herramienta Line Density, obtenemos valores de densidad de lineamientos estructurales que varían desde los 0 Km/Km² hasta los 2.0635 Km/Km². Haciendo uso de la herramienta Reclassify y en base a la investigación de Pinto et al. (2015), realizamos una clasificación de dicha densidad de lineamientos, obteniendo seis intervalos, como muestra la Tabla 9.

Tabla 9. Zonificación por densidad de lineamientos estructurales reclasificados.

Zona	Densidad de lineamientos estructurales
Zona I	0.0 a 0.25 Km/Km ²
Zona II	0.25 a 0.50 Km/Km ²
Zona III	0.50 a 0.75 Km/Km ²
Zona IV	0.75 a 1.00 Km/Km ²
Zona V	1.00 a 1.50 Km/Km ²
Zona VI	> 1.50 Km/Km ²

Fuente: Elaborado con base en Pinto et al., (2015).

La zonificación de acuerdo a los valores de densidad de lineamientos estructurales puede observarse en la Figura 12, y a mayor detalle en el Plano 06, en Anexos.

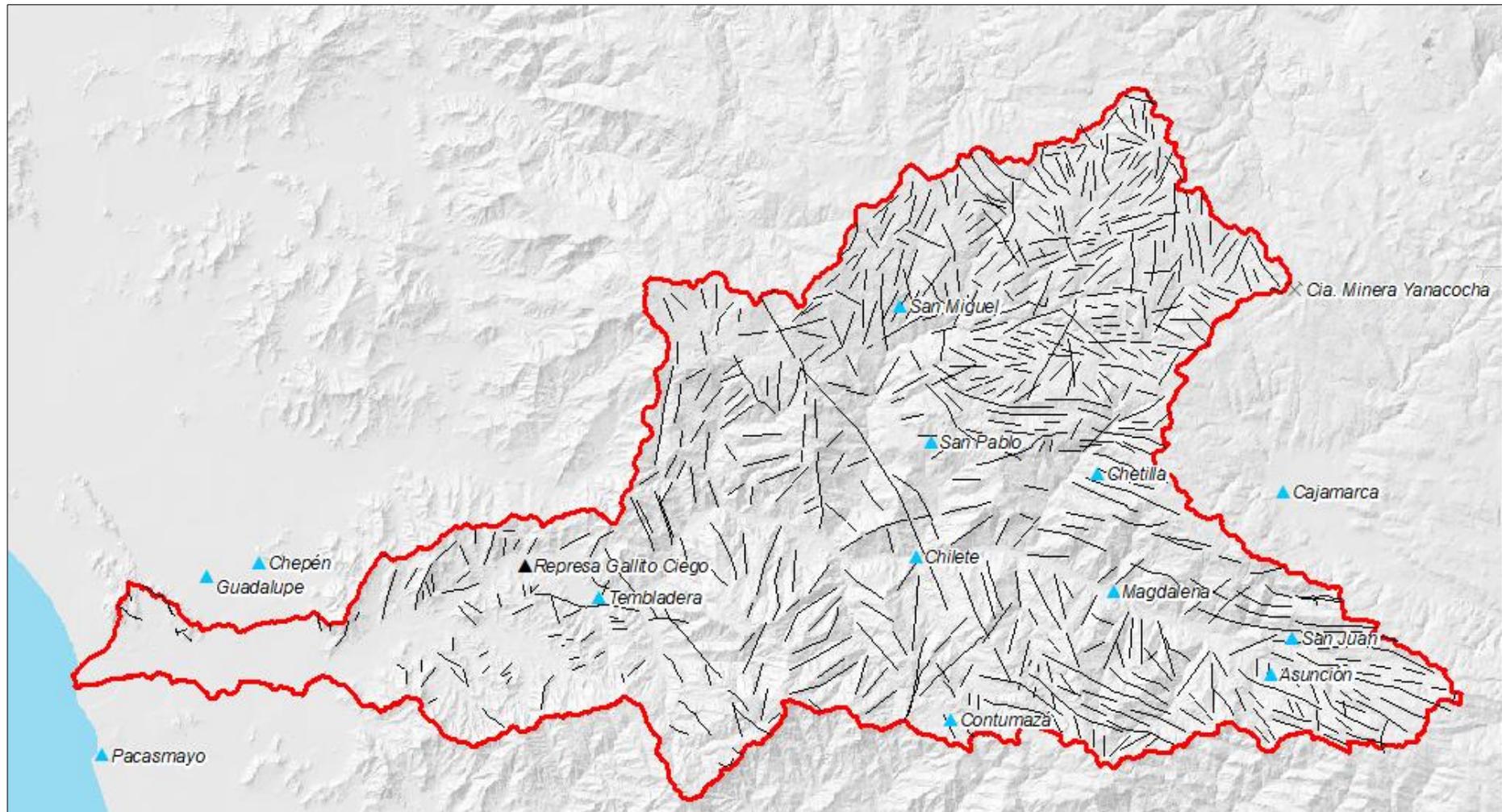


Figura 11. Lineamientos estructurales identificados en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

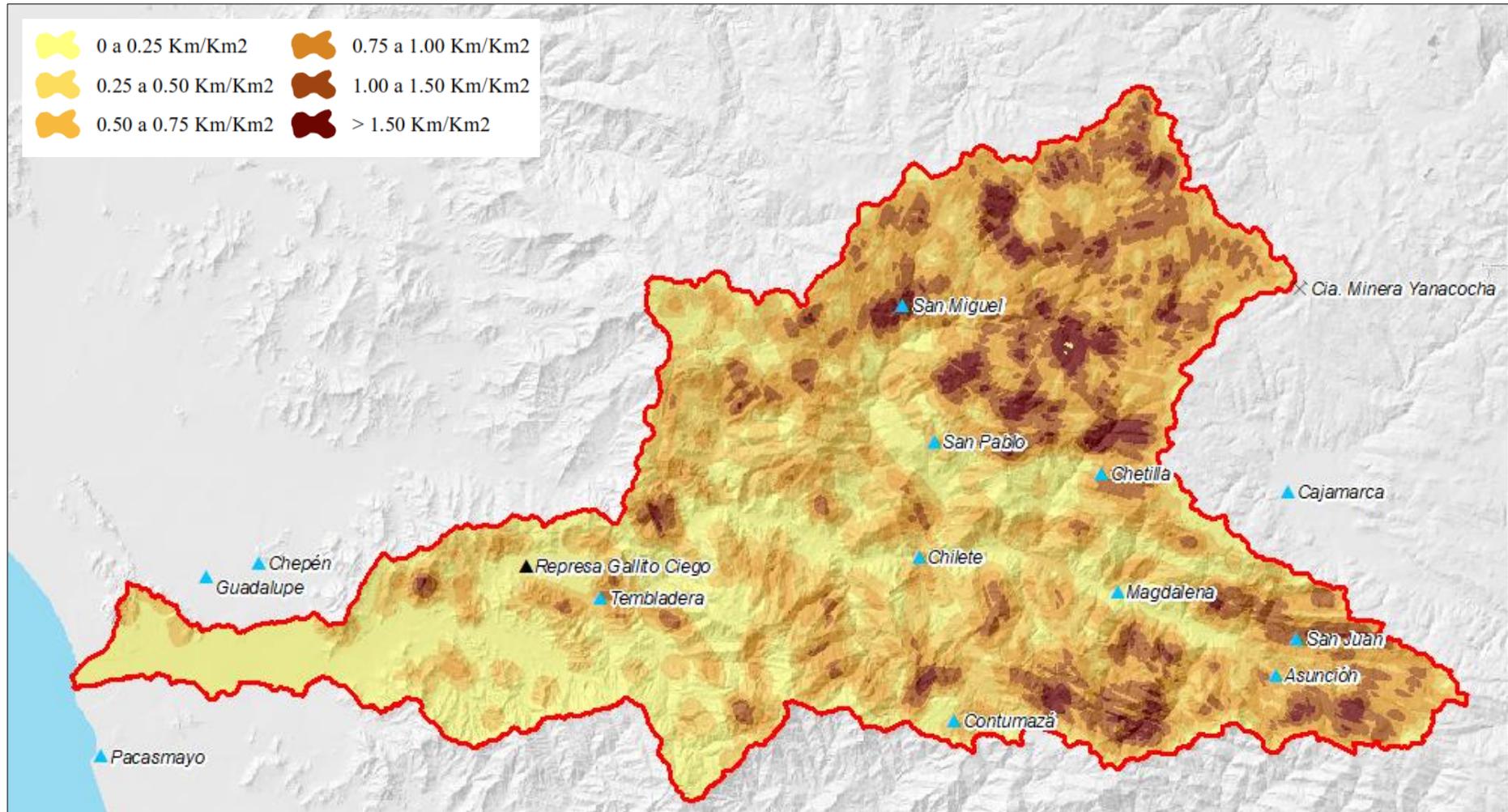


Figura 12. Densidad de lineamientos estructurales en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

3.3.2.4. Precipitación

Para generar la capa temática de la variable precipitación, debemos tener en cuenta la distribución geoespacial de las estaciones pluviométricas que se encuentran dentro de los límites de la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, así como las que se encuentran a su alrededor, y, por otro lado, los datos de precipitación media. Teniendo en cuenta los dos factores mencionados, generaremos el mapa de isoyetas de precipitación media anual.

La Tabla 10 contiene el listado de catorce estaciones pluviométricas que intervendrán en la generación de la capa temática de precipitación en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, así como su ubicación expresada en el sistema de coordenadas UTM.

Mientras que la Figura 13 muestra la distribución espacial en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque de las estaciones pluviométricas contenidas en la Tabla 10.

Tabla 10. Estaciones pluviométricas y su ubicación en coordenadas UTM.

Nombre de la estación	Departamento	Coordenadas UTM		Altitud msnm
		WGS - 84		
		Norte	Este	
1. Augusto Weberbauer	Cajamarca	9 207 072	777 794	2 660
2. Chilete	Cajamarca	9 200 900	738 779	850
3. Contumazá	Cajamarca	9 186 334	739 518	2 610
4. Granja Porcón	Cajamarca	9 221 840	762 191	3 061
5. Lives	Cajamarca	9 216 579	717 223	1 800
6. Llapa	Cajamarca	9 225 729	739 704	2 900
7. Magdalena	Cajamarca	9 197 563	759 209	1 257
8. Namora	Cajamarca	9 202 917	793 896	2 782
9. San Juan	Cajamarca	9 193 345	776 502	2 469
10. Tembladera	Cajamarca	9 198 160	706 068	433
11. Chepén	La Libertad	9 200 128	672 943	114
12. Jequetepeque	La Libertad	9 189 119	658 183	20
13. San José	La Libertad	9 187 233	671 058	100
14. Talla	La Libertad	9 195 977	674 063	105

Fuente: Adaptado de MINAGRI y ANA, (2015).

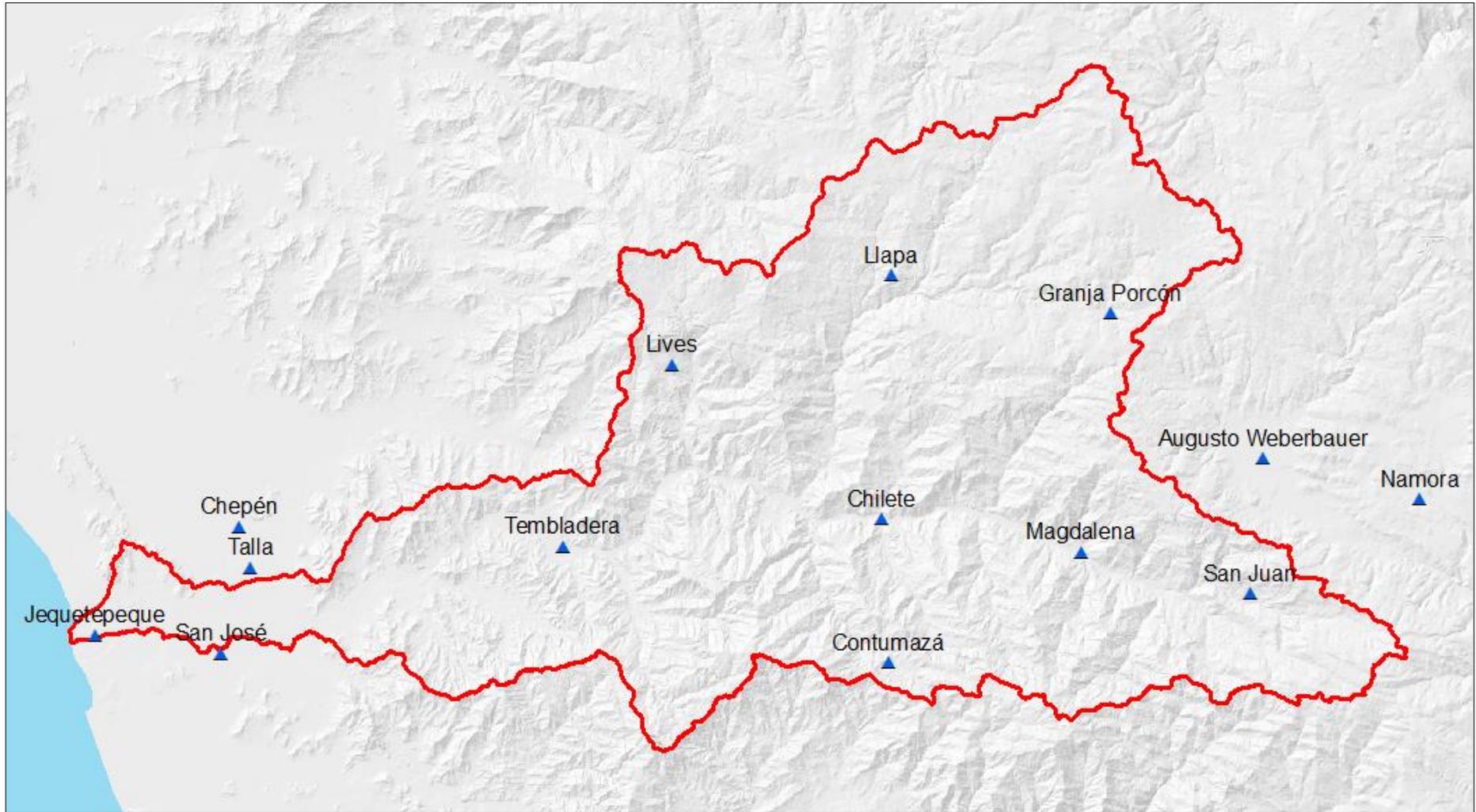


Figura 13. Distribución espacial de las estaciones pluviométricas.

Los Gráficos 1 a 14 muestran la representación de las curvas de precipitación total anual para cada una de las 14 estaciones mencionadas en la Tabla 10, según los datos históricos de precipitación de SENAMHI (2015).

Gráfico 1. Curva de precipitación anual, estación Augusto Weberbauer (periodo 1965 - 2014).

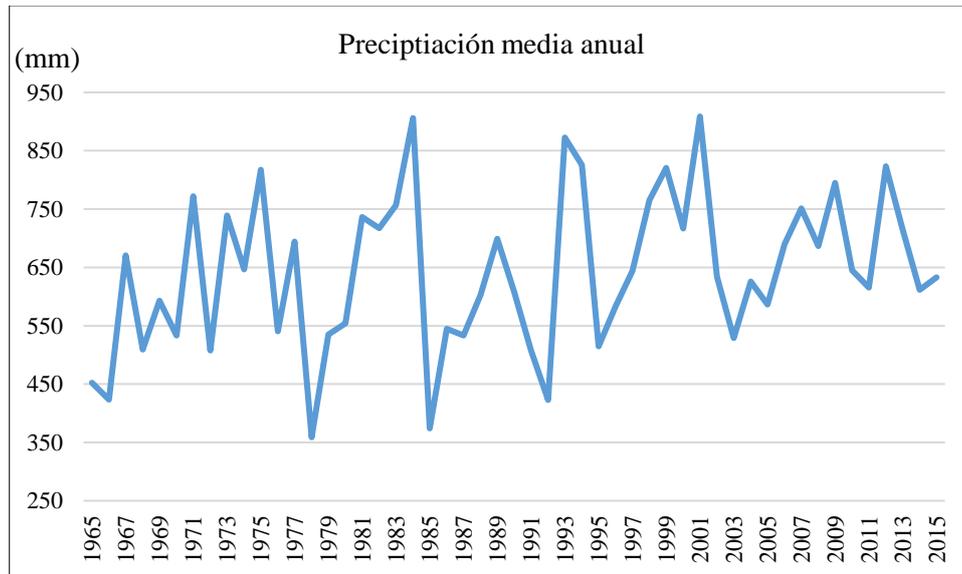


Gráfico 2. Curva de precipitación anual, estación Chilete (periodo 1965 - 2014).

