

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**TESIS:**

**Gestión optimizada de recarga de acuíferos para mejorar la  
disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Cachi,  
Ayacucho - 2024**

Para optar el título profesional de:

**INGENIERO AGRÍCOLA**

PRESENTADO POR:

**Bach. Viktor Galileo GIL SOSA**

ASESOR:

**MSc. Eleazar CHUCHÓN ANGULO**

**AYACUCHO - PERÚ**

**2024**

## DEDICATORIA

A mis padres, Víctor y Lurgia, les agradezco por su amor, esfuerzo y sacrificio a lo largo de los años. Gracias a ustedes he podido llegar hasta aquí y convertirme en quien soy. Siempre estaré agradecido por sus consejos y enseñanzas de vida.

## AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, mi alma mater, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente en sus aulas.

A la Facultad de Ciencias Agrarias y a mi estimada Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, por acogerme durante mi proceso de formación.

A mi asesor de tesis, el MSc. Eleazar Chuchón Angulo, por su valiosa orientación y apoyo académico que me permitieron llevar a cabo este trabajo.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, quienes jugaron un papel fundamental en mi desarrollo profesional y personal, motivándome a seguir adelante.

## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	I
AGRADECIMIENTO .....	II
ÍNDICE DE TABLAS .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE ANEXOS .....	XVII
ACRÓNIMOS.....	XVIII
RESUMEN .....	19
INTRODUCCCIÓN .....	20
1. CAPÍTULO I MARCO TEORICO .....	23
1.1. ANTECEDENTES .....	23
1.2. DISPONIBILIDAD HÍDRICA.....	23
1.3. ESCASEZ HÍDRICA.....	24
1.4. AGUA SUBTERRÁNEA.....	25
1.5. EL AGUA SUBTERRÁNEA EN PERÚ .....	25
1.6. ACUÍFERO.....	28
1.6.1. Tipos de Acuíferos.....	29
1.6.2. Parámetros Hidrogeológicos.....	30
1.7. MANEJO/GESTION DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS.....	36
1.7.1. Ventajas respecto al almacenamiento superficial .....	39
1.7.2. Viabilidad de un proyecto de recarga artificial.....	40
1.7.3. Origen del agua de recarga .....	41
1.7.4. Características del acuífero receptor.....	42
1.7.5. Otros aspectos relacionados con la recarga artificial de acuíferos .....	43
1.7.6. Métodos de recarga.....	45
1.7.6.1. Dispersión.....	49

1.7.6.2.	Pozos .....	60
1.7.6.3.	Modificación del cauce de arroyos y ríos.....	66
1.7.6.4.	Filtración .....	73
1.7.6.5.	Captación de agua de lluvia .....	76
1.8.	CUENCA DEL RIO CACHI.....	81
1.8.1.	Cuenca.....	81
1.8.2.	Descripción .....	81
1.8.3.	Hidrografía.....	84
1.8.4.	Balance hídrico .....	84
1.8.5.	Calidad de las fuentes de agua en la cuenca Cachi .....	86
2.	CAPÍTULO II METODOLOGÍA.....	88
2.1.	UBICACIÓN DEL ESTUDIO .....	88
2.1.1.	Ubicación geográfica .....	88
2.2.	MATERIALES Y EQUIPOS .....	88
2.3.	PROBLEMAS ESPECÍFICOS.....	89
2.3.1.	Distribución de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Cachi y áreas más afectadas durante los periodos de estiaje. ....	89
2.3.1.1.	Balance hidrológico.....	89
2.3.2.	Oportunidades y desafíos asociados con la implementación de técnicas de recarga artificial en la cuenca del río Cachi.....	112
2.3.2.1.	Disponibilidad del recurso hídrico .....	112
2.3.2.2.	Calidad de las fuentes de agua .....	112
2.3.2.3.	Uso actual de suelos y densidad poblacional .....	115
2.3.2.4.	Demanda futura del recurso hídrico .....	118
2.3.2.5.	Información y data sobre los acuíferos existentes.....	120
2.3.2.5.1.	Fallas en la cuenca:.....	122

2.3.2.5.2.	Formaciones geológicas: .....	123
2.3.2.5.3.	Hidrogeología: .....	125
2.3.2.5.4.	Geomorfología:.....	126
2.3.2.6.	Pendiente topográfica en la cuenca .....	127
2.3.2.7.	Nivel de conocimiento y tecnología.....	128
2.3.2.8.	Objetivo del MAR.....	131
2.3.2.9.	Costo del agua recargada.....	131
2.3.2.10.	Desempeño de las estructuras de recarga .....	133
2.3.3.	Mapeo de idoneidad para los métodos de Recarga Gestionada de Acuíferos (MAR) en función de atributos y condiciones específicas en la cuenca del río Cachi.....	136
2.3.3.1.	Asignación de peso.....	137
2.3.3.2.	Puntuación.....	138
2.3.3.3.	Indicadores MAR.....	138
2.3.3.4.	Análisis de sensibilidad.....	164
3.	CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	165
3.1.	Análisis de la disponibilidad hídrica espacial y temporal en la cuenca del río Cachi, considerando sus particularidades en cantidad y calidad, durante el año 2024 .....	165
3.1.1.	Distribución de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Cachi y áreas más afectadas durante los periodos de estiaje .....	165
3.2.	Identificación y evaluación de las metodologías de recarga artificial de acuíferos, analizando su viabilidad técnica, económica y ambiental en la selección de ubicaciones óptimas de recarga artificial, basándose en análisis de datos de geología, hidrogeología, clima, teledetección y uso del suelo, en la cuenca Cachi durante el año 2024.....	177
3.2.1.	Oportunidades y desafíos asociados con la implementación de técnicas de recarga artificial en la cuenca del río Cachi.....	177

3.3. Mapeo de la idoneidad, identificando y evaluando las diferentes metodologías de recarga de acuíferos en la cuenca Cachi, considerando factores físicos, hidrológicos, ecológicos y sociales, durante el año 2024 .....	181
3.3.1. Distribución de puntuaciones y pesos. ....	181
3.3.2. Disponibilidad de agua .....	192
3.3.2.1. Escorrentía acumulada (Modelamiento hidrológico).....	192
3.3.3. Análisis de idoneidad del sitio MAR.....	204
3.3.3.1. Análisis de Necesidad de MAR. ....	205
3.3.3.2. Idoneidad MAR al análisis de Disponibilidad de agua.....	211
3.3.3.3. Idoneidad MAR a la recargabilidad intrínseca del acuífero. ....	215
3.3.3.4. Idoneidad MAR al índice del atractivo económico .....	219
3.3.3.5. Idoneidad general del sitio MAR.....	223
3.3.3.6. Análisis de sensibilidad.....	232
CONCLUSIONES .....	236
RECOMENDACIONES.....	237
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	238
ANEXOS .....	250

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1:</b> Estimación de la distribución global de agua. ....	23
<b>Tabla 1.2:</b> Disponibilidad de la masa anual de recursos hídricos en el Perú, según vertiente hidrográfica. ....	24
<b>Tabla 1.3:</b> Principales rocas reservorios de aguas subterráneas en el Perú.....	26
<b>Tabla 1.4:</b> Valores de la permeabilidad. ....	30
<b>Tabla 1.5:</b> Valores de la transmisividad.....	31
<b>Tabla 1.6:</b> Valores de la porosidad .....	31
<b>Tabla 1.7:</b> Valores del coeficiente de almacenamiento .....	35
<b>Tabla 1.8:</b> Clasificación de técnicas MAR .....	45
<b>Tabla 1.9:</b> Comparativa entre los diferentes métodos de recarga artificial .....	48
<b>Tabla 1.10:</b> Descripción de la técnica MAR - Cuencas y estanques de infiltración.....	50
<b>Tabla 1.11:</b> Descripción de la técnica MAR - Cuencas y estanques de infiltración.....	52
<b>Tabla 1.12:</b> Descripción de la técnica MAR - Tratamiento de Suelo-Acuífero (TSA) .....	55
<b>Tabla 1.13:</b> Descripción de la técnica MAR - Zanjas y surcos (amunas).....	57
<b>Tabla 1.14:</b> Descripción de la técnica MAR – Riego .....	59
<b>Tabla 1.15:</b> Descripción de la técnica MAR - Pozos de recarga someros .....	61
<b>Tabla 1.16:</b> Descripción de la técnica MAR - Almacenamiento y recuperación de acuíferos (ASR).....	63
<b>Tabla 1.17:</b> Descripción de la técnica MAR - Almacenamiento, transferencia y recuperación de acuíferos (ASTR).....	65
<b>Tabla 1.18:</b> Descripción de la técnica MAR - Estanques de percolación asociados a represas de control, gaviones. ....	67
<b>Tabla 1.19:</b> Descripción de la técnica MAR - Presas de arena para almacenamiento.....	69
<b>Tabla 1.20:</b> Descripción de la técnica MAR - Presas subsuperficiales (subterráneas).....	71
<b>Tabla 1.21:</b> Descripción de la técnica MAR - Técnicas de ampliación de los cauces.....	72
<b>Tabla 1.22:</b> Descripción de la técnica MAR Filtro de bancos de río (RBF).....	74
<b>Tabla 1.23:</b> Descripción de la técnica MAR Filtración Inter-dunar. ....	76
<b>Tabla 1.24:</b> Descripción de la técnica MAR Barreras y diques.....	77
<b>Tabla 1.25:</b> Descripción de la técnica MAR Zanjas de infiltración.....	79
<b>Tabla 1.26:</b> Descripción de la técnica MAR Recolección de agua de lluvia en los tejados. ....	80

<b>Tabla 2.1:</b> Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio .....	91
<b>Tabla 2.2:</b> Precipitaciones medias mensuales.....	93
<b>Tabla 2.3:</b> Data obtenida de la ANA Mantaro en relación a las licencias de agua otorgadas. ....	96
<b>Tabla 2.4:</b> Puntaje en relación a la disponibilidad hídrica de la oferta - demanda. ....	101
<b>Tabla 2.5:</b> Puntuaciones y umbrales para la capacidad de recarga del acuífero subyacente mínima (CRA) .....	102
<b>Tabla 2.6:</b> Clasificación de la capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA) y asignación de puntajes. ....	107
<b>Tabla 2.7:</b> Clasificación en relación a la disponibilidad hídrica viable resultado del balance de oferta – demanda y capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA).....	109
<b>Tabla 2.8:</b> Área y porcentaje de la Figura 2.16, según la clasificación de disponibilidad hídrica balance oferta - demanda. ....	112
<b>Tabla 2.9:</b> Área y porcentaje de la Figura 2.28, según la clasificación de disponibilidad hídrica viable.....	112
<b>Tabla 2.10:</b> Puntos de monitoreo de la calidad de recursos hídricos en la cuenca. ....	113
<b>Tabla 2.11:</b> Contaminantes que superan el límite de la cat. 3 del ECA, para los distintos monitoreos en la cuenca.....	114
<b>Tabla 2.12:</b> Área y porcentaje de la Figura 2.29, según la clasificación de calidad de agua.....	115
<b>Tabla 2.13:</b> Área y porcentaje de la Figura 2.30, según uso actual en la cuenca.....	116
<b>Tabla 2.14:</b> Área y porcentaje de la Figura 2.31, según densidad poblacional de la cuenca. ....	117
<b>Tabla 2.15:</b> Ayacucho: población censada y tasa de crecimiento promedio anual, según provincia, 2007 y 2017. ....	118
<b>Tabla 2.16:</b> Área y porcentaje de la Figura 2.27, para la demanda hídrica futura en la cuenca.	120
<b>Tabla 2.17:</b> Área y porcentaje de la Figura 2.33, según pendientes en la cuenca.....	127
<b>Tabla 2.18:</b> Proyectos MAR del Fondo Sierra Azul ejecutados en el año 2023 en el área de influencia de la cuenca Cachi .....	130
<b>Tabla 2.19:</b> Costos nivelados promedio (AV) de los esquemas MAR en USD por m <sup>3</sup> (año 2016), por fuente de agua (número de esquemas entre paréntesis).....	132
<b>Tabla 2.20:</b> Relación costo beneficio para diferentes tipos de MAR, fuentes de agua y usos finales.....	132
<b>Tabla 2.21:</b> Vida útil probable mínimas de los materiales básicos de una construcción.....	132

<b>Tabla 2.22:</b> Costo en soles por metro m <sup>3</sup> (año 2023) de agua recargada de los diferentes proyectos ejecutados por el Fondo Sierra Azul dentro del ámbito de influencia de la cuenca Cachi. ....	133
<b>Tabla 2.23:</b> Desempeño de las técnicas MAR frente al diseño, condición y función. ....	133
<b>Tabla 2.24:</b> Matriz AHP para comparación por pares y cálculo de ponderación para un conjunto de cuatro indicadores. ....	138
<b>Tabla 2.25:</b> Puntaje en relación a la necesidad MAR de la disponibilidad hídrica futura. ....	140
<b>Tabla 2.26:</b> Asignación de puntaje a la calidad de agua en la cuenca. ....	141
<b>Tabla 2.27:</b> Características de las principales estaciones hidrométricas del estudio. ....	143
<b>Tabla 2.28:</b> Estadísticos de bondad de ajuste de modelos ....	144
<b>Tabla 2.29:</b> Criterios de rendimiento de modelos hidrológicos.....	145
<b>Tabla 2.30:</b> Valores del Factor C .....	151
<b>Tabla 2.31:</b> Tabla de valores de factor C para ecuación USLE. ....	152
<b>Tabla 2.32:</b> Cobertura vegetal y Factor C, para la cuenca Cachi.....	153
<b>Tabla 2.33:</b> Resumen de la tabla de atributos Litología y Permeabilidad.....	155
<b>Tabla 2.34:</b> Intervalo de valores de conductividad hidráulica y permeabilidad .....	156
<b>Tabla 2.35:</b> Clasificación de algunos materiales sedimentarios según su permeabilidad.....	156
<b>Tabla 2.36:</b> Asignación de puntaje de las formaciones geológicas existentes.....	157
<b>Tabla 2.37:</b> Formaciones geológicas en la cuenca y calificación. ....	158
<b>Tabla 2.38:</b> Fallas existentes en la cuenca y longitud acumulada.....	161
<b>Tabla 2.39:</b> Unidades geomórficas y pesos sobre la base de la recarga artificial. ....	161
<b>Tabla 2.40:</b> Unidades geomórficas cuenca Cachi y puntajes.....	161
<b>Tabla 2.41:</b> Clasificación de pendiente topográfica y puntajes asignados.....	162
<b>Tabla 2.42:</b> Asignación de puntaje del uso actual del suelo en la cuenca.....	163
<b>Tabla 2.43:</b> Asignación de puntaje a la densidad poblacional en la cuenca. ....	163
<b>Tabla 3.1:</b> Disponibilidad hídrica (oferta – demanda) y área en la cuenca mes de agosto. ....	167
<b>Tabla 3.2:</b> Disponibilidad hídrica muy baja mes en el de agosto (oferta – demanda) según distritos.....	167
<b>Tabla 3.3:</b> Disponibilidad hídrica anual (oferta – demanda) y área en la cuenca. ....	170
<b>Tabla 3.4:</b> Disponibilidad hídrica anual en déficit (oferta – demanda) según distritos. ....	170
<b>Tabla 3.5:</b> Disponibilidad hídrica viable y área en la cuenca, mes de agosto.....	173

<b>Tabla 3.6:</b> Disponibilidad hídrica viable muy baja, mes de agosto según distritos. ....	173
<b>Tabla 3.7:</b> Disponibilidad hídrica viable anual y área en la cuenca.....	176
<b>Tabla 3.8:</b> Disponibilidad hídrica viable anual según distritos.....	176
<b>Tabla 3.9:</b> Oportunidades y desafíos asociados con la implementación de MAR en la cuenca Cachi. ....	177
<b>Tabla 3.10:</b> Simbología de evaluación de las oportunidades y desafíos asociados a la implementación de MAR.....	180
<b>Tabla 3.11:</b> Puntuación obtenida para cada metodología en orden de importancia para la cuenca .....	180
<b>Tabla 3.12:</b> Clasificación de viabilidad de las tecnologías MAR para la cuenca Cachi.....	180
<b>Tabla 3.13:</b> Puntuaciones y umbrales. ....	181
<b>Tabla 3.14:</b> Matriz de comparación por pares para evaluar la importancia relativa y los pesos. ....	185
<b>Tabla 3.15:</b> Resultados de aplicación del modelo Budyko.....	192
<b>Tabla 3.16:</b> Resumen de indicadores de bondad de ajuste del modelo Budyko.....	193
<b>Tabla 3.17:</b> Resultados de aplicación del modelo Fu 1-parámetro.....	194
<b>Tabla 3.18:</b> Resumen de indicadores de bondad de ajuste del modelo Fu 1-parámetro.....	195
<b>Tabla 3.19:</b> Resultados de aplicación del modelo GR1A -Fase de calibración.....	196
<b>Tabla 3.20:</b> Resultados de aplicación del modelo GR1A -Fase de validación.....	198
<b>Tabla 3.21:</b> Índice de aridez y parámetro $\alpha$ para las cuencas en regionalización.....	199
<b>Tabla 3.22:</b> Resultados de los caudales simulados del modelo Fu 1-parámetro para la cuenca Cachi.....	200
<b>Tabla 3.23:</b> Índice de aridez y parámetro X para las cuencas en regionalización.....	201
<b>Tabla 3.24:</b> Resultados de la aplicación del modelo GR1A comparados con caudales simulados de modelo Fu 1-parámetro para la cuenca Cachi.....	202
<b>Tabla 3.25:</b> Caudales regionalizados y simulados para la cuenca Cachi con los modelos de Fu 1-parámetro y GR1A.....	203
<b>Tabla 3.26:</b> Clasificación de la capacidad de recarga del acuífero subyacente en la cuenca Cachi.....	207
<b>Tabla 3.27:</b> Clasificación de la Necesidad MAR para las cinco tecnologías.....	210
<b>Tabla 3.28:</b> Clasificación de la disponibilidad de agua para las cinco tecnologías.....	214

<b>Tabla 3.29:</b> Clasificación de la recargabilidad intrínseca del acuífero para las cinco tecnologías. .....	218
<b>Tabla 3.30:</b> Atractivo económico para las cinco tecnologías.....	222
<b>Tabla 3.31:</b> Clasificación de la Idoneidad general para las cinco tecnologías.....	230
<b>Tabla 3.32:</b> Clasificación de la Idoneidad general promedio de las metodologías.....	231
<b>Tabla 3.33:</b> Análisis de sensibilidad de eliminación junto con la distribución de peso original. .....	233

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Mapa hidrogeológico del Perú .....	27
<b>Figura 1.2:</b> Cortes hidrogeológicos hipotéticos para ilustrar el régimen del flujo de aguas subterráneas bajo condiciones de clima (A) húmedo y (B) semiárido .....	28
<b>Figura 1.3:</b> Variación de la porosidad con la granulometría en materiales detríticos no consolidados.....	33
<b>Figura 1.4:</b> Relación granulometría – porosidad eficaz.....	33
<b>Figura 1.5:</b> Distribución de agua moderna, utilizando datos de recarga de agua y niveles freáticos.....	36
<b>Figura 1.6:</b> Principal objetivo reportado en los casos de MAR por continente.....	38
<b>Figura 1.7:</b> Evolución de los proyectos de MAR por continente .....	38
<b>Figura 1.8:</b> Casos de MAR por millón de habitantes y la técnica MAR en América Latina .....	39
<b>Figura 1.9:</b> Esquema de técnicas MAR basadas en el tipo de acuífero, topografía, uso de la tierra y usos previstos del agua recuperada. ....	47
<b>Figura 1.10:</b> Diagrama de la operación de un sistema MAR de Cuencas y estanques de infiltración.....	50
<b>Figura 1.11:</b> Diagrama de la operación de un sistema MAR de Tratamiento de Suelo-Acuífero (TSA). ....	53
<b>Figura 1.12:</b> Diagrama de la operación de un sistema MAR de inundación controlada de tierra. ....	54
<b>Figura 1.13:</b> Diagrama de la operación de un sistema MAR de zanjas y surcos (amunas).....	56
<b>Figura 1.14:</b> Diagrama de la operación de un sistema MAR de riego.....	59
<b>Figura 1.15:</b> Diagrama de la operación de un sistema MAR Pozos someros.....	61
<b>Figura 1.16:</b> Diagrama de la operación de un sistema MAR Almacenamiento y recuperación de acuíferos (ASR). ....	63
<b>Figura 1.17:</b> Almacenamiento, transferencia y recuperación de acuíferos (ASTR).....	65
<b>Figura 1.18:</b> Estanques de percolación asociados a represas de control, gaviones. ....	67
<b>Figura 1.19:</b> Estanques de percolación asociados a represas de control, gaviones. ....	69
<b>Figura 1.20:</b> Presas subsuperficiales (subterráneas).....	70
<b>Figura 1.21:</b> Técnicas de ampliación de los cauces.....	72
<b>Figura 1.22:</b> Filtro de bancos de río (RBF). ....	74

<b>Figura 1.23:</b> Filtración Inter-dunar. ....	75
<b>Figura 1.24:</b> Barreras y diques. ....	77
<b>Figura 1.25:</b> Zanjas de infiltración, tinas ciegas, surcos, anillos de agua y terraplenes. ....	78
<b>Figura 1.26:</b> Recolección de agua de lluvia en los tejados. ....	80
<b>Figura 1.27:</b> Mapa de las microcuencas en la cuenca del río cachi. ....	83
<b>Figura 1.28:</b> Esquemización del modelo de balance hídrico. ....	85
<b>Figura 2.1:</b> Ubicación y localización del trabajo de investigación. ....	88
<b>Figura 2.2:</b> Precipitación media anual en la cuenca Cachi. ....	94
<b>Figura 2.3:</b> Interfaz y código en Google Earth Engine para la ET MODIS. ....	95
<b>Figura 2.4:</b> Evapotranspiración real anual (mm/año) para la cuenca Cachi. ....	95
<b>Figura 2.5:</b> Demanda anual (mm/año) para la cuenca Cachi. ....	97
<b>Figura 2.6:</b> Mes de febrero distribución de disponibilidad hídrica, datos de oferta – demanda para la cuenca Cachi. ....	98
<b>Figura 2.7:</b> Mes de abril distribución de disponibilidad hídrica, datos de oferta – demanda para la cuenca Cachi. ....	98
<b>Figura 2.8:</b> Mes de junio distribución de disponibilidad hídrica, datos de oferta – demanda para la cuenca Cachi. ....	99
<b>Figura 2.9:</b> Mes de agosto distribución de disponibilidad hídrica, datos de oferta – demanda para la cuenca Cachi. ....	99
<b>Figura 2.10:</b> Mes de octubre distribución de disponibilidad hídrica, datos de oferta – demanda para la cuenca Cachi. ....	100
<b>Figura 2.11:</b> Mes de diciembre distribución de disponibilidad hídrica, datos de oferta – demanda para la cuenca Cachi. ....	100
<b>Figura 2.12:</b> Distribución anual de disponibilidad hídrica, datos de oferta – demanda para la cuenca Cachi. ....	101
<b>Figura 2.13:</b> Asignación de puntajes según la cobertura vegetal existente en la cuenca Cachi. ....	104
<b>Figura 2.14:</b> Interfaz y código en Google Earth Engine para la clase textural en la cuenca Cachi. ....	105
<b>Figura 2.15:</b> Asignación de puntajes según la clase textural existente en la cuenca Cachi. ....	105
<b>Figura 2.16:</b> Asignación de puntajes según las pendientes existentes en la cuenca Cachi. ....	106
<b>Figura 2.17:</b> Asignación de puntajes según la hidrogeología existente en la cuenca Cachi. ....	107

<b>Figura 2.18:</b> Asignación de puntajes a la capacidad de recarga al acuífero subyacente (CRA) para la cuenca Cachi. ....	108
<b>Figura 2.19:</b> Mes de febrero, disponibilidad hídrica viable de la cuenca Cachi.....	109
<b>Figura 2.20:</b> Mes de mayo, disponibilidad hídrica viable de la cuenca Cachi. ....	110
<b>Figura 2.21:</b> Mes de agosto, disponibilidad hídrica viable de la cuenca Cachi.....	110
<b>Figura 2.22:</b> Mes de noviembre, disponibilidad hídrica viable de la cuenca Cachi .....	111
<b>Figura 2.23:</b> Distribución anual de disponibilidad hídrica viable de la cuenca Cachi. ....	111
<b>Figura 2.24:</b> Calidad de las fuentes de agua en la cuenca según la prioridad de intervención MAR. ....	115
<b>Figura 2.25:</b> Uso actual de suelos en la cuenca Cachi.....	116
<b>Figura 2.26:</b> Densidad poblacional en la cuenca Cachi.....	117
<b>Figura 2.27:</b> Demanda futura del recurso hídrico para la cuenca Cachi.....	120
<b>Figura 2.28:</b> Delimitación espacial de polígonos para los acuíferos evaluados por la ANA y la cuenca Cachi. ....	121
<b>Figura 2.29:</b> Mapa de fallas geológicas en la cuenca Cachi.....	123
<b>Figura 2.30:</b> Mapa geológico de la cuenca Cachi.....	124
<b>Figura 2.31:</b> Hidrogeología en la cuenca Cachi .....	125
<b>Figura 2.32:</b> Geomorfología de la cuenca Cachi .....	126
<b>Figura 2.33:</b> Pendiente en la cuenca Cachi.....	127
<b>Figura 2.34:</b> Tecnologías de MAR registrados en el Perú.....	128
<b>Figura 2.35:</b> Proyectos últimos ejecutados por Fondo Sierra Azul en la zona de influencia de la cuenca Cachi .....	129
<b>Figura 2.36:</b> Objetivo de MAR registrados en el Perú .....	131
<b>Figura 2.37:</b> Estructura jerárquica para la idoneidad del sitio de recarga gestionada de acuíferos. ....	137
<b>Figura 2.38:</b> Clasificación de disponibilidad hídrica futura en función a la necesidad MAR para la cuenca Cachi. ....	140
<b>Figura 2.39:</b> Interfaz de la página del SoilGrids.....	150
<b>Figura 3.1:</b> Distribución de disponibilidad hídrica en la cuenca Cachi, datos de oferta – demanda, mes de agosto. ....	166

<b>Figura 3.2:</b> Distribución de disponibilidad hídrica anual en la cuenca Cachi, balance datos de oferta – demanda.....	169
<b>Figura 3.3:</b> Distribución de disponibilidad hídrica viable en la cuenca Cachi, mes de agosto .	172
<b>Figura 3.4:</b> Distribución de disponibilidad hídrica viable anual en la cuenca Cachi .....	175
<b>Figura 3.5:</b> Distribuciones de peso general. ....	189
<b>Figura 3.6:</b> Distribuciones de peso del indicador de necesidad de MAR y sus criterios correspondientes. ....	190
<b>Figura 3.7:</b> Distribuciones de peso del indicador de CRA y sus criterios correspondientes. ....	190
<b>Figura 3.8:</b> Distribuciones de peso del indicador de disponibilidad de agua y sus criterios correspondientes. ....	191
<b>Figura 3.9:</b> Distribuciones de peso del indicador de recargabilidad intrínseca del acuífero y sus criterios correspondientes. ....	191
<b>Figura 3.10:</b> Distribuciones de peso del indicador de Atractivo económico y sus criterios correspondientes. ....	191
<b>Figura 3.11:</b> Tendencia del índice de aridez y el parámetro $\alpha$ de Fu para las cuencas Chacco, Apacheta y Chicllarazo. ....	200
<b>Figura 3.12:</b> Tendencia del índice de aridez (AI) y el parámetro simulado (Xsimul) para las cuencas Chacco y Chicllarazo.....	202
<b>Figura 3.13:</b> Correlación de caudales simulados entre el modelo Fu 1-parámetro con respecto al modelo GR1A. ....	204
<b>Figura 3.14:</b> Capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA) en la cuenca Cachi. ....	206
<b>Figura 3.15:</b> Necesidad MAR - Captación de agua de lluvia. ....	207
<b>Figura 3.16:</b> Necesidad MAR - Pozos. ....	208
<b>Figura 3.17:</b> Necesidad MAR - Distribución.....	208
<b>Figura 3.18:</b> Necesidad MAR – Modificación del cauce de arroyos y ríos.....	209
<b>Figura 3.19:</b> Necesidad MAR - Filtración. ....	209
<b>Figura 3.20:</b> Disponibilidad de agua - Captación de agua de lluvia.....	211
<b>Figura 3.21:</b> Disponibilidad de agua - pozos. ....	212
<b>Figura 3.22:</b> Disponibilidad de agua - distribución. ....	212
<b>Figura 3.23:</b> Disponibilidad de agua – modificación del cauce de arroyos y ríos.....	213
<b>Figura 3.24:</b> Disponibilidad de agua - Filtración.....	213

<b>Figura 3.25:</b> Recargabilidad intrínseca del acuífero - Captación de agua de lluvia. ....	215
<b>Figura 3.26:</b> Recargabilidad intrínseca del acuífero - Pozos. ....	216
<b>Figura 3.27:</b> Recargabilidad intrínseca del acuífero - Distribución.....	216
<b>Figura 3.28:</b> Recargabilidad intrínseca del acuífero – Modificación del cauce de arroyos y ríos. .....	217
<b>Figura 3.29:</b> Recargabilidad intrínseca del acuífero - Filtración. ....	217
<b>Figura 3.30:</b> Atractivo económico - Captación de agua de lluvia. ....	219
<b>Figura 3.31:</b> Atractivo económico - Pozos. ....	220
<b>Figura 3.32:</b> Atractivo económico - Distribución.....	220
<b>Figura 3.33:</b> Atractivo económico – Modificación del cauce de arroyos y ríos.....	221
<b>Figura 3.34:</b> Atractivo económico - Filtración. ....	221
<b>Figura 3.35:</b> Idoneidad general - Captación de agua de lluvia. ....	224
<b>Figura 3.36:</b> Idoneidad general - Pozos. ....	225
<b>Figura 3.37:</b> Idoneidad general - Distribución.....	226
<b>Figura 3.38:</b> Idoneidad general – Modificación del cauce de arroyos y ríos. ....	227
<b>Figura 3.39:</b> Idoneidad general - Filtración. ....	228
<b>Figura 3.40:</b> Idoneidad general – Promedio de metodologías. ....	229

## ÍNDICE DE ANEXOS

[Anexo 1](#) Datos de precipitaciones mensuales de las estaciones meteorológicas usadas

[Anexo 2](#) Datos de monitoreos de calidad de agua en la cuenca Cachi.

[Anexo 3](#) Mapa de Evapotranspiración real y potencial anual media obtenida de partir del sensor MODIS

[Anexo 4](#) Datos de estaciones hidrométricas en el ámbito de estudio.

[Anexo 5](#) Datos de licencias de agua vigentes otorgadas en la cuenca Cachi.

## ACRÓNIMOS

<b>AHP</b>	Analytical Hierarchy Process (Proceso Analítico Jerárquico)
<b>ANA</b>	Autoridad Nacional del Agua
<b>CRA</b>	Capacidad de recarga del acuífero subyacente
<b>CV</b>	Coefficiente de variación
<b>DEM</b>	Modelo de Elevación Digital
<b>ECA</b>	Estándar de Calidad Ambiental
<b>ET</b>	Evapotranspiración Real
<b>GEOCATMIN</b>	Sistema de Información Geológico y Catastral Minero
<b>IGRAC</b>	International Groundwater Resources Assessment Center (Centro Internacional de Evaluación de Recursos de Aguas Subterráneas)
<b>INGEMMET</b>	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico
<b>INOWAS</b>	Innovative Groundwater Solutions (Soluciones innovadoras para las aguas subterráneas)
<b>MAR</b>	Managed aquifer recharge o gestión de la recarga de acuíferos
<b>MCDA</b>	Multi-Criteria Decision Analysis (Análisis de decisiones de múltiples criterios)
<b>MIDAGRI</b>	Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego
<b>MINAM</b>	Ministerio del Ambiente
<b>MODIS</b>	Espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada
<b>NSE</b>	Eficiencia de Nash-Sutcliffe
<b>PBIAS</b>	Puntaje de sesgo (Bias Score)
<b>PET</b>	Evapotranspiración Potencial
<b>PISCO</b>	Datos interpolados peruanos del SENAMHI Observaciones
<b>SIG</b>	Sistema de información geográfica
<b>USD</b>	dólar estadounidense
<b>VI</b>	Variation Index (índice de variación)
<b>WFAC</b>	Weighted Flow Accumulation (Acumulación Ponderada del Flujo)
<b>WLC</b>	Weighted Linear Combination (combinación lineal ponderada) climatológicas e hidrológicas

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó con el objetivo de identificar y mapear la idoneidad de las distintas metodologías del Manejo de la Recarga de Acuíferos (MAR, por las siglas en inglés de *Managed Aquifer Recharge*) posibles a implementarse en la cuenca Cachi, una cuenca de montaña. Clasificando las diversas tecnologías existentes en relación a su mejor adaptación que respondería a las necesidades, potencialidad y desafíos para la cuenca en estudio. Se evaluó la necesidad de MAR como disponibilidad hídrica actual y futura en su distribución espacio temporal para la cuenca y la calidad de agua; la recargabilidad intrínseca del acuífero subyacente, la disponibilidad de agua para la recarga y el atractivo económico que representaría la ejecución del mismo. Los distintos criterios indicadores que engloban las evaluaciones fueron, cobertura vegetal, textura del suelo, pendiente topográfica, la escorrentía acumulada anual, transporte de sedimentos, la formación geológica, distancia a fallas, geomorfología, uso actual del suelo, densidad poblacional y la proximidad a las fuentes de agua. Esto se realizó con la utilización de la teledetección, análisis geoespacial y análisis de decisión multicriterio (MCDA, por las siglas en inglés de *Multi-criteria decision analysis*), de comparación por pares; de todos los criterios seccionados para la implementación de las cinco tecnologías MAR evaluadas en esta investigación. Se obtuvo que en relación a su viabilidad resultan en el siguiente orden: captación de agua de lluvia, pozos, distribución, modificación del cauce de arroyos y ríos, filtración. En el mapeo de idoneidad resultan en relación a áreas de calificación superiores a alta en el siguiente orden: pozos, distribución, filtración, captación de agua de lluvia y modificación del cauce de arroyos y ríos.

**Palabras clave:** Gestión optimizada de acuíferos (MAR), análisis de decisión multicriterio (MCDA), cuenca de montaña, disponibilidad hídrica, análisis geoespacial, teledetección.

## INTRODUCCIÓN

Las precipitaciones que cubren la superficie terrestre, parte de las cuales se infiltra hasta alcanzar los acuíferos, mantienen los flujos de agua en temporada de estiaje mediante una descarga lenta. En la cuenca del río Cachi, en la región Ayacucho, la disponibilidad hídrica es heterogénea en cantidad y calidad, agravada por el cambio climático, generando incertidumbre en la predicción de la disponibilidad y reposición natural de los recursos hídricos locales (Pachauri et al., 2014; Vörösmarty et al., 2000). Esto coloca a los habitantes de países en desarrollo en riesgo de sufrir escasez de agua, ya que la creciente demanda se satisface con un suministro estancado o en disminución. Los posibles impactos del cambio climático podrían hacer que la calidad del agua subterránea no sea viable para el uso previsto ya sea doméstico, agrícola, recreativo o industrial.

La Recarga Gestionada de Acuíferos o en inglés *managed aquifer recharge* (MAR), es la recarga intencionada de agua a acuíferos para su posterior recuperación o beneficios ambientales. Por definición, MAR es la recarga artificial (a diferencia de la natural) de acuíferos con exceso de agua para obtener beneficios ambientales o para su posterior recuperación (Marwaha et al., 2021; Ringleb et al., 2016). Los acuíferos subterráneos son excelentes para almacenar el exceso de agua durante los años húmedos y sirven como valiosas reservas de agua durante los años secos (Dillon et al., 2009). Las fuentes naturales de agua para recarga son en su mayoría aguas superficiales de ríos y lagos o escorrentías interceptadas. En el MAR también se han utilizado efluentes de aguas residuales tratadas y aguas pluviales (Stefan y Ansems, 2016). Entre los diferentes tipos de estrategias de gestión de aguas subterráneas, la recarga gestionada de acuíferos (MAR) es popular debido a su bajo costo de implementación, baja pérdida por evaporación en comparación con los reservorios superficiales y su capacidad para infiltrar grandes volúmenes de agua de diferentes fuentes, incluidas aguas de ríos o arroyos, zonas urbanas. y escorrentía agrícola, y aguas residuales municipales tratadas (Dillon et al., 2009, Dillon, 2005). MAR puede cerrar la brecha entre la disponibilidad de agua durante el invierno y el riego durante los meses de verano o usarse para construir un recurso hídrico estratégico solo para uso durante los años de sequía. Una colección de estudios de casos de MAR de la UNESCO identificó que MAR aumenta la seguridad del suministro de agua, mejora los ecosistemas y puede lograrse a menos de la mitad del costo de las alternativas convencionales (Murray et al., 2021). MAR también se utiliza para reducir inundaciones y daños por inundaciones, aumentar el confort urbano, el valor de la tierra, reducir la salinidad de los acuíferos, mejorar el suministro de agua y

aumentar los caudales ambientales en las cuencas originales (Dillon et al., 2009). Las técnicas MAR difieren entre sí en construcción, operación y costos. La recarga artificial de los acuíferos puede ser directa, mediante pozos de inyección, o indirecta (superficial o subsuperficial) mediante la infiltración a través de la superficie de la tierra y difusión en el suelo, lo que proporciona un tratamiento adicional del agua antes de llegar al acuífero. Los requisitos de calidad del agua residual son evidentemente mucho mayores en los métodos de recarga directos que en los métodos de recarga indirectos (CONAGUA, 2003; CONAGUA, 2019). Ejemplos de técnicas MAR son: el método de dispersión (Gale et al., 2002), el método de modificación en el canal (Sallwey J. et al., 2019), el método de recarga de pozos (NRMMC, E. NHMRC, 2009), recolección de agua de lluvia y escorrentía (Gale et al., 2002), y filtración de banco inducida (Dupont, 2018). A pesar del creciente interés en la implementación de MAR, seleccionar sitios y métodos de MAR basados en atributos y condiciones de ubicación ha sido un desafío (Casanova et al., 2016; Dillon, 2005).

Las técnicas MAR varían en construcción y costos, desde recarga directa mediante pozos hasta recarga indirecta mediante infiltración en el suelo. La teledetección, junto con Sistemas de Información Geográfica (SIG), facilita la gestión y análisis de datos espaciotemporales en áreas extensas (Russo et al., 2015). Los SIG demuestran ser herramientas eficaces en los análisis de idoneidad de MAR. Los datos satelitales proporcionan información útil sobre factores que influyen en el movimiento del agua subterránea a través de los acuíferos. La integración de SIG y Análisis de Decisión con Criterios Múltiples (MCDA) es esencial para evaluar la idoneidad del MAR.

Este estudio investigó el potencial de la recarga artificial (MAR) con metodologías óptimas para manejar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Cachi. Se seleccionaron diversas metodologías de recarga artificial y ubicaciones adecuadas según características físicas, hidrológicas, ecológicas y sociales de la cuenca, con la elaboración de un mapeo de idoneidad del MAR mediante SIG-MCDA.

### **Objetivo general**

Evaluar y mapear las metodologías de recarga de acuíferos como medio para gestionar eficazmente la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Cachi, considerando su heterogeneidad espacial y temporal, durante el año 2024.

### **Objetivos específicos**

1. Analizar la disponibilidad hídrica espacial y temporal en la cuenca del río Cachi, considerando sus particularidades en cantidad y calidad, durante el año 2024.
2. Identificar y evaluar metodologías de recarga artificial de acuíferos, analizando su viabilidad técnica, económica y ambiental en la selección de ubicaciones óptimas de recarga artificial, basándose en análisis de datos de geología, hidrogeología, clima, teledetección y uso del suelo, en la cuenca Cachi durante el año 2024.
3. Realizar un mapeo de la idoneidad, identificando y evaluando las diferentes metodologías de recarga de acuíferos en la cuenca Cachi, considerando factores físicos, hidrológicos, ecológicos y sociales, durante el año 2024.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEORICO

### 1.1. ANTECEDENTES

Talozi et al. (2023), en la investigación titulada “*Selecting suitable sites for groundwater recharge in Jordan using the spreading techniques via the integration of multi-criteria decision análisis and geographic information system tools*”, hace referencia a la evaluación de sitios adecuados para la implementación de las técnicas MAR mediante dispersión como componente de gestión de los recursos de hídricos subterráneos en zonas semiáridas; como fuente de abastecimiento urbano, agrícola e industrial, utilizando la herramienta de análisis SIG-MCDA.

En lo que respecta al análisis de decisiones espaciales multicriterio (MCDA) para seleccionar sitios adecuados para sistemas de recarga administrada de acuíferos (MAR). La nueva herramienta de software MCDA funciona basándose en la combinación de métodos de evaluación multicriterio existentes con técnicas modernas de análisis de decisiones, en la investigación titulada “Una nueva herramienta espacial de apoyo a la toma de decisiones con criterios múltiples para la selección de sitios para la implementación de la recarga gestionada de acuíferos”, ofrece algunos criterios predeterminados y métodos estándar para aumentar el equilibrio entre facilidad de uso y eficiencia. (Rahman, 2010).

### 1.2. DISPONIBILIDAD HÍDRICA

El volumen total de agua en la Tierra es alrededor de 1,400 millones de  $\text{Km}^3$ , de los cuales solo el 2.5 % o alrededor de 35 millones de  $\text{Km}^3$  es agua dulce (Tabla 1.1). La mayor parte del agua dulce ocurre en forma de hielo o nieve atrapada en la Antártica y Groenlandia, o en los acuíferos. Las principales fuentes de agua para uso humano son las aguas superficiales (lagos y ríos), la humedad del suelo y los acuíferos. Alrededor del 30 % del agua dulce se encuentra en los acuíferos (Shiklomanov, 1993).

**Tabla 1.1:** Estimación de la distribución global de agua.

<b>Fuente</b>	<b>Volumen de agua (<math>10^3 \text{ km}^3</math>)</b>	<b>Agua dulce (%)</b>	<b>Agua total (%)</b>
Océanos, mares	1,338,000	-	96.5
Capas de hielo, glaciares y nieve permanente	24,064	68.7	1.74
Agua subterránea	23,400	-	1.7

Dulce	10,530	30.1	-
Salada	12,870	-	-
Humedad del suelo	16.5	0.05	0.001
Permafrost	300	0.86	0.022
Lagos	176.4	-	0.013
Dulce	91.0	0.26	-
Salada	85.4	-	-
Atmosfera	12.9	0.04	0.001
Pantanos	11.47	0.03	0.0008
Ríos	2.12	0.006	0.0002
Agua Biológica	1.12	0.003	0.0001
Total, de agua	1,385,984	-	100
Total, de agua dulce	35,029	100	2.53

Fuente: Shiklomanov (1993).

A escala global es notorio un aumento de la vulnerabilidad para la disponibilidad de los recursos hídricos como resultado de los siguientes cambios: el incremento en su demanda sobre todo poblacional, cambios de usos de suelo y migraciones, la necesidad de incrementar la producción de alimentos, la expansión de la industrialización basado en el uso del agua, la mala calidad del agua y los impactos del cambio climático (Lavado et al., 2021).

**Tabla 1.2:** Disponibilidad de la masa anual de recursos hídricos en el Perú, según vertiente hidrográfica.

Vertiente	Nº UH	Superficie		Población	Disponibilidad hídrica (hm <sup>3</sup> )			Total	
		Miles Km <sup>2</sup>	%		%	Superficial hm <sup>3</sup>	%	Subterránea hm <sup>3</sup>	hm <sup>3</sup>
Pacífico	62	279.7	21.7	65.98	35,632	2.02	2,849	38,481	2.18
Atlántico	84	958.5	74.6	30.76	1'719,814	97.42	-	1'719,814	97.26
Titicaca	13	47	3.8	3.26	9,877	0.56	-	9,877	0.56
<b>TOTAL</b>	<b>159</b>	<b>1,258.2</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>1'765,323</b>	<b>100</b>	<b>2,849</b>	<b>1'768,172</b>	<b>100</b>

Fuente: Autoridad Nacional del Agua (ANA) (2014).

### 1.3. ESCASEZ HÍDRICA

La escasez de hídrica es el estado en el cual los requerimientos de este recurso, en todos los ámbitos, incluidos los ecológicos, no son cubiertas en consecuencia sobre el uso del agua en la provisión o en la calidad de este. (ONU, 2005).

La escasez hídrica ocurre naturalmente, aunque puede ser provocado por los humanos. A pesar de existir suficiente agua dulce en el planeta para cubrir la demanda de una población mundial de cerca de siete mil millones de personas, la distribución espacio temporal del agua no es uniforme, y gran parte de ella es desperdiciada, contaminada y manejada insosteniblemente. No existe en el mundo escasez de agua como tal, en su lugar hay un número de regiones en el mundo que sufren escasez de agua, esto debido a que el uso de este recurso ha crecido más del doble en relación con la tasa de incremento poblacional en el último siglo. Cerca de una quinta parte (1,200 millones) de la población mundial de 6 mil millones de personas, habita en áreas que enfrentan escasez de agua, y otro cuarto de la población mundial (1,600 millones) enfrenta recortes en el suministro de agua debido a que carecen de la infraestructura necesaria para tomar agua de los ríos y acuíferos (ONU, 2005).

#### **1.4. AGUA SUBTERRÁNEA**

Son aguas subsuperficiales situadas bajo el nivel freático en la zona saturada o freática (Ramsar, 2007). Es el agua que satura por completo los poros o intersticios del subsuelo. Por lo tanto, es aquella que constituye la zona saturada (CONAGUA, 2016).

Las reservas de aguas subterráneas representan la cantidad de agua almacenada en la matriz del acuífero. Estos recursos conforman el ciclo hidrológico. Parte del agua que cae por la precipitación, se incorpora a los lagos, ríos, arroyos y océanos, mientras que otra parte es absorbida por la vegetación, que incorpora el agua nuevamente a la atmósfera mediante la evapotranspiración. El agua que no se evapora directamente de los lagos y ríos, o no es transpirada por las plantas, se filtra a través del subsuelo y pasa a formar los acuíferos subterráneos (Apaéstegui y Peña, 2017).

#### **1.5. EL AGUA SUBTERRÁNEA EN PERÚ**

El potencial de aguas subterráneas del Perú no ha sido bien evaluado pero la mayoría de sus ciudades de la costa, se aprovisionan de este recurso mediante la perforación de pozos de hasta 200 metros de profundidad y en el caso de Lima la tercera parte del agua consumida proviene del acuífero, unos 7,5 m<sup>3</sup> /s. En líneas generales los recursos hídricos en el Perú constituyen uno de los principales recursos de los que dispone el Perú y su uso racional es necesario para lograr que toda la población peruana sobre todo de la parte Andina, disponga de él. En el Perú Andino la mayor disposición son las aguas de ríos y lagos (superficiales), el uso de los recursos subterráneos está limitado a las grandes ciudades y al desarrollo minero

e industrial. En la zona amazónica también se emplean los recursos hídricos subterráneos para uso doméstico e industrial, aunque en pequeña escala (Masson et al., 1993).

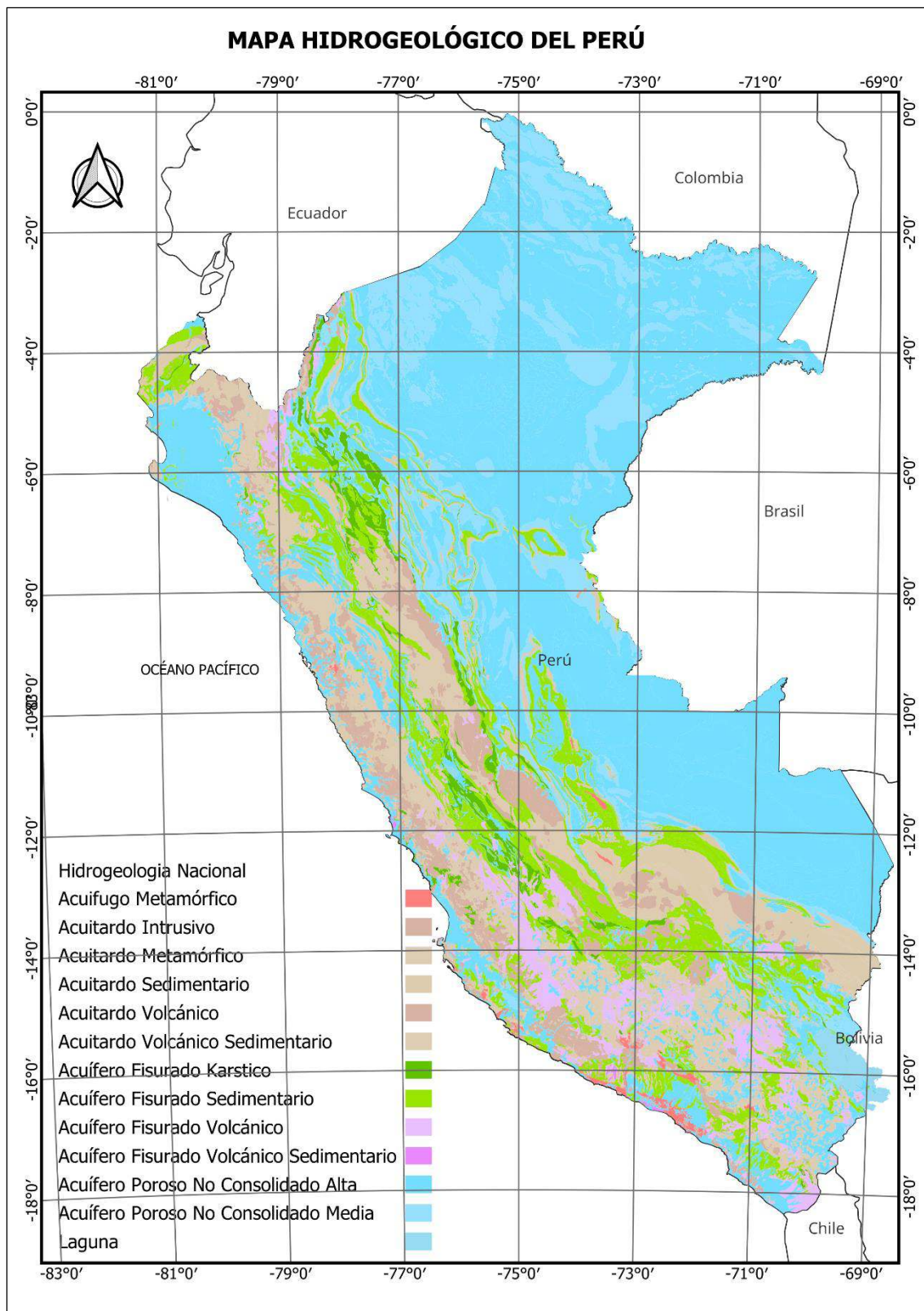
Las aguas subterráneas constituyen en las partes altas de las zonas cordilleranas el inicio de los ríos y lagunas, así como el principal alimentador de los bofedales que sirven para desarrollar la actividad pecuaria de la zona altoandina con el ganado auquénido y en los valles interandinos con el ganado vacuno y lanar (Tovar et al., 2006).

Los estudios hidrogeológicos en el Perú confirman que las aguas subterráneas están íntimamente ligadas al comportamiento geológico de las formaciones rocosas (Tabla 1.3).

**Tabla 1.3:** Principales rocas reservorios de aguas subterráneas en el Perú.

<b>ACUIFEROS PRINCIPALES</b>	<b>ROCA ALMACEN</b>
Acuíferos porosos no consolidados y/o Acuíferos detríticos	Materiales detríticos no consolidados, Depósitos Aluviales, Fluviales, Fluvioglaciares, morrenas, etc. Rocas Sedimentarias: Areniscas, caliza, etc. Rocas Volcánicas: Flujos de lava (andesitas y basaltos)
Acuíferos fisurados	Rocas Intrusivas: Solamente en fallas y fracturas Roca Metamórficas: Solamente en fallas y fracturas
Acuíferos kársticos	Rocas Sedimentarias: Calizas kárstificadas.
Acuíferos volcano-sedimentarios	Intercalación de rocas volcánicas y sedimentarias: conglomerados, arenas, piroclastos, flujos de lava, basaltos, andesitas, flujos de lava en bloques, tobas, lapilli, etc.

Fuente: Apaéstegui y Peña (2017).

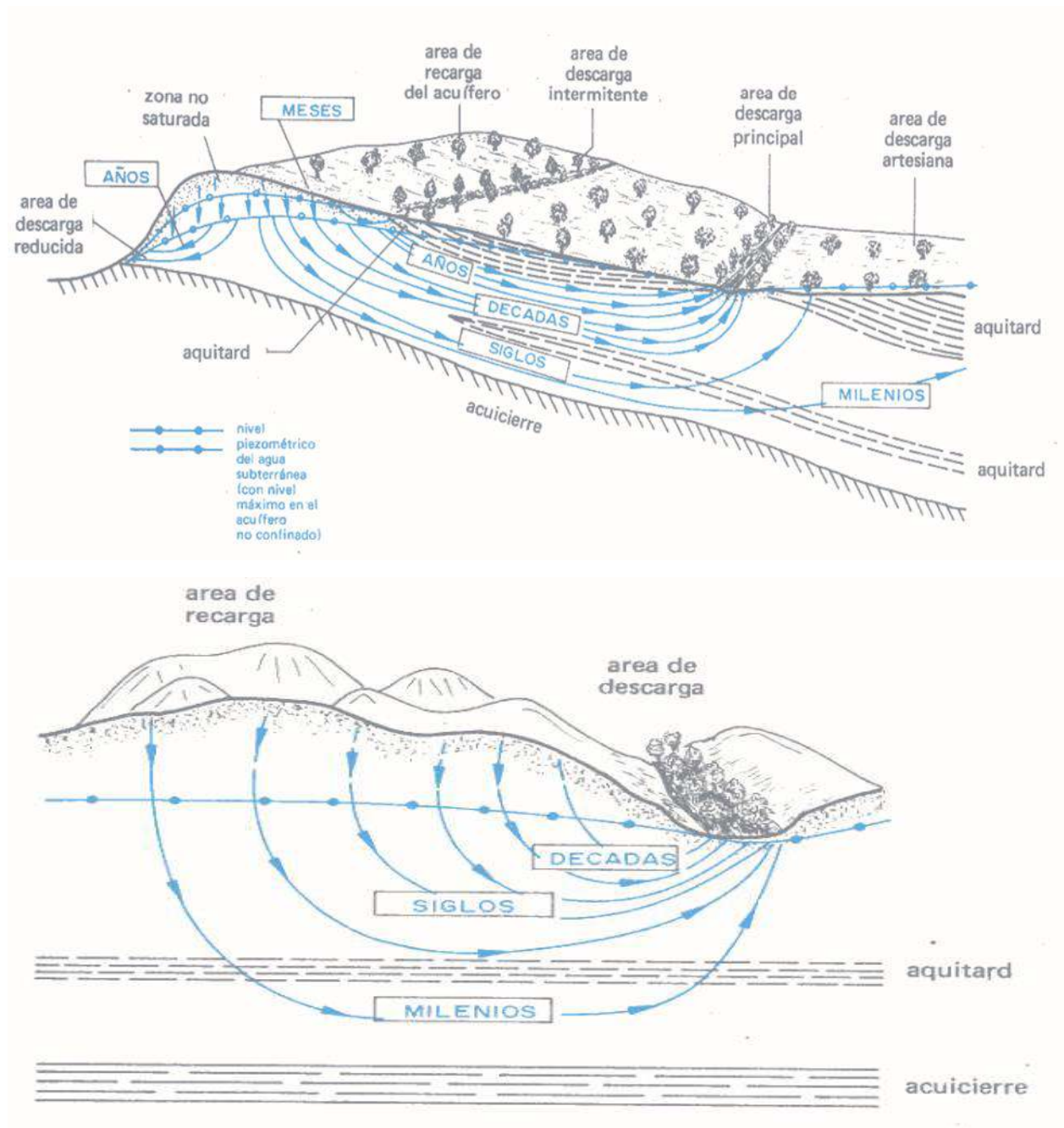


**Figura 1.1:** Mapa hidrogeológico del Perú

Fuente: modificado de INGEMMET (2024).

## 1.6. ACUÍFERO

Formación geológica o serie de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, que transmite y almacena aguas freáticas las cuales son posibles a ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y limitada horizontal y verticalmente de forma convenientemente con el propósito de gestión y administración de las aguas del subterráneas (Escolero et al., 2017).



**Figura 1.2:** Cortes hidrogeológicos hipotéticos para ilustrar el régimen del flujo de aguas subterráneas bajo condiciones de clima (A) húmedo y (B) semiárido

Fuente: modificado de Heath (1982).

### 1.6.1. Tipos de Acuíferos

#### Según su comportamiento hidrodinámico:

Según, Custodio y Llamas (1983).

- **Acuíferos:** Formaciones geológicas con buenas características para almacenar y transmitir el agua. Por ejemplo, formaciones de arenas y gravas o de calizas karstificadas.
- **Acuitardos:** Se trata de formaciones geológicas con buenas capacidades para almacenar agua, pero el agua es transmitida lentamente. Por ejemplo, los limos.
- **Acuícludos:** Se trata de formaciones geológicas que pueden contener agua, pero su poder de transmisión es muy baja o nula debido a su baja permeabilidad. Por ejemplo, las formaciones arcillosas.
- **Acuífugos:** Formaciones geológicas que no pueden ni almacenar agua y por consiguiente tampoco transmitirla. Por ejemplo, rocas ígneas no fisuradas ni fracturadas.

#### Por el tipo de materiales o terrenos que los constituyen:

Según, Custodio y Llamas (1983).

- **Acuíferos porosos:** Estos acuíferos están compuestos por materiales permeables, como arena o arenisca. El agua se encuentra en los espacios porosos entre las partículas del material.
- **Acuíferos fisurados:** Estos acuíferos se forman en rocas fracturadas, donde el agua se mueve a través de las grietas y fisuras de la roca.
- **Acuíferos cársticos:** Estos acuíferos se encuentran en áreas donde hay rocas solubles, como la caliza. El agua se mueve a través de sistemas de cuevas y conductos subterráneos formados por la disolución de la roca.
- **Acuíferos mixtos:** Estos acuíferos son una combinación de acuíferos porosos y fisurados. Pueden contener tanto agua en los espacios porosos como en las fisuras de la roca.

#### Por el grado de presión a que están sometidos:

Según, Custodio y Llamas (1983).

- **Acuíferos libres:** Estos acuíferos se encuentran en áreas donde el nivel freático está cerca de la superficie del suelo. El agua se encuentra bajo presión atmosférica y puede ser fácilmente extraída mediante pozos.
- **Acuíferos confinados:** Estos acuíferos se encuentran entre capas de roca impermeable, lo que los hace menos accesibles. El agua está bajo presión debido a

la capa impermeable superior y requiere pozos de mayor profundidad para su extracción.

- **Acuíferos semiconfinados:** Estos acuíferos se encuentran entre capas de roca parcialmente impermeable. El agua está bajo cierta presión, pero no tanto como en los acuíferos confinados.
- **Acuíferos colgados:** Se producen ocasionalmente cuando, por efecto de una fuerte recarga, asciende el nivel freático quedando retenida una porción de agua por un nivel inferior impermeable.

### 1.6.2. *Parámetros Hidrogeológicos*

Los parámetros hidrogeológicos de un acuífero, según Villanueva y Iglesias (1984), son:

#### a) **Permeabilidad (K):**

Es la propiedad de un material para facilitar el paso del agua a través de él. La permeabilidad se vincula con la interconexión de los poros y la capacidad de conducir agua.

La permeabilidad es una medida relacionada con la textura del acuífero; pero no representa como la transmisividad las posibilidades de ceder. Un acuífero con alta permeabilidad, pero de escaso grosor puede tener baja capacidad de transmisión.

$$K = \frac{\text{Caudal} \left(\frac{m^3}{\text{día}}\right)}{\text{Seccion}(m^2)} = K \cdot \frac{\Delta h(m)}{\Delta l(m)} = LT^{-1}$$

**Tabla 1.4:** Valores de la permeabilidad.

<b>VALORES DE LA PERMEABILIDAD</b>	
<b>K (m/día)</b>	<b>Calificación estimativa</b>
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy Alta

Fuente: Villanueva y Iglesias (1984).

#### b) **Transmisividad (T):**

Representa el agua volumétrica que fluye por una franja de acuífero de ancho unitario por unidad de tiempo y con la carga de un metro. Representando la capacidad que tiene

el acuífero para ceder agua. Partiendo de la definición, sus dimensiones son las siguientes:

$$T = \frac{L^3}{\frac{L}{T}} = L^2 T^{-2}$$

Donde:

T = dimensión tiempo

L = dimensión longitud

Lo más común es que transmisividad se mida en m<sup>2</sup>/día, m<sup>2</sup>/hora o m<sup>2</sup>/segundo. Sin embargo, la unidad que da cifras más manejables es el m<sup>2</sup>/día.

**Tabla 1.5:** Valores de la transmisividad.

<b>VALORES DE TRANSMISIVIDAD</b>	
<b>T (m<sup>2</sup>/día)</b>	<b>Calificación estimativa</b>
T<10	Muy baja
10<T<100	Baja
100<T<500	Media a alta
500<K<1000	Alta
T>1000	Muy Alta

Fuente: Villanueva y Iglesias (1984).

### c) Porosidad (m):

Es la medida de la relación de los espacios vacíos y el volumen total, el cual puede llenarse de agua. La porosidad determina la capacidad de almacenamiento de agua de un acuífero, se conoce como el cociente entre el volumen de huecos y su volumen total, se trata de un valor adimensional.

En tanto el concepto de **porosidad eficaz**. ( $m_e$ ) es el cociente entre el volumen de espacios vacíos conectados que presenta el acuífero que puede transmitir adecuadamente el agua freática, respecto al volumen total de este.

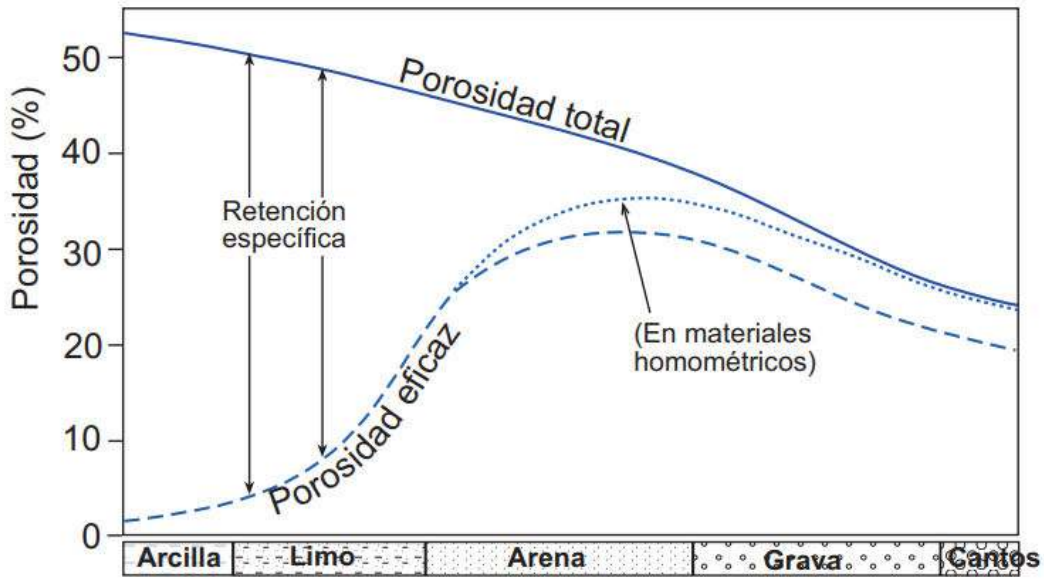
La porosidad puede clasificarse como primaria o secundaria. Se denomina porosidad primaria a la que resulta al originarse la formación geológica, mientras que la porosidad secundaria es que se origina posteriormente, como consecuencia de cualquier proceso geológico.