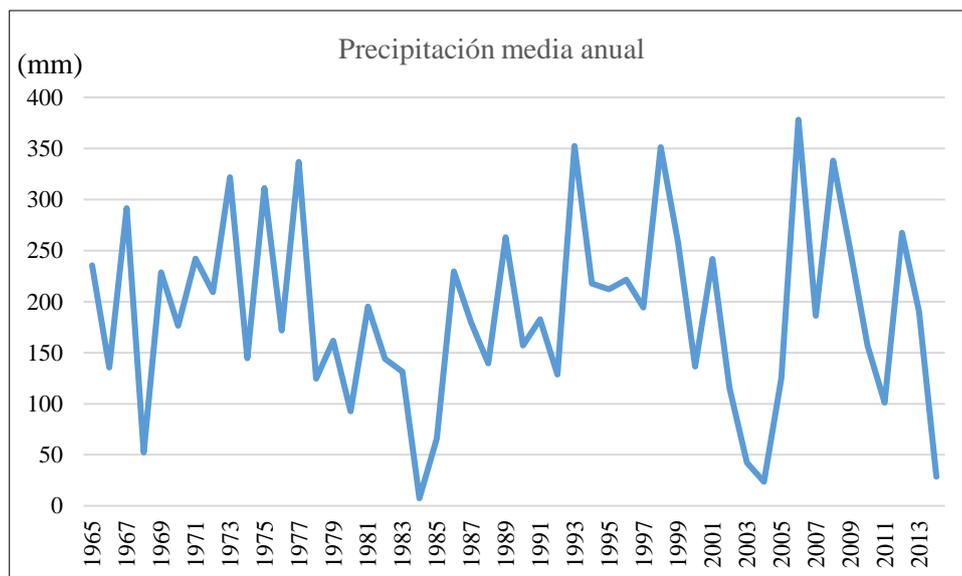


Gráfico 3. Curva de precipitación anual, estación Contumazá (periodo 1965 - 2014).

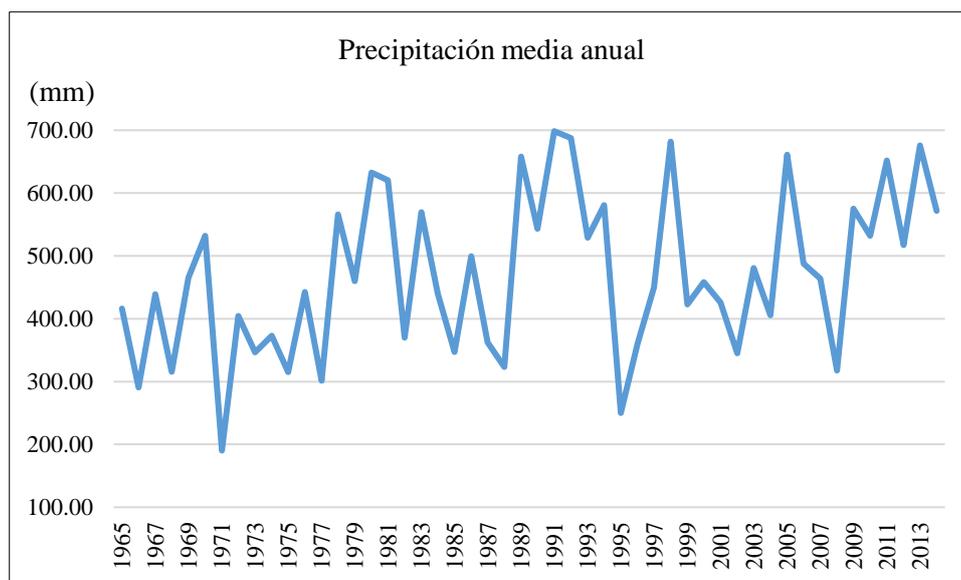


Gráfico 4. Curva de precipitación anual, estación Granja Porcón (periodo 1965 - 2014).

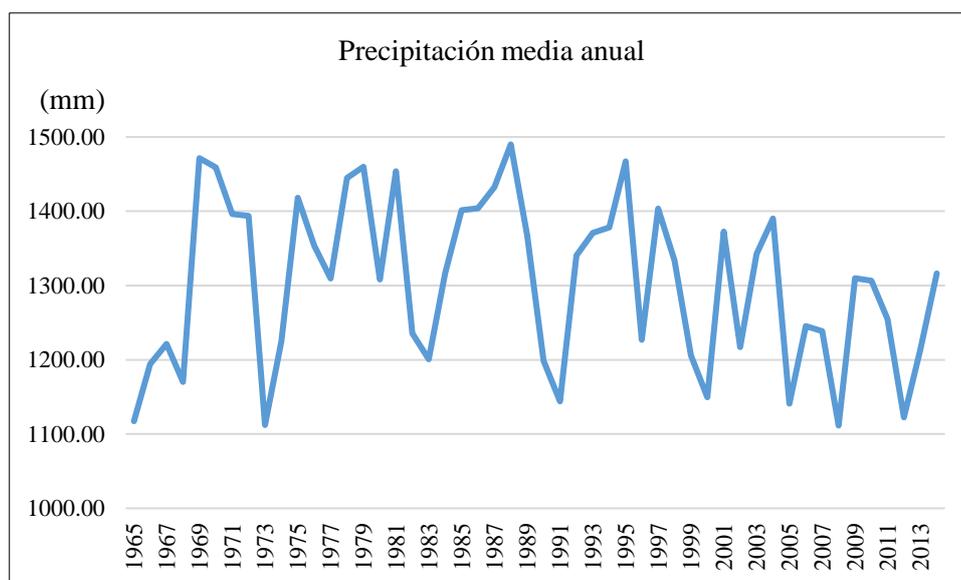


Gráfico 5. Curva de precipitación anual, estación Lives (periodo 1965 - 2014).

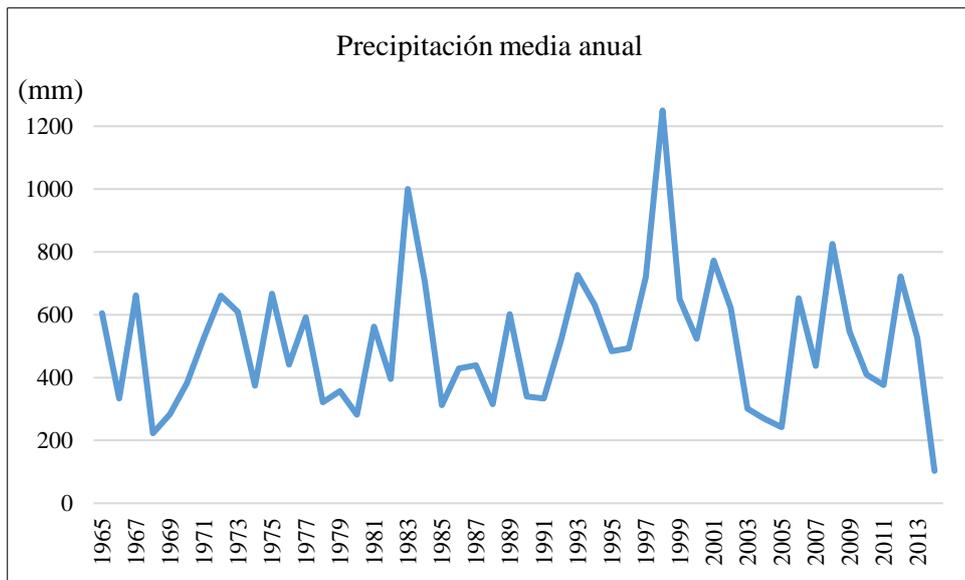


Gráfico 6. Curva de precipitación anual, estación Llapa (periodo 1965 - 2014).

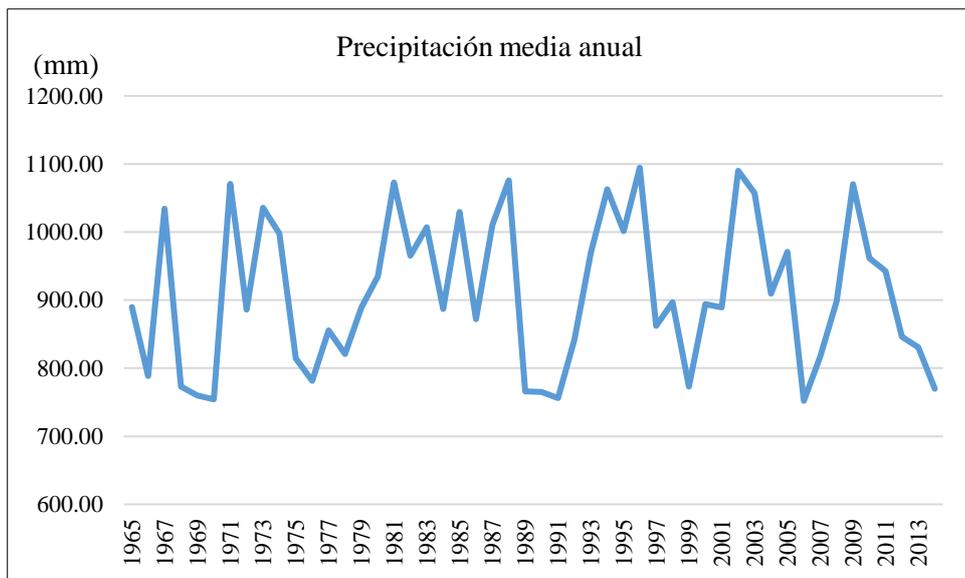


Gráfico 7. Curva de precipitación anual, estación Magdalena (periodo 1965 - 2014).

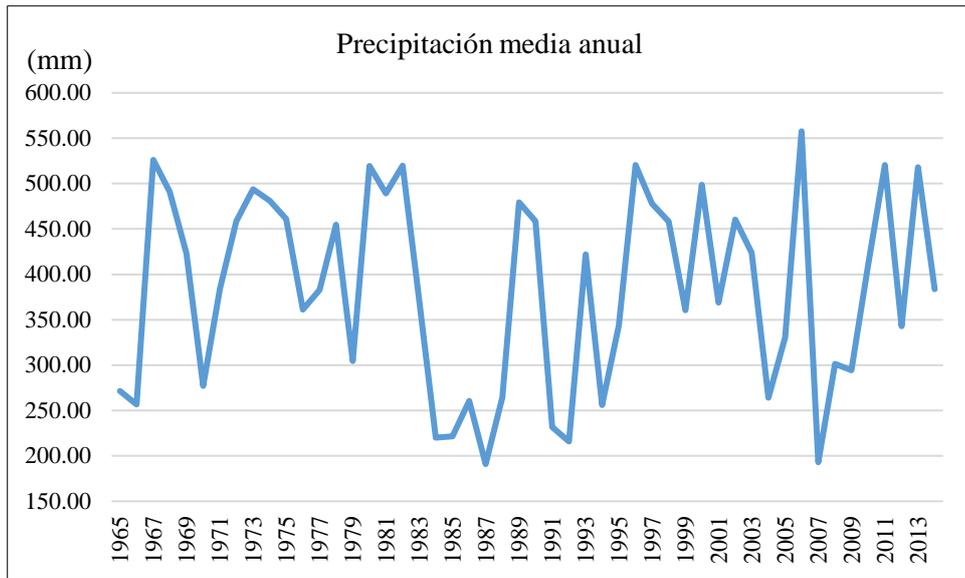


Gráfico 8. Curva de precipitación anual, estación Namora (periodo 1965 - 2014).

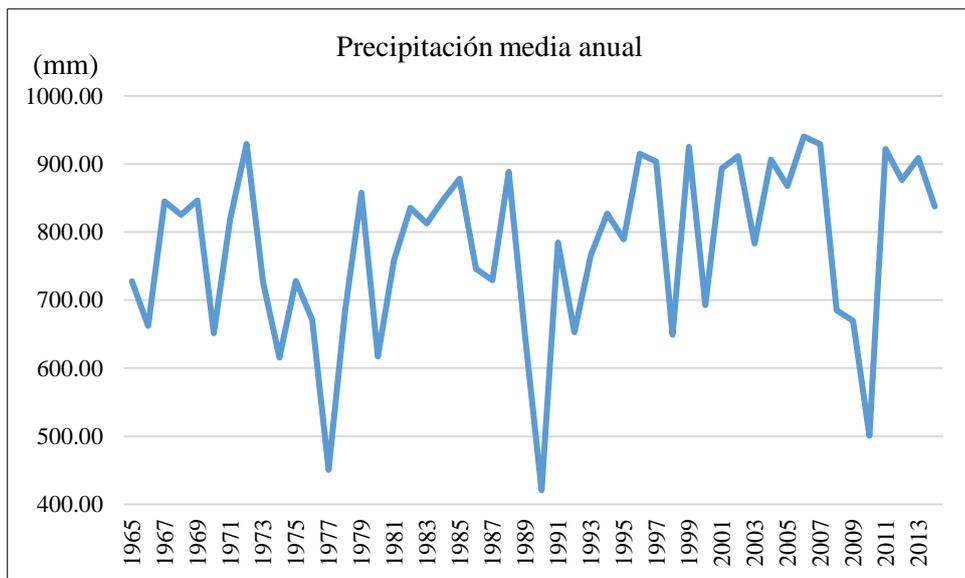


Gráfico 9. Curva de precipitación anual, estación San Juan (periodo 1965 - 2014).

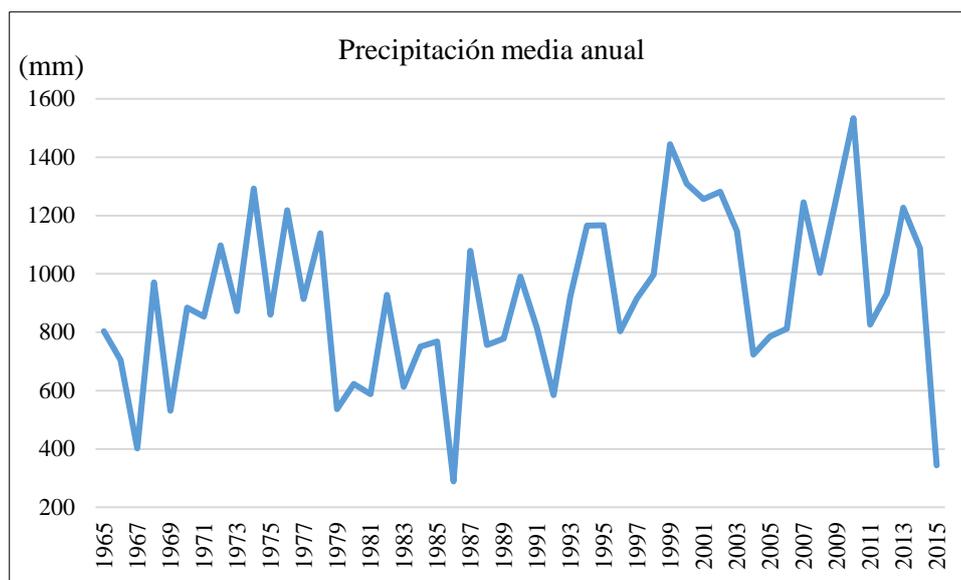


Gráfico 10. Curva de precipitación anual, estación Tembladera (periodo 1965 - 1979).

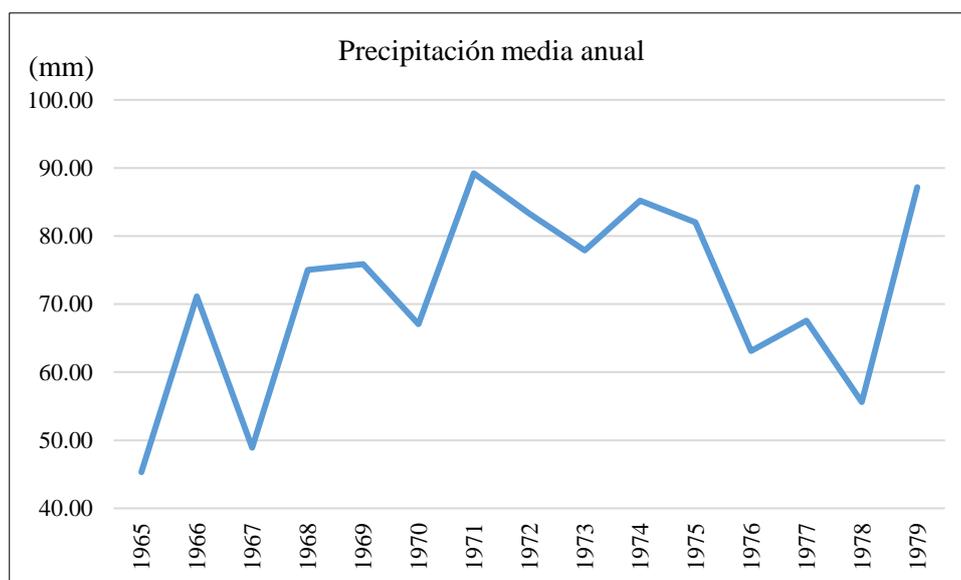


Gráfico 11. Curva de precipitación anual, estación Chepén (periodo 1965 - 1979).

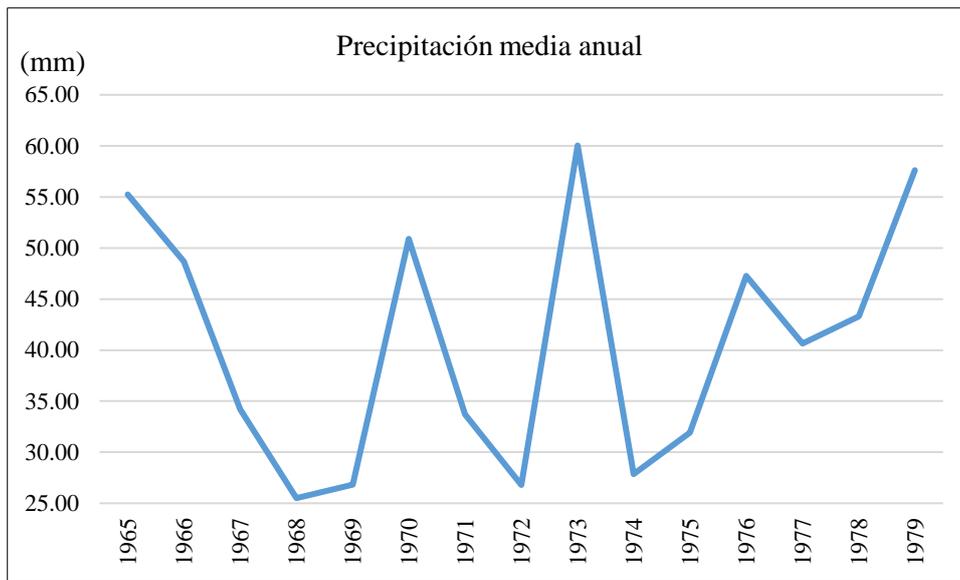


Gráfico 12. Curva de precipitación anual, estación Chepén (periodo 1970 - 1983).