**Tabla 1.6:** Valores de la porosidad

### **VALORES DE LA POROSIDAD**

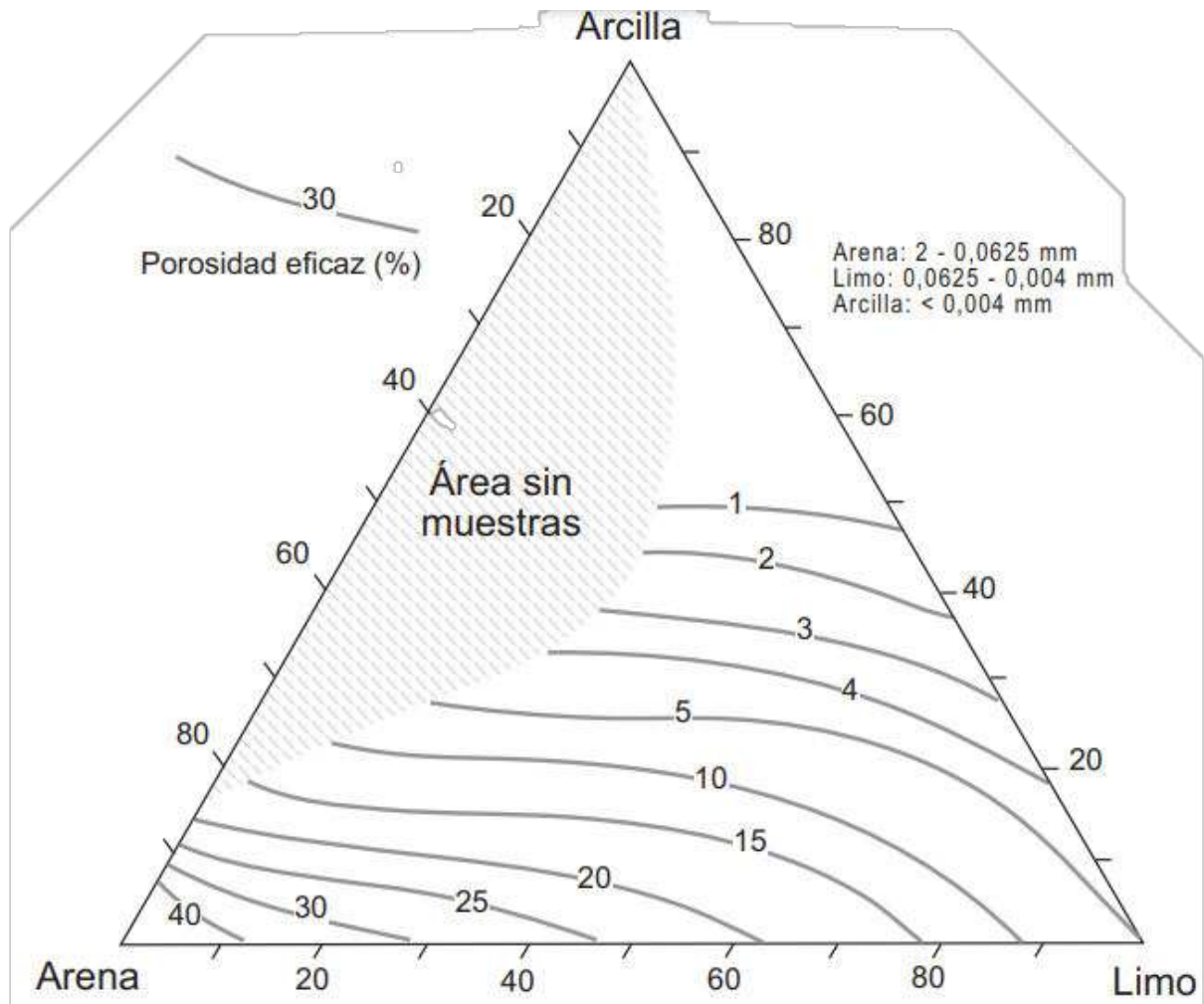
<b>Material</b>		<b>Porosidad total (%)</b>	<b>Porosidad eficaz (%)</b>
<b>Tipo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Media</b>	<b>Media</b>
	Granito	0.3	<0.2
Rocas masivas	Caliza masiva	8	<0.5
	Dolomía	5	<0.5
Rocas metamórficas		0.5	<0.5
	Piroclastos y tobas	30	<5
	Escorias	25	20
Rocas volcánicas	Pumitas	85	<5
	Basaltos densos, fonolitas	2	<1
	Basaltos vacuolares	12	5
	Pizarras sedimentarias	5	<2
Rocas sedimentarias consolidadas	Areniscas	15	10
	Creta blanda	20	1
	Caliza detrítica	10	3
	Aluviones	25	15
	Dunas	35	20
	Gravas	30	25
Rocas sedimentarias sueltas	Loess	45	<5
	Arenas	35	25
	Depósitos glaciares	25	15
	Limos	40	10
	Arcillas sin compactar	45	2

Fuente: Custodio y Llamas (1983).



**Figura 1.3:** Variación de la porosidad con la granulometría en materiales detríticos no consolidados

Fuente: modificado de Sánchez (2017).



**Figura 1.4:** Relación granulometría – porosidad eficaz

Fuente: modificado de Sánchez (2017).

**d) Coeficiente de almacenamiento (S):**

Es una medida del volumen de agua que un acuífero puede almacenar y liberar. Está relacionado con la porosidad y la compresibilidad del acuífero. También puede definirse como el volumen de agua que se libera de una columna de acuífero de base cuadrada unitaria por cada metro de carga. Por consiguiente, es adimensional. Para los acuíferos libres, el coeficiente de almacenamiento corresponde a la cantidad de agua que se libera un metro cúbico de acuífero; entonces es posible expresarlo como porcentaje y concuerda con la porosidad eficaz.

$$S = \frac{\text{Volumen de agua liberado}}{\text{Volumen total que ha disminuido la superficie piezométrica.}}$$

Se define almacenamiento específico del medio poroso del acuífero  $S_0$ [L-1] como el volumen de agua extraído, o añadido, a un volumen unitario de acuífero por unidad de disminución del nivel piezométrico.

$$S_0 = \frac{\Delta V_a}{V_t \Delta p}$$

Según Custodio y Llamas (1983). El almacenamiento específico ( $S_0$ ) es la cantidad de agua, por unidad de volumen, que es almacenada o liberada debido a la compresibilidad del esqueleto mineral y del agua en los poros debido a un cambio unitario en el nivel de agua en el acuífero. Este coeficiente se denomina de almacenamiento elástico. Este concepto se aplica tanto a acuíferos confinados como no confinados

El almacenamiento específico esta dado por la siguiente expresión:

$$S_0 = \rho_w * g * (\alpha + m_e * \beta)$$

Donde:

$\rho_w$  = es la densidad del agua ( $M/L^3$ )

$g$  = es la aceleración de gravedad ( $L/T^2$ )

$\alpha$  = es la compresibilidad del acuífero ( $1/(M/LT^2)$ )

$m_e$  = es la porosidad efectiva ( $L^3/L^3$ )

$\beta$  = es la compresibilidad del agua ( $1/(M/LT^2)$ )

el almacenamiento específico tiene unidades de 1/L, con valores inferiores a 0.0001

1/m

El coeficiente de almacenamiento (S)

Para un acuífero confinado

$$S = b * S_0$$

Donde:

b = es el espesor del acuífero (L)

El coeficiente de almacenamiento (S)

Para un acuífero libre

$$S = m_e + b * S_0$$

Donde:

b = es el espesor de la zona freática del acuífero (L)

En el caso de un sistema no confinado el valor de  $m_e$  es algunos órdenes de magnitud mayor que  $b*S_0$ , por lo que el coeficiente de almacenamiento se supone igual a  $m_e$ .

En el caso de una unidad geológica de grano muy fino la capacidad específica puede ser comparable a  $b*S_0$ . En general el coeficiente de almacenamiento es del orden de 0.02 a 0.30.

El volumen de agua drenado desde un acuífero, debido a una reducción en su carga hidráulica puede ser calculada como:

$$V_w = S * A * \Delta h$$

Donde:

$V_w$  = es el volumen de agua drenada.

A = es el área superficial de la zona drenada

$\Delta h$  = es la disminución promedio en la carga hidráulica

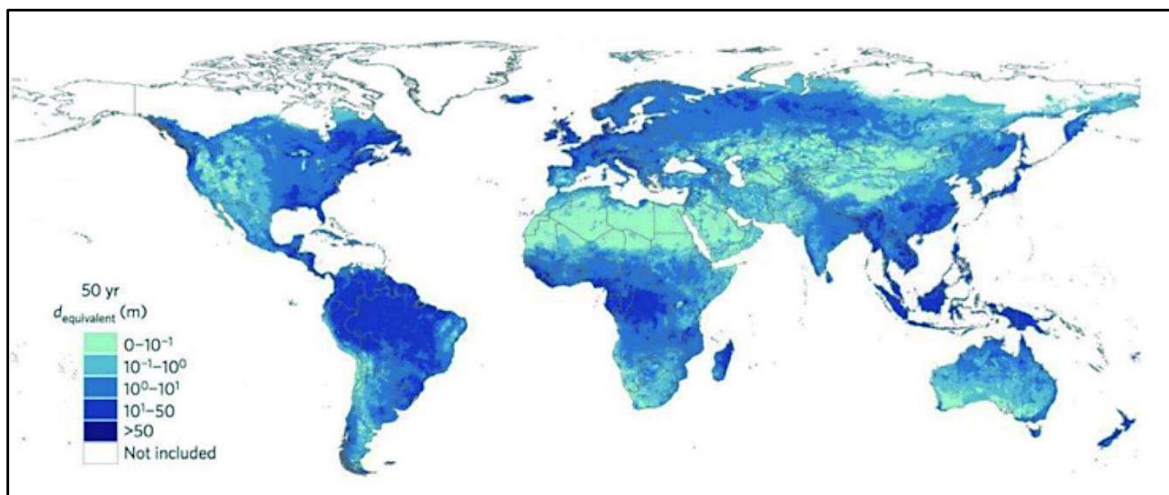
**Tabla 1.7:** Valores del coeficiente de almacenamiento

VALORES DEL ALMACENAMIENTO		
Tipo de material permeable	Forma de funcionamiento del acuífero	Valores de S (medio)
Kárstico	Libre	$2 \times 10^{-2}$
Caliza y dolomías jurásicas	Semiconfinado	$5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$5 \times 10^{-5}$
	Libre	$2 \times 10^{-2} - 6 \times 10^{-2}$

Calizas y dolomías cretácicas y terciarias	Semiconfinado	$10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \times 10^{-5}$
Poroso intergranular		
Gravas y arenas	Libre	$5 \times 10^{-2} - 6 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3}$
	Confinado	$10^{-4}$
Kársticos y porosos		
Calcarenitas marinas terciarias	Libre	$15 \times 10^{-2} - 18 \times 10^{-2}$

Fuente: Villanueva y Iglesias (1984).

## 1.7. MANEJO/GESTION DE LA RECARGA DE ACUÍFEROS



**Figura 1.5:** Distribución de agua moderna, utilizando datos de recarga de agua y niveles freáticos

Fuente: Escolero et al. (2017).

El manejo o gestión de la recarga artificial de acuíferos en adelante AR o MAR acrónimos en inglés de *aquifer recharge* y *managed aquifer recharge* respectivamente, implica una serie de técnicas diseñadas para el aprovechamiento mejorando el almacenamiento y la calidad de este, con una serie de procesos que modifican el ciclo hidrológico (Custodio y Llamas, 1983) y es considerado de gran efectividad en comparación con grandes obras hidráulicas (DINA MAR, 2010).

Además de la recarga natural, las actividades humanas también pueden incrementar la recarga de aguas subterráneas, esta se conoce como recarga antropogénica. De acuerdo con (Dillon et al., 2009) la recarga antropogénica se puede clasificar en tres categorías: 1) no

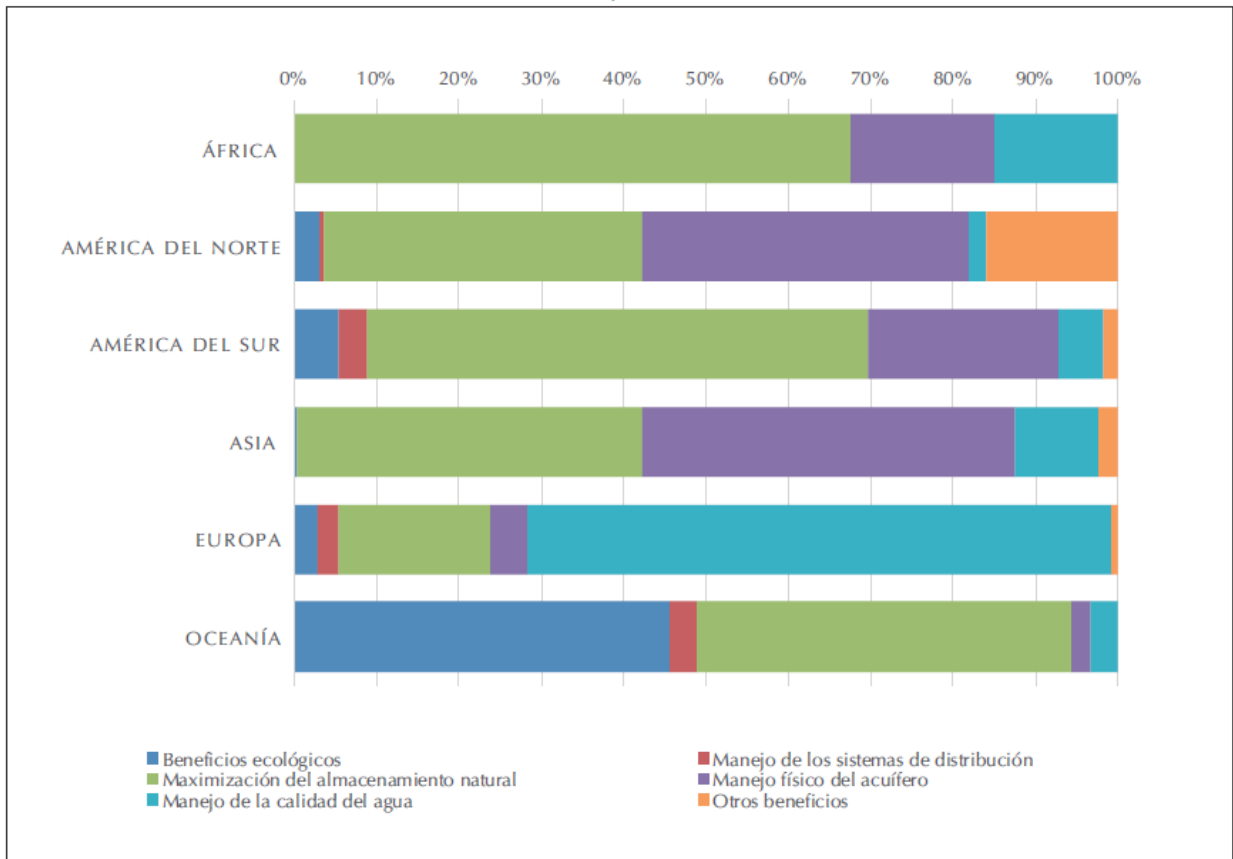
intencional, 2) no controlada y 3) controlada. La tercera categoría de la recarga antropogénica es lo que se denomina Manejo de la Recarga de Acuíferos (MAR, por las siglas en inglés de *Managed Aquifer Recharge*), la cual es definida por (Dillon, 2005) como el almacenamiento intencional y tratamiento del recurso hídrico en los acuíferos. Otros nombres con los que se ha conocido al MAR son: recarga artificial, recarga mejorada o aumentada, embancamiento de agua (*water banking*) y almacenamiento subterráneo sostenible.

El principal objetivo por el cual se han ejecutado la mayoría de proyectos MAR ha sido aumentar la disponibilidad de agua (Bouwer, 2002; Dillon, 2005; Dillon et al., 2009; Gale I., 2005), así como mejorar la calidad de las diferentes fuentes de agua con que se realiza la recarga. Otros beneficios que se pueden obtener al practicar el MAR son: mitigación de las inundaciones, reducción de la escorrentía y la erosión, mejora en la calidad de las aguas costeras, control de la subsidencia y aumento de los caudales mínimos en los ríos, entre otros (Gale I., 2005).

Entre sus aplicaciones más usuales suelen encontrarse las siguientes:

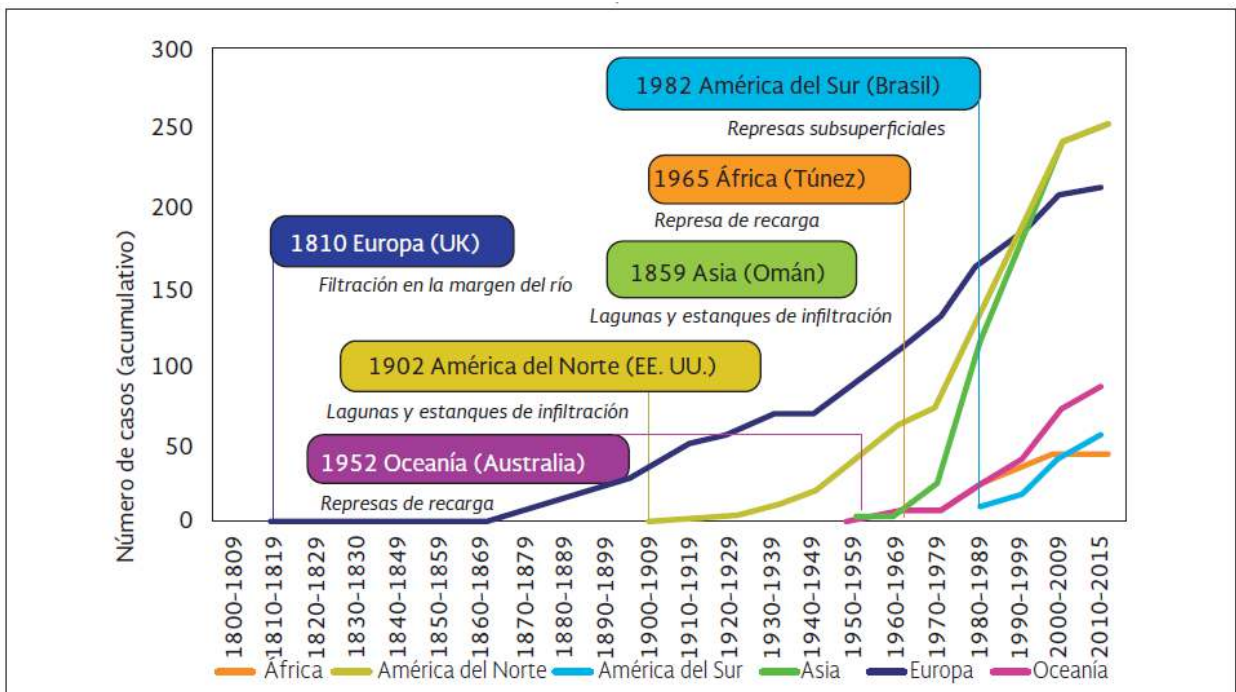
- i. Reducir la intrusión marina o salina continental
- ii. Impedir la subsidencia de la superficie de los terrenos.
- iii. Almacenar agua en el subsuelo.
- iv. Mejorar la calidad del agua en los acuíferos
- v. Usar los acuíferos para transmitir y depurar del agua
- vi. Reducción o eliminación del descenso del nivel piezométrico
- vii. Soporte de ciertos sistemas de manejo conjunto (barreras hidráulicas)
- viii. Mantenimiento hídrico de reservas ecológicas o medioambientales
- ix. Reducción de costos de transporte, almacenamiento o bombeo del agua
- x. Dilución del contenido de nitratos, cloruros u otros elementos químicos de las aguas de un acuífero.

El aumento de la disponibilidad del recurso hídrico es la principal tarea en la gestión del suministro de agua; esta se centra en equilibrar la oferta de los recursos disponibles con la demanda (Tuinhof y Heederik, 2003). Además, la demanda no solo es fluctuante en espacio y tiempo, sino también es diferente entre los distintos grupos de usuarios de agua. El MAR es una herramienta más en la gestión del recurso hídrico subterráneo, que no solo ofrece grandes oportunidades para aumentar la disponibilidad del recurso, sino que también se puede utilizar para mejorar la calidad de las aguas.



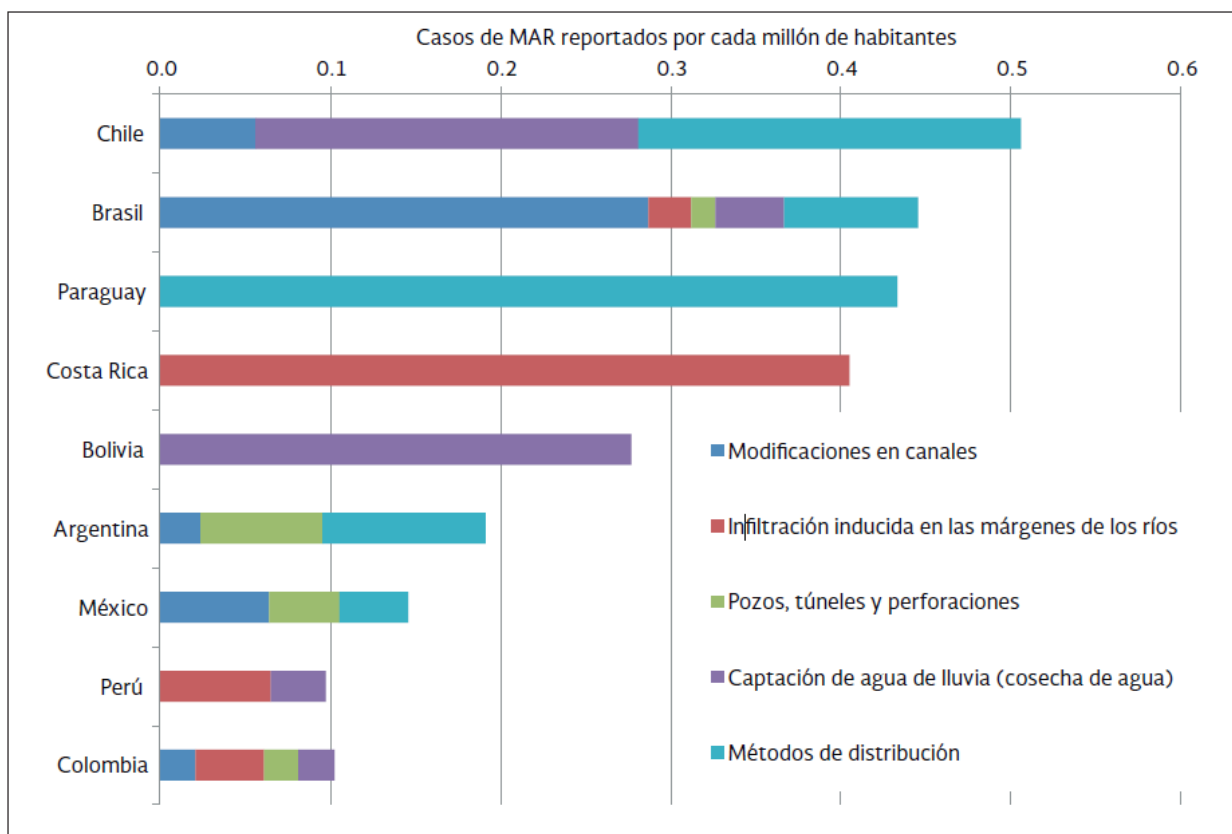
**Figura 1.6:** Principal objetivo reportado en los casos de MAR por continente

Fuente: Stefan y Ansems (2016).



**Figura 1.7:** Evolución de los proyectos de MAR por continente

Fuente: Stefan y Ansems (2016).



**Figura 1.8:** Casos de MAR por millón de habitantes y la técnica MAR en América Latina

Fuente: Bonilla Valverde et al. (2016).

### 1.7.1. Ventajas respecto al almacenamiento superficial

Históricamente, una forma de superar esta diferencia temporal entre la oferta y la demanda ha sido la construcción de obras de almacenamiento. En muchos de los sistemas de abastecimiento de agua se requiere de un almacenamiento anual, el cual se logra mediante la construcción de embalses superficiales. Estos embalses constan de una presa que intercepta el curso de agua y, consecuentemente, se crea un embalse detrás de la misma (Tuinhof y Heederik, 2003). Aparte de requerir grandes áreas, el agua de los embalses normalmente requiere de plantas de tratamiento y grandes sistemas de distribución y tienen significativas pérdidas por evaporación (Dillon, 2005). Otras limitaciones adicionales de los embalses son la seguridad de presas, el aumento de la sedimentación y los impactos ambientales y sociales (Tuinhof y Heederik, 2003).

Con un menor requerimiento de área, menores costos de mantenimiento e inversión y menores pérdidas por evaporación, las técnicas de MAR son una alternativa a los embalses superficiales bajo ciertas condiciones. Estas técnicas se pueden hacer con muchos propósitos, en diferentes tipos de acuíferos, con diversos tipos de agua y bajo condiciones sociales y ambientales muy diferentes.

En general, el agua meteórica y la superficial que no han transitado por focos potenciales de contaminación pueden ser aplicadas a la recarga de acuíferos sin restricciones en cuanto a su calidad. Por el contrario, la recarga de acuíferos con aguas residuales puede provocar deterioro de la calidad del agua subterránea y daños a la salud pública, especialmente cuando se pretende recuperar el agua de recarga para consumo humano o cuando cabe la posibilidad de que esta migre incidentalmente hasta captaciones que suministran agua para ese uso. Lo anterior representa una amplia gama de opciones para el manejo de la recarga de acuíferos. (Arreguín et al., 2008).

### **1.7.2. Viabilidad de un proyecto de recarga artificial**

Según el IGME - Instituto Geológico y Minero de España (2010):

Un proyecto de recarga artificial debe considerarse como una alternativa para satisfacer la demanda de agua. El estudio de los siguientes aspectos es básico de abordar un proyecto de recarga artificial:

- Análisis de demandas y usos actuales y futuros.
- Análisis de los elementos de regulación actual y futura, tanto de carácter superficial como subterránea.
- Evaluación de las hipótesis de gestión enfocada al aumento de la regulación, al incremento de la garantía, o a ambas conjuntamente.
- Aplicación de criterios y técnicas de utilización conjunta o gestión coordinada.

Una vez establecido que la recarga artificial de acuíferos puede constituir una herramienta útil, válida y competitiva dentro de un sistema de gestión, es preciso evaluar la viabilidad de la misma mediante el análisis y estudio, desde el punto de vista técnico, de los factores que se relacionan a continuación:

- Agua de recarga en origen.
- Características del acuífero receptor.
- Análisis de las diferentes alternativas de instalaciones de recarga, así como de las auxiliares de control, tratamiento y transporte del agua de recarga.
- Diferentes hipótesis de gestión de la recarga artificial. Su evaluación mediante modelación matemática.
- Agua recargada y destino final.
- Colmatación de las instalaciones de recarga.
- Evaluación económica, así como aspectos legislativos y de gestión.

### 1.7.3. Origen del agua de recarga

Según el IGME (2010):

En el estudio del agua de recarga en origen deben tenerse en cuenta tantos aspectos cuantitativos. Los resultados del estudio deben tener en cuenta la perspectiva espacial, así como la distribución temporal.

Una condición imprescindible a la hora de acometer cualquier tipo de recarga artificial de acuíferos, es contar con disponibilidad de agua excedentaria. Por tanto, es necesario realizar una detallada evaluación de aportaciones, tanto de origen superficial como subterráneo, y una posterior determinación de los excedentes hídricos disponibles para la recarga.

Durante la fase de estudio, deben analizarse los puntos:

- Naturaleza
- Localización de los puntos de toma
- Caudal disponible y régimen temporal.
- Características de calidad y variabilidad temporal.

El agua que se emplea en la recarga artificial tiene su origen, principalmente, en las siguientes fuentes:

- Agua superficial continua (curso fluvial permanente) o discontinua (escorrentía de las aguas de tormenta) tomada directamente o con un cierto grado de tratamiento.
- Agua residual doméstica que, con un cierto grado de tratamiento, es posible reutilizar o mezclar con agua procedente de otra fuente.
- Agua procedente de otro acuífero. Generalmente se refiere a la drenada a través de manantiales.
- Agua procedente de otras fuentes, como, por ejemplo, de drenajes de mina.

Teniendo en cuenta que no toda la aportación excedentaria de una cuenca es susceptible de aprovechamiento mediante recarga artificial de acuíferos. Es muy importante tener en cuenta que su distribución es desigual espacio temporalmente, presentando picos de caudal cuyo aprovechamiento total sería inviable por el coste de la infraestructura. Además, sería posible que la utilización de la instalación fuese muy reducida, además que pudiese quedar inutilizable con la ocurrencia de una gran avenida.

Para complementar la determinación de agua excedentaria disponible, es muy conveniente la realización de un análisis de las características de calidad y su variabilidad temporal, a partir de campañas de agua en el punto que constituye la fuente de toma, puesto que la presencia de agua en algunos cursos fluviales se caracteriza por una acusada discontinuidad y por importantes fluctuaciones en la cantidad del caudal circulante por los mismos.

En general el agua disponible para la recarga presenta una variabilidad para sus características físicas, químicas y biológicas, siendo necesario la disposición en el ingreso de las instalaciones de recarga de:

- Sistemas de pretratamiento, en las que depuren total o parcialmente de ciertos elementos o sustancias que deben ser controladas.
- Sistemas de seguimiento y control los que controlen el ingreso del agua de recarga con ciertos estándares de calidad a la instalación de recarga. El contenido de sedimentos es una característica del agua de recarga al que se debe realizar una exhaustiva vigilancia, siendo este un parámetro ligado directamente de la probable colmatación de las infraestructuras de infiltración.

En base a estas condiciones, la toma de muestras de agua en los cauces, debe planificarse siguiendo una secuencia que incluya un mínimo de muestreos coincidentes con períodos de lluvias, así como con el día o días posteriores al cese de las mismas, ya que el contenido por la pluviosidad, así como por la forma de producirse de esta. La mayor cantidad de aporte sólido se produce en tan solo muy pocos días, que corresponden a las ondas de avenida.

#### **1.7.4. Características del acuífero receptor**

Es posible realizarse la recarga artificial, prácticamente, en todo acuífero, que cuente con porosidad intergranular libre el cual pueda ser llenado con agua de recarga.

No obstante, no la totalidad de los acuíferos es propicia para llevar a cabo la recarga artificial, debido a que el desempeño de esta técnica está relacionada a los parámetros hidrogeológicos del acuífero receptor, así como al aprovechamiento que se viene realizando en este. En este sentido, es preciso indicar que el agua recargada debe permanecer en el acuífero el tiempo suficiente para permitir su utilización posterior, y su calidad final debe ser la adecuada a los usos a los que se destine.

Generalmente la recarga artificial se realiza en acuíferos libres con el nivel freático intermedia o próxima a la superficie, en manantiales conformados por calizas y dolomías

fracturadas y/o karstificadas. Sin embargo, es posible implementarlo en acuíferos confinados, mucho más profundos, o en formaciones menos permeables, o en consolidados de leve fracturación. Bajo estos escenarios, los volúmenes de recarga son menores, incluidos, también, normalmente, inconvenientes mayores en relación a la colmatación (De La Orden, 2006).

Para llevar a cabo actuaciones de recarga artificial con resultados positivos, es necesario conocer detalladamente los siguientes parámetros.

- Litología y aspectos geológicos de los materiales que integran el acuífero.
- Geometría del acuífero.
- Piezometría.
- Hidroquímica y calidad de agua
- Parámetros hidráulicos (transmisividad, permeabilidad, porosidad eficaz, coeficiente de almacenamiento, capacidad de infiltración).
- Velocidad del agua subterránea y direcciones preferenciales de flujo. Volúmenes utilizables o disponibles en el acuífero (reservas útiles).
- Zonas de drenaje a descarga natural.
- Relación río-acuífero.
- Usos, demandas y consumos de agua.
- Balance Hídrico.

#### ***1.7.5. Otros aspectos relacionados con la recarga artificial de acuíferos***

Según el IGME (2010):

Para llevar a cabo un proyecto de recarga artificial de acuíferos, es preciso estudiar globalmente los efectos, tanto positivos como negativos, que el mismo puede presentar durante su ejecución.

El método de la recarga tiene una base técnico-científica, pero también influyen decisivamente consideraciones legales, económicas, sociales y medioambientales.

- **Consideraciones económicas:**

Entre las principales imputaciones que se realizan a metodologías de la recarga gestionada de acuíferos se encuentra su alto coste. La evaluación económica de cualquier proyecto u obra de carga artificial se debe realizar teniendo en cuenta, entre otros, los siguientes costos:

- De investigación hidrogeológica.
- Del agua a recargar.

- De adquisición de los terrenos
- De instalaciones de pretratamiento
- De instalaciones auxiliares
- De instalaciones de recarga
- De instalaciones de control y seguimiento.
- De explotación y conservación.

En general, la explotación de las instalaciones superficiales precisa de grandes inversiones, mientras que sus costes de operación son normalmente reducidos. En cambio, las aguas subterráneas requieren de inversiones iniciales pequeñas, aunque sus costes de operación son mayores. La recarga artificial de acuíferos, al participar de elementos comunes a ambas técnicas de regulación, se verá afectada por factores económico relacionados tanto con proyectos superficiales como de aguas subterráneas (De La Orden, 2006).

- **Consideraciones legales:**

Para la ejecución de cualquier proyecto, ya sea de recarga artificial o de cualquier tipo, es necesario adaptarse a las exigencias impuestas por la ley, ya sea a nivel local, nacional e internacional (IGME, 2010).

- **Consideraciones sociales:**

La recarga gestionada de acuíferos es, en la actualidad, una metodología poco conocida por la mayoría de la población en el país, que tiende a estar más familiarizada con sistemas superficiales, el tratamiento de aguas residuales y los trasvases como principales métodos de gestión del agua. Sin embargo, esta técnica ofrece una alternativa adicional que podría contribuir a mitigar o mejorar los desafíos en la gestión hídrica, especialmente a medida que avanza su implementación e investigación.

Para asegurar la viabilidad y efectividad de la recarga gestionada, es fundamental que se desarrollen políticas de educación ambiental dirigidas a la población, que podría beneficiarse de esta práctica. Además, es importante explicar todos los aspectos legales relacionados con su implementación, incluyendo la propiedad del agua de recarga, la del agua recargada, el régimen de uso de esta agua, y la revisión de su consideración como vertido para facilitar su adopción.

La capacitación e información ambiental son esenciales para aumentar el conocimiento y fomentar una sociedad con actitudes y saberes necesarios para adoptar posturas analíticas y responsables en la conservación de los recursos naturales. Para que la recarga artificial tenga éxito en el futuro, es crucial que la comunidad la reconozca como una herramienta valiosa

en la gestión del agua. De lo contrario, su implementación podría verse seriamente afectada. (Fernandez et al., 2006).

- **Consideraciones medioambientales:**

Como en todos los proyectos de ingeniería la afectación al medio ambiente es uno de los aspectos más importantes a considerar a la hora de llevar a ejecución una obra. En el caso de los trabajos de recarga artificial, en la cual la evaluación de impacto ambiental podrá resultar de relevancia.

En resumen, la recarga gestionada de acuíferos, en el medio ambiente debería tener consecuencias positivas, y evitar la afección a bofedales, ríos y comunidades que pudieran verse perjudicadas por un mal empleo de la técnica como daños a cultivos y suministro de agua.

Aspectos medioambientales a tener en cuenta en un proyecto de recarga son, por ejemplo, el mantenimiento del caudal ecológico, la conservación del medio natural, la no afección a la calidad del agua subterráneas o aprovechamientos existentes, etc. (Rodríguez, 2013)

### 1.7.6. Métodos de recarga

Las maneras conocidas con las cuales se lleva a la práctica las tecnologías de MAR son diversas las responden a diversos requerimientos y objetivos de MAR (Figura 1.9); no obstante, se suele realizar la clasificación en dos grandes grupos descritos en la Tabla 1.8.

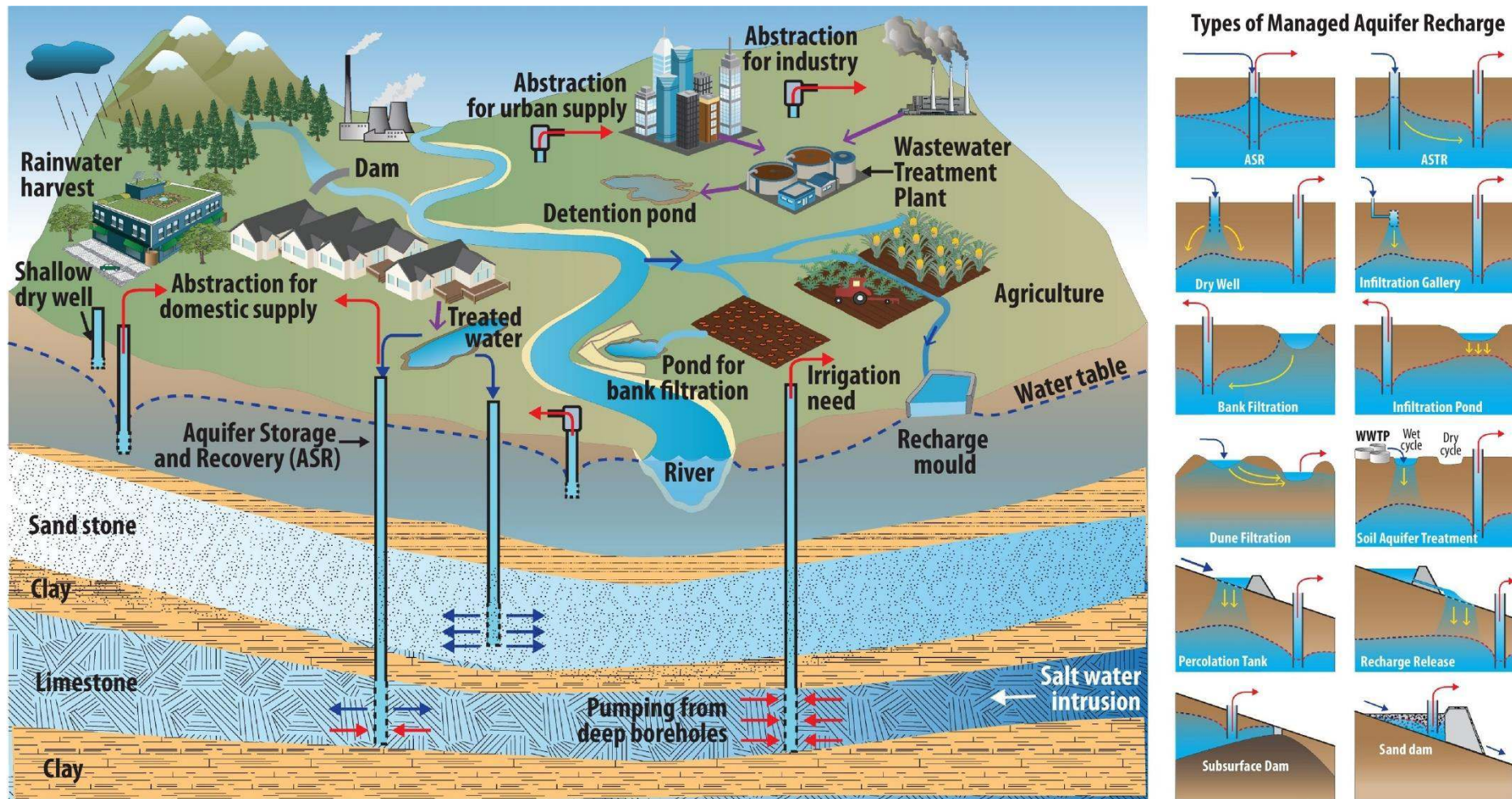
**Tabla 1.8:** Clasificación de técnicas MAR

<b>Técnica</b>	<b>Tecnología</b>	<b>Clasificación</b>
INFILTRAR AGUA	Infiltración Inducida	Cuencas y estanques de infiltración
	Distribución	Tratamiento de Suelo-Acuífero (TSA)
		Inundación controlada
		Zanjas y surcos (amunas)
		Riego
		Pozos de recarga someros
	Pozos	Almacenamiento y recuperación de acuíferos (ASR, por sus siglas en inglés de <i>Aquifer storage and recovery</i> )

		Almacenamiento, transferencia y recuperación de acuíferos (ASTR, por sus siglas en inglés de <i>Aquifer storage, transfer, and recovery</i> )
	Modificación del cauce de arroyos y ríos.	Estanques de percolación asociados a represas de control, gaviones Presas de arena para almacenamiento Presas subsuperficiales (subterráneas) Técnicas de ampliación de los cauces.
INTERCEPTAR AGUA	Filtración.	Filtro de bancos de río (RBF) Filtración Inter-dunar Barreras y diques (Qochas)
	Captación de agua de lluvia	Zanjas de infiltración, tinas ciegas, surcos, anillos de agua y terraplenes. Recolección de agua de lluvia en los tejados

---

Fuente: Mendoza, 2017.



**Figura 1.9:** Esquema de técnicas MAR basadas en el tipo de acuífero, topografía, uso de la tierra y usos previstos del agua recuperada.

Fuente: Alam et al., 2021.

**Tabla 1.9:** Comparativa entre los diferentes métodos de recarga artificial

---

**VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE RECARGA ARTIFICIAL**

---

<b>FACTOR\MÉTODOS</b>	<b>EN SUPERFICIE</b>	<b>EN PROFUNDIDAD</b>
Precio y disponibilidad del terreno	Precisa en general terrenos baratos, así como de grandes superficies si se quieren infiltrar importantes volúmenes de agua.	Más caro que los de superficie, pero precisan poco espacio.
Factores estéticos y ambientales	Pueden presentar problemas de proliferación de insectos y roedores. Requieren cercados y vallas para proteger a personas y animales.	Escasa afección estética y medioambiental.
Permeabilidad del acuífero	Se pueden emplear en acuíferos con permeabilidad de media a grande. Permeabilidades bajas exigen grandes extensiones de terreno para poder recargar volúmenes apreciables de agua.	Para acuíferos con permeabilidad variable. Se emplean de una forma generalizada en terrenos formados por una alternancia de niveles permeables e impermeables, o cuando existen niveles poco permeables entre la superficie del suelo y el acuífero.
Construcción de instalaciones	Pueden requerir acondicionamientos previos del terreno para nivelarlo, retirar coberturas poco permeables o arcillosas, retirar vegetación, obtener diques resistentes, construir estructuras para la conducción de agua, etc. La construcción de algunas instalaciones, como por ejemplo aquellas que llevan aparejadas un	Las construcciones de las instalaciones no tienen por qué resultar excesivamente complicadas.

---

---

	embalse de vaso permeable, pueden resultar muy complejas.	
Caudal recargable	El caudal recargable puede llegar a ser muy grande en las instalaciones en superficie.	El caudal recargable es notablemente inferior si se compara con el medio de las instalaciones superficiales.
Pérdidas por evaporación	En determinados casos puede producirse grandes pérdidas. Dependen del tamaño de las instalaciones. Los valores de evaporación en general no superan, en general, los 0.005 m/día.	Las perdidas por evaporación son nulas.
Requisitos de calidad del agua	No exige una gran calidad del agua, ya que se puede aprovechar el poder autodepurador de la zona no saturada.	Son exigentes en lo relativo a la calidad del agua, ya que se introduce directamente en el acuífero. A veces implica un coste de pretratamiento importante.
Colmatación	Los problemas derivados de la colmatación pueden ser importantes. El agua introducida debe presentar un bajo contenido de sólidos en suspensión.	Presentan una gran susceptibilidad a la colmatación.
Grado de depuración del agua en el terreno	Gran depuración del agua. Su paso por el medio no saturado es decisivo para conseguir una buena eliminación de contaminantes.	Pequeño grado de depuración del agua al pasar por el terreno, o nulo.

---

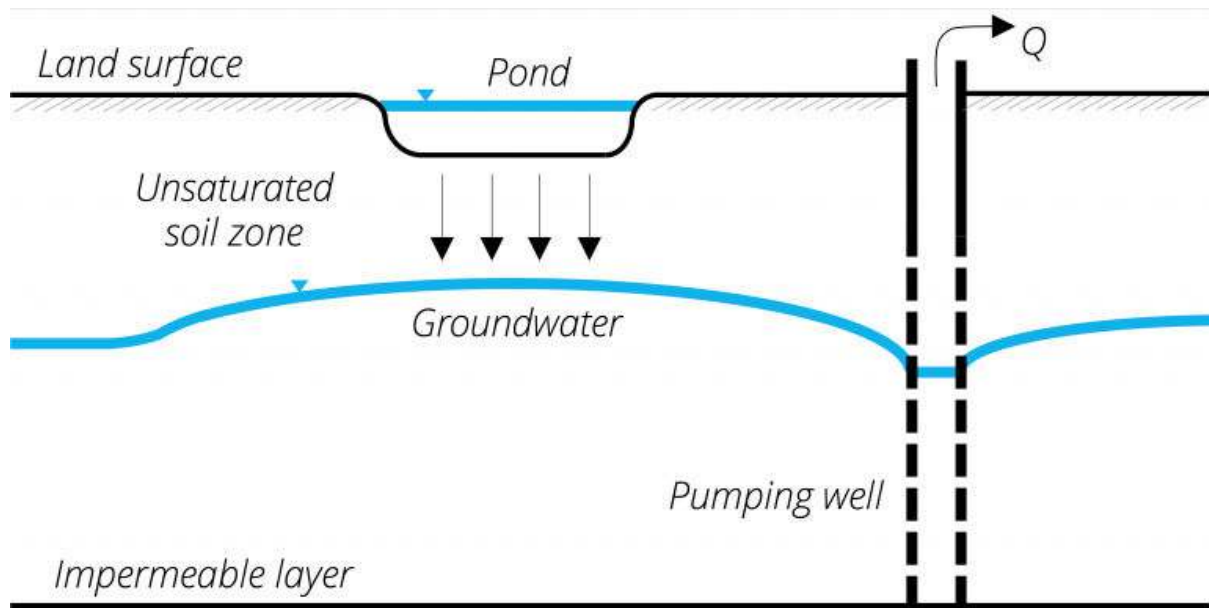
Fuente: DINA MAR, 2017.

### 1.7.6.1. Dispersión

#### a) Cuencas y estanques de infiltración

La dispersión superficial y específicamente los estanques de infiltración se encuentran entre las técnicas MAR más aplicadas en todo el mundo. Se basan disponer el agua en depresiones

naturales (cuencas o embalses) y estanques construidos exprofeso, donde el agua es conducida para ser infiltrada a través del subsuelo y ser almacenada en el acuífero (Figura 1.10). Durante el proceso de infiltración se propicia la formación de un domo, el cual conecta la base del estanque o embalse con el nivel estático. Al implementar la técnica es importante determinar si el subsuelo cuenta con las propiedades para infiltrar el agua que se desea infiltrar, así como delimitar la zona de influencia del domo de recarga con la finalidad de no afectar a terceros (Bouwer, 2002).



**Figura 1.10:** Diagrama de la operación de un sistema MAR de Cuencas y estanques de infiltración.

Fuente: INOWAS - Innovative Groundwater Solutions (2018).

**Tabla 1.10:** Descripción de la técnica MAR - Cuencas y estanques de infiltración

<b>Factor de viabilidad</b>	<b>Descripción</b>
Escala de capacidad típica del sistema	Hogar – Pueblo ( $\approx 10^2 \text{ m}^3/\text{año}$ – superior a $10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ ).
Geología	Acuíferos libres compuestos por rocas sedimentarias permeables y rocas cristalinas fracturadas.
Topografía	Terrenos planos o suavemente inclinados para mejorar la infiltración y reducir la obstrucción.
Suelos	Suelos permeables capaces de garantizar estándares de calidad del agua del acuífero objetivo.

Fuente de agua	Agua de río, agua pluvial, agua tratada, agua de lago.
Pretratamiento	Dependiendo de la calidad de la fuente de agua, principalmente para evitar obstrucciones.
Objetivo principal del MAR	Agrícola, doméstico e industrial.
Coste relativo	Medio bajo.

---

Ventajas y desventajas del sistema, adaptado de INOWAS (2018):

### **Ventajas**

- Baja demanda de infraestructura.
- Infiltración de grandes cantidades de agua a un coste y mantenimiento relativamente bajos.
- Procedimientos antiobstrucción relativamente sencillos.
- Los contaminantes contenidos en las fuentes de agua pueden ser eliminados por el suelo.

### **Limitaciones**

- Puede aplicarse únicamente a acuíferos libres.
- Requiere grandes superficies planas permeables.
- Potencial de enfermedades relacionadas con las aguas superficiales.
- Posible contaminación del agua.
- Evaporación potencial (pérdidas de agua).

#### **b) Tratamiento de Suelo-Acuífero (TSA)**

El método de tratamiento suelo-acuífero [TSA o por las siglas en inglés de Soil-Aquifer Treatment (SAT)] es utilizado para mejorar la calidad química, utilizando el suelo como filtro para eliminar organismos patógenos, estabilización de parámetros químicos, absorción de compuestos orgánicos y reducción de antibióticos, entre otros. La técnica permite tratar grandes volúmenes de agua (140,000 hm<sup>3</sup>/año, (Cikurel et al., 2012)), por lo que se requiere contar con grandes extensiones de terreno para los estanques de infiltración.

El tratamiento del acuífero del suelo es una tecnología en la que el agua se recarga en el agua subterránea mediante la percolación del suelo en condiciones controladas (Figura 1.11). Durante la percolación, se producen procesos naturales de filtración del suelo que mejoran la calidad del agua de origen al eliminar nutrientes y patógenos. Esta técnica requiere

condiciones de suelo no saturado que se logran mediante esparcimiento superficial intermitente. El objetivo de este método está en la mejora de la calidad del agua recargada (INOWAS, 2018).

El TSA permite el reúso del agua recuperada con fines agrícolas, pero existen variantes donde es posible establecer un sistema de barrera hidráulica y extraer, en el mismo horizonte, el agua subterránea del acuífero y utilizarse para suministro público urbano (Cikurel et al., 2012).

**Tabla 1.11:** Descripción de la técnica MAR - Cuencas y estanques de infiltración

<b>Factor de viabilidad</b>	<b>Descripción</b>
Escala de capacidad típica del sistema	Aldea - Pueblo ( $\approx 10^4 \text{ m}^3/\text{año}$ – superior a $10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ ).
Geología	Acuíferos libres compuestos por rocas sedimentarias permeables.
Topografía	Preferiblemente terreno plano o con pendiente suave, pero las características de la pendiente pueden interrumpirse para mejorar la infiltración.
Suelos	Suelos permeables capaces de garantizar estándares de calidad del agua del acuífero objetivo.
Fuente de agua	Aguas residuales tratadas, aguas pluviales.
Pretratamiento	Se requiere tratamiento previo.
Objetivo principal del MAR	Mejora de la calidad del agua.
Coste relativo	Medio-alto.

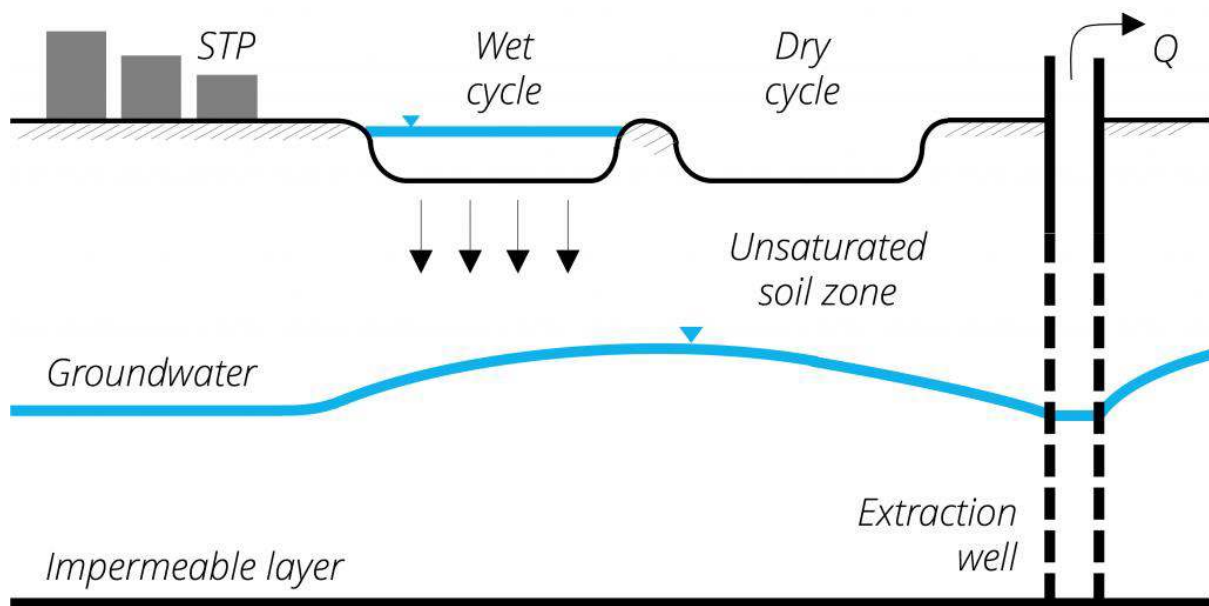
Ventajas y desventajas del sistema, adaptado de INOWAS (2018):

#### **Ventajas**

- Tratamiento de aguas regeneradas a través del suelo.

#### **Limitaciones**

- Es necesario garantizar condiciones de suelo no saturado.
- Es necesario controlar los procesos para monitorear la mejora de la calidad.
- Altos costos de mantenimiento.
- Riesgo de obstrucción.

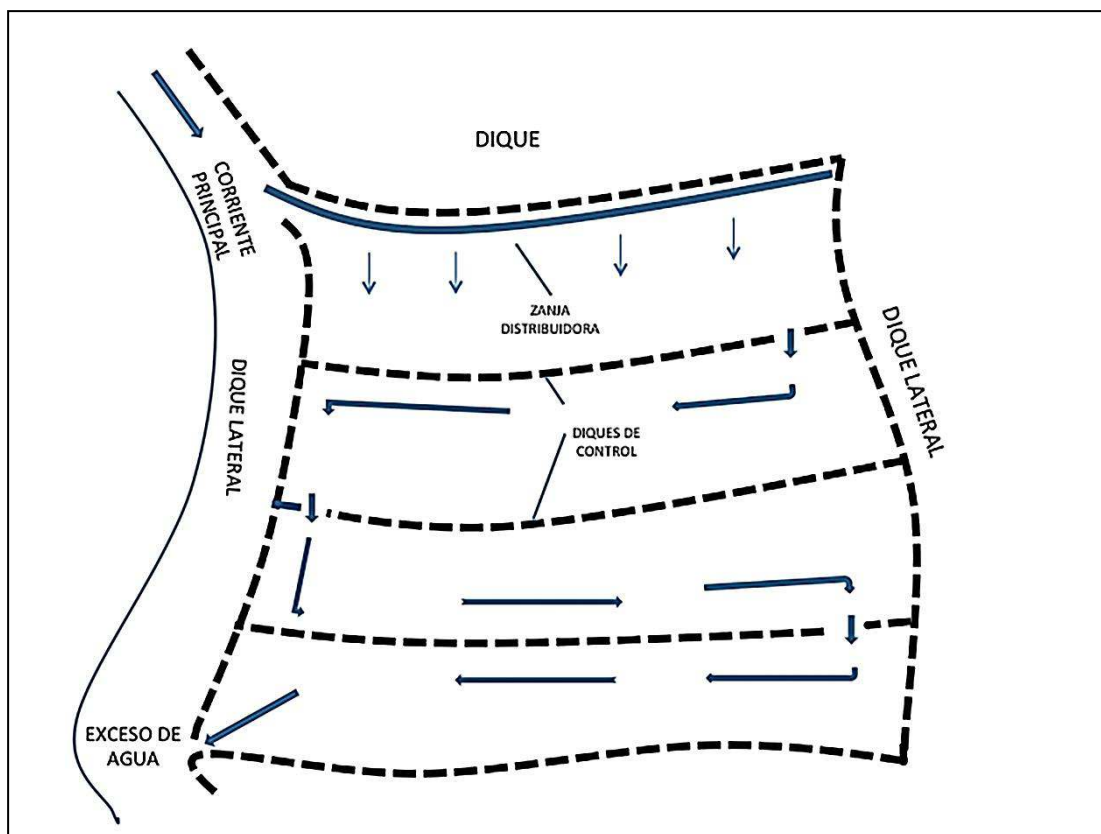


**Figura 1.11:** Diagrama de la operación de un sistema MAR de Tratamiento de Suelo-Acuífero (TSA).

Fuente: INOWAS., 2018.

### c) Inundación controlada

La inundación controlada, utiliza como fuente una corriente superficial de la cual se conduce un volumen controlado para ser esparcido en terrenos inundables (Figura 1.12). Las derivaciones e inundaciones se controlan con un sistema de represas, diques, zanjas o una combinación de estas, diseñadas para disponer un volumen calculado de flujo (Kowsar, 2011).



**Figura 1.12:** Diagrama de la operación de un sistema MAR de inundación controlada de tierra.

Fuente: modificado de Jensen (1981).

Las inundaciones como técnica MAR se utilizan cuando el exceso de agua del río está disponible durante la temporada de caudales altos o cuando es necesario gestionar las inundaciones. El sistema utiliza infiltración pasiva para entregar y difundir el agua de recarga que luego se infiltra a través de la zona vadosa hasta el acuífero subyacente. Estos sistemas pueden combinar muchos beneficios, como protección contra inundaciones, preparación para sequías, remediación de acuíferos y restauración de ecosistemas. Sin embargo, es necesario mantener disponibles tierras (a menudo muy demandadas) para permitir inundaciones periódicas. Por lo tanto, es necesario establecer sistemas de compensación para los propietarios de tierras (INOWAS, 2018).

Las ventajas de la inundación controlada recaen en costos bajos de construcción y mantenimiento y en su adaptabilidad a zonas rurales donde existen sitios disponibles para inundar. El aprovechamiento del agua infiltrada influye para cubrir de forma total o parcial la demanda local. Otro beneficio, aunque indirecto, es en el medio ambiente. La mayor desventaja es la sedimentación, que ocasiona una disminución en la capacidad de infiltración de los terrenos inundados. Dentro de los esfuerzos que deben realizarse para mantener la inundación controlada están: el control del crecimiento de la vegetación, la presencia de

agroquímicos, la escarificación y la elevación de los niveles de sales en el suelo (Kowsar, 2011).

**Tabla 1.12:** Descripción de la técnica MAR - Tratamiento de Suelo-Acuífero (TSA)

<b>Factor de viabilidad</b>	<b>Descripción</b>
Escala de capacidad típica del sistema	Hogar – Pueblo ( $\approx 10^2 \text{ m}^3$ /año – $\approx 10^6 \text{ m}^3$ /año).
Geología	Acuíferos libres compuestos por rocas sedimentarias permeables.
Topografía	Preferiblemente terreno llano o con pendiente suave, cercano a ríos.
Suelos	Suelos permeables capaces de garantizar estándares de calidad del agua del acuífero objetivo.
Fuente de agua	Agua de río.
Pretratamiento	Ninguno.
Objetivo principal del MAR	Agricultura. Gestión del riesgo de inundaciones.
Coste relativo	Bajo.

Ventajas y desventajas del sistema, adaptado de INOWAS (2018):

### **Ventajas**

- La gestión del riesgo de inundaciones como beneficio.
- Mejora del ecosistema.
- Se podrán utilizar amplias zonas para la recarga de acuíferos.

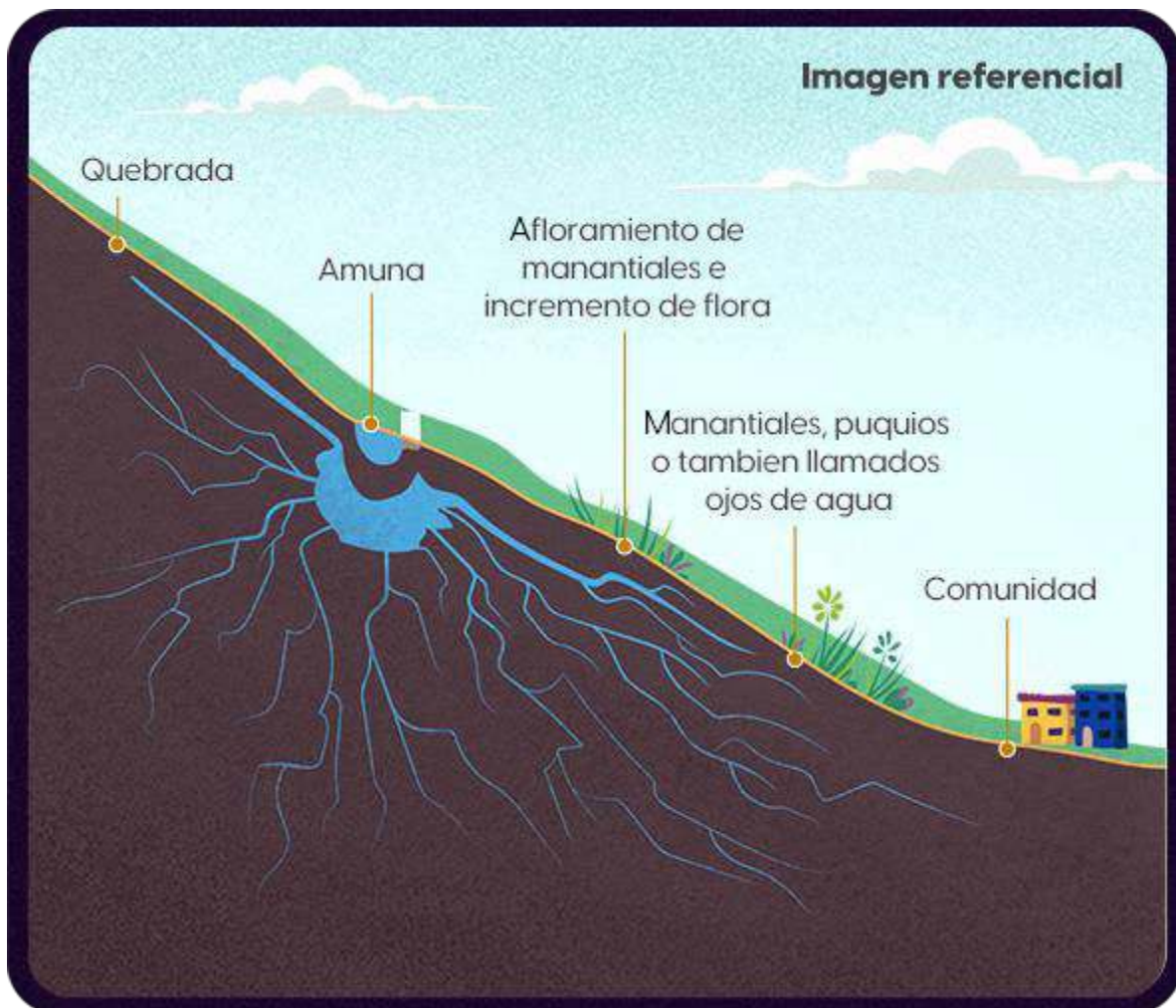
### **Limitaciones**

- Puede aplicarse únicamente a acuíferos libres.
- Competencia con otros usos del suelo a lo largo de los ríos.
- Fuente de agua poco confiable.
- Potencial de contaminación del suelo y acuíferos con nutrientes y concentración de sal en el perfil del suelo.

#### **d) Zanjas y surcos (amunas)**

Las amunas son un sistema ancestral de recarga artificial del acuífero, son construidas con piedra impermeable y canales de infiltración permeables, que permiten que el agua se filtre en el subsuelo durante la temporada de lluvias. A este proceso se le conoce como siembra de agua, ya que posibilita que las comunidades puedan cosechar el recurso hídrico en épocas de estiaje, es decir, cuando no hay lluvia (Fondo de Agua para Lima y Callao – AQUAFONDO, 2019)

Las amunas captan el agua desde las quebradas y la conducen a través de ellas en su terreno permeable, lo que permite que el agua filtre en el subsuelo durante la temporada de lluvias, esto es lo que se conoce precisamente como siembra de agua (Figura 1.13). Estudios geológicos y científicos demuestran que, a través de la infiltración, el agua recogida por las amunas puede llegar más allá de una comunidad, incluso hasta las ciudades. (AQUAFONDO, .2019).



**Figura 1.13:** Diagrama de la operación de un sistema MAR de zanjas y surcos (amunas).

Fuente: AQUAFONDO (2019).