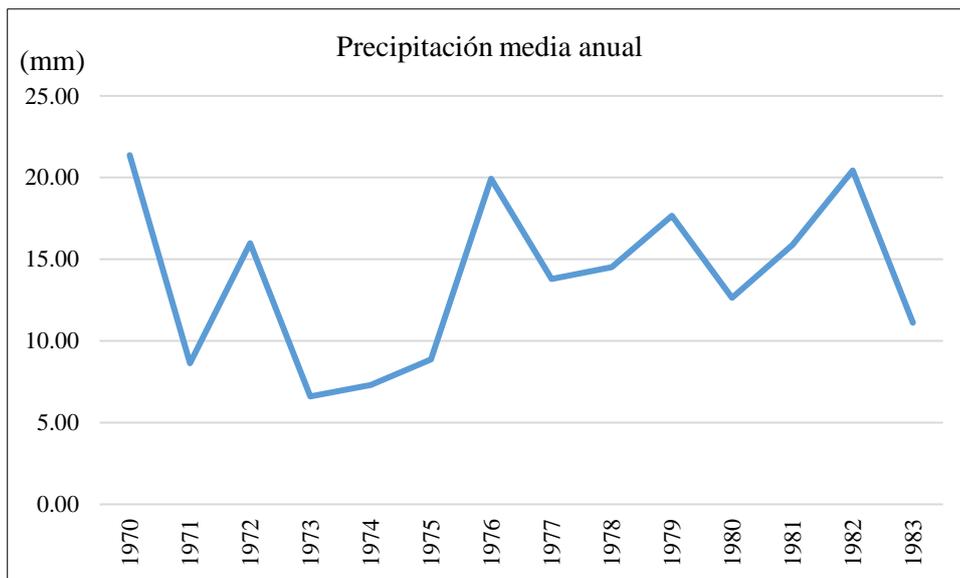


Gráfico 13. Curva de precipitación anual, estación San José (periodo 1965 - 1983).

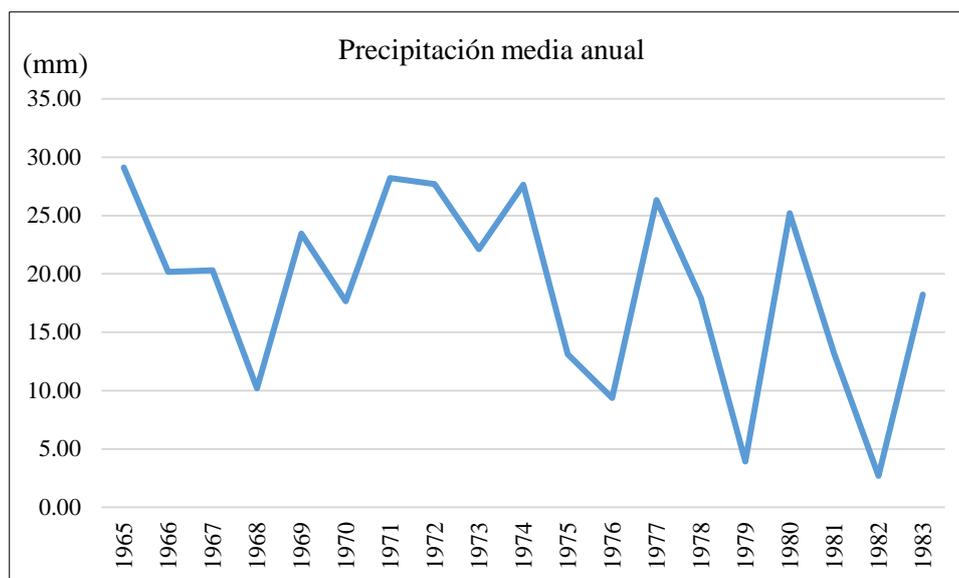
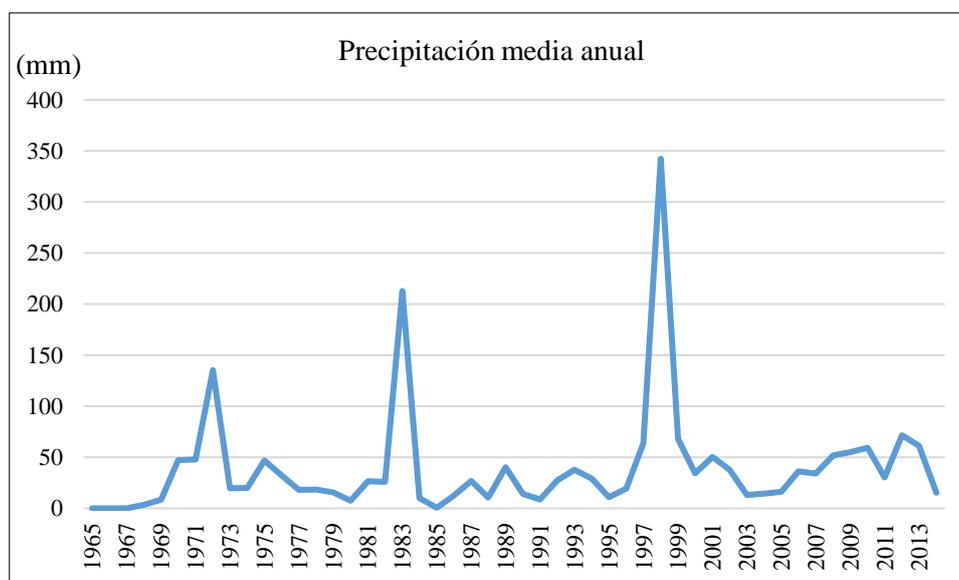


Gráfico 14. Curva de precipitación anual, estación Talla (periodo 1970 - 2014).



En el estudio realizado por MINAGRI y ANA (2015), en el cual, a partir de los datos históricos de precipitación a escala diaria (SENAMHI, 2015), realizan un análisis de la precipitación total diaria, mensual y anual para el total de las catorce estaciones pluviométricas (Tabla 10); en donde los registros históricos de pluviometría son tratados estadísticamente, completados y extendidos por los autores; además, los autores realizan un análisis de consistencia y homogeneidad a las series históricas mensuales, procedimiento

que comprende el análisis gráfico, de doble masa y estadístico, verificando así que estos sean registros confiables.

Al concluir el análisis de consistencia de los datos históricos de precipitación, los autores proceden a realizar el procedimiento de completar y extender datos de precipitación para los periodos vacíos de las estaciones de Chepén, Jequetepeque, San José, Talla y Tembladera, principalmente. Este procedimiento fue realizado utilizando modelos de regresión lineal simple y regresión lineal múltiple, en base a series de datos de precipitación más extensas de estaciones de probada consistencia, las cuales son: San Juan, Magdalena, Lives, Chilete, Namora, Llapa, Contumazá, Augusto Weberbauer.

Completados y extendidos los registros pluviométricos, los investigadores realizan el cálculo de la precipitación total mensual promedio por cada una de las catorce estaciones pluviométricas (Tabla 10). La Tabla 11 muestra el resumen de la precipitación media mensual y anual (periodo 1965 - 2014) por cada una de las catorce estaciones pluviométricas involucradas.

Con la información sobre la distribución geoespacial de las estaciones pluviométricas involucradas (Tabla 10), así como la precipitación media anual calculada para cada una de las estaciones pluviométricas (Tabla 11); procedemos a la generación del plano de precipitación anual, para ello recurrimos a la herramienta de interpolación Kriging, presente en el software ArcGIS.

Ejecutada la herramienta de Kriging, obtenemos la capa en formato ráster de precipitación anual promedio para la cuenca. Luego, usando la herramienta Reclassify, agrupamos los valores de precipitación en intervalos de 200 mm según lo planteado por Kumar et al. (2019), obteniendo siete zonas de acuerdo a la cantidad de precipitación en la cuenca, como muestra la Tabla 12.

La zonificación de acuerdo a los intervalos de precipitación anual promedio para la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque puede observarse en la Figura 14, y a mayor detalle en el Plano 07, en Anexos.

Tabla 11. Precipitación promedio mensual y anual para la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque (periodo 1965 – 2014).

Estación	Precipitación mensual (mm)												Total anual (mm)
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
1. Augusto Weberbauer	77.6	97.7	118.3	67.5	28.7	9.7	6.1	8.2	28.4	67.0	64.5	71.8	645.5
2. Chilete	28.2	50.2	59.2	24.3	5.2	1.1	0.4	0.6	2.6	8.8	7.3	12.8	200.7
3. Contumazá	87.9	140.1	180.8	89.8	16.6	4.3	2.0	2.7	11.4	28.7	22.9	39.6	648.6
4. Granja Porcón	158.5	186.7	225.9	147.1	81.0	25.7	15.3	20.1	66.6	129.0	127.7	146.1	1329.7
5. Lives	75.4	123.2	143.2	57.7	15.2	6.5	2.0	3.2	10.3	26.4	22.1	40.1	525.3
6. Llapa	119.1	154.7	201.1	116.4	45.5	17.5	8.7	14.8	45.6	87.5	68.4	91.9	971.2
7. Magdalena	53.3	84.9	106.6	47.0	14.1	3.3	0.8	1.0	8.7	23.4	21.8	38.6	403.5
8. Namora	95.4	117.1	130.3	85.7	38.3	11.2	6.7	8.7	32.0	90.8	70.7	89.2	776.1
9. San Juan	137.1	186.1	215.3	104.7	27.6	10.6	3.1	4.9	21.7	61.5	59.3	95.9	927.8
10. Chepén	5.9	11.8	16.7	4.8	1.0	0.3	0.1	0.2	0.5	1.6	1.4	3.4	47.7
11. Jequetepeque	1.8	3.2	4.2	1.6	0.3	0.1	0.0	0.1	0.2	0.5	0.5	0.9	13.4
12. San José	2.7	4.6	6.2	2.6	0.5	0.2	0.0	0.1	0.2	0.7	0.6	0.3	19.7
13. Talla	4.9	10.8	13.5	5.0	0.8	0.3	0.0	0.2	0.4	1.4	1.3	3.0	41.6
14. Tembladera	9.7	17.9	28.5	7.4	1.2	0.3	0.1	0.3	0.7	1.9	2.3	5.0	75.3

Fuente: Tomado de MINAGRI y ANA, (2015).

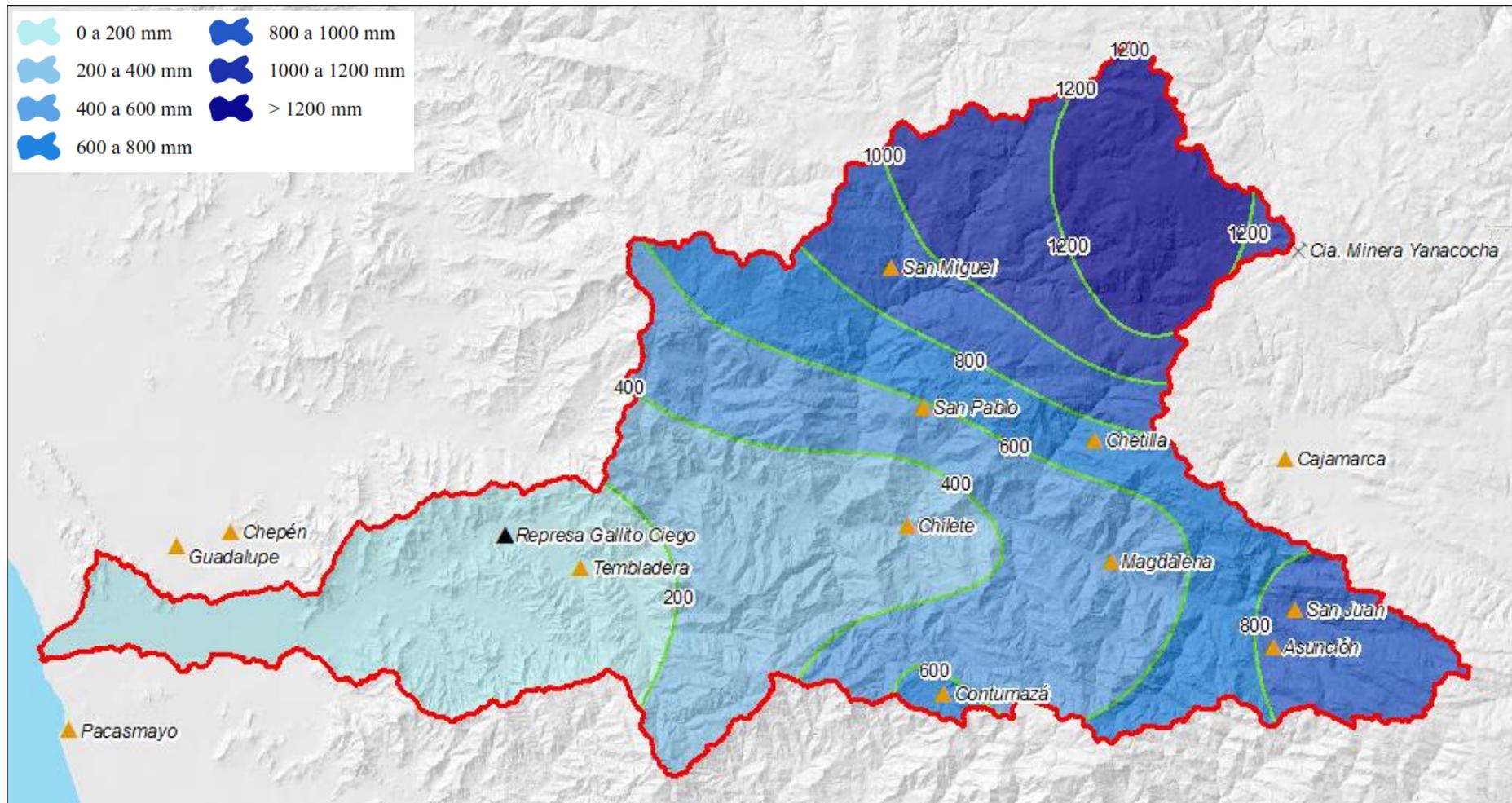


Figura 14. Isoyetas (mm) en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

Tabla 12. Intervalos de precipitación anual.

Zona	Precipitación anual promedio (mm)
Zona I	0 a 200
Zona II	200 a 400
Zona III	400 a 600
Zona IV	600 a 800
Zona V	800 a 1 000
Zona VI	1 000 a 1 200
Zona VII	> 1 200

Fuente: Elaborado con base en Kumar et al., (2019).

3.3.2.5. Pendiente del Terreno

Para generar la capa temática de la variable pendiente del terreno, utilizamos cuatro MDE, de tipo ASTER GDEM V3; son archivos de descarga libre que se puede adquirir desde la plataforma EarthExplorer. Son:

- *MDE 1:* ASTGTMV003_S07W080.
- *MDE 2:* ASTGTMV003_S07W079.
- *MDE 3:* ASTGTMV003_S08W080.
- *MDE 4:* ASTGTMV003_S08W079.

Una vez adquiridos los archivos MDE, procedemos a su unión mediante la herramienta Mosaic to new Raster, presente en el software ArcGIS; la unión de los MDE dará como resultado un único MDE, facilitando el procesamiento del mismo. La Figura 15 muestra el Modelo Digital de Elevaciones para la zona de estudio.

Mediante la herramienta Slope procesamos el MDE para obtener la pendiente del terreno, expresada en grados sexagesimales. Ejecutado el procesamiento mediante la herramienta Slope, obtenemos valores de pendiente del terreno que varían desde los 0° hasta los 78.1°. Usando la herramienta Reclassify, realizamos una clasificación de las pendientes del terreno según lo propuesto por Rodríguez (2016), en cuya clasificación el autor propone cuatro Unidades Morfogénicas: Planicies, lomadas, laderas y escarpas; cada una de ellas asociada a un intervalo específico de pendiente del terreno, como muestra la Tabla 13.

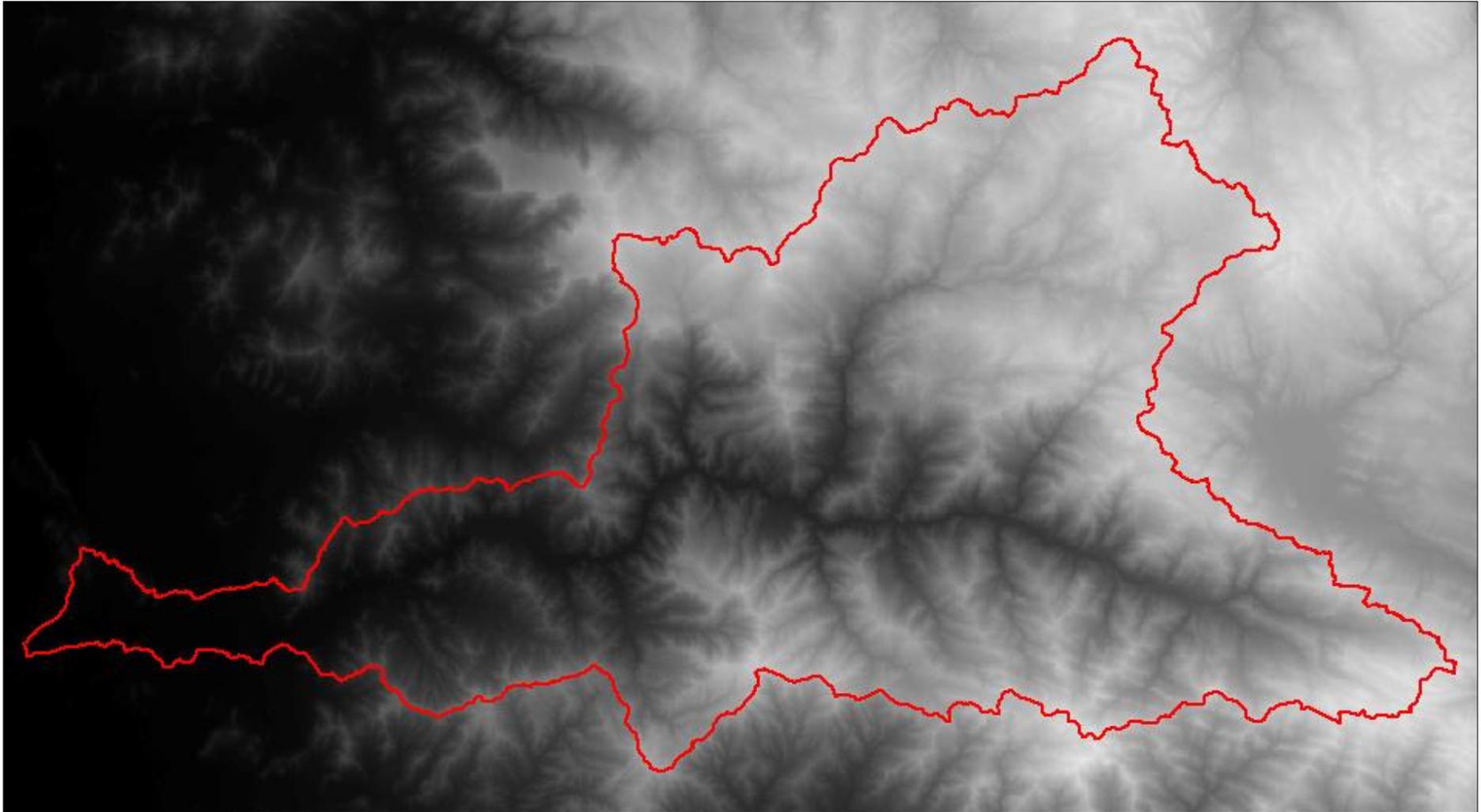


Figura 15. Modelo Digital de Elevaciones para la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

Tabla 13. Pendiente del terreno y Unidades Morfogenéticas asociadas.

Unidad Morfogenética	Pendiente del terreno
Planicies	0° a 8°
Lomadas	8° a 20°
Laderas	20° a 50°
Escarpas	> 50°

Fuente: Elaborado con base en Rodríguez, (2016).

La zonificación de las Unidades Morfogenéticas identificadas en la CHJ de acuerdo a los valores de la pendiente del terreno puede observarse en la Figura 16, y a mayor detalle en el Plano 08, en Anexos.

3.3.2.6. Drenajes

Para generar la capa temática de la variable drenajes, utilizamos archivos en formato tipo vector de la Red Hidrográfica de los departamentos de Cajamarca y La Libertad, en una escala 1:100 000; los cuales pueden obtenerse gratuitamente del portal web Geocatmin; asimismo se utilizó una ortofoto obtenida del software SASPlanet, la cual ayudará en el análisis e identificación de drenajes, a modo de complemento. La Figura 17 muestra los drenajes identificados en la cuenca.

Obtenidos los drenajes en la cuenca, los cuales se encuentran en formato tipo vector; hacemos uso de la herramienta Line Density, presente en el software ArcGIS, para realizar el cálculo de la densidad de drenajes expresados en Km/Km^2 . Una vez obtenida la densidad de drenajes, este nuevo archivo estará en formato tipo ráster.

Ejecutada la operación en la herramienta Line Density, observamos valores de densidad de drenajes que varían desde los $0.0 \text{ Km}/\text{Km}^2$ hasta los $4.90 \text{ Km}/\text{Km}^2$. Finalmente, haciendo uso de la herramienta Reclassify, realizamos una clasificación de la densidad de drenajes en base a Macas y López (2018), obteniendo de esta manera seis intervalos, como muestra la Tabla 14.

La zonificación de acuerdo a los valores de densidad de drenajes puede observarse en la Figura 18, y a mayor detalle en el Plano 09, en Anexos.

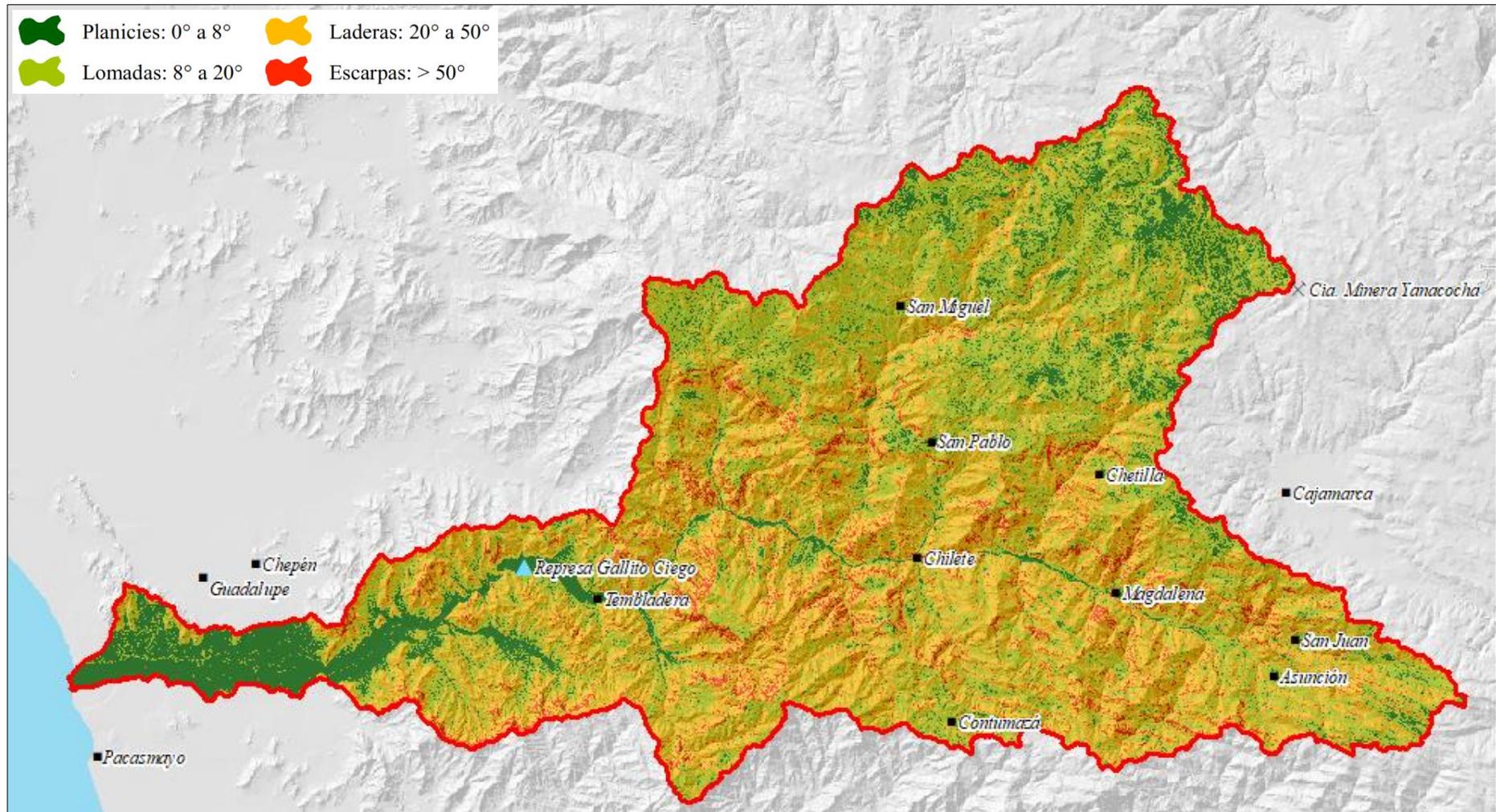


Figura 16. Unidades morfogénicas según la pendiente del terreno.

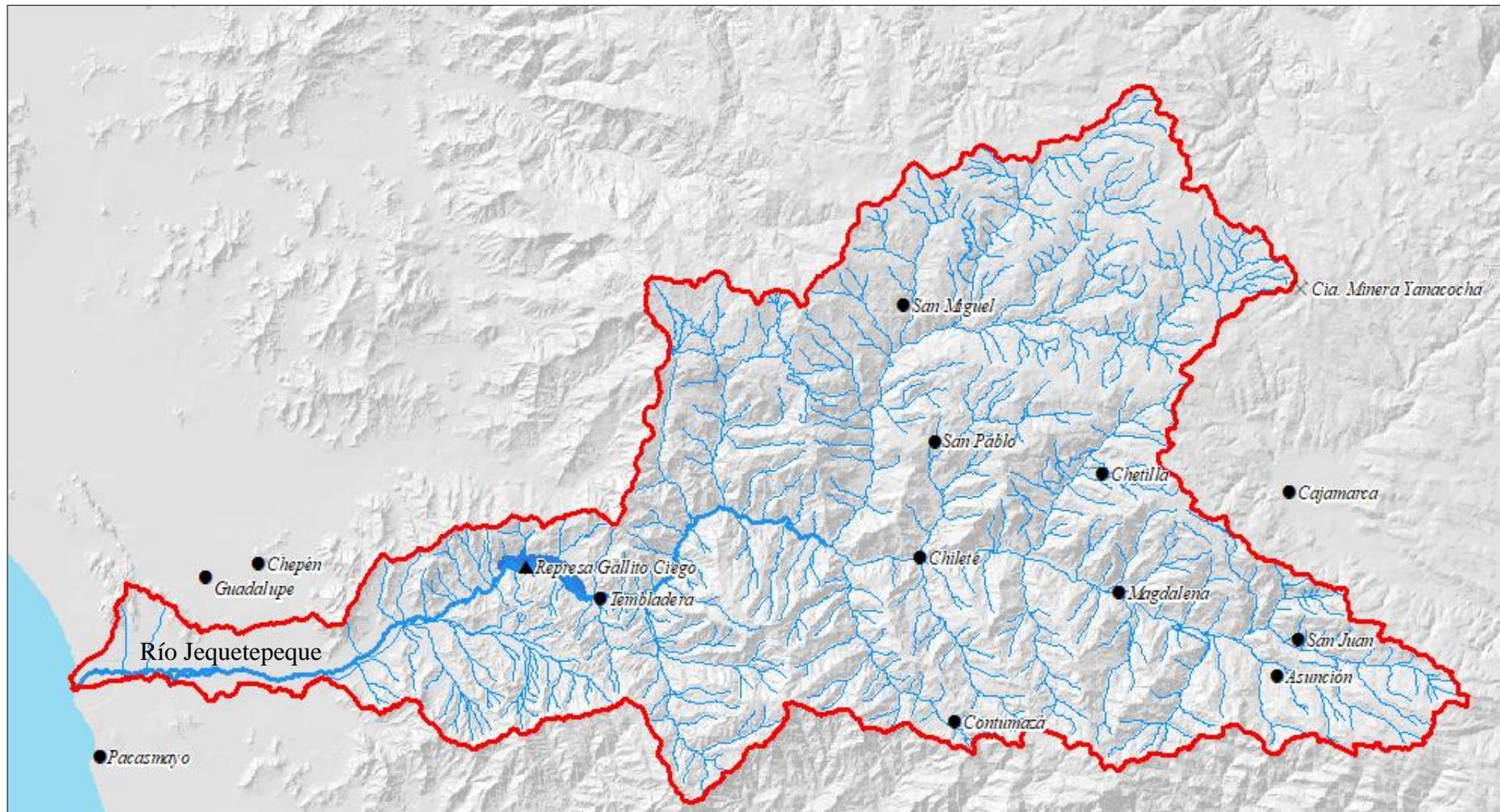


Figura 17. Drenajes en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

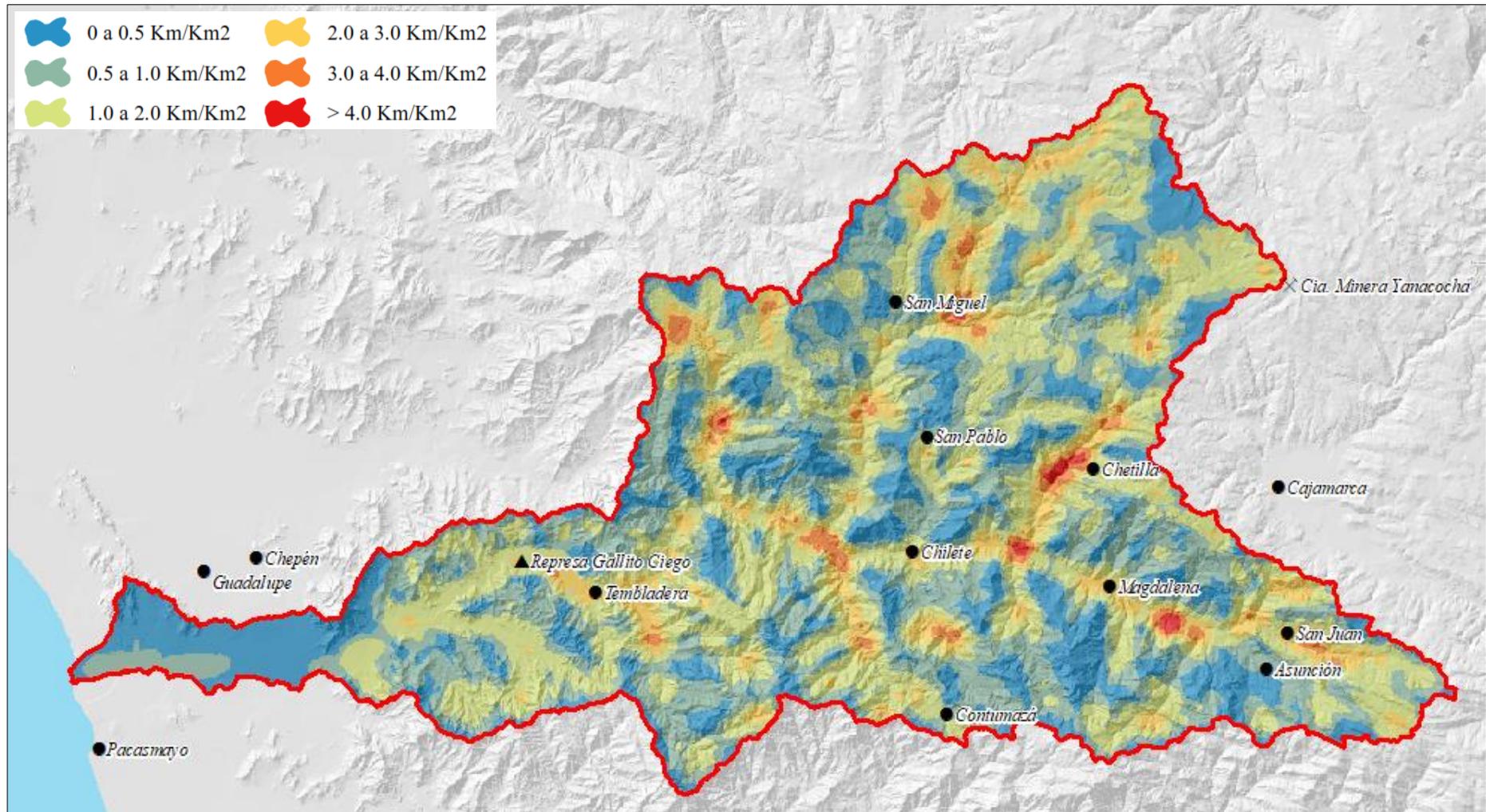


Figura 18. Densidad de drenajes en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

Tabla 14. Intervalos de densidad de drenajes.

Zona	Densidad de drenajes
Zona I	0.0 a 0.5 Km/Km ²
Zona II	0.5 a 1.0 Km/Km ²
Zona III	1.0 a 2.0 Km/Km ²
Zona IV	2.0 a 3.0 Km/Km ²
Zona V	3.0 a 4.0 Km/Km ²
Zona VI	> 4.00 Km/Km ²

Fuente: Elaborado con base en Macas y López, (2018).

3.3.3. Aplicación de la Metodología de Procesos de Análisis Jerárquico

3.3.3.1. Construcción de la Jerarquía

El primer paso para aplicar la metodología AHP, es la construcción de la jerarquía que nos será especialmente útil para establecer el objetivo principal para el cual estamos realizando dicho proceso, es decir, nos ayuda a definir el objetivo principal al cual deseamos llegar con la aplicación del AHP; así como también se definen los criterios o variables que estarán involucrados para lograr dicho objetivo principal.