Las zanjas, surcos o drenajes son estructuras puntuales o lineales que permiten que el agua de recarga se infiltre hasta el acuífero que se encuentra debajo. Suelen ser estructuras poco profundas, de fondo plano y poco espaciadas que se excavan. Este método de dispersión se utiliza principalmente en terrenos irregulares para recolectar y distribuir el agua o en áreas donde hay una capa impermeable en el perfil superior del suelo. Estos métodos también incluyen el drenaje inverso, lo que significa que el agua de recarga fluye hacia una red de tuberías de drenaje perforadas desde donde se infiltra en el suelo (INOWAS, 2018).

**Tabla 1.13:** Descripción de la técnica MAR - Zanjas y surcos (amunas)

<b>Factor de viabilidad</b>	<b>Descripción</b>
Escala de capacidad típica del sistema	Hogar – Pueblo ( $\approx 10^2 \text{ m}^3$ /año – $\approx 10^6 \text{ m}^3$ /año).
Geología	Acuíferos libres compuestos por rocas sedimentarias permeables y rocas cristalinas fracturadas.
Topografía	Preferiblemente terreno llano o con pendiente suave. Las características de la pendiente se pueden interrumpir para mejorar la infiltración mediante el uso de estas tecnologías.
Suelos	Suelos permeables capaces de garantizar estándares de calidad del agua al acuífero objetivo. Las capas impermeables en el perfil superior del suelo pueden superarse mediante el uso de estas técnicas.
Fuente de agua	Agua de río, agua pluvial, agua tratada, agua de lago.
Pretratamiento	Dependiendo de la calidad de la fuente de agua.
Objetivo principal del MAR	Agrícola, doméstico e industrial.
Coste relativo	Medio - Bajo.

Ventajas y desventajas del sistema, adaptado de INOWAS (2018):

#### **Ventajas**

- Las estructuras se pueden instalar en terrenos irregulares.

- En el caso del drenaje inverso, las estructuras son independientes del uso del suelo y, como tales, son buenas soluciones para terrenos caros (uso combinado).

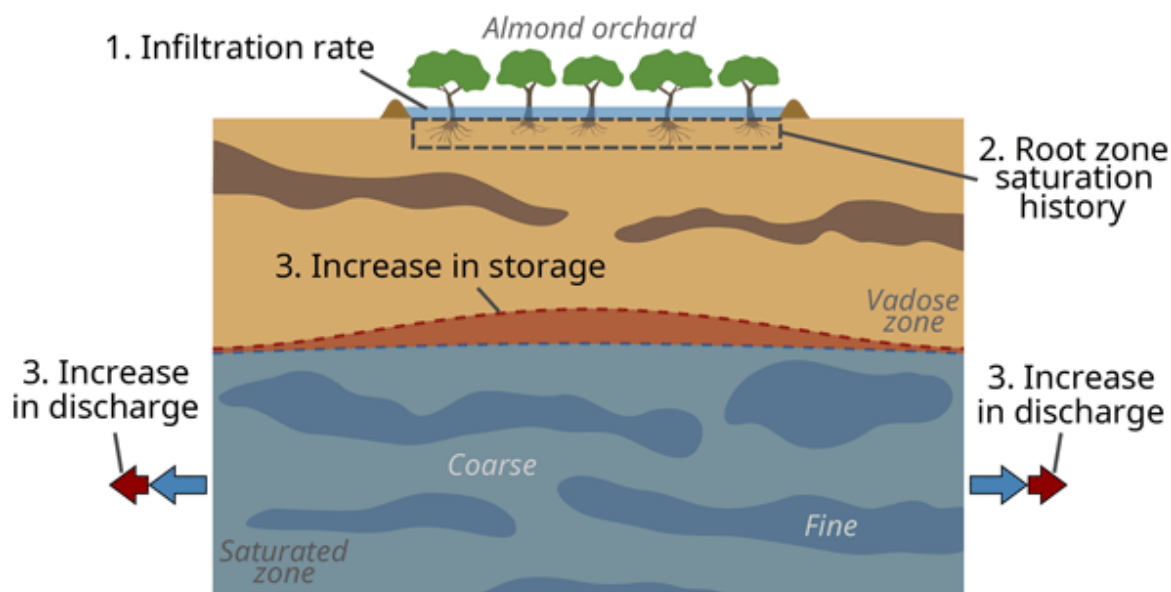
### **Limitaciones**

- Puede aplicarse únicamente a acuíferos libres.
- Requieren grandes áreas permeables.
- Potencial de enfermedades relacionadas con las aguas superficiales y reproducción de vectores.
- Posible contaminación del agua.

### **e) Riego**

La recarga por riego se aplica en las zonas bajo riego cuando no hay cultivos y existe agua en exceso; los excedentes de agua pueden ser aplicados en forma deliberada sobre las áreas de cultivo. Es un proceso dinámico que depende de la precipitación, la irrigación, la evapotranspiración, el uso de suelo, el tipo de suelo y el drenaje, así como su variabilidad temporal y espacial. Estudios que cuantifican el volumen de agua, utilizando la técnica, reportan que la recarga contribuye en un tercio del volumen total de la recarga (Ian et al., 1997).

El exceso de riego como técnica MAR se utiliza en tierras agrícolas irrigadas donde hay exceso de agua disponible y se distribuye sobre el área durante las temporadas de inactividad o sin riego para permitir la recarga del acuífero. El exceso de riego tiene posibles beneficios sobre otras técnicas tradicionales de MAR. Las áreas agrícolas irrigadas están disponibles en todo el mundo y ya cuentan con la infraestructura necesaria para conectar estas áreas a las fuentes de agua. Además, no compite con otros usos de la tierra y otorga a las tierras agrícolas un segundo propósito beneficioso. Los efectos de la agricultura con uso intensivo de agua (disminución de los niveles freáticos) se pueden amortiguar mediante la aplicación de este método (INOWAS, 2018).



**Figura 1.14:** Diagrama de la operación de un sistema MAR de riego.

Fuente: Perzan et al. (2023).

**Tabla 1.14:** Descripción de la técnica MAR – Riego

<b>Factor de viabilidad</b>	<b>Descripción</b>
Escala de capacidad típica del sistema	Hogar – Pueblo ( $\approx 10^2 \text{ m}^3$ /año – $\approx 10^6 \text{ m}^3$ /año).
Geología	Acuíferos libres compuestos por rocas sedimentarias permeables.
Topografía	Preferiblemente terreno plano o con pendiente suave, pero las características de la pendiente pueden interrumpirse para mejorar la infiltración del agua.
Suelos	Suelos permeables capaces de garantizar estándares de calidad del agua al acuífero objetivo.
Fuente de agua	Fuente de agua de riego.
Pretratamiento	Dependiendo de la calidad de la fuente de agua.
Objetivo principal del MAR	Agricultura.
Coste relativo	Bajo.

Ventajas y desventajas del sistema, adaptado de INOWAS (2018):

## **Ventajas**

- No hay competencia con otros usos del suelo.
- Costo relativamente bajo porque se puede utilizar la infraestructura de riego existente.
- Se podrán utilizar amplias zonas para la recarga de acuíferos.

## **Limitaciones**

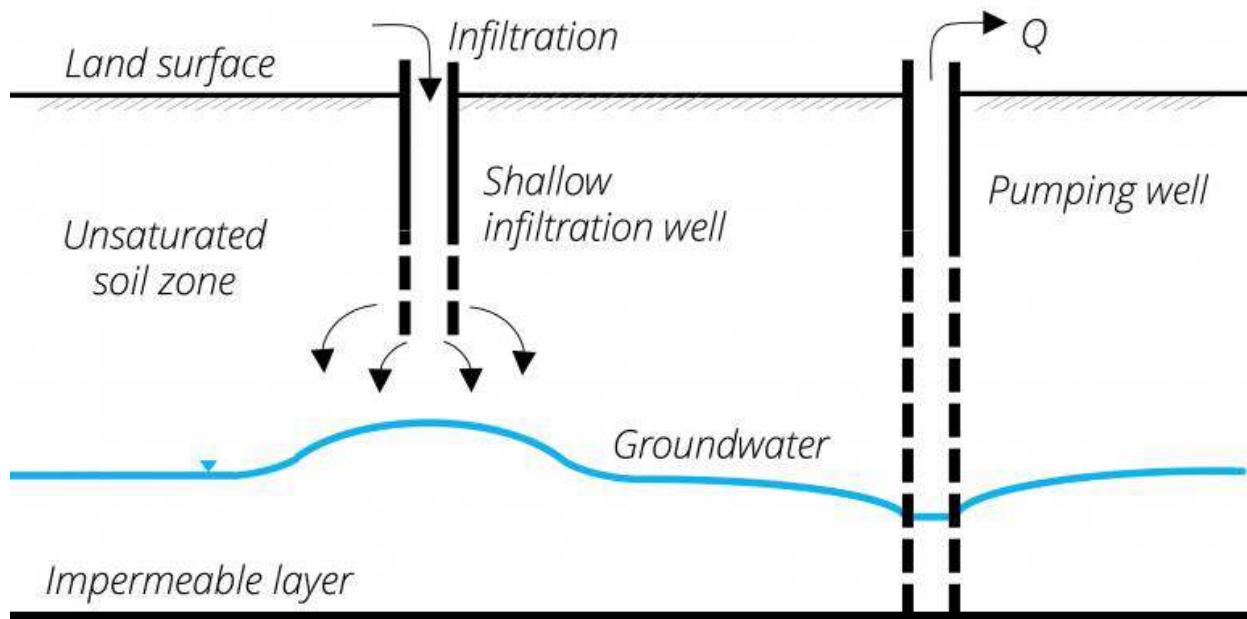
- Puede aplicarse únicamente a acuíferos libres.
- Puede aplicarse únicamente en tierras de cultivo donde se pueda proporcionar un exceso de agua.
- Depende de los ciclos de cultivo del sitio específico.
- Exigir a los productores que se comprometan con cuestiones de coordinación adicionales más allá del riego convencional para la agricultura.
- Potencial de contaminación del suelo y acuíferos con nutrientes y concentración de sal en el perfil del suelo.

### **1.7.6.2. Pozos**

#### **a) Pozos de recarga someros**

Las técnicas de recarga con pozos se orientan a infiltrar el agua a la zona saturada mediante perforaciones someras o profundas (Arreguín et al., 2008).

Los pozos someros de recarga se utilizan para acuíferos con niveles freáticos someros o en lugares donde las capas superficiales son de baja permeabilidad y por debajo existen materiales permeables, lo que impide la aplicación de las técnicas de distribución. La técnica permite la infiltración en dirección de las capas de mayor permeabilidad. Los pozos someros se construyen dentro de un estanque de infiltración, una zanja de infiltración o en el interior de un cauce natural (Figura 1.14). Recordemos que son un medio por el cual propiciamos que suceda la infiltración atravesando las capas de menor permeabilidad a capas con mayor permeabilidad (Wayne, 1981).



**Figura 1.15:** Diagrama de la operación de un sistema MAR Pozos someros.

Fuente: INOWAS (2018).

La infiltración a través de pozos, pozos o fosas poco profundas se practica habitualmente para recargar un acuífero freático donde no se pueden aplicar métodos de dispersión debido a la presencia de estratos superiores del suelo de poca permeabilidad. A menudo se utilizan pozos o fosas abandonadas que previamente se habían secado. El agua alimentada a la estructura llenará lentamente el acuífero. Es un método rentable porque la recarga se rige únicamente por el flujo de gravedad (INOWAS, 2018).

**Tabla 1.15:** Descripción de la técnica MAR - Pozos de recarga someros

<b>Factor de viabilidad</b>	<b>Descripción</b>
Escala de capacidad típica del sistema	Aldea – Pueblo ( $\approx 10^4 \text{ m}^3 / \text{año} - \approx 10^6 \text{ m}^3 / \text{año}$ ).
Geología	Acuíferos libres compuestos por rocas no consolidadas donde está presente una capa superficial de baja permeabilidad.
Topografía	Los terrenos planos pueden estar asociados con una menor erosión y menos obstrucción por sedimentos.
Suelos	No es relevante para este tipo de tecnología.
Fuente de agua	Agua de río, agua de lago, aguas residuales tratadas, aguas pluviales.

Pretratamiento	Se recomienda el tratamiento del agua para evitar obstrucciones y cumplir con las regulaciones locales sobre aguas subterráneas.
Objetivo principal del MAR	Recuperar los niveles freáticos.
Coste relativo	Bajo-Medio (se puede utilizar la infraestructura existente para reducir costos).

Ventajas y desventajas del sistema, adaptado de INOWAS (2018):

#### **Ventajas**

- Las instalaciones existentes pueden utilizarse para reducir los costos de construcción de nueva infraestructura.
- En el caso de pozos poco profundos, la recuperación de agua a través de la misma estructura reduce la obstrucción.

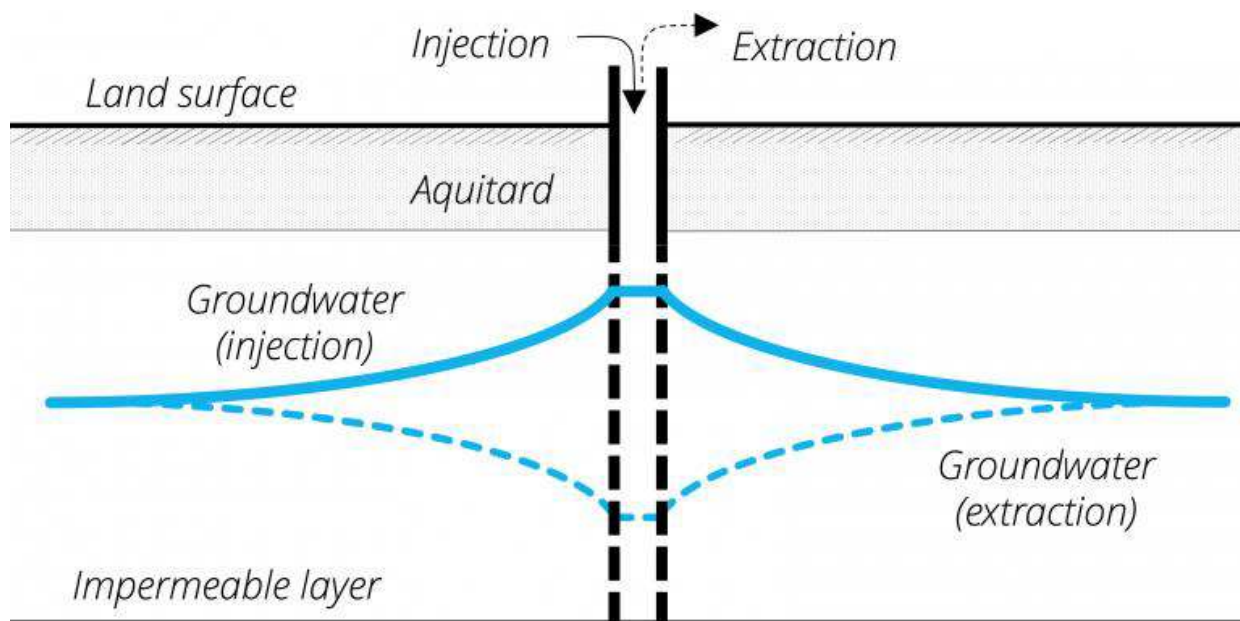
#### **Limitaciones**

- Altas exigencias de calidad del agua de origen.

### **b) Almacenamiento y recuperación de acuíferos (ASR)**

La técnica almacenamiento del agua en un acuífero y recuperación (ASR) considera el almacenamiento de agua en el acuífero utilizando un pozo para la introducción y recuperación de agua (DOF, 2009). La técnica se aplica en zonas donde existen horizontes gruesos de baja permeabilidad que yacen sobre el acuífero por recargar. La técnica ASR utiliza un pozo para recargar y extraer del agua. La desventaja de esta técnica radica en el punto de extracción, ya que el agua recuperada puede estar influenciada por la química del agua que originalmente se inyectó (Maliva y Missimer, 2011).

Para el almacenamiento y recuperación de acuíferos (ASR), se conecta un pozo profundo construido al acuífero objetivo y se utiliza tanto para la extracción como para la inyección de agua (Figura 1.15). Este tipo de MAR se utiliza principalmente donde hay estratos gruesos y de baja permeabilidad sobre el acuífero objetivo. La mayoría de los sistemas ASR actualmente en funcionamiento almacenan agua potable en el acuífero para recuperarla durante los picos de demanda o para transferirla de épocas de alta a baja disponibilidad (por ejemplo, temporada de lluvias a temporada seca) (INOWAS, 2018).



**Figura 1.16:** Diagrama de la operación de un sistema MAR Almacenamiento y recuperación de acuíferos (ASR).

Fuente: INOWAS (2018).

Los métodos de inyección de pozo exigen una alta calidad del agua que se va a inyectar, ya que se inyecta directamente en el acuífero. La superposición de estratos de suelo no tiene importancia y para esta tecnología sólo se requiere una pequeña superficie (INOWAS, 2018).

**Tabla 1.16:** Descripción de la técnica MAR - Almacenamiento y recuperación de acuíferos (ASR)

<b>Factor de viabilidad</b>	<b>Descripción</b>
Escala de capacidad típica del sistema	Aldea – Pueblo ( $\approx 10^4 \text{ m}^3 / \text{año} - \approx 10^6 \text{ m}^3 / \text{año}$ ).
Geología	Acuíferos confinados o no confinados compuestos por rocas no consolidadas.
Topografía	No es relevante para este tipo de tecnología.
Suelos	No es relevante para este tipo de tecnología.
Fuente de agua	Agua de río, agua de lago, agua de tormenta, agua subterránea, etc. Se espera que una alta calidad del agua evite la obstrucción y la contaminación del acuífero.
Pretratamiento	Altas necesidades de pretratamiento. El agua debe tratarse para evitar obstrucciones y

	cumplir con los estándares locales de aguas subterráneas.
Objetivo principal del MAR	Recuperar los niveles freáticos y servir de barrera a la intrusión salina.
Coste relativo	Bajo-Medio.

Ventajas y desventajas del sistema, adaptado de INOWAS (2018):

#### **Ventajas**

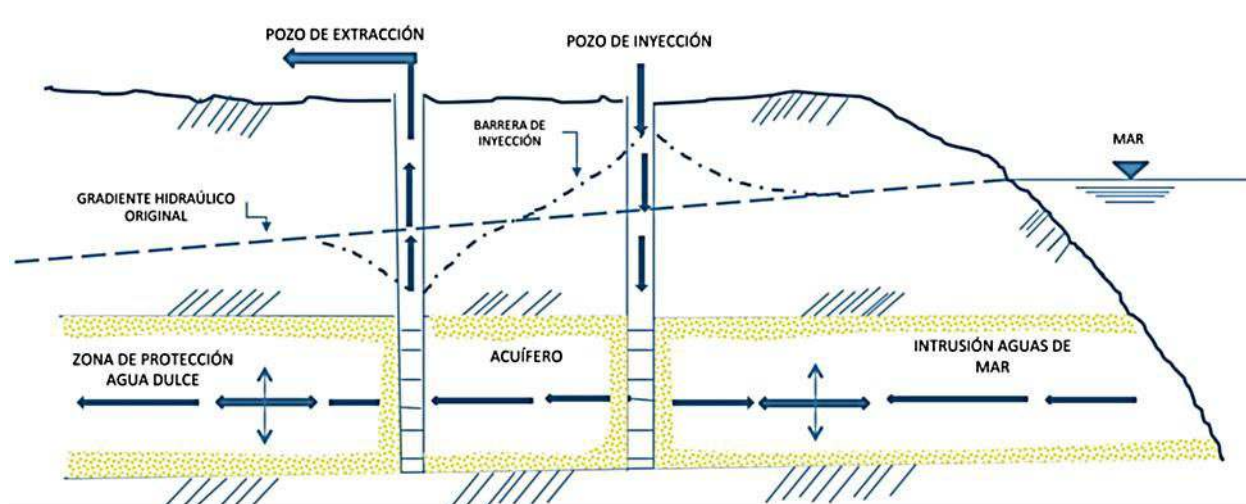
- La obstrucción se remedia parcialmente durante el ciclo de recuperación (extracción de agua).
- Infiltración de grandes cantidades de agua a un coste relativamente bajo.
- Se puede utilizar infraestructura de pozos no operativos para reducir costos. (Pozos que se habían secado)
- La recarga de aguas subterráneas no está determinada por las características de la superficie.

#### **Limitaciones**

- Diseño complejo, construcción, operación y mantenimiento.
- Se requiere una supervisión intensiva del rendimiento del sistema.
- Agua de fuente de alta calidad.

### **c) Almacenamiento, transferencia y recuperación de acuíferos (ASTR)**

Los pozos de almacenamiento del agua en un acuífero, transferencia y recuperación (ASTR). Se realiza mediante la introducción directa del agua a un pozo y la posterior extracción en otro pozo ubicado a una distancia razonable para incrementar el tiempo de viaje del agua en el acuífero (Figura 1.16). La técnica ofrece un beneficio de depuración del agua al pasar por los estratos permeables del acuífero. Este tipo de MAR se utiliza principalmente donde hay estratos gruesos y de baja permeabilidad por encima del acuífero objetivo. Las técnicas de inyección en pozos exigen una alta calidad del agua, ya que el agua recargada se inyecta directamente en el acuífero (INOWAS, 2018).



**Figura 1.17:** Almacenamiento, transferencia y recuperación de acuíferos (ASTR).

Fuente: modificado de Sheahan (1977).

La técnica ASTR ha sido también utilizada en la protección de los acuíferos para formar una barrera hidráulica que se consigue al inyectar agua al subsuelo a través de uno o varios pozos ubicados próximos a la zona costera. Una vez realizada la inyección se procede a la extracción del agua subterránea en otro pozo, ubicado tierra adentro. El efecto conjunto de los pozos de inyección/extracción (I/E) produce un traslape de la zona de influencia de cada pareja, propiciando que la trayectoria de una partícula sea modificada en su dirección, teniendo como consecuencia la ampliación de la zona de influencia de cada pareja I/E. El efecto conjunto de los pozos I/E equilibra el avance del frente salino. La forma de los conos I/E depende del gasto de extracción, del espaciamiento entre los pozos I/E, de las propiedades hidráulicas del acuífero y del flujo regional (Figura 1.16). Este tipo de aplicaciones permite la remediación del agua subterránea (Ponsin, 2014) y la caracterización de parámetros hidráulicos y de transporte (Burbery et al., 2013).

**Tabla 1.17:** Descripción de la técnica MAR - Almacenamiento, transferencia y recuperación de acuíferos (ASTR)

<b>Factor de viabilidad</b>	<b>Descripción</b>
Escala de capacidad típica del sistema	Aldea – Pueblo ( $\approx 10^4 \text{ m}^3 / \text{año} - \approx 10^6 \text{ m}^3 / \text{año}$ ).
Geología	Acuíferos confinados o no confinados compuestos por rocas no consolidadas.
Topografía	No es relevante para este tipo de tecnología.
Suelos	No es relevante para este tipo de tecnología.

Fuente de agua	Agua de río, agua de lago, aguas residuales tratadas, aguas subterráneas, etc. Se requiere una alta calidad del agua para evitar la obstrucción y la contaminación del acuífero.
Pretratamiento	El agua debe tratarse para evitar obstrucciones y cumplir con las regulaciones locales sobre aguas subterráneas.
Objetivo principal del MAR	Tratamiento de aguas de origen y recuperación de niveles freáticos.
Coste relativo	Medio-Alto.

Ventajas y desventajas del sistema, adaptado de INOWAS (2018):

#### **Ventajas**

- Infiltración de grandes cantidades de agua a un coste relativamente bajo.
- La recarga de aguas subterráneas no está determinada por las características de la superficie.
- Paso subterráneo como paso de tratamiento adicional.

#### **Limitaciones**

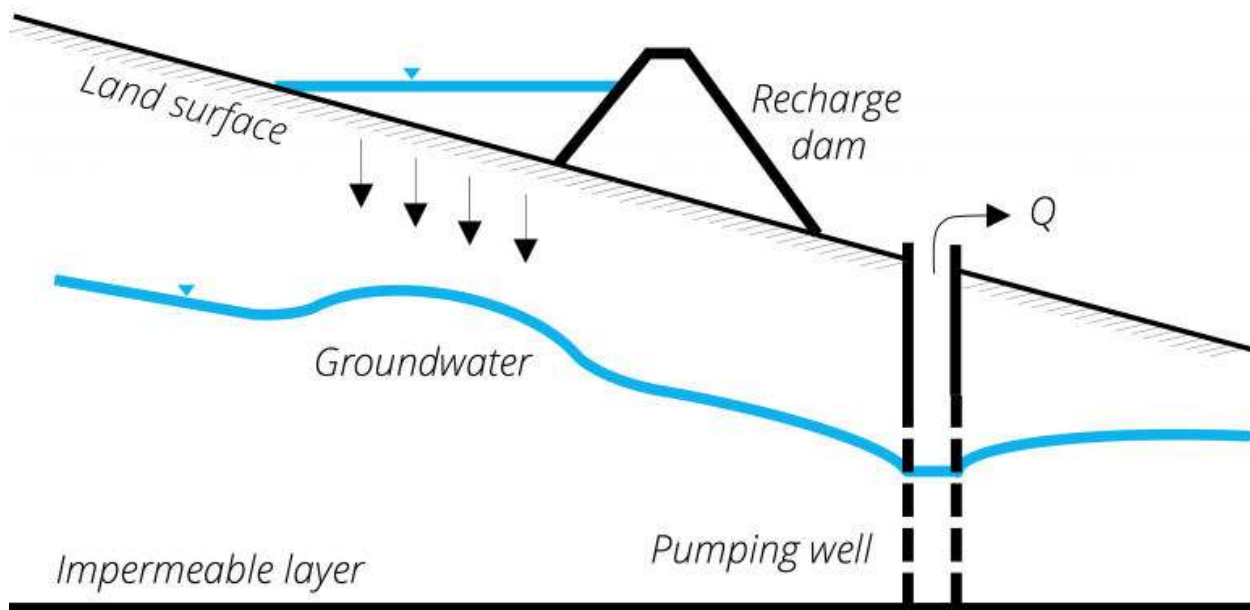
- Diseño complejo, construcción, operación y mantenimiento.
- Se requiere una supervisión intensiva del rendimiento del sistema.
- Altas exigencias de calidad del agua de origen.
- Alto potencial de obstrucción de pozos.

### **1.7.6.3. Modificación del cauce de arroyos y ríos**

#### **a) Estanques de percolación asociados a represas de control, gaviones**

Se utilizan predominantemente en regiones áridas, en arroyos y cauces arenosos de ríos que solo llevan agua en época de lluvias. Su propósito es principalmente mejorar o facilitar la infiltración en el suelo, almacenando o reteniendo el agua de las avenidas con el objetivo de recargar el acuífero subyacente (Arreguín et al., 2008).

Los estanques de percolación asociados a represas de control, gaviones: se construyen sobre el cauce del río y se diseñan para la recolección del escurrimiento superficial (Figura 1.17). La presa actúa como estanque de infiltración o el agua se conduce a través de tuberías para que se infiltre en el lecho del río aguas abajo, lo cual facilita la recarga del acuífero (Garcíadiego y Herreras, 2016).



**Figura 1.18:** Estanques de percolación asociados a represas de control, gaviones.

Fuente: INOWAS (2018).

Las presas de recarga son estructuras impermeables construidas en canales de arroyos que almacenan el agua de escorrentía mediante la creación de embalses superficiales aguas arriba de la presa. Pueden diseñarse para recargar el agua subterránea mejorando la infiltración del agua superficial detrás de la presa de recarga o mediante la liberación controlada de agua a través de la presa y la infiltración aguas abajo a través del lecho del río (INOWAS, 2018).

**Tabla 1.18:** Descripción de la técnica MAR - Estanques de percolación asociados a represas de control, gaviones.

<b>Factor de viabilidad</b>	<b>Descripción</b>
Escala de capacidad típica del sistema	Aldea – Pueblo ( $\approx 10^4 \text{ m}^3 / \text{año} - \approx 10^6 \text{ m}^3 / \text{año}$ ).
Geología	Acuíferos libres.
Topografía	Canales de drenaje naturales, principalmente en condiciones de arroyos intermitentes o efímeros.
Suelos	Lecho permeable del río, grava arenosa.
Fuente de agua	Agua de río.
Pretratamiento	Se pueden utilizar trampas de sedimentos para mitigar la obstrucción.
Objetivo principal del MAR	Almacenamiento estratégico de agua.

---

Coste relativo	Bajo-Medio (depende del tamaño de la presa).
----------------	--

---

Ventajas y desventajas del sistema, adaptado de INOWAS (2018):

### **Ventajas**

- Poca interferencia con otros usos del suelo.
- Almacenamiento de inundaciones repentinas.

### **Limitaciones**

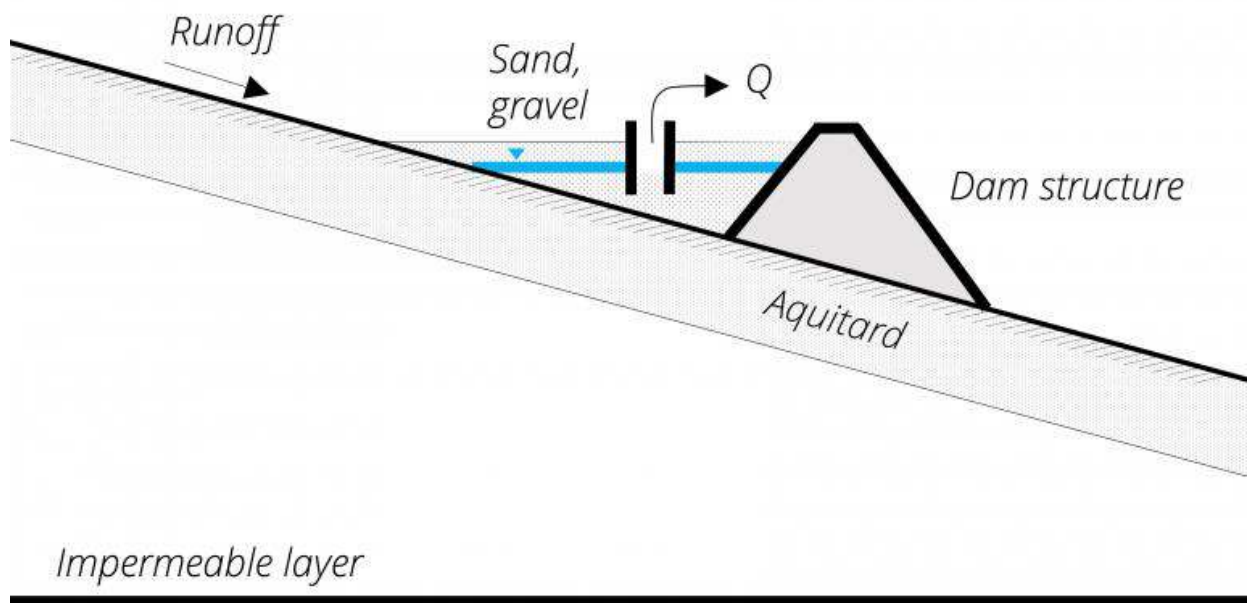
- La falla de la presa puede causar grandes daños aguas abajo de la presa.

#### **b) Presas de arena para almacenamiento**

Las presas de arena para almacenamiento, son utilizadas dentro del cauce de los ríos y arroyos, construyendo una cortina con mampostería. El vaso de almacenamiento, que genera la presa, es rellenado con arena y en su interior se almacena el agua reduciéndose así el proceso de evaporación (Arreguín et al., 2008).

Conforme avanza el tiempo, la obra se azolva y se sobre eleva la altura de la cortina. Para abastecer de agua a los pobladores se construye un pozo en la proximidad de la cortina (Figura 3.4). Este tipo de obras se han construido en Kenia, África, bajo una participación activa de la comunidad que, adaptándose a los cambios del clima, hace posible el éxito de proyectos que detonan un crecimiento económico regional (Mendoza, 2017).

Las presas de arena son estructuras de contención construidas sobre el suelo dentro de canales fluviales intermitentes. Durante los eventos de lluvia, el escurrimiento de aguas pluviales acumulará arena y grava detrás de la estructura de la presa. Esto crea un acuífero artificial aguas arriba de la presa que puede almacenar el agua de lluvia. Los embalses se llenarán durante las lluvias y almacenarán el agua en lugar de perderla en la cuenca (Figura 1.18). Los diques de arena pueden aumentar la disponibilidad de agua durante las estaciones secas, prevenir la evaporación del agua y protegerla de la contaminación. Son comunes en el África subsahariana y una tecnología viable para las comunidades rurales, ya que pueden construirse con materiales locales (INOWAS, 2018).