La Figura 19 muestra la jerarquía que se utilizará para lograr la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, es decir, el objetivo principal y los criterios o variables involucradas. De esta manera, queda establecido que el foco u objetivo principal que perseguimos es la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en los límites de la cuenca, y, para ello intervendrán seis criterios o variables, como se observa.

3.3.3.2. Establecimiento de Prioridades

El segundo paso en la metodología del AHP, es el establecimiento de las prioridades o ponderación de los pesos normalizados de cada una de las variables o criterios sobre los demás, así también como de los subcriterios. El establecimiento de prioridades se efectúa en función de las denominadas comparaciones pareadas, es decir, comparaciones por pares, en una MRCP; y haciendo uso de la escala fundamental de Saaty.

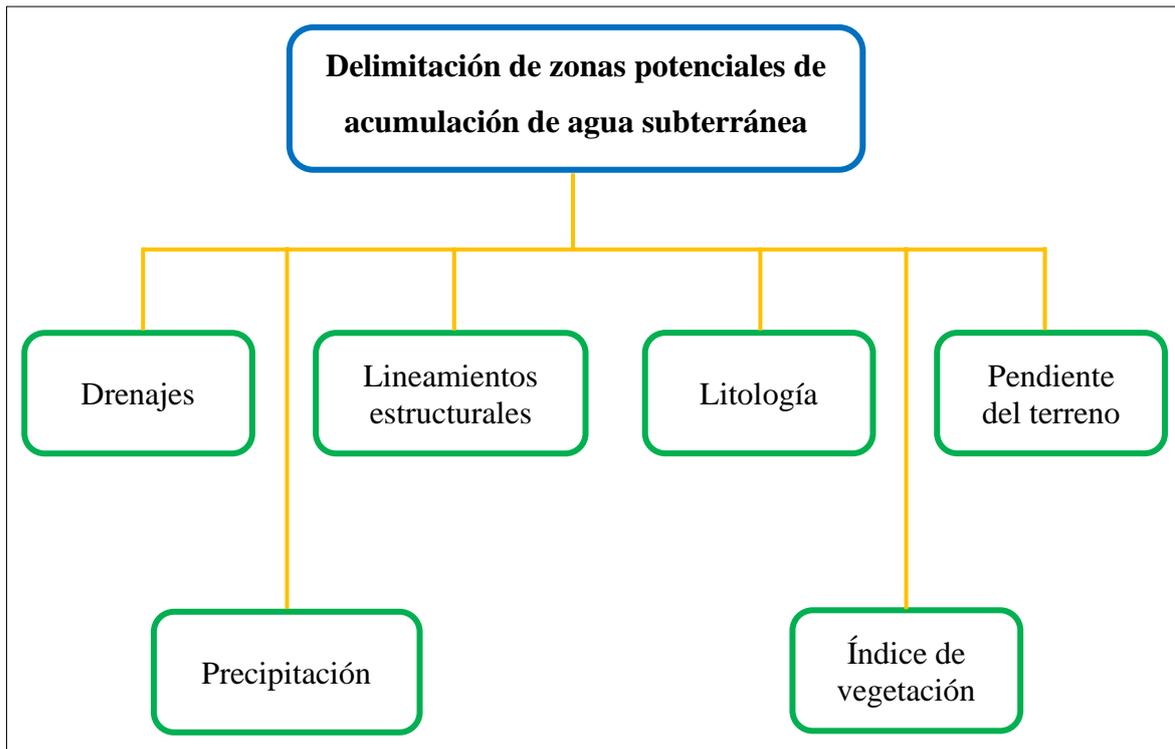


Figura 19. Jerarquía utilizada en la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

En primer lugar, se realizará la MRCP para comparar y establecer las prioridades de los seis criterios principales en la jerarquía, posteriormente se elaborará una MRCP para comparar y establecer prioridades para los subcriterios contenidos en cada uno de los seis criterios principales.

La MRCP principal, es decir, donde se comparan y establecen prioridades de los seis criterios o variables principales, es desarrollada en función de las investigaciones de Arkoprovo et al. (2012), Muralitharan y Palanivel (2015), Pinto et al. (2015), Sahoo et al. (2015), Sánchez (2017), Macas y López (2018), Arulbalaji et al. (2019), Kumar et al. (2019) y Hernández et al. (2020); pues se toma sus trabajos como referencia para el desarrollo y establecimiento de prioridades.

La Tabla 15 muestra la MRCP para los seis criterios principales, y de forma resumida los resultados del cálculo de las prioridades o pesos normalizados para los mismos. Para establecer las prioridades de cada criterio partimos de su influencia en cuanto a su aporte en la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea, teniendo en cuenta para ello a las investigaciones de los autores mencionados en el párrafo anterior. Observamos

que la mayor y menor prioridad al momento de realizar la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea, son para las variables o criterios de precipitación e índice de vegetación, respectivamente.

Una vez ya establecidas las prioridades para los criterios principales, corresponde realizar el mismo procedimiento para los subcriterios de cada una de las variables o criterios principales.

La Tabla 16 muestra la MRCP para los seis subcriterios de la variable drenajes, obtenidos en el apartado 3.3.2. Generación de la base de datos; así como las prioridades relativas o pesos normalizados para los mismos. Para establecer las prioridades relativas de cada subcriterio partimos de su influencia relativa en cuanto a su aporte en la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea, teniendo en cuenta que una mayor densidad de drenajes incrementa la escorrentía superficial, en comparación con una baja densidad de drenajes que permite una mayor infiltración; por tanto, las prioridades más altas las tendrán las zonas con densidad de drenajes menores y viceversa (Arkoprovo et al., 2012; Muralitharan y Palanivel, 2015; Macas y López, 2018; Arulbalaji et al., 2019; Kumar et al., 2019).

Tabla 15. MRCP N° 01: comparación por pares de los criterios principales.

Potencial de acumulación de agua subterránea	Drenajes	Lineamientos estructurales	Litología	Pendiente del terreno	Precipitación	Índice de vegetación	C
Drenajes	1	1/3	1/5	2	1/5	5	0.079
Lineamientos estructurales	3	1	1/3	5	1/3	7	0.167
Litología	5	3	1	7	1/2	7	0.297
Pendiente del terreno	1/2	1/5	1/7	1	1/7	3	0.047
Precipitación	5	3	2	7	1	8	0.383
Índice de vegetación	1/5	1/7	1/7	1/3	1/8	1	0.026

Tabla 16. MRCP N° 02: comparación de subcriterios, variable drenajes.

Densidad de drenajes	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV	Zona V	Zona VI	Ci
Zona I	1	2	3	5	7	8	0.395
Zona II	1/2	1	2	3	5	7	0.249
Zona III	1/3	1/2	1	3	5	7	0.185
Zona IV	1/5	1/3	1/3	1	3	5	0.095
Zona V	1/7	1/5	1/5	1/3	1	3	0.048
Zona VI	1/8	1/7	1/7	1/5	1/3	1	0.027

La Tabla 17 muestra la MRCP para los seis subcriterios de la variable lineamientos estructurales, obtenidos en el apartado 3.3.2. Generación de la base de datos; así como las prioridades relativas o pesos normalizados para los mismos. Para establecer las prioridades relativas de cada subcriterio partimos de su influencia relativa en cuanto a su aporte en la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea, teniendo en cuenta que una mayor densidad de lineamientos estructurales da como resultado mayor permeabilidad y porosidad secundarias en el terreno, lo que se traduce a una mayor tasa de infiltración de agua en el subsuelo; entonces, tendrán mayor prioridad las zonas con una mayor densidad de lineamientos estructurales, por el contrario, tendrán menor prioridad aquellas zonas con menores densidad de lineamientos estructurales (Sahoo et al., 2015; Macas y López, 2018; Arulbalaji et al., 2019; Kumar et al., 2019).

La Tabla 18 muestra la MRCP para los cuatro subcriterios de la variable litología, obtenidos en el apartado 3.3.2. Generación de la base de datos; así como las prioridades relativas o pesos normalizados para los mismos. Para establecer las prioridades relativas de cada subcriterio partimos de su influencia relativa en cuanto a su aporte en la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea. Desde el punto de vista del comportamiento hidrogeológico de los materiales geológicos aflorantes en la CHJ, según el grado de permeabilidad de los distintos tipos de litología permitirá, en mayor o menor medida, la infiltración de agua hacia el subsuelo; por tanto, depósitos inconsolidados tendrán mayor prioridad en comparación, por ejemplo, a rocas de origen ígneo intrusivo; vale decir, tendrán mayor prioridad aquellos materiales geológicos con mayor permeabilidad a

comparación de aquellos materiales impermeables (Arkoprovo et al., 2012; Pinto et al., 2015; Sahoo et al., 2015; Sánchez, 2017; Macas y López, 2018; Arulbalaji et al., 2019; Kumar et al., 2019).

Tabla 17. MRCP N° 03: comparación de subcriterios, variable lineamientos estructurales.

Densidad de lineamientos estructurales	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV	Zona V	Zona VI	Ci
Zona I	1	1/3	1/5	1/7	1/7	1/9	0.025
Zona II	3	1	1/3	1/5	1/6	1/7	0.044
Zona III	5	3	1	1/3	1/5	1/5	0.082
Zona IV	7	5	3	1	1/3	1/5	0.148
Zona V	7	6	5	3	1	1/3	0.262
Zona VI	9	7	5	5	3	1	0.439

Tabla 18. MRCP N° 04: comparación de subcriterios, variable litología.

Tipo de litología	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Ci
Tipo I	1	3	5	7	0.564
Tipo II	1/3	1	3	5	0.263
Tipo III	1/5	1/3	1	3	0.118
Tipo IV	1/7	1/5	1/3	1	0.055

La Tabla 19 muestra la MRCP para los cinco subcriterios de la variable pendiente del terreno, obtenidos en el apartado 3.3.2. Generación de la base de datos; así como las prioridades relativas o pesos normalizados para los mismos. Para establecer las prioridades relativas de cada subcriterio partimos de su influencia relativa en cuanto a su aporte en la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea, teniendo en cuenta que las zonas que cuenten con menores pendientes, es decir, más planicies en contraparte a las zonas con pendientes más escarpadas, tendrán mayor prioridad; esto debido a que las zonas con pendientes más pronunciadas y escarpadas imparten mayores escorrentías y por tanto menor

tasa de infiltración, en comparación a planicies, que ayudan a una mayor infiltración de agua hacia el subsuelo (Arkoprovo et al., 2012; Sánchez, 2017; Arulbalaji et al., 2019; Kumar et al., 2019; Hernández et al., 2020).

Tabla 19. MRCP N° 05: comparación de subcriterios, variable pendiente del terreno.

Pendiente del terreno	Planicies	Lomadas	Laderas	Escarpas	Ci
Planicies	1	3	5	7	0.567
Lomadas	1/3	1	3	5	0.265
Laderas	1/5	1/3	1	2	0.107
Escarpas	1/7	1/5	1/2	1	0.061

La Tabla 20 muestra la MRCP para los siete subcriterios de la variable precipitación, obtenidos en el apartado 3.3.2. Generación de la base de datos; así como las prioridades relativas o pesos normalizados para los mismos. Para establecer las prioridades relativas de cada subcriterio partimos de su influencia relativa en cuanto a su aporte en la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea, teniendo en cuenta que mayores prioridades se asignarán a las zonas que cuenten con mayor cantidad de precipitación anual, así por el contrario, tendrán menor prioridad zonas con menor tasa de precipitación anual; esto se debe a que las lluvias son un factor de gran influencia que llega a determinar la cantidad de agua que podría infiltrarse en el subsuelo, convirtiéndose en la principal fuente de recarga de las aguas subterráneas (Pinto et al., 2015; Macas y López, 2018; Arulbalaji et al., 2019; Kumar et al., 2019; Hernández et al., 2020).

La Tabla 21 muestra la MRCP para los cuatro subcriterios de la variable índice de vegetación, obtenidos en el apartado 3.3.2. Generación de la base de datos; así como las prioridades relativas o pesos normalizados para los mismos. Para establecer las prioridades relativas de cada subcriterio partimos de su influencia relativa en cuanto a su aporte en la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea, teniendo en cuenta que mayores prioridades se asignarán a las zonas con los mayores valores de NDVI; debido a que valores altos implican mayor actividad fotosintética y por tanto mayor densidad vegetativa, indicando mayor humedad en el suelo y subsuelo (Sánchez, 2017; Macas y López, 2018).

Tabla 20. MRCP N° 06: comparación de subcriterios, variable precipitación.

Isoyetas (mm)	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV	Zona V	Zona VI	Zona VII	Ci
Zona I	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	0.031
Zona II	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	0.045
Zona III	3	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5	0.068
Zona IV	4	3	2	1	1/2	1/3	1/4	0.104
Zona V	5	4	3	2	1	1/2	1/3	0.160
Zona VI	6	5	4	3	2	1	1/2	0.241
Zona VII	7	6	5	4	3	2	1	0.352

Tabla 21. MRCP N° 07: comparación de subcriterios, variable índice de vegetación.

NDVI	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV	Ci
Zona I	1	1/3	1/5	1/9	0.048
Zona II	3	1	1/3	1/6	0.104
Zona III	5	3	1	1/4	0.226
Zona IV	9	6	4	1	0.623

3.3.3.3. Consistencia Lógica

El tercer paso en la metodología del AHP, es la evaluación de la consistencia lógica. Una vez realizadas las comparaciones por pares, completadas las matrices correspondientes y calculados los pesos normalizados para cada criterio y subcriterios, se debe verificar la consistencia, o en todo caso la inconsistencia, de los juicios emitidos y de las prioridades o pesos calculados. Para medir esta consistencia, o inconsistencia, se recurre a la Relación de Consistencia.

Para que los juicios emitidos y las prioridades calculadas sean consideradas consistentes, el valor de RC debe ser menor o igual a 0.10, es decir, menor o igual a 10%; de lo contrario los juicios emitidos para completar la MRCP deberán ser reevaluados para evitar inconsistencias.

Las Tablas 22, 23, 24, 25, 26, 27 muestran cada MRCP en las que se comparan los subcriterios de cada uno de los criterios principales o variables de drenajes, lineamientos estructurales, litología, pendiente del terreno, precipitación e índice de vegetación, respectivamente. Las matrices son completadas y desarrolladas, llegando al cálculo de RC para cada una de ellas.

La Tabla 28 muestra la MRCP en la que se comparan las variables o criterios principales en función del foco de la jerarquía construida anteriormente (Figura 19). La matriz es completada y desarrollada hasta llegar al cálculo de la Relación de Consistencia para dicha matriz.

Tabla 22. Cálculo de RC, subcriterios - variable drenajes.

Densidad de drenajes	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV	Zona V	Zona VI	Wi	Ci	λ_i
Zona I	1	2	3	5	7	8	3.448	0.395	0.910
Zona II	1/2	1	2	3	5	7	2.172	0.249	1.040
Zona III	1/3	1/2	1	3	5	7	1.611	0.185	1.233
Zona IV	1/5	1/3	1/3	1	3	5	0.833	0.095	1.197
Zona V	1/7	1/5	1/5	1/3	1	3	0.423	0.048	1.034
Zona VI	1/8	1/7	1/7	1/5	1/3	1	0.235	0.027	0.837
Σ total por columna	2.30	4.18	6.68	12.53	21.33	31.00	8.722	1.000	6.250
									λ máx.

n	6
----------	---

Índice de Consistencia o IC	0.0501
-----------------------------	--------

Índice de Aleatoriedad o IA	1.24
-----------------------------	------

Relación de Consistencia o RC	0.040	Consistente
-------------------------------	--------------	--------------------

Tabla 23. Cálculo de RC, subcriterios - variable lineamientos estructurales.

Densidad de lineamientos estructurales	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV	Zona V	Zona VI	Wi	Ci	λ_i
Zona I	1	1/3	1/5	1/7	1/7	1/9	0.231	0.025	0.792
Zona II	3	1	1/3	1/5	1/6	1/7	0.410	0.044	0.983
Zona III	5	3	1	1/3	1/5	1/5	0.765	0.082	1.192
Zona IV	7	5	3	1	1/3	1/5	1.383	0.148	1.435
Zona V	7	6	5	3	1	1/3	2.438	0.262	1.266
Zona VI	9	7	5	5	3	1	4.096	0.439	0.873
Σ total por columna	32.00	22.33	14.53	9.68	4.84	1.99	9.323	1.000	6.542
									λ máx.

n	6
---	---

Índice de Consistencia o IC	0.1084
-----------------------------	--------

Índice de Aleatoriedad o IA	1.24
-----------------------------	------

Relación de Consistencia o RC	0.087	Consistente
-------------------------------	-------	-------------

Tabla 24. Cálculo de RC, subcriterios - variable litología.

Tipo de litología	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Wi	Ci	λ_i
Tipo I	1	3	5	7	3.201	0.564	0.945
Tipo II	1/3	1	3	5	1.495	0.263	1.194
Tipo III	1/5	1/3	1	3	0.669	0.118	1.099
Tipo IV	1/7	1/5	1/3	1	0.312	0.055	0.880
Σ total por columna	1.68	4.53	9.33	16.00	5.678	1.000	4.119
							λ máx.

n	4
Índice de Consistencia o IC	0.0396
Índice de Aleatoriedad o IA	0.90
Relación de Consistencia o RC	0.044 Consistente

Tabla 25. Cálculo de RC, subcriterios - variable pendiente del terreno.