**Figura 1.19:** Estanques de percolación asociados a represas de control, gaviones.

Fuente: INOWAS (2018).

**Tabla 1.19:** Descripción de la técnica MAR - Presas de arena para almacenamiento.

Factor de viabilidad	Descripción
Escala de capacidad típica del sistema	Aldea – Pueblo ( $\approx 10^4 \text{ m}^3$ /año – $\approx 10^6 \text{ m}^3$ /año).
Geología	Rocas principalmente cristalinas con cauces arenosos.
Topografía	Canales de drenaje naturales con pendientes suaves.
Suelos	Cauces de arena.
Fuente de agua	Aguas pluviales.
Pretratamiento	No se utiliza ningún tratamiento previo.
Objetivo principal del MAR	Almacenamiento de agua.
Coste relativo	Bajo.

Ventajas y desventajas del sistema, adaptado de INOWAS (2018):

#### Ventajas

- Bajos costos de construcción.
- Bajo mantenimiento.
- No interferir con otros usos del suelo.

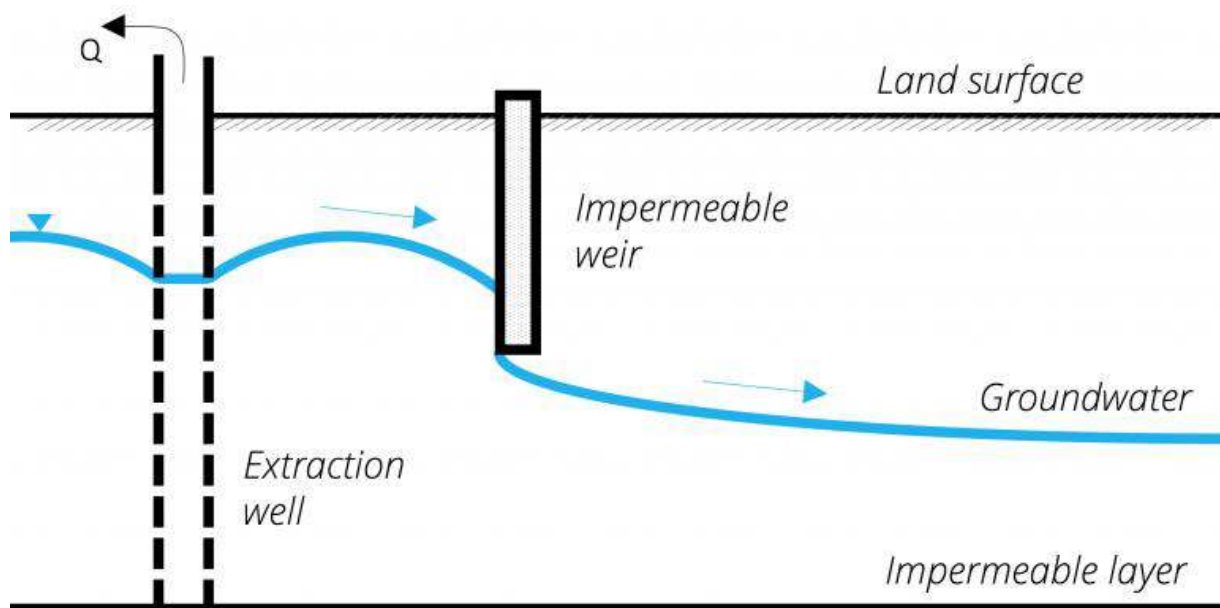
## Limitaciones

- Posibles conflictos de propiedad.
- Potencial de contaminación del agua.
- Tasas de infiltración relativamente pequeñas.

### c) Presas subsuperficiales (subterráneas)

Las presas sub-superficiales (subterráneas): Son estructuras destinadas a contener el flujo subterráneo de un acuífero natural o artificial mediante una barrera impermeable que origina la elevación del nivel freático. Se utilizan para generar un almacenamiento subterráneo que es aprovechado en riego u otros usos. Existen casos en los que las presas subterráneas cumplen una doble función: de almacenamiento, como se ha comentado, y, en el caso de encontrarse próximas a la línea de costa, de barrera que impide la intrusión del frente salino. (Mendoza, 2017).

Las presas subterráneas son barreras de baja permeabilidad que se construyen bajo tierra. Estas estructuras reducen o detienen el flujo lateral de agua subterránea para almacenar agua bajo tierra y elevar el nivel freático. Para construir presas subterráneas, se construye una zanja a través de un arroyo o valle hasta alcanzar la profundidad del lecho de roca o una capa de arcilla (Figura 1.19). Dentro de la zanja se construye un muro impermeable o de baja permeabilidad y luego se rellena la zanja con el material excavado (INOWAS, 2018).



**Figura 1.20:** Presas subsuperficiales (subterráneas).

Fuente: INOWAS (2018).

Las presas sub-superficiales no son profundas, por lo que se requiere de un acuífero libre que cuente con una zona no saturada somera y fronteras laterales que contengan la salida del flujo subterráneo. Implementar este tipo de obras requiere de una gestión integrada de agua superficial y subterránea, así como una organización de los usuarios del agua, ya que es necesario generar políticas operativas y de uso de suelo restrictivas, así como programas de impacto que protejan la fuente y el embalse subterráneo (Mendoza, Y. 2017).

**Tabla 1.20:** Descripción de la técnica MAR - Presas subsuperficiales (subterráneas).

<b>Factor de viabilidad</b>	<b>Descripción</b>
Escala de capacidad típica del sistema	Aldea – Pueblo ( $\approx 10^4 \text{ m}^3$ /año – $\approx 10^6 \text{ m}^3$ /año).
Geología	Acuíferos libres con capa impermeable situados a pocos metros bajo la superficie.
Topografía	Canales de drenaje naturales, principalmente en condiciones de arroyos intermitentes o efímeros.
Suelos	Arenas y gravas no consolidadas.
Fuente de agua	Agua de río.
Pretratamiento	No se utiliza ningún tratamiento previo.
Objetivo principal del MAR	Almacenamiento de agua.
Coste relativo	Bajo.

Ventajas y desventajas del sistema, adaptado de INOWAS (2018):

#### **Ventajas**

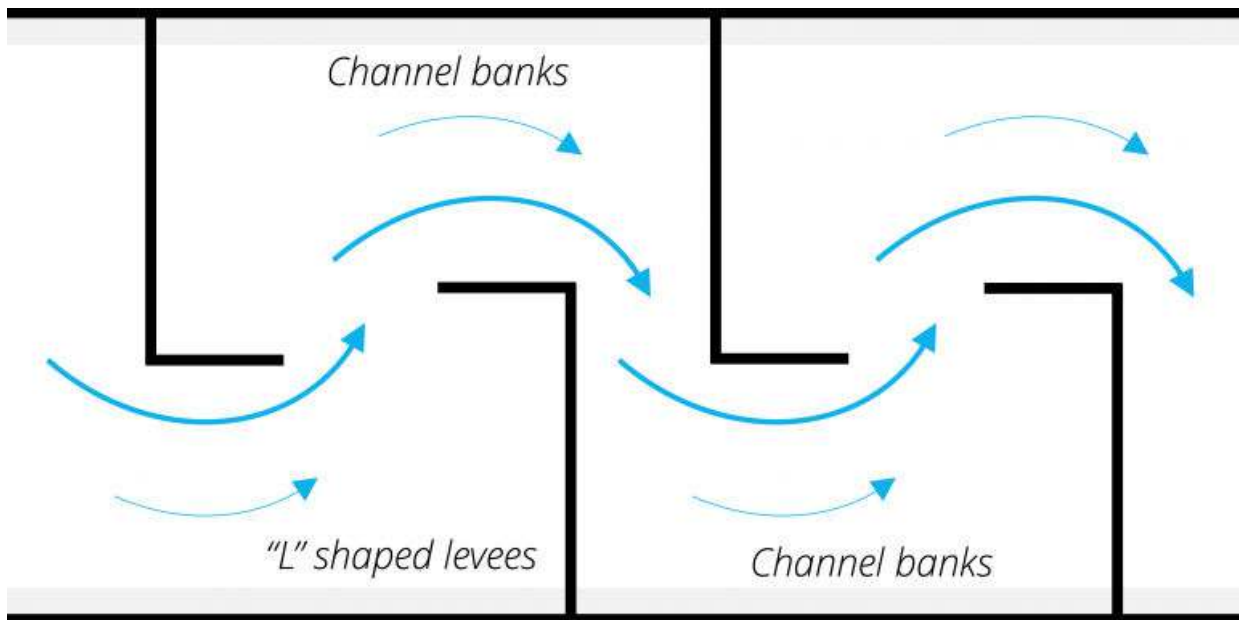
- Bajos costos de construcción.
- Bajo mantenimiento.
- No interferir con otros usos del suelo.

#### **Limitaciones**

- Posibles conflictos de propiedad.
- Tasas de infiltración relativamente pequeñas.
- El control de calidad de la presa puede resultar difícil.
- Es necesario que se cumplan características muy específicas del subsuelo.

#### **d) Técnicas de ampliación de los cauces**

La ampliación de cauces implica modificación al cauce natural de los ríos y arroyos con la finalidad de ampliar el área mojada y la capacidad de infiltración, retener la avenida disminuyendo la velocidad del agua o derivar un volumen de excedentes a zonas permeables que se encuentran dentro del cauce del río (Figura 1.20). La ampliación, nivelación, escarificación y el dragado de los cauces son ejemplos de esta tecnología (Mendoza, 2017). La expansión de canales agrupa tecnologías mediante las cuales el área mojada de un canal de drenaje o lecho de un río se incrementa artificialmente para mejorar la infiltración de agua al acuífero. El canal de drenaje se puede ampliar, nivelar, escarificar o dragar. El caudal del río también se puede modificar instalando diques en forma de L. La recarga se mejora aumentando el área de infiltración potencial y disminuyendo la velocidad del flujo (INOWAS, 2018).



**Figura 1.21:** Técnicas de ampliación de los cauces.

Fuente: INOWAS (2018).

Dentro de las modificaciones del cauce del río se tiene el uso de diques en forma de “L” que permite se modifique el patrón del flujo superficial dentro del cauce, teniendo por consecuencia la disminución de la velocidad del flujo en el río e incrementar la longitud del cauce, lo cual se traduce en más tiempo para que el agua se infiltre. La ventaja de utilizar diques es que los materiales de construcción se encuentran en el mismo cauce del río lo que propicia una disminución en el costo de construcción (Mendoza, 2017).

**Tabla 1.21:** Descripción de la técnica MAR - Técnicas de ampliación de los cauces.

Factor de viabilidad	Descripción
----------------------	-------------

Escala de capacidad típica del sistema	Aldea – Pueblo ( $\approx 10^4 \text{ m}^3 / \text{año} - \approx 10^6 \text{ m}^3 / \text{año}$ ).
Geología	Acuíferos libres.
Topografía	Canales de drenaje naturales con pendientes suaves.
Suelos	Lecho permeable, arena, grava.
Fuente de agua	Agua de río.
Pretratamiento	Se pueden utilizar trampas de sedimentos para mitigar la obstrucción.
Objetivo principal del MAR	Almacenamiento de agua.
Coste relativo	Bajo - moderado.

Ventajas y desventajas del sistema, adaptado de INOWAS (2018):

#### **Ventajas**

- Técnica de bajos costos.
- Diseño, operación y mantenimiento sencillos.

#### **Limitaciones**

- La tierra disponible a lo largo de los lechos de los ríos suele ser escasa.
- Potencial de obstrucción.
- Vulnerable a la destrucción durante las inundaciones.

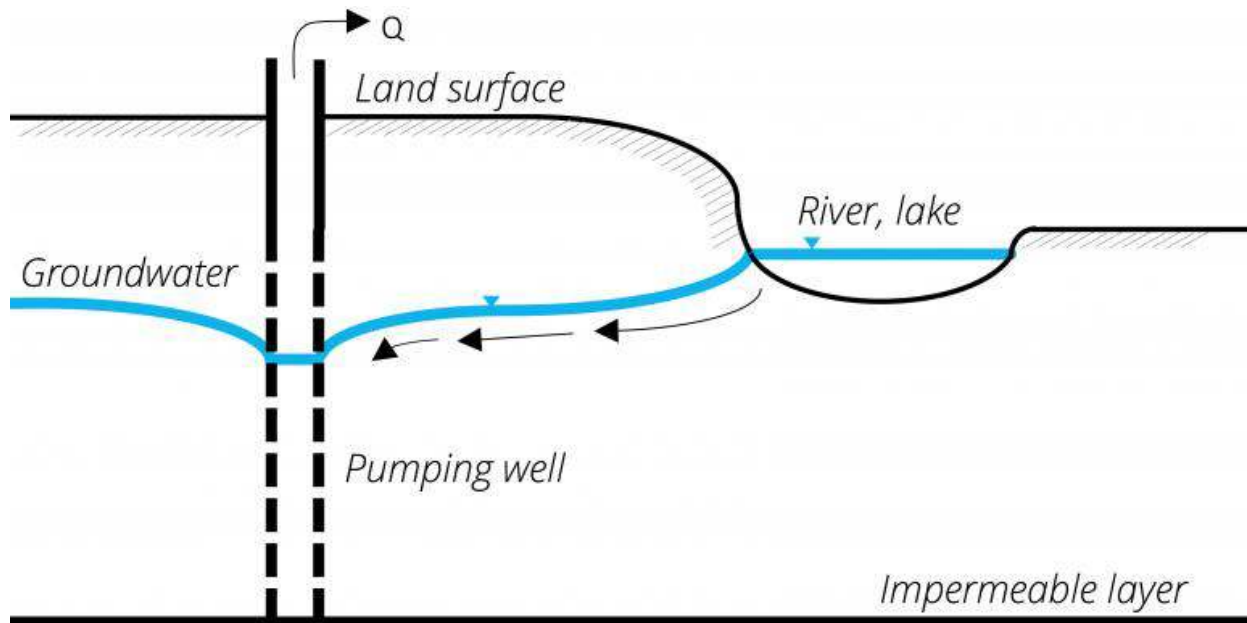
#### **1.7.6.4. Filtración**

##### **a) Filtro de bancos de río (RBF)**

La filtración ribereña es reconocida en la literatura anglosajona como River Bank Filtración (RBF, por sus siglas en inglés) y consiste en inducir el flujo agua de un cuerpo de agua (ríos, lagos, esteros) a través de los sedimentos permeables del subsuelo (Mendoza, 2017).

Para la filtración de orillas de ríos/lagos, se induce la infiltración del agua superficial de un río o lago bombeando en una galería de pozos o una línea de pozos paralelos a la orilla de la fuente de agua. El bombeo en la galería de pozos reduce el nivel freático adyacente al río o lago, induciendo que el agua se infiltre en el sistema acuífero (Figura 1.21). Este proceso tiene como objetivo principal el tratamiento mejorando y depurando ciertos parámetros de calidad del agua de recarga. El paso del agua a través del lecho del río o lago y el acuífero

elimina contaminantes y patógenos disueltos y suspendidos mediante procesos químicos, físicos y biológicos (INOWAS, 2018).



**Figura 1.22:** Filtro de bancos de río (RBF).

Fuente: INOWAS 2018.

**Tabla 1.22:** Descripción de la técnica MAR Filtro de bancos de río (RBF).

Factor de viabilidad	Descripción
Escala de capacidad típica del sistema	Aldea – Pueblo ( $\approx 10^4 \text{ m}^3 / \text{año} - \approx 10^6 \text{ m}^3 / \text{año}$ ).
Geología	Sedimentos no confinados.
Topografía	Llanuras aluviales, orillas de lagos.
Suelos	Grava de arena.
Fuente de agua	Agua de río, agua de lago.
Pretratamiento	No requerido. Comúnmente se utiliza la filtración de ribera de los ríos como proceso de pretratamiento.
Objetivo principal del MAR	Mejorar la calidad del agua.
Coste relativo	Medio-alto.

Ventajas y desventajas del sistema, adaptado de INOWAS (2018):

#### Ventajas

- Se pueden extraer grandes cantidades de agua.

- Los contaminantes contenidos en las fuentes de agua pueden eliminarse mediante procesos de filtración.

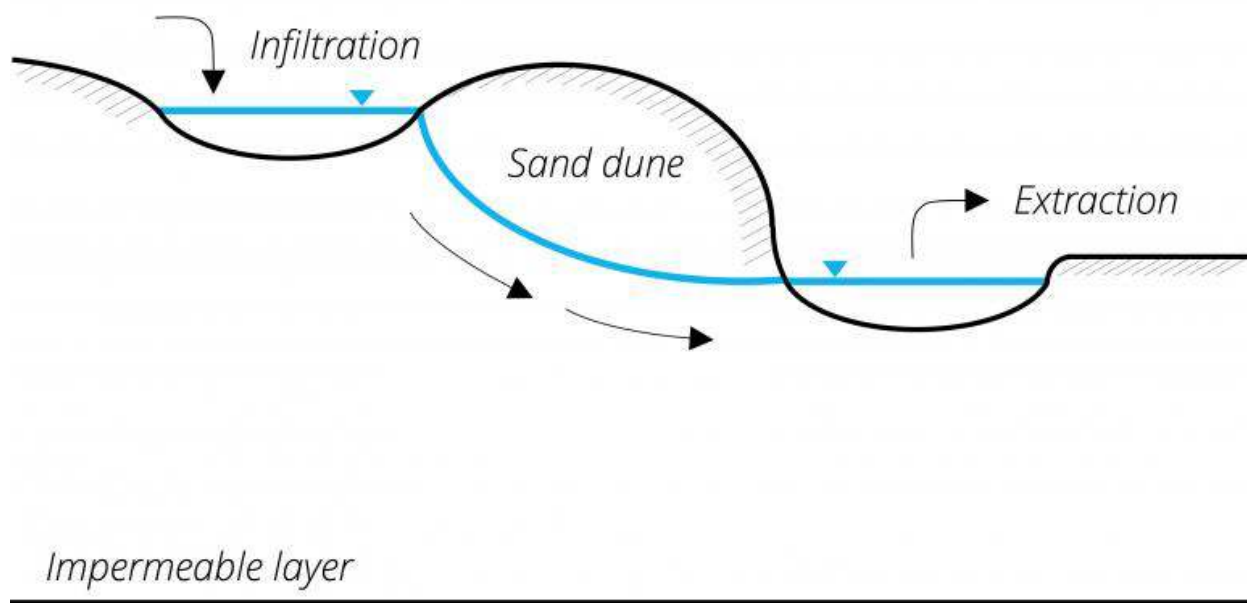
### Limitaciones

- Diseño complejo, construcción, operación y mantenimiento.
- Se requiere una supervisión intensiva del rendimiento del sistema.
- Alto potencial de obstrucción de pozos.
- Altos precios.

### b) Filtración Inter-dunar

La filtración inter-dunar, se implementa en zonas costeras utilizando el valle que se forma entre las dunas. Se inunda el valle propiciando que el agua se infiltre en los sedimentos, el agua subterránea surge en el valle aledaño de donde el agua es extraída para diferentes usos. La técnica se ha utilizado en zonas costeras donde los ríos son la fuente del agua de recarga (Ian G. , 2005).

Para la filtración de dunas, el agua superficial se infiltra en el sistema de dunas y, después del paso del suelo, se recupera mediante bombeo a una galería de pozos o estanques más bajos (Figura 1.22). Este proceso sirve como un paso de tratamiento adicional mejorando la calidad del agua infiltrada. El paso del agua a través del sistema dunar elimina contaminantes y patógenos disueltos y suspendidos mediante procesos químicos, físicos y biológicos (INOWAS, 2018).



**Figura 1.23:** Filtración Inter-dunar.

Fuente: INOWAS (2018).

**Tabla 1.23:** Descripción de la técnica MAR Filtración Inter-dunar.

<b>Factor de viabilidad</b>	<b>Descripción</b>
Escala de capacidad típica del sistema	Aldea – Pueblo ( $\approx 10^4 \text{ m}^3$ /año – $\approx$ superior a $10^6 \text{ m}^3$ /año).
Geología	Sedimentos no confinados.
Topografía	Dunas.
Suelos	Grava de arena.
Fuente de agua	Agua de lluvia, agua de río, aguas residuales tratadas.
Pretratamiento	Depende de la fuente de agua: coagulación y sedimentación.
Objetivo principal del MAR	Mejorar la calidad del agua.
Coste relativo	Medio.

Ventajas y desventajas del sistema, adaptado de INOWAS (2018):

#### **Ventajas**

- Se pueden extraer grandes cantidades de agua.
- Los contaminantes contenidos en las fuentes de agua pueden eliminarse mediante procesos de filtración.

#### **Limitaciones**

- Se requiere una supervisión intensiva del rendimiento del sistema.
- Alto potencial de obstrucción.

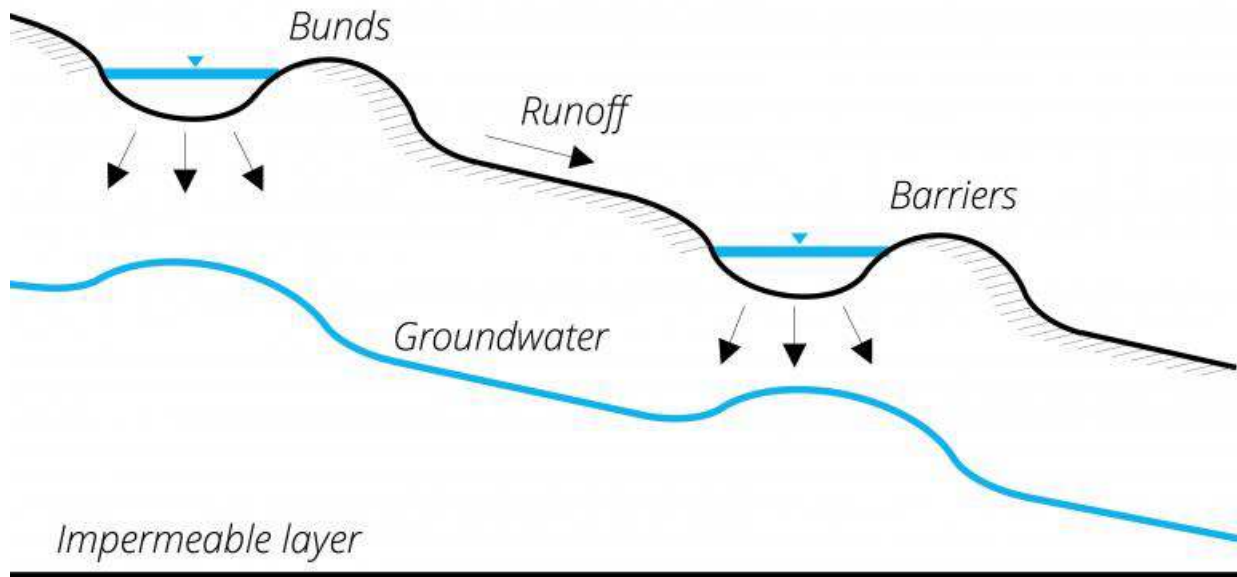
#### **1.7.6.5. Captación de agua de lluvia**

El aprovechamiento de cosechar agua de lluvia beneficia la economía, ya que el agua de lluvia es un recurso gratuito fácil de mantener y reduce el gasto por consumo de agua potable, así como en el medio ambiente, al consumir menores volúmenes de agua. Implementar estas tecnologías permite que la sociedad sea sensible y propicie hábitos de conservación, ahorro y mejor uso del agua (Mendoza, 2017).

##### **a) Barreras y diques (Qochas)**

La captación de agua de lluvia se utiliza cada vez más para recolectar agua de lluvia. La idea de las barreras es obstruir la escorrentía superficial de las cuencas y prohibir el flujo del agua

que se infiltra. La recogida del agua de lluvia se puede conseguir mediante la construcción de diques, barreras o crestas de nivel (Figura 1.23). Estas estructuras son fáciles de construir y mantener y muy adaptables. También se pueden utilizar en combinación con zanjas (INOWAS, 2018).



**Figura 1.24:** Barreras y diques.

Fuente: INOWAS (2018).

**Tabla 1.24:** Descripción de la técnica MAR Barreras y diques.

<b>Factor de viabilidad</b>	<b>Descripción</b>
Escala de capacidad típica del sistema	Familia – Aldea ( $\approx 10^2 \text{ m}^3$ /año – $\approx 10^3 \text{ m}^3$ /año).
Geología	Acuíferos libres.
Topografía	Zonas rurales con pendientes suaves.
Suelos	Suelos arenosos.
Fuente de agua	Agua de lluvia.
Pretratamiento	Ninguno.
Objetivo principal del MAR	Almacenamiento estratégico de agua.
Coste relativo	Bajo.

Ventajas y desventajas del sistema, adaptado de INOWAS (2018):

#### **Ventajas**

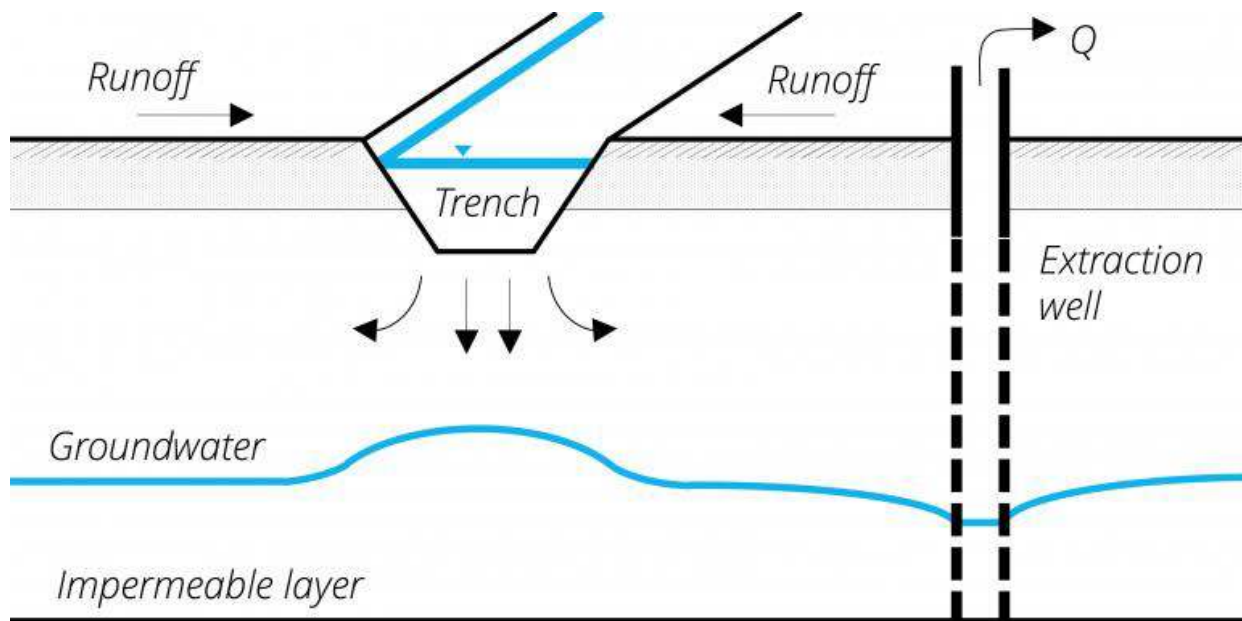
- Diseño sencillo y de bajo coste.
- Prevención de la erosión del suelo.

## Limitaciones

- La calidad del agua puede ser problemática (fertilizante).
- Cantidades de infiltración relativamente pequeñas.

### c) Zanjas de infiltración, tinas ciegas, surcos, anillos de agua y terraplenes.

La tecnología de zanjas de infiltración, tinas ciegas, surcos, anillos de agua, jagüey y terraplenes es útil en zonas abiertas y tiene por objeto interceptar la escorrentía del agua de lluvia en las cabecearas de cuenca para infiltrarla, conducirla o almacenarla (Mendoza, 2017) Las zanjas de infiltración y tinas ciegas se construyen a mano, haciendo una excavación horizontal de 90 cm de largo por 30 de ancho y 25 de profundidad, aproximadamente. El material que se extrae es depositado en la cara frontal de la zanja, denominándosele como zanja de infiltración o, en caso de que no se apile el material en la parte frontal de la excavación, como tina ciega. Ambas siguen la cota topográfica y su función es captar sedimento y propiciar la infiltración del agua de lluvia (Figura 1.24). Las zanjas y tinas ciegas impiden el libre escurrimiento del agua una vez que empieza a correr por la superficie del terreno, ya que intercepta el escurrimiento y lo almacena. La técnica se asocia con la reforestación, aprovechando parte del suelo, que es removido para hacer la plantación. Asimismo, la zanja y tina ciega propician el abastecimiento de humedad que requiere la planta, ya que en su entorno la zanja mantiene la humedad por mayor tiempo (Mendoza, 2017).



**Figura 1.25:** Zanjas de infiltración, tinas ciegas, surcos, anillos de agua y terraplenes.

Fuente: INOWAS (2018).

Los surcos se implementan siguiendo la cota topográfica, son de longitud variada y tienen por objeto retener el agua captada en la parte alta, permitiendo la infiltración del agua a lo largo del mismo, así como conducir superficialmente al agua a un punto de concentración. El surco, al interconectarse, forma un anillo de agua que tiene por función conducir el agua captada a un punto donde puede ser almacenada en una cocha, reservorio, o tanque o para su posterior utilización (Sagarpa, 2009).

La captación de agua de lluvia se utiliza cada vez más para recolectar agua de lluvia. La idea de las zanjas es obstruir el escurrimiento superficial de las cuencas y concentrar el agua a infiltrar. El agua de lluvia recogida se puede recargar a través de zanjas, acequias y fosos. Estas estructuras son fáciles de construir y mantener y muy adaptables (INOWAS, 2018).

**Tabla 1.25:** Descripción de la técnica MAR Zanjas de infiltración.

<b>Factor de viabilidad</b>	<b>Descripción</b>
Escala de capacidad típica del sistema	Familia – Aldea ( $\approx 10^2 \text{ m}^3$ /año – $\approx 10^3 \text{ m}^3$ /año).
Geología	Acuíferos libres.
Topografía	Zonas rurales con pendientes suaves.
Suelos	Suelos arenosos.
Fuente de agua	Agua de lluvia.
Pretratamiento	Ninguno.
Objetivo principal del MAR	Almacenamiento estratégico de agua.
Coste relativo	Bajo.

Ventajas y desventajas del sistema, adaptado de INOWAS (2018):

#### **Ventajas**

- Diseño sencillo y de bajo coste.
- Prevención de la erosión del suelo.

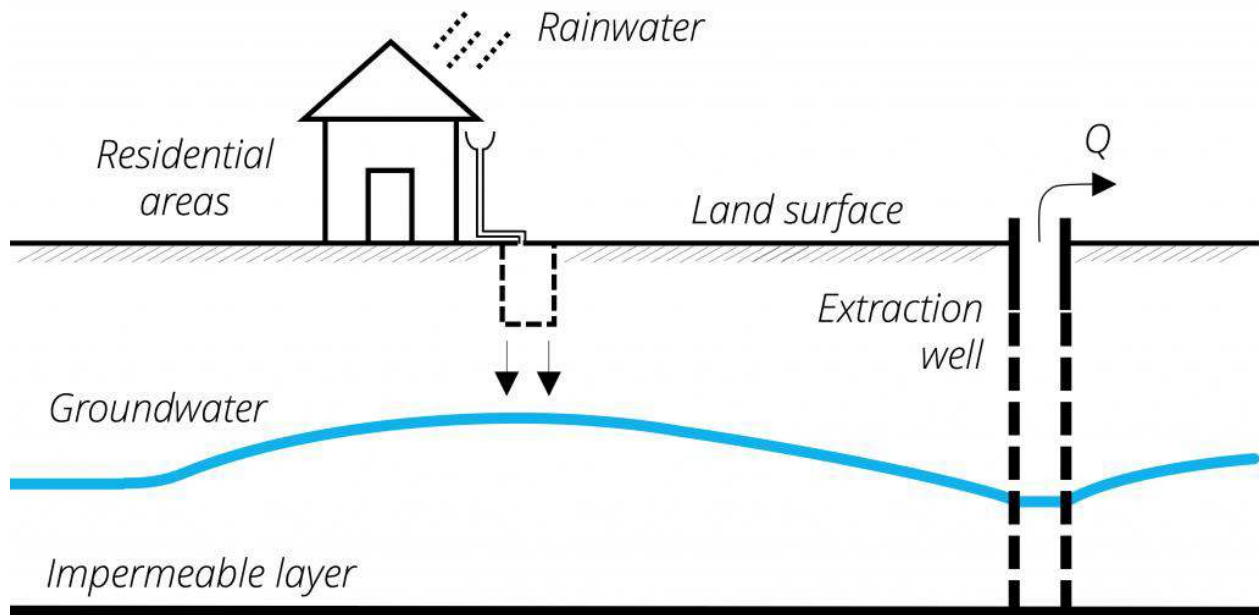
#### **Limitaciones**

- La calidad del agua puede ser problemática (fertilizante).
- Cantidades de infiltración relativamente pequeñas.

#### **d) Recolección de agua de lluvia en los tejados**

Recolectar el agua de las precipitaciones de los tejados tiene por finalidad en las zonas urbanas cosechar el agua de las lluvias. Los usos son múltiples e incluyen el almacenamiento

superficial en tanques, el uso para riego y recarga de aguas subterráneas. El agua de lluvia recogida se puede alcanzar a través de zanjas, drenaje inverso o cualquier otro método que requiera una superficie pequeña (Figura 1.25). Como las zonas urbanas se caracterizan por tener superficies selladas, la recolección y la recarga pueden ayudar a mantener los niveles de agua subterránea. También ayudan a disminuir la escorrentía de aguas pluviales con sus posibles focos de acumulación de contaminantes (INOWAS, 2018).



**Figura 1.26:** Recolección de agua de lluvia en los tejados.

Fuente: INOWAS (2018).

La tecnología consiste en interceptar el agua de lluvia, coleccionarla y almacenarla para su uso posterior. En la captación del agua de lluvia se utiliza la superficie de los techos de casas para la captación y se conduce a un pozo donde se infiltra al acuífero. Existe una componente que utiliza el agua de lluvia colectada para utilizarla en uso doméstico almacenándose en un depósito superficial o subterráneo. El agua almacenada puede ser utilizada entre otros usos para regar las áreas verdes de los hogares o mantener un sistema de producción de alimentos. Si la tecnología se utiliza para uso agrícola, es necesario contar con mayores superficies de captación para coleccionar la mayor cantidad de agua (Mendoza, 2017).

**Tabla 1.26:** Descripción de la técnica MAR Recolección de agua de lluvia en los tejados.

Factor de viabilidad	Descripción
Escala de capacidad típica del sistema	Familia – Aldea ( $\approx 10^2 \text{ m}^3$ /año – $\approx 10^3 \text{ m}^3$ /año).
Geología	Acuíferos libres.

Topografía	Áreas urbanas. Superficies selladas.
Suelos	Suelos arenosos.
Fuente de agua	Agua de lluvia.
Pretratamiento	Dependiendo de las necesidades locales, p. ej. tejados verdes.
Objetivo principal del MAR	Almacenamiento estratégico de agua. Mitigación de efectos de la urbanización.
Coste relativo	Moderado.

Ventajas y desventajas del sistema, adaptado de INOWAS (2018):

### **Ventajas**

- Aprovechamiento de estructuras ya existentes (tejados, carreteras).
- Almacenamiento de eventos de lluvia, menos inundaciones.
- Alivio de EDAR en caso de captación de aguas mixtas.

### **Limitaciones**

- La calidad del agua puede ser problemática (contaminación de las carreteras).

## **1.8. CUENCA DEL RIO CACHI**

### **1.8.1. Cuenca**

Según Villón (2002) con respecto a la cuenca indica que “corresponde a la superficie de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, convergen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida, para cada punto de su recorrido”.

### **1.8.2. Descripción**

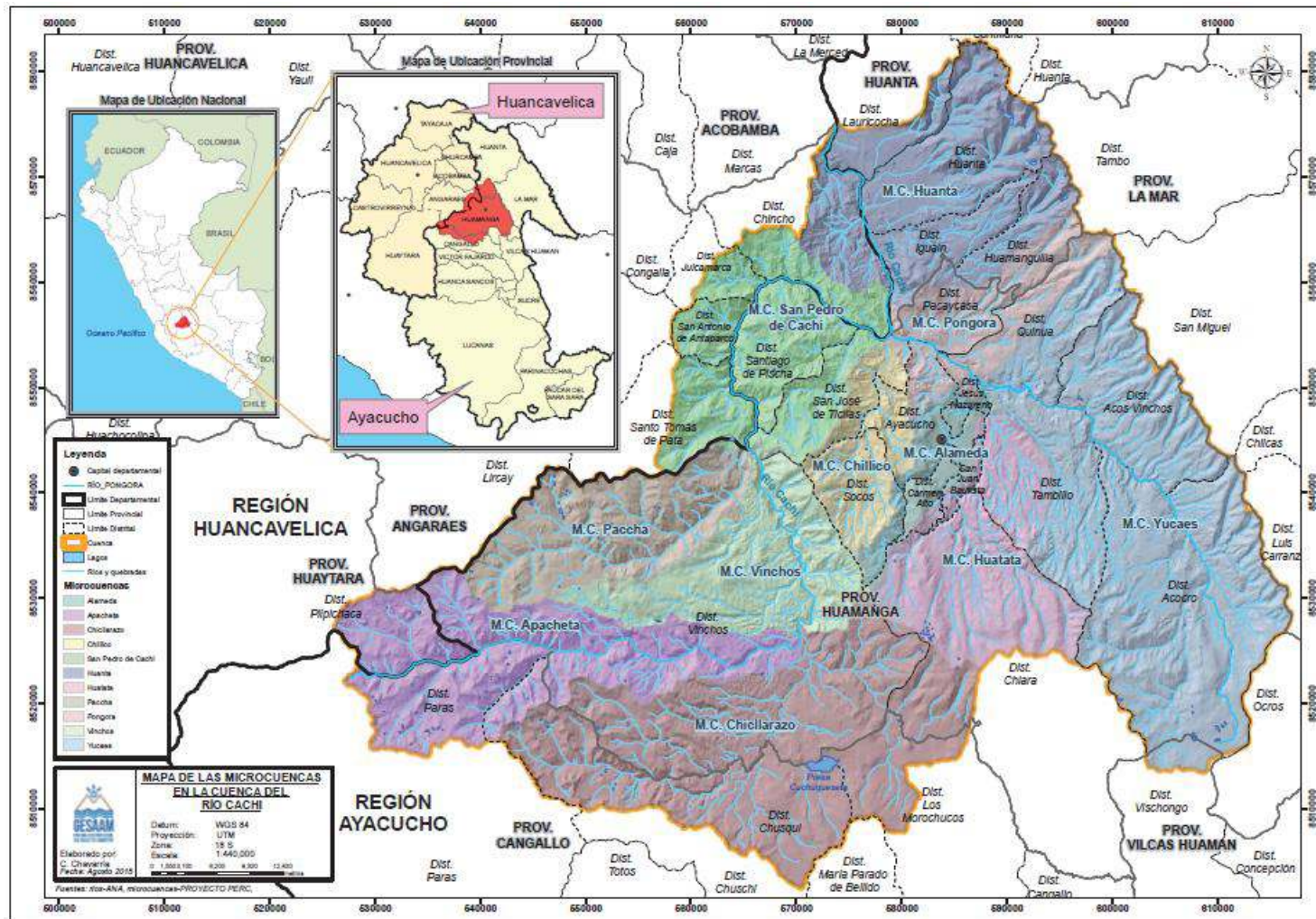
La cuenca del río Cachi (Figura 1.16) está comprendida geográficamente en dos regiones, con un 91% de su área en la región de Ayacucho y solo un 9 % en Huancavelica. Cuya área es de 360985.5 Ha. (Proyecto GESSAM, 2016).

Los servicios ecosistémicos hídricos proporcionados por la cuenca Cachi está amenazada por el uso intensivo del recurso hídrico en las actividades agropecuarias, el exceso de riego, el sobrepastoreo, tala de árboles nativos, quema de pajonales y pastizales, que generan problemas de erosión de los suelos, mayor escorrentía y menor infiltración, contribuyen a la degradación de las funciones del ecosistema, e impide cumplir con el cierre de brechas de las 14493 ha agrícolas registradas en el padrón de usuarios de la cuenca Cachi (JUDRA, 2022).

Para el 2015 la población de la cuenca del Cachi era de aprox. 240 mil habitantes. El 96% de esta población corresponde al departamento de Ayacucho, sobre todo la población de las ciudades, que representa una parte muy importante de la cuenca (165 mil habitantes).

La cuenca del Cachi es el ámbito más importante de la región Ayacucho. Si bien en cuanto a superficie representa tan solo 8% de Ayacucho (y apenas 1% de Huancavelica), el peso demográfico es otro: 33% de la población de Ayacucho está en esta cuenca.

La cuenca también alberga el sistema de riego más extenso de la región y uno de los más importantes de la sierra peruana: el sistema hidráulico Cachi. Este incluye más de 200 km de canales, una represa con capacidad de 80 millones de m<sup>3</sup> y más de 6,000 usuarios que riegan una superficie superior a las 10,000 hectáreas. La relevancia de este sistema se ve aumentada por su provisión de agua potable para la zona urbana de Huamanga. Cualquier falla en el mantenimiento o colapso de la infraestructura comprometería el suministro de agua potable para una población de 170,000 habitantes. La cuenca tiene una densidad poblacional de 33.30 habitantes por km<sup>2</sup> y representa la principal fuente de servicios ecosistémicos hídricos en la región de Ayacucho. (Ccasani, 2024).



**Figura 1.27:** Mapa de las microcuencas en la cuenca del río cachi.

Fuente: Proyecto GESSAM (2016).

### **1.8.3. Hidrografía**

La cuenca del río Cachi constituye una fracción de la vertiente Amazónica.

Nace a partir de la unión de los ríos Cachi y Urubamba, discurriendo de oeste a este en la provincia de Angaraes. (Proyecto GESSAM, 2016)

A su vez, el Proyecto GESSAM (2016): subdivide la Cuenca Cachi se en unidades hidrográficas más pequeñas. Son 11 microcuencas que se agrupan como sigue, partiendo de la parte baja:

- La microcuenca “Huanta”, aproximadamente donde convergen los ríos de Cachi y Pongora.

De la unión de estos ríos, realiza la agrupación siguiente:

- 6 microcuencas en el recorrido del mismo río Cachi, hacia el suroeste: de la parte baja a la parte alta, Huamanga, Chillico, Paccha, Vinchos, Chichlarazu y Apacheta.
- Microcuencas hacia el sureste: Pongora, Alameda, Huatatas y Yucaes.

En la cuenca Cachi, las mayores precipitaciones se registran entre enero y marzo, lo que provoca un notable incremento en la vegetación durante abril y mayo. Por otro lado, las precipitaciones disminuyen entre mayo y agosto, mientras que de septiembre a noviembre se observa un aumento gradual. (Pereda et al., 2018).

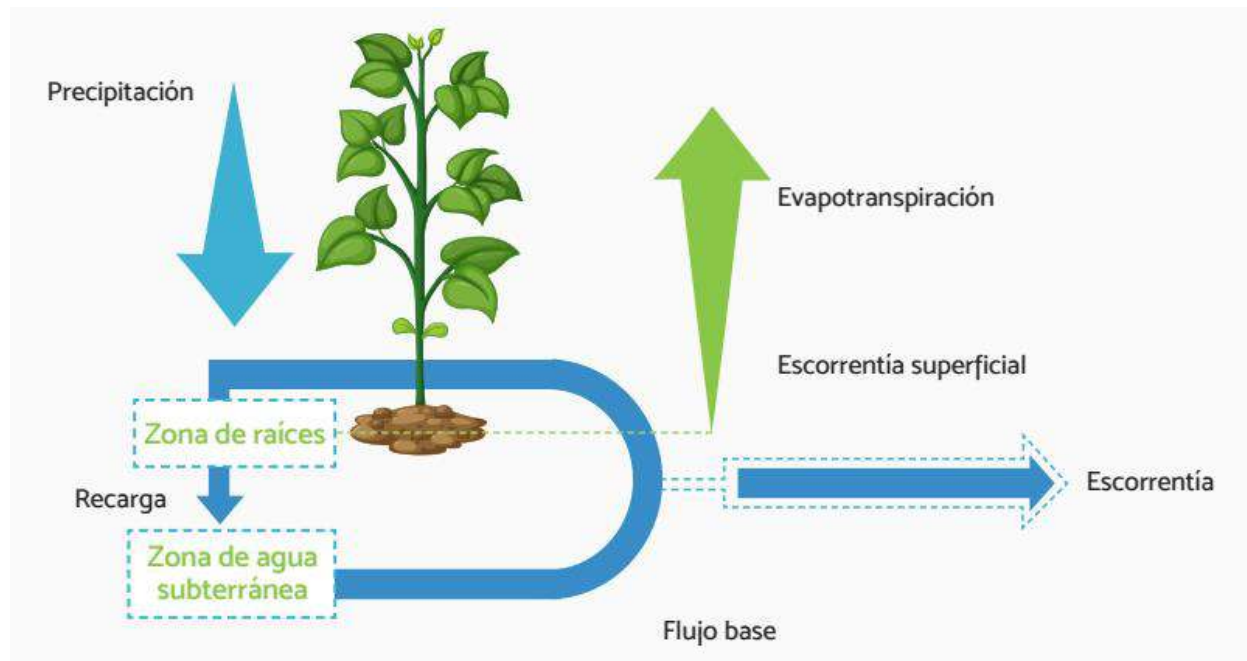
### **1.8.4. Balance hídrico**

Fattorelli y Fernández (2011). El balance hidrológico se describe como la relación entre las distintas variables que componen el ciclo del agua: precipitación, evapotranspiración, escurrimiento superficial, almacenamiento en superficie y subsuelo, y flujo de agua subterránea. Se utiliza para distribuir los recursos hídricos tanto a nivel global como en cuencas específicas.

Llevar a cabo el balance hídrico en una cuenca implica obtener datos sobre el volumen anual de escurrimiento o excedentes, las fechas de excedencia, y la recarga de acuíferos o infiltración. También permite identificar los períodos de déficit hídrico y calcular la demanda de agua para uso humano.

Es posible establecer balances de manera general aplicando la ecuación de continuidad a un volumen de control definido por una superficie de referencia, a través de la cual el agua fluye hacia adentro y hacia afuera. Este es un sistema abierto a flujos de masa, cantidad de movimiento y energía. De este modo, el balance se reduce a la cantidad de agua que permanece almacenada:

$$\text{Entrada} - \text{Salida} = \text{Variación del almacenamiento}$$



**Figura 1.28:** Esquemmatización del modelo de balance hídrico.

Fuente: Zhang et al. (2008).

Basándose en lo anterior y considerando el volumen de control mostrado en la Figura 1.27, la ecuación general del balance hidrológico en una cuenca determinada tiende a tener la siguiente forma:

$$P - E - G = ET + \Delta S$$

$$\Delta S = P - E - G - ET$$

Donde:

**P** = Es la precipitación en el periodo seleccionado

**E** = Es la escorrentía superficial que sale de la cuenca que se analiza.

**G** = Constituye el flujo neto o base de aguas subterráneas desde la cuenca hacia el exterior.

**ET** = Representa la evapotranspiración real en la cuenca.

**$\Delta S$**  = Se refiere a la variación en el almacenamiento tanto superficial como subterráneo, que incluye ríos, lagos, suelos y acuíferos.

A partir de lo mencionado, representando el caudal neto de descarga como Q, la fórmula puede expresarse de la siguiente manera:

$$E + G = P - ET - \Delta S$$

$$Q = E + G$$

Así el caudal neto de descarga queda expresado:

$$Q = P - ET - \Delta S$$

- **Demanda hídrica administradas por proyecto río Cachi:** La demanda de agua para actividades agropecuarias en 2022 se proyectó para 14,493 hectáreas de áreas cultivables, distribuidas en la cuenca Alta con 3,986 ha, la cuenca Baja con 9,077 ha y Socos-Totorilla con 1,430 ha (Proyecto GESSAM, 2016). En ese mismo año, el uso agrícola requirió un total de 38 hm<sup>3</sup> de agua, mientras que el consumo poblacional fue de 13 hm<sup>3</sup> (Santana, 2022).

Los caudales en la microcuenca Apacheta han mostrado una tendencia negativa, disminuyendo 1.56 m<sup>3</sup>/s entre 2000 y 2018, lo que representa una reducción del 36.1 % en comparación con el año 2000. Si esta tendencia continúa, se estima que para finales de 2024 la disminución será del 46.1 %, con un caudal medio anual de salida de 2.33 m<sup>3</sup>/s, cercano al caudal ecológico de 2.24 m<sup>3</sup>/s. Esta reducción es consecuencia del aumento en la evapotranspiración, la disminución de la cobertura de nieve, la humedad relativa y las precipitaciones en la microcuenca. De mantenerse este escenario, se espera que para 2025 el caudal ecológico supere al caudal de salida estimado. Dado que la población sigue creciendo y la disponibilidad de agua sigue disminuyendo, es posible que se enfrente un escenario de escasez de agua en la microcuenca Apacheta. Por lo tanto, es urgente implementar infraestructuras de almacenamiento superficial, proyectos de siembra y cosecha de agua, o el uso de aguas subterráneas. Dada la escasez de investigaciones en esta área, es crucial que las autoridades encargadas de la gestión del recurso hídrico en la cuenca tomen medidas de mitigación en un plazo de 5 a 10 años. (Moncada, 2021).

#### ***1.8.5. Calidad de las fuentes de agua en la cuenca Cachi***

La microcuenca "Alameda", parte de la cuenca Cachi, presenta diferentes niveles de calidad de agua según el Índice de Calidad de Agua. En la cabecera de la microcuenca, las aguas tienen buena calidad; en la zona previa a la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Totorá, la calidad es regular; y en la parte baja de la microcuenca, después del PTAR de Totorá, las aguas presentan mala calidad. (Espinoza, 2015)

En la microcuenca "Huatatas", utilizando el Índice de Calidad de Agua de la National Sanitation Foundation de Estados Unidos (ICA-NSF), se calcularon los valores de calidad del agua entre

2017 y 2018. Los resultados indicaron una calidad "MEDIA" en el tramo del río Huatatas, lo que sugiere que el agua está moderadamente contaminada. (Huallanca y Toscano, 2019).

En la microcuenca "Vinchos" se detectó que la concentración de arsénico en el agua que abastece las piscigranjas de truchas del río Apacheta, ubicado en el distrito de Vinchos, provincia de Huamanga, excede los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua en la categoría 4, correspondiente a ríos de la costa y sierra. (De La Cruz, 2022).

## CAPÍTULO II METODOLOGÍA

### 2.1. UBICACIÓN DEL ESTUDIO

El trabajo de investigación se realizó en la cuenca del río Cachi- Ayacucho.

#### 2.1.1. Ubicación geográfica

Región : Ayacucho

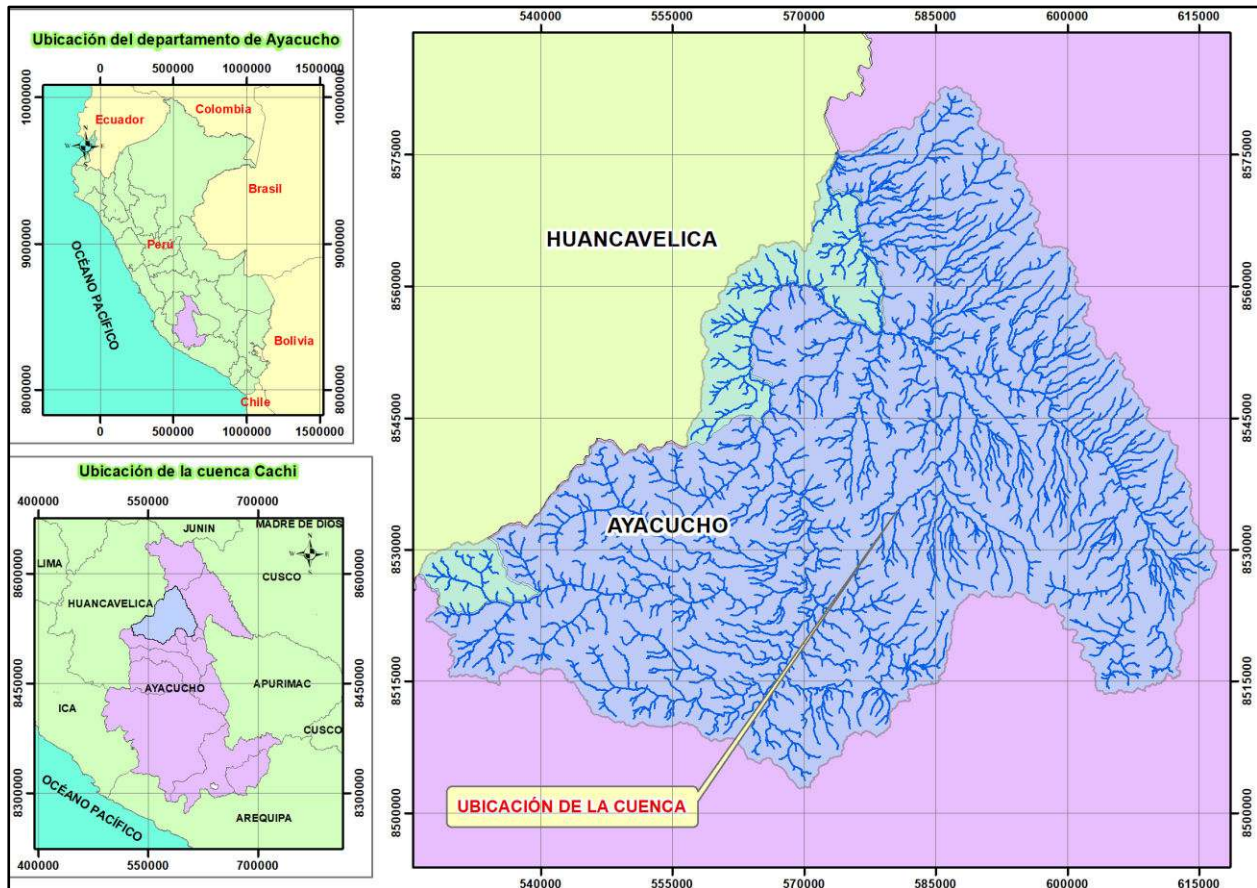


Figura 2.1: Ubicación y localización del trabajo de investigación.

### 2.2. MATERIALES Y EQUIPOS

- ✓ Computadora Intel inside core I7
- ✓ Impresora
- ✓ Papeles
- ✓ Software ArcGIS 10.8.2
- ✓ Delimitación de ríos y subcuencas (formato *Shapefile*) de la Autoridad Nacional de Agua (ANA).

- ✓ Imágenes satelitales Landsat que cubren la zona de estudio
- ✓ Software Hydraccess 7.01
- ✓ Software HEC-4
- ✓ Series de datos de precipitación mensual, dentro y alrededor de la cuenca.
- ✓ Data obtenida de la ANA Mantaro en relación a las licencias de agua otorgadas.
- ✓ Información hidrométrica de caudales medios anuales de los ríos de Apacheta, Chicllarazo y Chacco.
- ✓ Mapas temáticos de suelos y uso actual de suelos de la zonificación ecológica y económica de la región Ayacucho y Huancavelica, (formatos *shapefile*); descargados desde el geoservidor del Ministerio del Ambiente (MINAM): <https://geoservidor.minam.gob.pe/>.
- ✓ Plataforma Google Earth Engine

## 2.3. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

### 2.3.1. *Distribución de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Cachi y áreas más afectadas durante los periodos de estiaje.*

#### 2.3.1.1. Balance hidrológico.

$$Q = P - ET - \Delta S$$

Donde:

**Q** = Es caudal expresado en lámina de agua para la cuenca

**P** = Es la precipitación

**ET** = Representa la evapotranspiración real en la cuenca

**$\Delta S$**  = Se refiere a la variación en el almacenamiento tanto superficial como subterráneo, que incluye ríos, lagos, suelos y acuíferos.

El almacenamiento superficial y subterráneo es función directa de las características de la cuenca como, cobertura vegetal, textura del suelo, pendiente; los cuales recargan los acuíferos subyacentes (estos a su vez función de las formaciones geológicas que la originan) como la capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA).

Entonces podemos expresar el cambio en almacenamiento superficial y subterráneo ( $\Delta S$ ), como:  
 $f(P, CRA)$

El balance hidrológico mensualizado queda representado:

$$Q_i = P_i - ET_i - f(P, CRA)$$

Donde:

$Q_i$  = Es caudal para del mes expresado en lámina de agua para la celda (mm/mes)

$P_i$  = Es la precipitación del mes en la celda(mm/mes)

$ET_i$  = Representa la evapotranspiración real en la celda (mm/mes).

$f(P, CRA)$  = Es el cambio en almacenamiento en función de la precipitación y la capacidad de la recarga del acuífero subyacente

Así para calcular la disponibilidad hídrica ( $B_i$ ) actual sobre la cuenca:

$$B_i = Q_i - D_i$$

Donde:

$B_i$  = Es caudal libre sin uso expresado en lámina de agua para la celda (mm/mes)

$Q_i$  = Es caudal ofertado expresado en lámina de agua para la celda (mm/mes)

$D_i$  = Es la demanda hídrica para la celda (mm/mes)

Reemplazando (1) en (2), la disponibilidad hídrica, queda expresado:

$$B_i = P_i - ET_i - D_i - f(P, CRA)$$

#### **2.3.1.1.1. Precipitación en la cuenca:**

La precipitación se obtuvo a partir de 22 estaciones usadas alrededor y dentro de la cuenca, las cuales se detallan a continuación, los datos completos se anexan en el Anexo 1:

**Tabla 2.1:** Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio

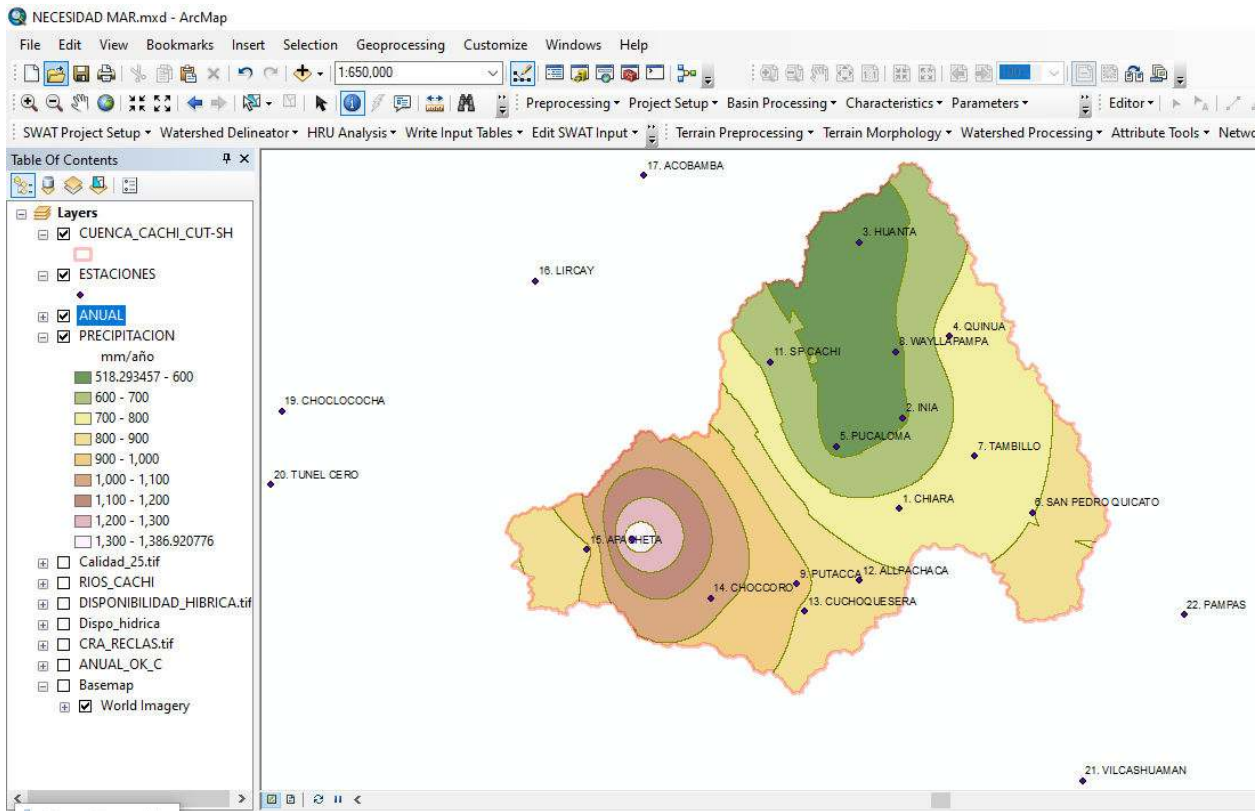
Estaciones	Propietario	ESTACIONES METEOROLOGICAS								
		Coordenadas geográficas UTM		Altitud m.s.n.m.	Cuenca	Ubicación			Periodo de registro	Récord de años
		Este	Norte			Departamento	Provincia	Distrito		
1. Chiara	PERC	585463.89	8530610.71	3587.0	Cachi	Ayacucho	Huamanga	Chiara	1992-2018	27.0
2. INIA	SENAMHI	586007.36	8544295.59	2756.0	Cachi	Ayacucho	Huamanga	Andrés Cáceres	A. 1992-2018	27.0
3. Huanta	SENAMHI	579373.91	8570777.59	2542.0	Cachi	Ayacucho	Huanta	Huanta	1999-2018	27.0
4. Quinua	SENAMHI	593070.30	8556572.31	3209.0	Cachi	Ayacucho	Huamanga	Quinua	1992-2018	27.0
5. Pucaloma	SENAMHI	575923.42	8539980.96	3490.0	Cachi	Ayacucho	Huamanga	Socos	1992-2018	27.0
6. San Pedro Quicato	SENAMHI	605518.13	8529973.23	3497.0	Cachi	Ayacucho	Huamanga	Acocro	1992-2018	27.0
7. Tambillo	PERC	596832.09	8538524.61	3343.0	Cachi	Ayacucho	Huamanga	Tambillo	1992-2018	27.0
8. Wayllapampa	SENAMHI	584940.10	8554273.01	2470.0	Cachi	Ayacucho	Huamanga	Pacaycasa	1993-2018	26.0
9. Putacca	PERC	569984.52	8519244.20	3550.0	Cachi	Ayacucho	Huamanga	Vinchos	1991-2009	19.0
10. Tunsulla	PERC	545153.43	8526056.00	3900.0	Cachi	Ayacucho	Cangallo	Paras	1991-2008	18.0
11. S. P. Cachi	SENAMHI	565945.32	8552647.88	3443.0	Cachi	Ayacucho	Cangallo	Pischa	1999-2017	19.0
12. Allpachaca	PERC	579400.06	8519770.93	3550.0	Cachi	Ayacucho	Huamanga	Chiara	1992-2018	27.0
13. Cuchoquesera	PERC	571194.11	8515148.31	3724.0	Cachi	Ayacucho	Cangallo	Chuschi	1992-2018	27.0
14. Choccoro	PERC	557047.25	8517093.72	4025.0	Cachi	Ayacucho	Cangallo	Paras	1999-2018	20.0
15. Apacheta	PERC	538382.48	8524407.64	4150.0	Cachi	Ayacucho	Cangallo	Paras	1991-2018	20.0
16. Lircay	SENAMHI	530606.89	8564874.73	3150.0	Mantaro	Huancavelica	Angaraes	Lircay	1994-2018	25.0
17. Acobamba	SENAMHI	546901.45	8580795.13	3236.0	Mantaro	Huancavelica	Acobamba	Acobamba	1994-2018	25.0
18. Paucarbamba	SENAMHI	542905.60	8623433.95	3000.0	Mantaro	Huancavelica	Tayacaja	Colcabamba	1995-2018	24.0
19. Choclococha	SENAMHI	492323.67	8545353.65	4350.0	Pampas	Huancavelica	Castrovirreyna	Santa Ana	1991-2018	28.0
20. Túnel Cero	SENAMHI	490731.90	8534232.85	4425.0	Pampas	Huancavelica	Huaytará	Pilpichaca	1992-2018	27.0
21. Vilcas Huamán	SENAMHI	613080.04	8489631.81	3540.0	Pampas	Ayacucho	Vilcas Huamán	Vilcas Huamán	1991-2018	28.0
22. Pampas	SENAMHI	628462.08	8514633.74	2032.0	Pampas	Apurímac	Chincheros	Los Chankas	2003-2018	16.0

- **Análisis y completación de datos:** utilización del programa de Hydraccess versión 7.01, en agrupación de estaciones similares y la generación del vector regional de las precipitaciones y la completación de datos dentro del periodo comprendido entre 1991 – 2018, en los respectivos meses de enero a diciembre para las distintas estaciones.
- **Extensión de datos:** La extensión de datos se realizó con la aplicación de HEC-4, tomando la agrupación de estaciones realizadas durante el proceso del análisis y completación de datos, el periodo de extensión de datos correspondió para el periodo de 2019 – 2022.