Pendiente del terreno	Planicies	Lomadas	Laderas	Escarpas	Wi	Ci	λ_i
Planicies	1	3	5	7	3.201	0.567	0.950
Lomadas	1/3	1	3	5	1.495	0.265	1.201
Laderas	1/5	1/3	1	2	0.604	0.107	1.017
Escarpas	1/7	1/5	1/2	1	0.346	0.061	0.918
Σ total por columna	1.68	4.53	9.50	15.00	5.646	1.000	4.086
							λ máx

n	4
Índice de Consistencia o IC	0.0286
Índice de Aleatoriedad o IA	0.9
Relación de Consistencia o RC	0.032 Consistente

Tabla 26. Cálculo de RC, subcriterios - variable precipitación.

mm	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV	Zona V	Zona VI	Zona VII	Wi	Ci	λi
Zona I	1	½	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	0.296	0.031	0.862
Zona II	2	1	½	1/3	1/4	1/5	1/6	0.431	0.045	0.965
Zona III	3	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5	0.652	0.068	1.074
Zona IV	4	3	2	1	1/2	1/3	1/4	1.000	0.104	1.153
Zona V	5	4	3	2	1	1/2	1/3	1.534	0.160	1.163
Zona VI	6	5	4	3	2	1	1/2	2.318	0.241	1.073
Zona VII	7	6	5	4	3	2	1	3.380	0.352	0.912
Σ total por columna	28.00	21.50	15.83	11.08	7.28	4.45	2.59	9.612	1.000	7.201

λ máx.

n	7
Índice de Consistencia o IC	0.0336
Índice de Aleatoriedad o IA	1.32
Relación de Consistencia o RC	0.025 Consistente

Tabla 27. Cálculo de RC, subcriterios - variable índice de vegetación.

NDVI	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV	Wi	Ci	λ_i
Zona I	1	1/3	1/5	1/9	0.293	0.048	0.858
Zona II	3	1	1/3	1/6	0.639	0.104	1.072
Zona III	5	3	1	1/4	1.392	0.226	1.251
Zona IV	9	6	4	1	3.834	0.623	0.951
Σ total por columna	18.00	10.33	5.53	1.53	6.158	1.000	4.132
							λ máx.

n	4
Índice de Consistencia o IC	0.0438
Índice de Aleatoriedad o IA	0.9
Relación de Consistencia o RC	0.049
	Consistente

Tabla 28. Cálculo de RC, criterios principales.

Potencial de acumulación de agua subterránea	Drenajes	Lineamientos estructurales	Litología	Pendiente del terreno	Precipitación	Índice de vegetación	Wi	C	λ_i
Drenajes	1	1/3	1/5	2	1/5	5	0.715	0.079	1.166
Lineamientos estructurales	3	1	1/3	5	1/3	7	1.506	0.167	1.283
Litología	5	3	1	7	1/2	7	2.676	0.297	1.135
Pendiente del terreno	1/2	1/5	1/7	1	1/7	3	0.428	0.047	1.060
Precipitación	5	3	2	7	1	8	3.448	0.383	0.881
Índice de vegetación	1/5	1/7	1/7	1/3	1/8	1	0.235	0.026	0.810
Σ total por columna	14.70	7.68	3.82	22.33	2.30	31.00	9.008	1.000	6.336

λ máx

n	6
Índice de Consistencia o IC	0.0671
Índice de Aleatoriedad o IA	1.24
Relación de Consistencia o RC	0.054 Consistente

De las Tablas 22 a la 28, comprobamos que los juicios emitidos en cada una de las MRCP y las prioridades o pesos normalizados calculados tienen consistencia lógica, pues en todos los casos desarrollados se obtiene un valor de RC menor a 0.1 es decir, menor a 10%; por tanto, la teoría nos indica que no es necesario reevaluar los juicios.

La Tabla 29 muestra el resumen de los valores de RC para cada una de las siete matrices construidas.

Tabla 29. Resumen de valores de la Relación de Consistencia para cada matriz.

Matriz	Valor de RC
MRCP N° 01: criterios principales	0.054
MRCP N° 02: subcriterios – variable drenajes	0.040
MRCP N° 03: subcriterios – variable lineamientos estructurales	0.087
MRCP N° 04: subcriterios – variable litología	0.044
MRCP N° 05: subcriterios – variable pendiente del terreno	0.032
MRCP N° 06: subcriterios – variable precipitación	0.025
MRCP N° 07: subcriterios – variable índice de vegetación	0.049

3.3.4. Delimitación de Zonas Potenciales de Acumulación de Agua Subterránea

Para realizar la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en la CHJ intervendrán un total de seis capas temáticas, cada una de las cuales corresponde a un criterio o variable, como muestra la jerarquía elaborada anteriormente (Figura 21), cada una con subcriterios propios. Las capas temáticas han sido ponderadas o priorizadas según su contribución o influencia en el almacenamiento de agua subterránea a través de la metodología AHP; de la misma manera se procedió con los subcriterios, se calcularon los pesos normalizados según su contribución en el almacenamiento de agua subterránea dentro de su capa temática respectiva. Para la priorización o el cálculo de los pesos normalizados, nos basamos en la bibliografía y autores mencionados anteriormente. Así, una capa temática con una priorización o peso normalizado alto representará un mayor impacto y una capa temática con priorización o peso normalizado bajo representará un impacto bajo en cuanto al potencial de acumulación de agua subterránea.

La Tabla 30 muestra un resumen de las capas temáticas involucradas, así como los subcriterios para cada una de ellas y los valores de prioridad o pesos normalizados correspondientes.

Tabla 30. Capas temáticas involucradas, subcriterios y pesos normalizados.

Capa temática	Prioridad (C)	Subcriterios	Prioridad relativa (Ci)
Precipitación	0.383	Zona I: 0 a 200 mm	0.031
		Zona II: 200 a 400 mm	0.045
		Zona III: 400 a 600 mm	0.068
		Zona IV: 600 a 800 mm	0.104
		Zona V: 800 a 1000 mm	0.160
		Zona VI: 1000 a 1200 mm	0.241
		Zona VII: > 1200 mm	0.352
Litología	0.297	Tipo I: $K > 0.25$ m/d	0.564
		Tipo II: K entre 0.15 y 0.25 m/d	0.263
		Tipo III: K entre 0.05 y 0.15 m/d	0.118
		Tipo IV: $K < 0.05$ m/d, impermeable	0.055
Lineamientos estructurales	0.167	Zona I: 0 a 0.25 Km/Km ²	0.025
		Zona II: 0.25 a 0.50 Km/Km ²	0.044
		Zona III: 0.50 a 0.75 Km/Km ²	0.082
		Zona IV: 0.75 a 1.00 Km/Km ²	0.148
		Zona V: 1.00 a 1.50 Km/Km ²	0.262
		Zona VI: > 1.50 Km/Km ²	0.439
Drenajes	0.079	Zona I: 0.0 a 0.5 Km/Km ²	0.395
		Zona II: 0.5 a 1.0 Km/Km ²	0.249
		Zona III: 1.0 a 2.0 Km/Km ²	0.185
		Zona IV: 2.0 a 3.0 Km/Km ²	0.095
		Zona V: 3.0 a 4.0 Km/Km ²	0.048
		Zona VI: > 4.0 Km/Km ²	0.027
Pendiente del terreno	0.047	Planicies: 0° a 8°	0.567
		Lomadas: 8° a 20°	0.265
		Laderas: 20° a 50°	0.107
		Escarpas: > 50°	0.061
Índice de vegetación	0.026	Zona I: -1 a -0.07	0.048
		Zona II: -0.07 a 0.15	0.104
		Zona III: 0.15 a 0.33	0.226
		Zona IV: > 0.33	0.623

De esta manera, a partir de las prioridades o pesos normalizados obtenidos para cada capa temática y sus respectivos subcriterios, es decir C y Ci, se realizará el cálculo del Índice de Potencial de Agua Subterránea (GWPI) para nuestra zona de estudio, la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque. Para el cálculo del GWPI se utilizará una combinación lineal ponderada,

la cual se ejecutará con la herramienta Raster Calculator, presente en el software ArcGIS. La expresión matemática utilizada para el cálculo del GWPI será la indicada en la Formula 6; la cual ha sido adaptada de Arkoprovo et al. 2012, Muralitharan y Palanivel 2015, Pinto et al. 2015, Sahoo et al. 2015, Macas y López 2018, Arulbalaji et al. 2019 y Kumar et al. 2019; para nuestro caso en particular.

$$GWPI = \{ [(PP_C)(PP_{Ci})] + [(LE_C)(LE_{Ci})] + [(LT_C)(LT_{Ci})] + [(DR_C)(DR_{Ci})] + [(PT_C)(PT_{Ci})] + [(IV_C)(IV_{Ci})] \}$$

Fórmula 6. Cálculo del Índice de Potencial de Agua Subterránea.

En donde: PP es precipitación, LE es lineamientos estructurales, LT es litología, DR es drenajes, PT es pendiente del terreno, IV es índice de vegetación; C es el peso normalizado de cada capa temática, Ci es el peso normalizado para cada subcriterio en su capa temática correspondiente.

Se debe tener en consideración que las seis capas temáticas involucradas tienen las siguientes características para ser procesadas en un entorno SIG: se encuentran en modelo de datos ráster, con un tamaño de celda o pixel de treinta por treinta metros. Ejecutada la expresión matemática para el cálculo del GWPI en la herramienta Raster Calculator, obtenemos cantidades adimensionales que van desde 0.0455 a 0.4098. Los valores obtenidos para el GWPI fueron distribuidos en cuatro grupos, utilizando el método de clasificación por cuantiles, pues según indica Rahmati et al. y Nampak et al., citados por Macas y López (2018), este método presenta alta eficiencia en la clasificación por contener igual número de elementos por clase o grupo definidos. La Tabla 31 indica los cuatro intervalos definidos para el Índice de Potencial de Agua Subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

Tabla 31. Valores del Índice de Potencial de Agua Subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

Índice de Potencial de Agua Subterránea	Potencial
0.0455 a 0.0955	Bajo
0.0955 a 0.1269	Bajo-moderado
0.1269 a 0.1698	Moderado
0.1698 a 0.4098	Alto

Fuente: Elaborado con base en Macas y López, (2018).

Los valores de Índice de Potencial de Agua Subterránea obtenidos para la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque son utilizados para realizar la delimitación de las distintas zonas potenciales de acumulación de agua subterránea dentro de la cuenca en cuestión.

El Plano 10 (ver Anexos), muestra las zonas con diferente potencial de acumulación de agua subterránea en la cuenca en función del rango de valores obtenidos en el cálculo del Índice de Potencial de Agua Subterránea (GWPI).

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis y Discusión

4.1.1. Generación de la Base de Datos Geoespaciales

La recopilación de la información geoespacial fue diseñada de tal manera que abarque a las variables de drenajes, lineamientos estructurales, litología, pendiente del terreno, precipitación e índice de vegetación.

A partir de la recopilación de los datos e información geoespaciales se elaboró una base de datos en un entorno SIG, específicamente dentro de la interfaz del software ArcGIS v10.8. La Tabla 32 muestra el resumen de la información geoespacial recopilada y utilizada en la generación de la base de datos, así como la fuente de obtención.

Tabla 32. Información geoespacial recopilada y fuente de origen.

Datos e información geoespaciales	Formato	Obtenido de
Mapas geológicos integrados 1:100 000	Vectorial	Geocatmin, INGEMMET
Imágenes satelitales Landsat 8	Ráster	EarthExplorer
MDE ASTER GDEM V3	Ráster	
Ortofoto ECW	Ráster	SASPlanet
Red hidrográfica regional	Vectorial	Geocatmin, GEOGPS Perú
Distribución espacial de estaciones pluviométricas	Vectorial	INGEMMET, ANA
Datos de precipitación media anual	Texto	

4.1.2. Procesamiento de la Información Geoespacial

Una vez recopilados los datos e información geoespacial y construida la base de datos en un entorno SIG, procedemos al procesamiento de esta. El procesamiento de la información geoespacial quiere decir que se aplicarán distintas herramientas u operaciones para el tratamiento de los datos e información geoespaciales, esto con el objetivo de producir nueva información geoespacial acorde a las variables de la investigación.

La Tabla 33 muestra el resumen del procesamiento, es decir, de las herramientas utilizadas del software ArcGIS v10.8, aplicadas a la información geoespacial recopilada, en donde, por cada una de las variables de la investigación se obtiene un resultado final.

Tabla 33. Procesamiento aplicado a la información geoespacial recopilada.

Variable	Información geoespacial	Procesos	Herramientas utilizadas	Resultado
Drenajes	- Red hidrográfica nacional	Densidad de lineamientos	Line density	Densidad de drenajes
	- Ortofoto ECW	Reclasificación	Reclassify	
Lineamientos estructurales	- Mapas geológicos integrados 1:100 000	Densidad de lineamientos	Line density	Densidad de lineamientos estructurales
	- MDE ASTER GDEM V3	Reclasificación	Reclassify	
Litología	- Mapas geológicos integrados 1:100 000	Reclasificación	Reclassify	Asociaciones litológicas por permeabilidad
	- MDE ASTER GDEM V3	Unión de MDE	Mosaic to new raster	
Pendiente del terreno		Pendiente del terreno	Slope	Pendiente del terreno
		Reclasificación	Reclassify	
Precipitación	- Distribución espacial de estaciones pluviométricas	Interpolación	Kriging	Isoyetas, precipitación media
	- Datos de precipitación media anual	Reclasificación	Reclassify	

Tabla 33. Procesamiento aplicado a la información geoespacial recopilada.

Variable	Información geoespacial	Proceso	Herramientas utilizadas	Resultado
Índice de vegetación	- Imágenes satelitales Landsat 8	Unión de imágenes satelitales	Mosaic to new raster	NDVI
		Corrección atmosférica y radiométrica	Geobias Landsat 8	
		Cálculo de NDVI	Raster calculator	
		Reclasificación	Reclassify	

Los resultados del procesamiento de la información geoespacial recopilada y utilizada para cada una de las variables de la investigación son plasmados en los Planos 04, 05, 06, 07, 08 y 09 (ver Anexos).

Cada una de las variables abordadas contiene subdivisiones o subcriterios, por lo que es importante conocer cuánto es su porcentaje de área relativo abarcado en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, teniendo en consideración que el área total aproximada de la cuenca es de 3 956.4 Km².

A continuación, se muestra el área relativa de cada uno de los subcriterios para cada una de las variables de la investigación, ordenadas de una forma descendente según su prioridad.

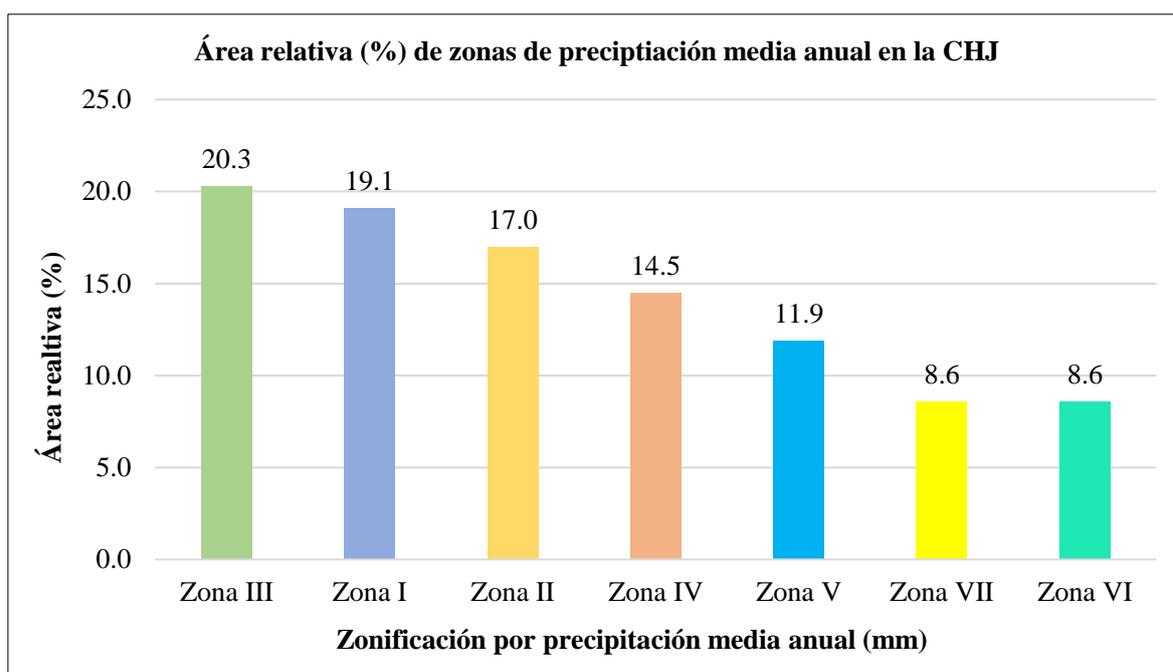
La Tabla 34 muestra la zonificación para la variable precipitación, así como sus áreas relativas expresadas en Km².

Por su parte, el Gráfico 15 muestra las áreas relativas para la zonificación de los valores de precipitación media anual, expresados en porcentajes, que están distribuidos en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

Tabla 34. Áreas relativas para la variable precipitación.

	Zona	Área en Km²	Área en %
Zona I	0 a 200 mm	756.1	19.1
Zona II	200 a 400 mm	674.5	17.0
Zona III	400 a 600 mm	801.2	20.3
Zona IV	600 a 800 mm	574.3	14.5
Zona V	800 a 1000 mm	470.8	11.9
Zona VI	1000 a 1200 mm	338.4	8.6
Zona VII	> 1200 mm	341.1	8.6

Gráfico 15. Áreas relativas en porcentaje para las zonas de precipitación.

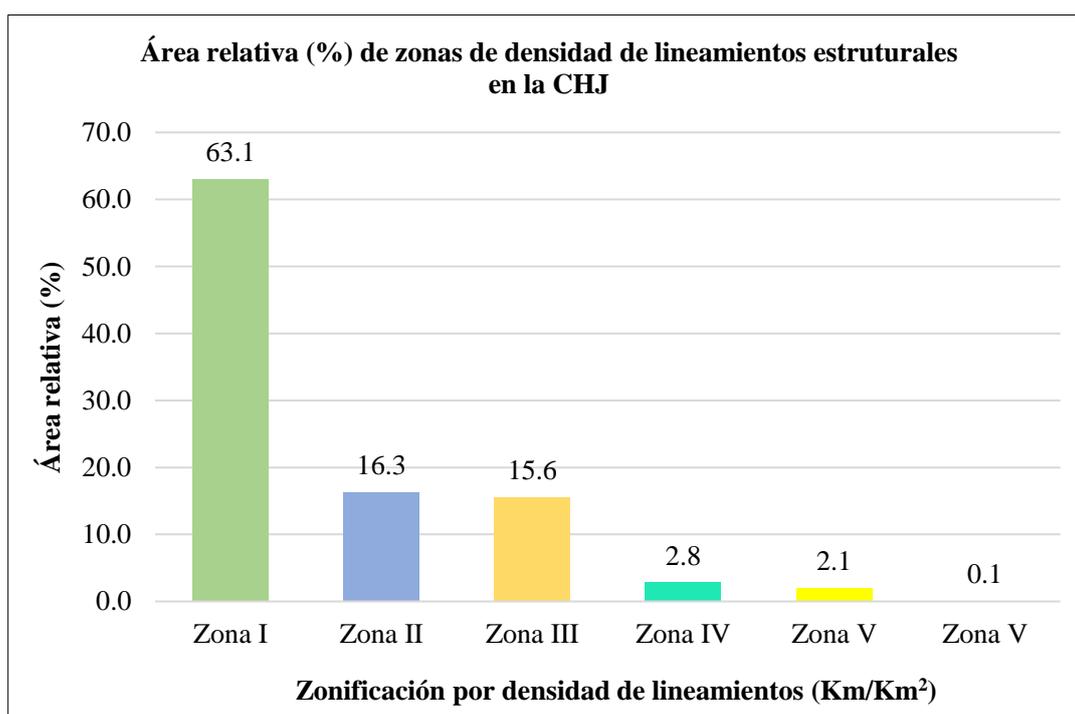


La Tabla 35 muestra la zonificación para la variable lineamientos estructurales, así como sus áreas relativas expresadas en Km². Por su parte, el Gráfico 16 muestra las áreas relativas para la zonificación de los valores de densidad de lineamientos estructurales, expresados en porcentajes, que están distribuidos en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

Tabla 35. Áreas relativas para la variable lineamientos estructurales.

Zona	Área en Km ²	Área en %
Zona I	0.0 a 0.25 Km/Km ²	2496.7
Zona II	0.25 a 0.50 Km/Km ²	645.1
Zona III	0.50 a 0.75 Km/Km ²	616.1
Zona IV	0.75 a 1.00 Km/Km ²	112.6
Zona V	1.00 a 1.50 Km/Km ²	82.4
Zona VI	> 1.50 Km/Km ²	3.5

Gráfico 16. Áreas relativas en porcentaje para las zonas de densidad de lineamientos estructurales.

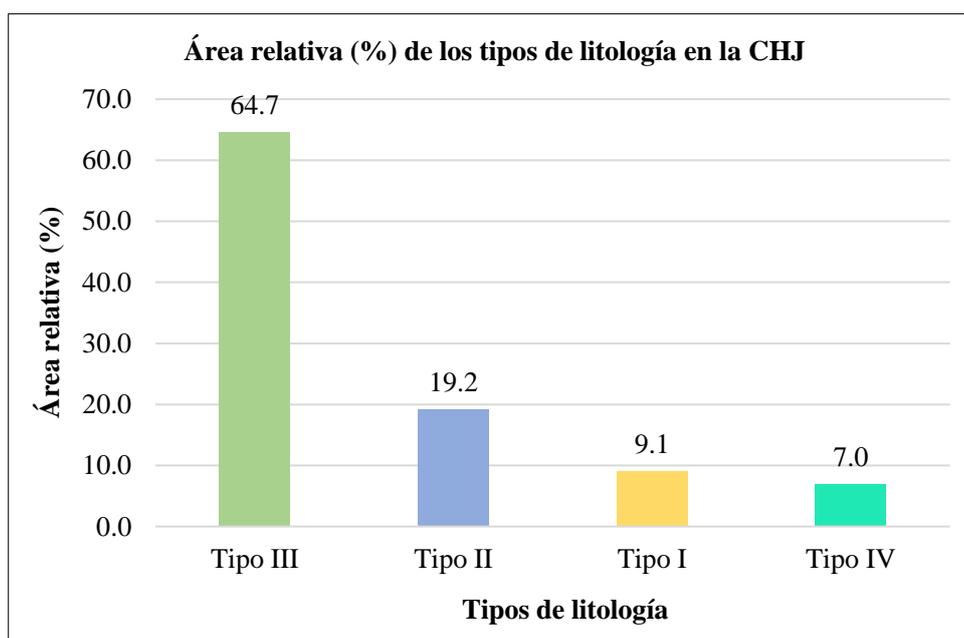


La Tabla 36 muestra los tipos de litología para la variable litología, así como sus áreas relativas expresadas en Km². Por su parte, el Gráfico 17 muestra las áreas relativas para los tipos de litología, expresados en porcentajes, que están distribuidos en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

Tabla 36. Áreas relativas para la variable litología.

	Tipo de litología	Área en Km²	Área en %
Tipo I	Depósitos aluviales, fluviales, fluvio-glaciares, eólicos	359.9	9.1
Tipo II	Formaciones Chimú, Santa, Carhuaz, Pariatambo, Cajamarca, Huambos	759.4	19.2
Tipo III	Formaciones Farrat, Inca, Chúlec, Yumagual, Grupo Quilquiñán-Mujarrún, Grupo Calipuy	2558.3	64.7
Tipo IV	Rocas ígneas intrusivas: diorita, tonalita, granodiorita, monzonita	278.8	7.0

Gráfico 17. Áreas relativas en porcentaje para los tipos de litología según su permeabilidad.

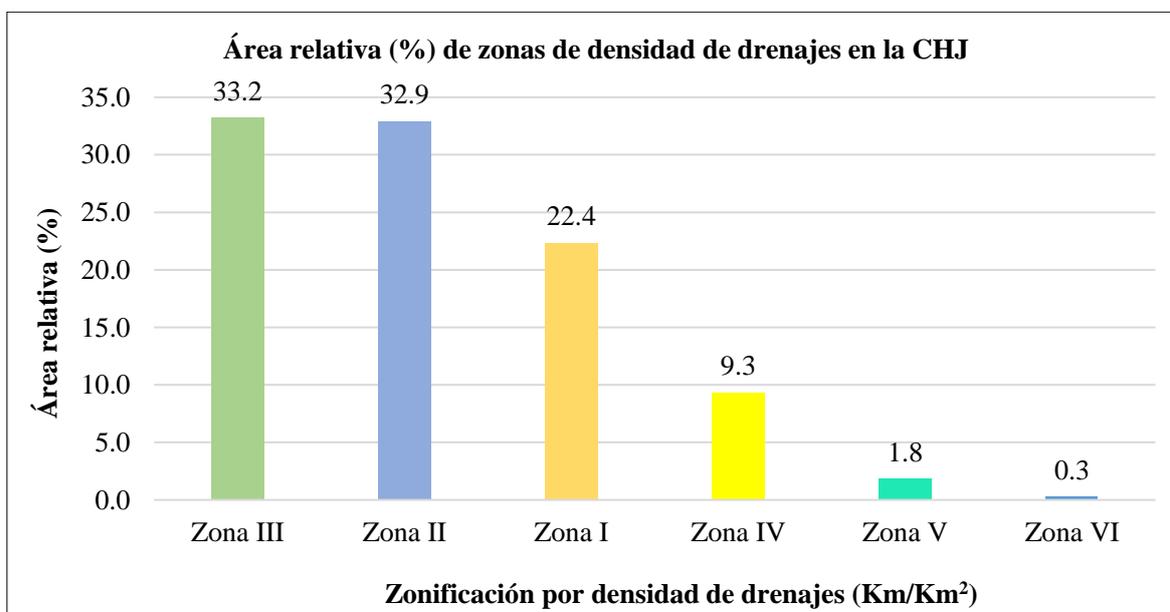


La Tabla 37 muestra la zonificación para la variable drenajes, así como sus áreas relativas expresadas en Km². Por su parte, el Gráfico 18 muestra las áreas relativas para la zonificación de los valores de densidad de drenajes, expresados en porcentajes, que están distribuidos en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

Tabla 37. Áreas relativas para la variable drenajes.

	Zona	Área en Km ²	Área en %
Zona I	0.0 a 0.5 Km/Km ²	884.5	22.4
Zona II	0.5 a 1.0 Km/Km ²	1303.1	32.9
Zona III	1.0 a 2.0 Km/Km ²	1314.5	33.2
Zona IV	2.0 a 3.0 Km/Km ²	369.8	9.3
Zona V	3.0 a 4.0 Km/Km ²	73.1	1.8
Zona VI	> 4.0 Km/Km ²	11.4	0.3

Gráfico 18. Áreas relativas en porcentaje para las zonas de densidad de drenajes.

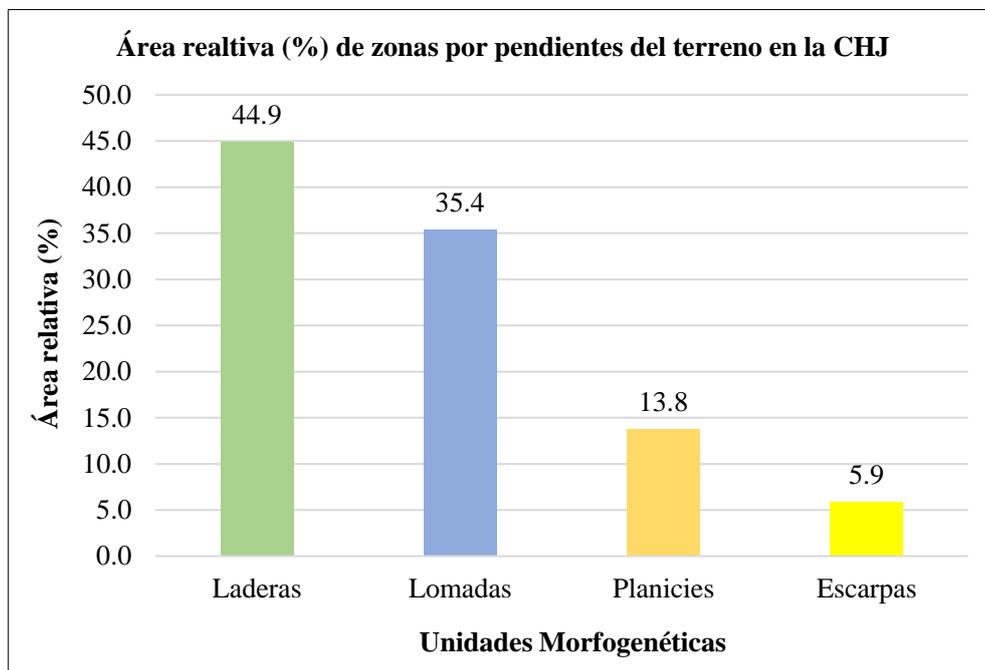


La Tabla 38 muestra la zonificación para la variable pendiente del terreno, así como sus áreas relativas expresadas en Km². Por su parte, el Gráfico 19 muestra las áreas relativas para la zonificación de los valores de las pendientes del terreno, expresados en porcentajes, que están distribuidos en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

Tabla 38. Áreas relativas para la variable pendiente del terreno.

Unidad morfológica	Pendiente	Área en Km ²	Área en %
Planicies	0° a 8°	544.8	13.8
Lomadas	8° a 20°	1400.1	35.4
Laderas	20° a 50°	1776.7	44.9
Escarpas	> 50°	234.8	5.9

Gráfico 19. Áreas relativas en porcentaje para las unidades morfológicas.

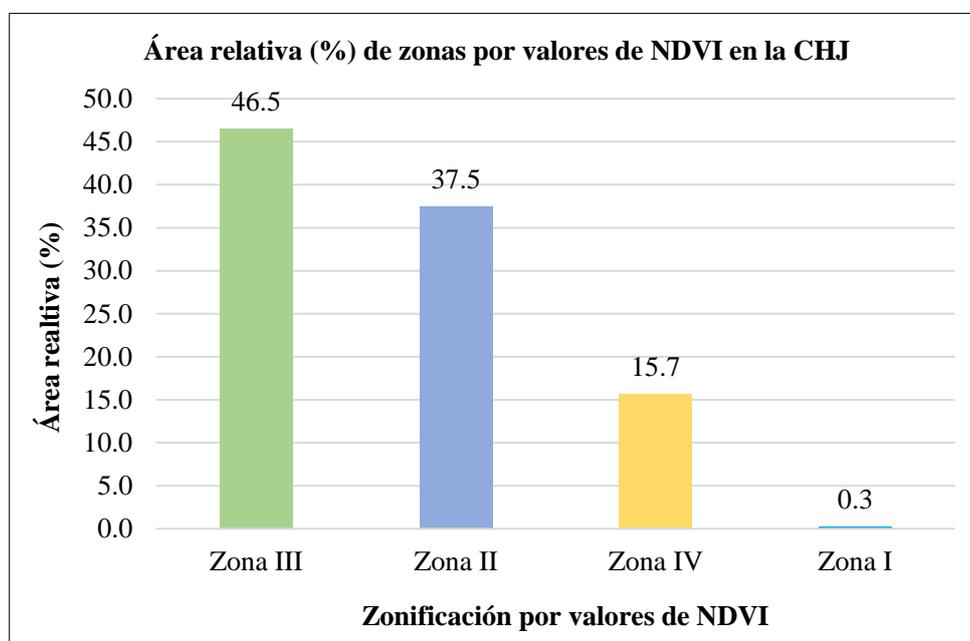


La Tabla 39 muestra la zonificación para la variable índice de vegetación, así como sus áreas relativas expresadas en Km². Por su parte, el Gráfico 20 muestra las áreas relativas para la zonificación de los valores de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), expresados en porcentajes, que están distribuidos en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

Tabla 39. Áreas relativas para la variable índice de vegetación.

Zona	Área en Km ²	Área en %
Zona I -1 a -0.07	10.1	0.3
Zona II -0.07 a 0.15	1484.2	37.5
Zona III 0.15 a 0.33	1841.3	46.5
Zona IV > 0.33	620.8	15.7

Gráfico 20. Áreas relativas en porcentaje para las zonas por valores del Índice de Vegetación.



4.1.3. Aplicación de la Metodología de Procesos de Análisis Jerárquico

La aplicación de la metodología de Procesos de Análisis Jerárquicos (AHP) a la información procesada inicia con la construcción de la jerarquía principal (Figura 19). La jerarquía construida nos permite identificar de una manera rápida el foco u objetivo principal y los criterios o variables involucradas. Así, el objetivo principal en la jerarquía es la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, en donde, para llegar a dicho objetivo principal intervendrán las variables o

criterios principales, como son drenajes, lineamientos estructurales, litología, pendiente del terreno, precipitación e índice de vegetación.

Establecida la jerarquía principal se procede al establecimiento de prioridades u obtención de los pesos normalizados, esto es, realizar comparaciones pareadas en una Matriz Recíproca de Comparaciones Pareadas (MRCP), para determinar la prioridad o predominancia de cada uno de los criterios sobre los demás al momento de realizar la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea; esto también aplicará para los subcriterios establecidos en su criterio correspondiente.

De esta manera, y basándonos en la literatura consultada, en primer lugar, se establecen las prioridades o pesos normalizados de los seis criterios o variables principales y, seguidamente se establecen también las prioridades para los subcriterios de cada una de las seis variables principales, como puede observarse de forma resumida en la Tabla 30 (página 81).

El paso final en la metodología AHP es la medida de la consistencia, o inconsistencia, a través de la Relación de Consistencia (RC), de los juicios o valoraciones emitidas para completar cada una de las MRCP y por consiguiente de los pesos normalizados para cada uno de los criterios o subcriterios considerados. Como se observa en la Tabla 29 (página 80), la medida de la consistencia lógica, tanto para los criterios y subcriterios, se encuentran dentro de los valores recomendados por la literatura consultada para ser considerados como consistentemente lógicos, esto es, los valores de RC para criterios y subcriterios se encuentran por debajo de 0.1, o 10%, por lo que tanto los juicios o valoraciones emitidas como los pesos normalizados son considerados consistentes.

4.1.4. Cálculo del Índice de Potencial de Agua Subterránea

El Índice de Potencial de Agua Subterránea (GWPI) es calculado mediante una combinación lineal ponderada; método que es ejecutado en la herramienta Raster Calculator, en el software ArcGIS v10.8; y que involucra a las seis capas temáticas, en formato ráster, de cada una de las seis variables o criterios principales. En orden descendente de prioridad, los seis criterios principales son: precipitación, litología, lineamientos estructurales, drenajes, pendiente del terreno e índice de vegetación.

Para el cálculo de los valores del GWPI se utiliza las prioridades o pesos normalizados de las seis variables o criterios principales, así como de los subcriterios de cada una (Tabla 30), obtenidos como resultado de aplicar la metodología AHP.

Una vez realizada la combinación lineal ponderada y, por tanto, calculados los valores del GWPI; estos varían entre 0.0455 a 0.4098. Estos valores obtenidos serán especialmente útiles para realizar la delimitación de las zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

4.1.5. Delimitación de Zonas Potenciales de Acumulación de Agua Subterránea

Obtenidos el rango de valores para el Índice de Potencial de Agua Subterránea (GWPI); estos últimos son clasificados en cuatro grupos según su potencial de agua subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

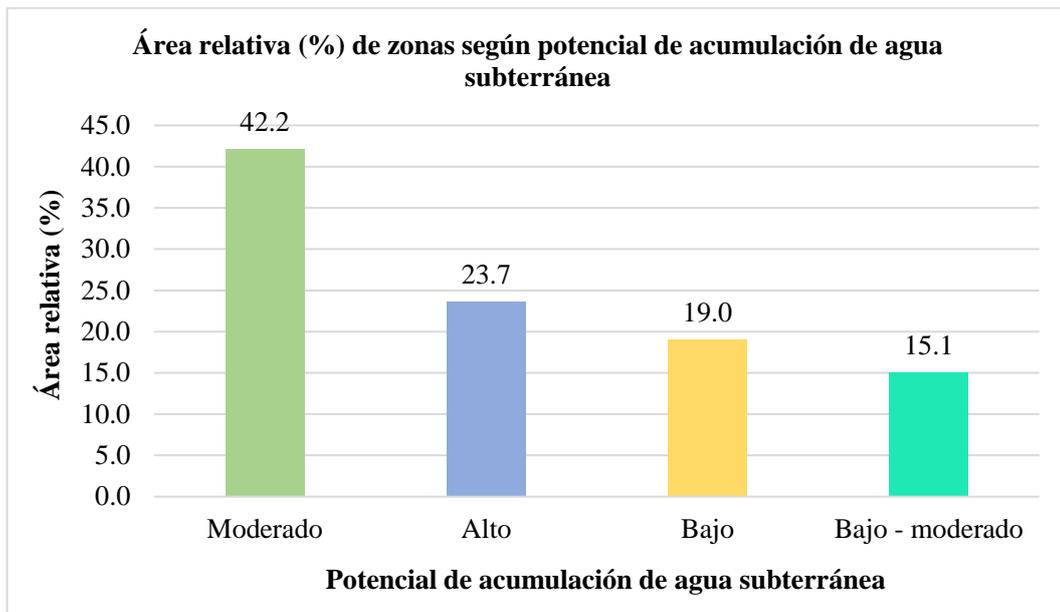
La Tabla 40 muestra los cuatro grupos definidos según los intervalos de valores obtenidos para el Índice de Potencial de Agua Subterránea (GWPI) y la potencial de agua subterránea asociado a cada uno de ellos, así como el área relativa que abarca cada grupo en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, expresados tanto en Km² y porcentaje. Por su parte, el Gráfico 21 muestra el gráfico de barras en donde observamos la distribución porcentual del área relativa que abarca cada grupo en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

Tabla 40. Áreas relativas de acuerdo al potencial de agua subterránea.

Valores de GWPI	Potencial	Área en Km²	Área en %
0.0455 a 0.0955	Bajo	753.4	19.1
0.0955 a 0.1269	Bajo-moderado	596.9	15.1
0.1269 a 0.1698	Moderado	1669.2	42.2
0.1698 a 0.4098	Alto	936.9	23.6

El Plano 10 (ver Anexos), plasma la delimitación de las diferentes zonas potenciales de acumulación de agua subterránea para la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

Gráfico 21. Áreas relativas en porcentaje de acuerdo al potencial de agua subterránea.



Finalmente, delimitadas las zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, mediante la superposición geoespacial de un total de 416 pozos de agua inventariados por ANA (2015), ubicados en la parte baja de la cuenca, es decir, en la parte inferior suroeste; y las zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en esta zona presentes en esta parte de la cuenca; obtenemos que un total de 371 pozos de agua (89.2%) se ubican dentro de la zona identificada como alto potencial de acumulación de agua subterránea, zona que coincide con el denominado Acuífero Poroso No Consolidado (Peña y Vargas, 2006; Peña et al., 2015). Los 45 pozos de agua restantes (10.8%) se ubican en las zonas denominadas como moderado, bajo-moderado y bajo potencial de acumulación de agua subterránea. El Plano 11 (ver Anexos) muestra la distribución de los pozos de agua inventariados y su ubicación en las distintas zonas potenciales de acumulación de agua subterránea.

4.2. Contrastación de la Hipótesis

Se planteó la hipótesis explicativa: Las variables drenajes, lineamientos estructurales, litología, pendiente del terreno, precipitación e índice de vegetación; influirán en la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque de acuerdo a la valoración dada a cada una de ellas en el análisis jerárquico según sea su aporte o influencia en la acumulación del recurso hídrico subterráneo.

Las seis variables involucradas en la delimitación de las zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, al compararse en una Matriz Recíproca de Comparaciones Pareadas según su aporte o importancia en la delimitación de las potenciales zonas de acumulación de agua subterránea, obtienen las siguientes prioridades: Precipitación 38.3%, litología 29.7%, lineamientos estructurales 16.7%, drenajes 7.9%, pendiente del terreno 4.7%, índice de vegetación 2.6%; estos valores de prioridad tienen una influencia directa en el resultado final, que es la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque. Por tanto, se corrobora y confirma la hipótesis planteada para la investigación.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se identificó que las zonas consideradas de alto y moderado potencial se encuentran principalmente en la parte baja (Suroeste) y alta (Este) de la cuenca, así como en la parte alta (noreste) de la cuenca, respectivamente; siendo las más favorables para la prospección de aguas subterráneas.

La generación de la base de datos geospaciales permitió realizar el modelamiento geoespacial para la delimitación de zonas potenciales de acumulación de agua subterránea en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.

El procesamiento en un entorno SIG de la información geoespacial contenida en la base de datos permitió la elaboración de las seis capas temáticas en formato ráster de las variables precipitación, litología, lineamientos estructurales, drenajes, pendiente del terreno e índice de vegetación.

La aplicación de la metodología de Procesos de Análisis Jerárquico permitió corroborar que las prioridades asignadas a cada una de las variables en función de su aporte o importancia en la acumulación de agua subterránea son válidas y consistentes, es decir, que son aplicables en la realidad objetiva.

Se calculó el Índice de Potencial de Agua Subterránea para la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque, el cual permitió definir los cuatro tipos de zonas con distintos potenciales de acumulación de agua subterránea: alto, moderado, bajo-moderado, bajo.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda a la Autoridad Administrativa del Agua Jequetepeque – Zarumilla; autoridad competente en cuanto a la gestión de los recursos hídricos subterráneos:

Realizar ensayos geofísicos en las distintas zonas potenciales de acumulación de agua subterránea, para determinar y caracterizar las profundidades del nivel freático.

Ejecutar sondeos verticales para determinar caudales que permitan definir el potencial de aprovechamiento de agua subterránea en las distintas zonas potenciales de acumulación de agua subterránea.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA (Autoridad Nacional del Agua). 2015. Inventario de pozos de agua (en línea). Perú. Consultado 11 ago. 2023. Disponible en <https://www.geogpsperu.com/2018/07/mapa-de-pozos-ana-descargar-shapefile.html>
- Arkoprovo, B.; Adarsa, J.; Prakash, SS. 2012. Delineation of groundwater potential zones using satellite remote sensing and geographic information system techniques: A case study from Ganjam District, Orissa, India. *Research Journal of Recent Sciences* 1(9): 59 – 66.
- Arulbalaji, P.; Padmalal, D.; Sreelash, K. 2019. GIS and AHP techniques based delineation of groundwater potential zones: A case study from Southern Western Ghats, India. *Scientific Reports* (9): 1 – 17.
- Bautista, J. 2019. Elementos de hidrología. s.l., s.e. 222 p.
- Bernabé, M.; López, C. 2012. Fundamentos de las infraestructuras de datos espaciales. Madrid, España, UPM Press. 596 p.
- Bravo, N. 2017. Teoría – Teledetección espacial Landsat, Sentinel-2, Aster L1T y Modis. Huánuco, Perú, Geomática Ambiental. 105 p.
- Caballero, A. 2014. Metodología integral innovadora para planes y tesis. México, Cengage Learning. 473 p.
- Chuvieco, E. 2008. Teledetección ambiental. 3 ed. España, Ariel. 595 p.
- Cusquisibán, 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. Tesis para optar título profesional. Cajamarca, Perú, Universidad Privada del Norte. 147 p.
- Dávila, J. 2011. Diccionario geológico. s.l., s.e. 900 p.
- Del Bosque, I.; Fernández, C.; Martín, L.; Pérez, E. 2012. Los sistemas de información geográfica y la investigación en ciencias humanas y sociales. Madrid, España, CSIC. 145 p.

- Del Río, J. 2010. Introducción al tratamiento de datos espaciales en hidrología. España, Bubok. 350 p.
- Díaz, S. 2018. Análisis multiespectral mediante imágenes satelitales para identificar zonas de recarga hídrica subterránea en la cuenca Jequetepeque. Tesis para optar título profesional. Cajamarca, Perú, Universidad Nacional de Cajamarca. 93 p.
- Escuder, R.; Fraile, J.; Jordana, S.; Ribera, F.; Sánchez, X.; Vásquez, E. 2009. Hidrogeología: conceptos básicos de hidrología subterránea. Barcelona, España, FCIHS. 768 p.
- Hernández, R.; Fernández, C.; Baptista, P. 2014. Metodología de la investigación. 6 ed. México, McGraw Hill. 600 p.
- Hernández, R.; Martínez, L.; Peñuela, L.; Rivera, S. 2020. Identificación de zonas potenciales de recarga y descarga de agua subterránea en la cuenca del río Ayuquila – Armería mediante el uso de SIG y el análisis multicriterio. Investigaciones Geográficas (101): 27 – 45.
- Kumar, S.; Machiwal, D.; Parmar, B. 2019. A parsimonious approach to delineating groundwater potential zones using geospatial modeling and multicriteria decision analysis techniques under limited data availability condition. Engineering Reports 1(5): 237 – 259.
- Lima, A. 2018. Modelamiento geoespacial para la caracterización física, socioeconómica y alternativas de aprovechamiento de la unidad hidrográfica Puyango Ecuador. Tesis de maestría. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 135 p.
- Macas, V.; López, K. 2018. Potencial para la exploración de aguas subterráneas en la demarcación hidrográfica Puyango Catamayo, Ecuador, utilizando un proceso de análisis jerárquico basado en SIG y teledetección. Revista de Teledetección (51): 135 – 145.
- Mancebo, S.; Ortega, E.; Valentín, A.; Martín, B.; Martín, L. 2008. Libro SIG: aprendiendo a manejar los SIG en la gestión ambiental. Madrid, España, s.e. 108 p.
- Martínez, P.; Martínez, A.; Castaño, A. 2006. Fundamentos de hidrogeología. Madrid, España, Ediciones Mundi-Prensa. 284 p.

- Meijerink, A.; Bannert, D.; Batelaan, O.; Lubczynski, M.; Pointet, T. 2007. Remote sensing applications to groundwater. Francia, UNESCO. 311 p.
- Mendoza, J.; Rojas, J. 2012. Exploración de aguas subterráneas en la región Lambayeque – Perú usando imágenes Landsat y Aster. Lima, Perú, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 8 p.
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego, Perú); ANA (Autoridad Nacional del Agua, Perú). 2015. Evaluación de recursos hídricos en la cuenca del río Jequetepeque – Aguas superficiales. Perú. 251 p.
- Muñoz, P. 2013. Apuntes de teledetección: índices de vegetación. s.l., CIREN. 15 p.
- Muralitharan, J.; Palanivel, K. 2015. Groundwater targeting using remote sensing, geographical information system and analytical hierarchy process method in hard rock aquifer system, Karur district, Tamil Nadu, India. *Earth Science Informatics* 8(4): 827 – 842.
- Olaya, V. 2020. Sistemas de información geográfica. 3 ed. s.l., s.e. 620 p.
- Pacheco, J.; Contreras, E. 2008. Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos. Santiago de Chile, Chile. ILPES, CEPAL. 111 p. (Serie Manuales N° 58).
- Peña, F.; Vargas, V. 2006. Mapa hidrogeológico de la cuenca del Río Jequetepeque: Regiones Cajamarca y La Libertad. Lima, Perú, INGEMMET. XIII Congreso Peruano de Geología: 467 – 470.
- Peña, F.; Carpio, J.; Vargas, V. 2015. Hidrogeología de la cuenca de los ríos Jequetepeque (13774) y Chamán (137752) – Regiones Cajamarca, La Libertad y Lambayeque. Lima, Perú, INGEMMET. 296 p. (Boletín Serie H: Hidrogeología, N° 4).
- Pinto, D.; Shrestha, S.; Babel, M.; Ninsawat, S. 2015. Delineation of groundwater potential zones in the Comoro watershed, Timor Leste using GIS, remote sensing and analytic hierarchy process (AHP) technique. *Applied Water Science* (7): 503 – 519.
- Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2011. Glosario de términos geológicos. s.l., s.e. 283 p.

- Reyes, L. 1980. Geología de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba – Hojas 15-f, 15-g y 16-g. Lima, Perú, INGEMMET. 76 p. (Boletín Serie A: Carta geológica nacional, N° 31).
- Rodríguez, S. 2016. Método de investigación geológico-geotécnico para el análisis de inestabilidad de laderas por deslizamientos zona Ronquillo-Corisorgona. Tesis de maestría. Lima, Perú, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 134 p.
- Rojas, P. 2016. Vulnerabilidad biofísica y socioeconómica mediante modelamiento geoespacial de la unidad hidrográfica Chancay – Huaral. Tesis para optar título profesional. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 103 p.
- Saaty, T. 1980. The Analytic Hierarchy Process. Nueva York, Estados Unidos, McGraw-Hill. s.p.
- Saaty, T. 1997. Toma de decisiones para líderes: El proceso analítico jerárquico, la toma de decisiones en un mundo complejo. Universidad de Pittsburg, Estados Unidos, RWS Publicaciones. 324 p.
- Sahoo, S.; Jha, M.; Kumar, N.; Chowdary, V. 2015. Evaluation of GIS-based multicriteria decisión analysis and probabilistic modeling for exploring groundwater prospects. *Environmental Earth Sciences* (74): 2223 – 2246.
- Sánchez, L. 2017. Identificación de zonas con potencial de recarga hídrica en la intersección sureste del acuífero Sierra de San Andrés y Sotepan-Hueyapan. Tesis. México. Universidad Veracruzana. 75 p.
- Sarría, F. 2006. Sistemas de información geográfica. Murcia, España, Universidad de Murcia. 239 p.
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, Perú). 2015. Datos históricos de precipitación. Consultado 26 feb. 2024. Disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe/site/descarga-datos/>
- Tejada, J. 2019. Caracterización de lineamientos estructurales aplicando imágenes de satélite Landsat TM y su significado tectónico en la franja suroccidental de la zona Moquegua-Tacna. Tesis de maestría. Arequipa, Perú. Universidad Nacional San Agustín. 118 p.

- Vásquez, A.; Mejía, A.; Faustino, J.; Terán, R.; Vásquez, I.; Díaz, J.; Vásquez, C.; Castro, A.; Tapia, M.; Alcántara, J. 2016. Manejo y gestión de cuencas hidrográficas. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 646 p.
- Villafani, J. 2017. Modelamiento geoespacial para caracterización físico, biótico y socioeconómico de la cuenca alta del río Santa – Ancash. Tesis de maestría. Lima, Perú, Universidad Nacional Agraria La Molina. 186 p.
- Villodas, R. 2008. Hidrología. Mendoza, Argentina, UNC. 239 p.
- Villón, M. 2004. Hidrología. Cartago, Costa Rica, Editorial Tecnológica. 430 p.
- Wilson, J. 1984. Geología de los cuadrángulos de Jayanca (13-d), Incahuasi (13-e), Cutervo (13-f), Chiclayo (14-d), Chongoyape (14-e), Chota (14-f), Celendín (14-g), Pacasmayo (15-d), Chepén (15-e). Lima, Perú, INGEMMET. 114 p. (Boletín Serie A: Carta geológica nacional, N° 38).

ANEXOS

1. Lista de planos

- Plano 01. Ubicación geográfica de la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.
- Plano 02. Ubicación política de la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.
- Plano 03. Geología de la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.
- Plano 04. Asociaciones litológicas según su permeabilidad.
- Plano 05. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.
- Plano 06. Densidad de lineamientos estructurales.
- Plano 07. Isoyetas en la Cuenca Hidrográfica del Jequetepeque.
- Plano 08. Unidades Morfogenéticas.
- Plano 09. Densidad de drenajes.
- Plano 10. Zonas potenciales de acumulación de agua subterránea.
- Plano 11. Inventario de pozos de agua según ANA (2015).