**Tabla 2.2:** Precipitaciones medias mensuales

ESTACIONES	ESTE	NORTE	ALTITUD	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	ANUAL
1. CHIARA	585463.89	8530610.71	3587.00	143.12	133.30	131.10	48.63	17.13	5.28	11.98	18.46	23.20	47.49	56.58	101.08	<b>737.35</b>
2. INIA	586007.36	8544295.59	2756.00	105.01	120.51	90.96	37.76	11.85	5.44	12.35	10.46	24.58	33.54	50.77	86.39	<b>589.63</b>
3. HUANTA	579373.91	8570777.59	2542.00	100.54	92.79	79.43	33.00	11.36	4.00	6.16	8.19	12.58	30.58	43.57	96.04	<b>518.24</b>
4. QUINUA	593070.30	8556572.31	3209.00	127.70	148.66	113.18	42.36	18.81	5.38	11.75	15.39	33.02	58.24	68.72	115.17	<b>758.38</b>
5. PUCALOMA	575923.42	8539980.96	3490.00	113.32	123.67	96.23	37.12	7.86	4.00	5.31	6.50	16.35	31.96	44.73	88.02	<b>575.07</b>
6. SAN PEDRO QUICATO	605518.13	8529973.23	3497.00	162.39	155.88	116.28	48.18	18.35	8.60	11.75	14.48	27.42	56.11	67.41	112.84	<b>799.69</b>
7. TAMBILLO	596832.09	8538524.61	3343.00	133.74	151.84	118.26	46.25	14.94	16.26	12.66	13.41	26.49	46.07	63.27	113.50	<b>756.69</b>
8. WAYLLAPAMPA	584940.10	8554273.01	2470.00	110.88	117.30	96.21	31.77	14.31	3.49	8.47	11.07	20.81	31.70	49.78	84.42	<b>580.20</b>
9. PUTACCA	569984.52	8519244.20	3550.00	173.37	180.27	143.24	48.79	19.99	12.48	18.05	23.16	34.77	77.58	66.17	136.20	<b>934.08</b>
10. TUNSULLA	545153.43	8526056.00	3900.00	243.50	233.55	207.96	117.79	31.73	16.06	19.52	46.44	69.07	135.92	97.38	168.56	<b>1387.46</b>
11. SP CACHI	565945.32	8552647.88	3443.00	136.83	136.14	109.67	42.47	15.75	4.48	10.17	11.76	18.45	40.00	45.32	107.15	<b>678.17</b>
12. ALLPACHACA	579400.06	8519770.93	3550.00	148.02	155.58	145.93	57.34	19.96	10.71	15.70	16.02	28.22	54.49	58.16	116.88	<b>826.99</b>
13. CUCHOQUESERA	571194.11	8515148.31	3724.00	167.80	175.52	156.01	62.76	17.38	11.75	14.00	22.71	29.99	54.67	57.91	112.62	<b>883.13</b>
14. CHOCORO	557047.25	8517093.72	4025.00	173.25	194.97	177.20	66.54	26.85	18.84	20.16	26.22	50.20	74.96	58.94	134.99	<b>1023.12</b>
15. APACHETA	538382.48	8524407.64	4150.0	172.36	143.70	137.44	53.33	19.05	8.58	8.50	19.94	52.54	57.78	52.98	138.27	<b>864.46</b>
16. LIRCAY	530606.89	8564874.73	3150.00	147.52	151.36	117.52	56.63	23.81	8.38	14.45	15.89	28.45	55.09	52.74	114.10	<b>785.94</b>
17. ACOBAMBA	546901.45	8580795.13	3236.00	129.45	135.75	101.97	44.13	19.84	7.70	10.68	15.37	23.80	54.73	54.45	105.01	<b>702.89</b>
18. PAUCARBAMBA	542905.60	8623433.95	3000.00	217.70	234.09	215.86	88.60	34.58	16.59	27.09	37.60	54.21	87.86	95.93	164.20	<b>1261.83</b>
19. CHOCLOCOCHA	492323.67	8545353.65	4350.00	163.64	240.64	204.46	114.95	34.71	13.53	14.11	37.87	48.57	84.55	79.07	147.84	<b>1214.17</b>
20. TUNEL CERO	490731.90	8534232.85	4425.00	163.17	160.30	160.74	77.27	17.65	5.08	4.24	10.46	22.06	51.39	63.90	123.52	<b>859.77</b>
21. VILCASHUAMAN	613080.04	8489631.81	3540.00	149.91	154.66	119.91	36.83	12.07	7.14	9.44	20.77	28.41	35.25	55.14	107.93	<b>737.47</b>
22. PAMPAS	628462.08	8514633.74	2032.00	122.79	136.97	113.76	44.25	14.99	0.55	5.03	5.59	12.78	13.99	60.01	108.57	<b>639.27</b>

- **Generación de precipitación:** Superficie estimada mediante método de Kriging de la precipitación a partir de las estaciones alrededor y dentro de la cuenca dispersados con valores mensuales y anuales (Figura 2.2).



**Figura 2.2:** Precipitación media anual en la cuenca Cachi.

### 2.3.1.1.2. *Evapotranspiración en la cuenca:*

La Evapotranspiración real (ET) de la cuenca se obtuvo a partir de datos recolectados y generados por el sensor MODIS entre 2000 y 2022, con una resolución de celda de 500x500 metros. Los datos de ET se encuentran en MOD16, utilizando un algoritmo basado en la ecuación de Penman-Monteith. La evapotranspiración superficial incluye tanto la evaporación efectiva de la superficie terrestre como la transpiración del dosel vegetal. La ET de 8 días (0.1 mm/8 días o 0.1 mm/5 días) representa la suma de la evapotranspiración en esos períodos, procesada de forma mensual y anual (Figura 2.4), y obtenida a través de Google Earth Engine (Figura 2.3) para la cuenca en estudio.

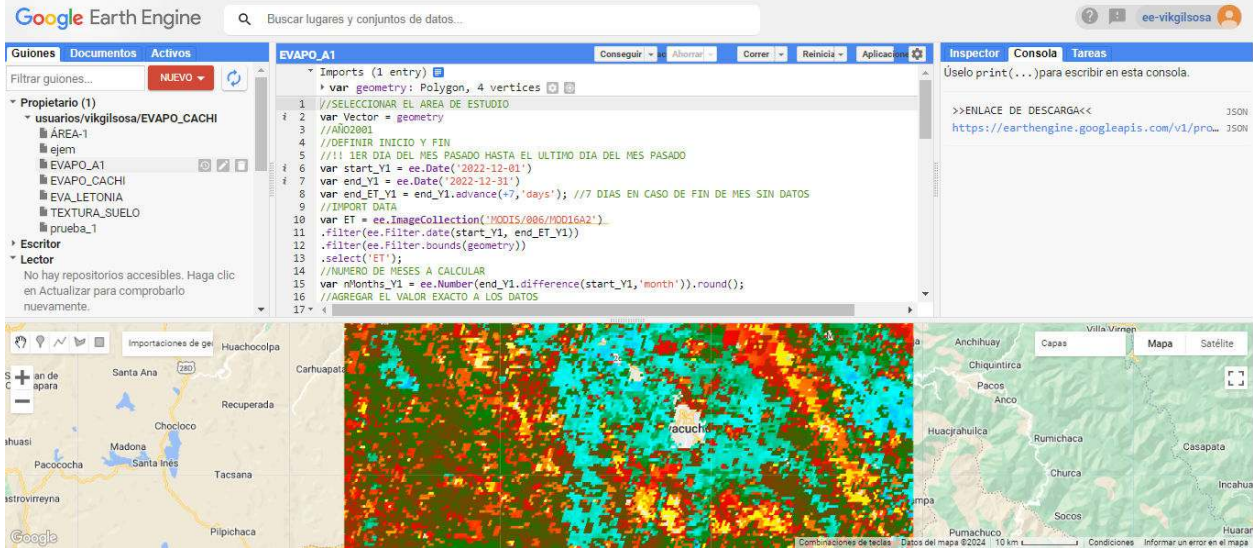


Figura 2.3: Interfaz y código en Google Earth Engine para la ET MODIS.

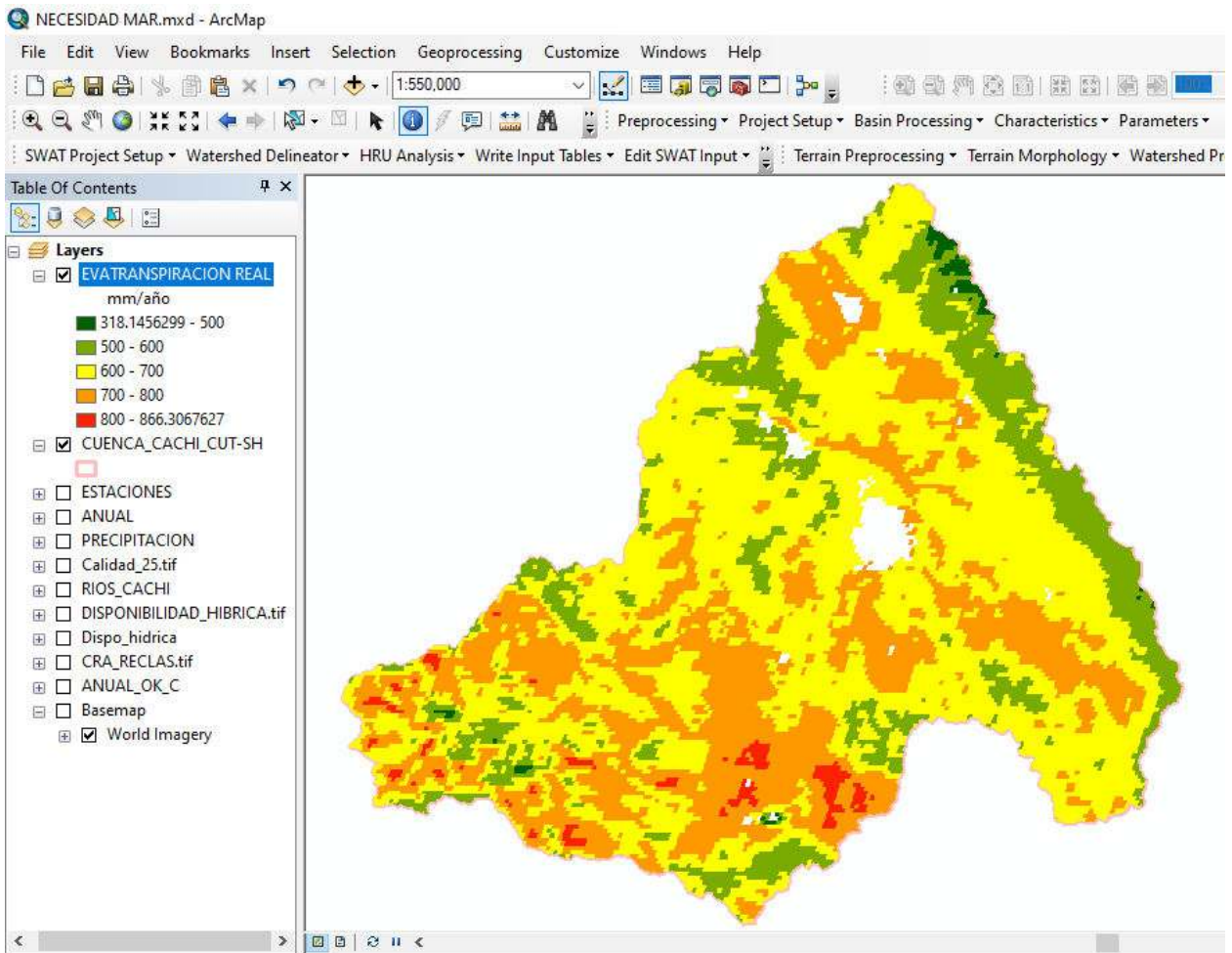


Figura 2.4: Evapotranspiración real anual (mm/año) para la cuenca Cachi.

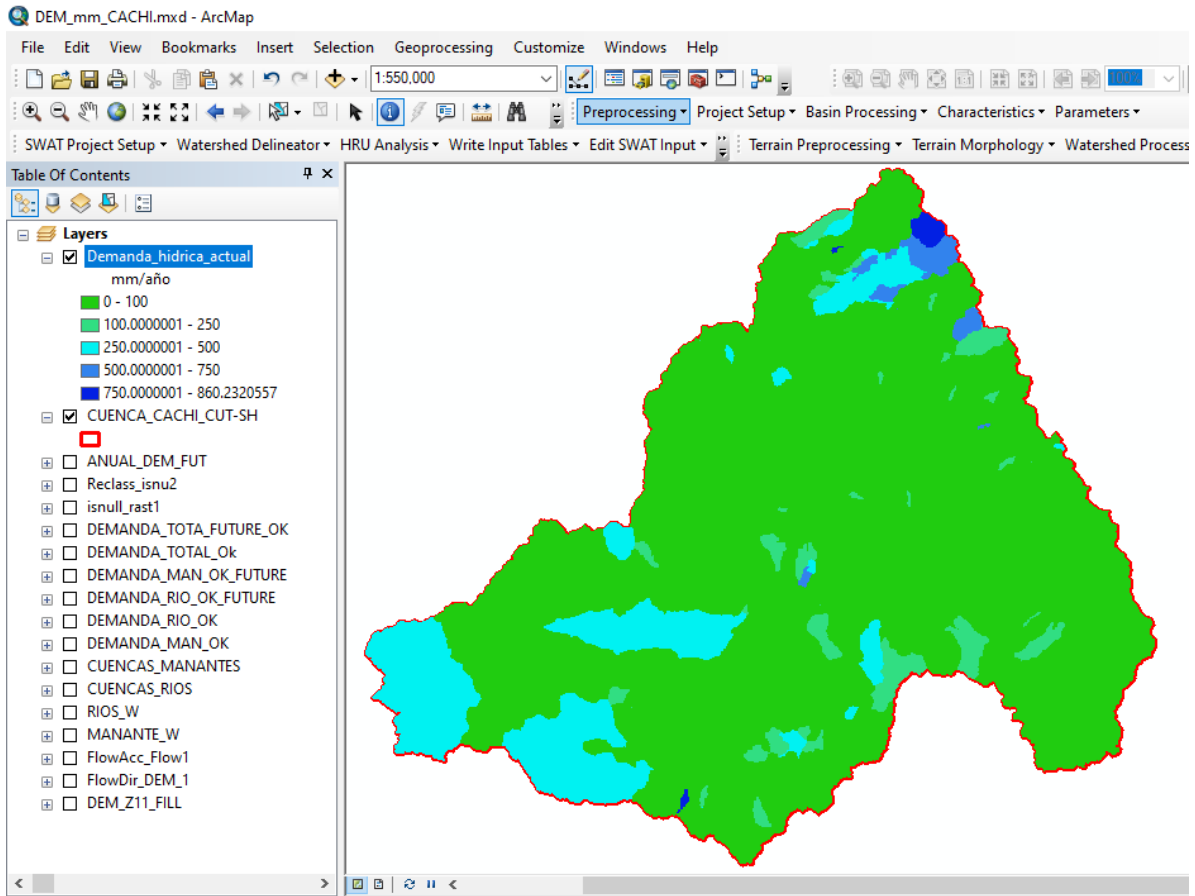
### 2.3.1.1.3. Demanda actual en la cuenca:

La demanda actual sobre la cuenca se obtuvo a partir de datos procesados a partir de las licencias de uso de agua otorgadas por el ANA Mantaro hasta la fecha de enero de 2024. Parte de la data se muestra en la Tabla 2.3 y la data completa usada en la investigación se anexa en el Anexo 5.

**Tabla 2.3:** Data obtenida de la ANA Mantaro en relación a las licencias de agua otorgadas.

Resolución de derecho	Este	Norte	Tipo de uso	Distrito	Fuente Natural	Área (Ha)	Volumen derecho (m <sup>3</sup> )
0001-2012	578544	8575202	Agrícola	Luricocha	Manantial	0.99	12614.4
0001-2017	606634	8529897	Agrícola	Tambillo	Río	42.45	369238
0001-2019	572778	8516894	Agrícola	Chuschi	Río	55	489179.43
0002-2017	567867	8520019	Agrícola	Vinchos	Quebrada	34.6	286541
0002-2019	567972	8538184	Agrícola	Vinchos	Manantial	8.5	62277.37
0003-2017	574569	8542084	Agrícola	Socos	Manantial	8.46	108867
0004-2017	557548	8533732	Agrícola	Vinchos	Manantial	1.76	20363
0004-2019	585518	8542160	Agrícola	San Juan Bautista	Manantial	27	276301.64
0005-2019	578355	8574316	Agrícola	Luricocha	Río	16.1	309311.78
0006-2019	579042	8573988	Agrícola	Luricocha	Río	20.36	392636.82
0008-2019	579293	8574296	Agrícola	Luricocha	Río	13.57	261693.58
0008-2022	581446	8570232	Agrícola	Huanta	Río	5	33276.17
0013-2006	567729	8559882	Poblacional	Santiago De Pischa	Manantial	NA	15768
0014-2003	582557	8570838	Poblacional	Huanta	Manantial	NA	13592.016
0014-2005	592968	8562750	Poblacional	Huamanguilla	Manantial	NA	17975.52
0016-2003	583273	8573870	Poblacional	Huanta	Manantial	NA	8830.08
0017-2006	597332	8550191	Poblacional	Acos Vinchos	Manantial	NA	22075.2
0018-2006	569365	8545932	Poblacional	San José De Tiellas	Manantial	NA	8167.82
0018-2016	577685	8574575	Poblacional	Luricocha	Manantial	NA	81047.52
0018-2022	585434	8565329	Poblacional	Iguain	Manantial	NA	11352.93
0018-2024	609127	8534237	Poblacional	Acocro	Manantial	NA	2872
0019-2002	582877	8572936	Poblacional	Huanta	Puquio	NA	12614.4
0020-2002	578249	8574582	Poblacional	Luricocha	Puquio	NA	12929.76
0021-2024	609126	8528292	Poblacional	Acocro	Manantial	NA	16380.85
0024-2018	578930	8571996	Doméstico Poblacional	Luricocha	Manantial	NA	1521.2

Realizando una tabulación y delimitación independiente para los aforos descritos en las licencias, se obtuvieron las respectivas áreas de influencia directa de cada licencia otorgada, como paso subsecuente se realizó la sumatoria e intersección de las mismas y a la laminación de los volúmenes concedidos en cada licencia, teniéndose como resultados la demanda totalizada en la cuenca expresadas en mm/año (Figura 2.5) y mm/mes.



**Figura 2.5:** Demanda anual (mm/año) para la cuenca Cachi.

#### 2.3.1.1.4. Balance oferta – demanda en la cuenca sin ( $\Delta S$ ):

Así para realizar el balance oferta – demanda, actual sobre la cuenca, sin considerarse la variación de almacenamiento ( $\Delta S$ ) la ecuación del balance hídrico:

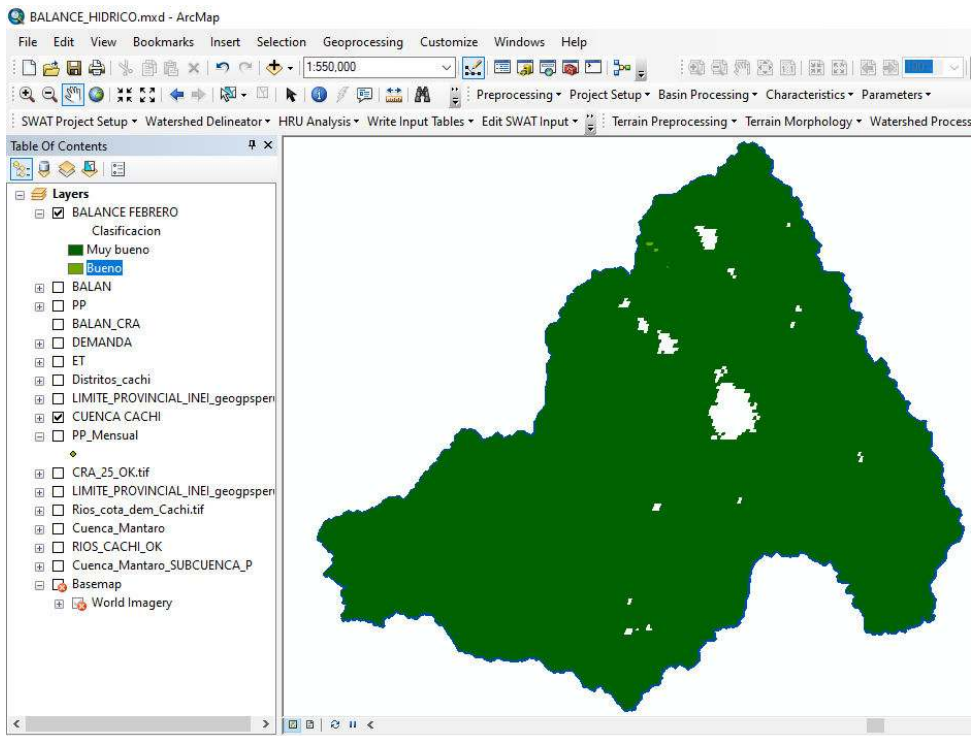
El balance oferta – demanda, queda expresado:

$$B_{ODi} = B_i + \Delta S = P_i - ET_i - D_i$$

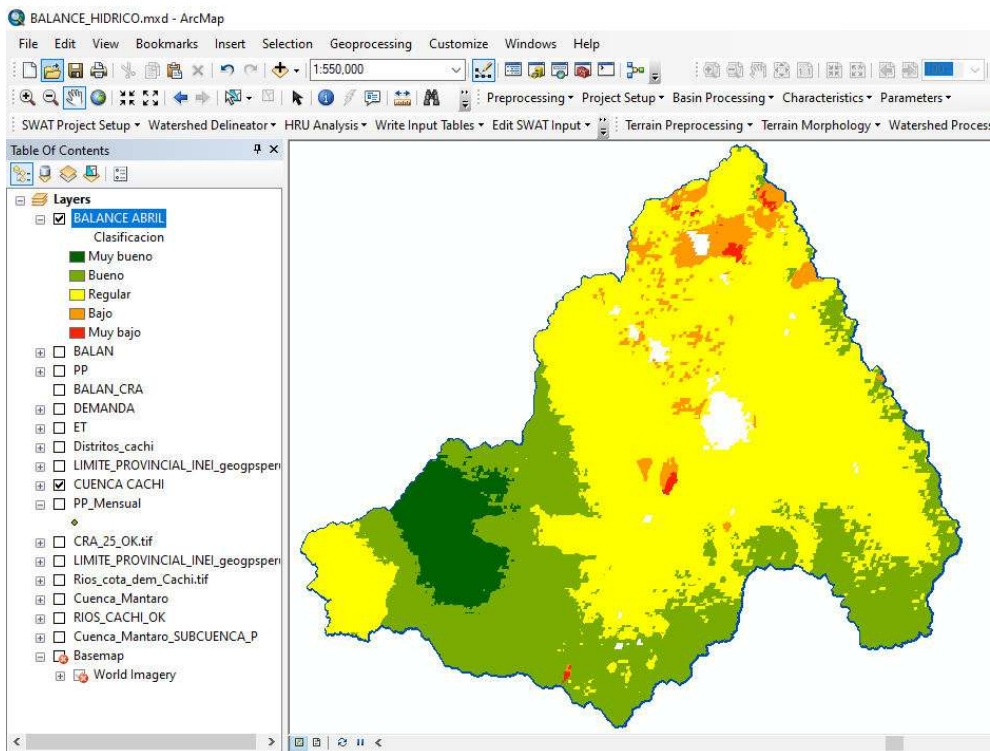
Donde:

**$B_{ODi}$**  = Es el balance en lámina de agua para la celda, exceptuando la variación del almacenamiento (mm/mes).

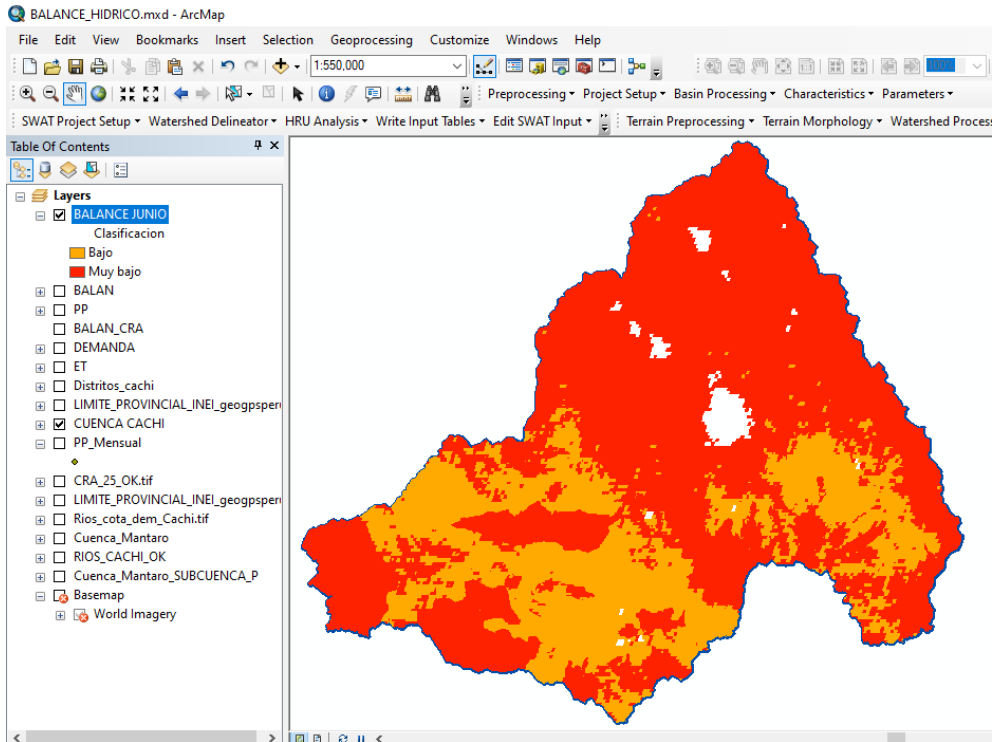
Aplicándose la fórmula última en la cuenca se obtuvieron la disponibilidad hídrica espacial, sin incluir la influencia de la variación del almacenamiento (capacidad de recarga del acuífero subyacente) en la cuenca como se detalla para los meses representativos (Figura 2.6 a Figura 2.11) y de estiaje (Figura 2.8, Figura 2.9).



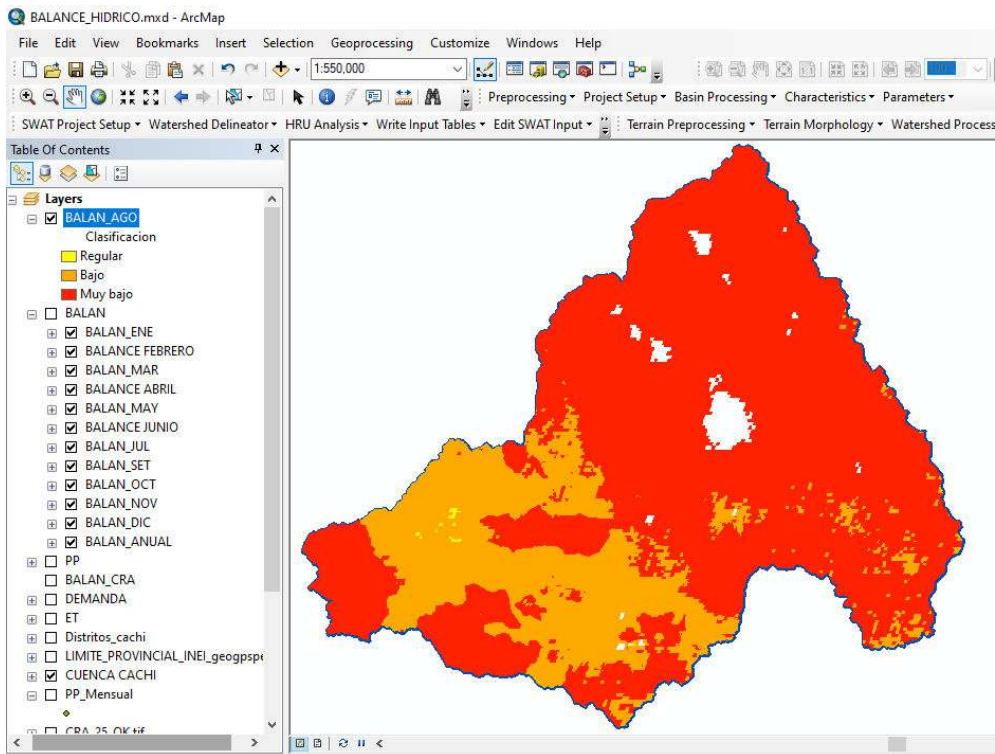
**Figura 2.6:** Mes de febrero distribución de disponibilidad hídrica, datos de oferta – demanda para la cuenca Cachi.



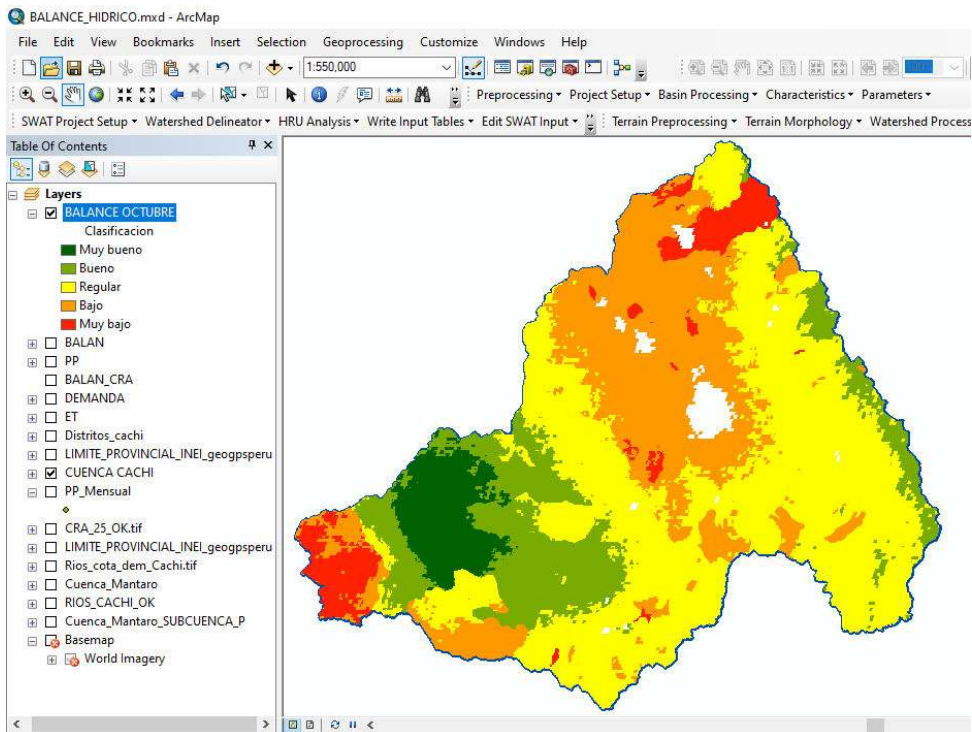
**Figura 2.7:** Mes de abril distribución de disponibilidad hídrica, datos de oferta – demanda para la cuenca Cachi.



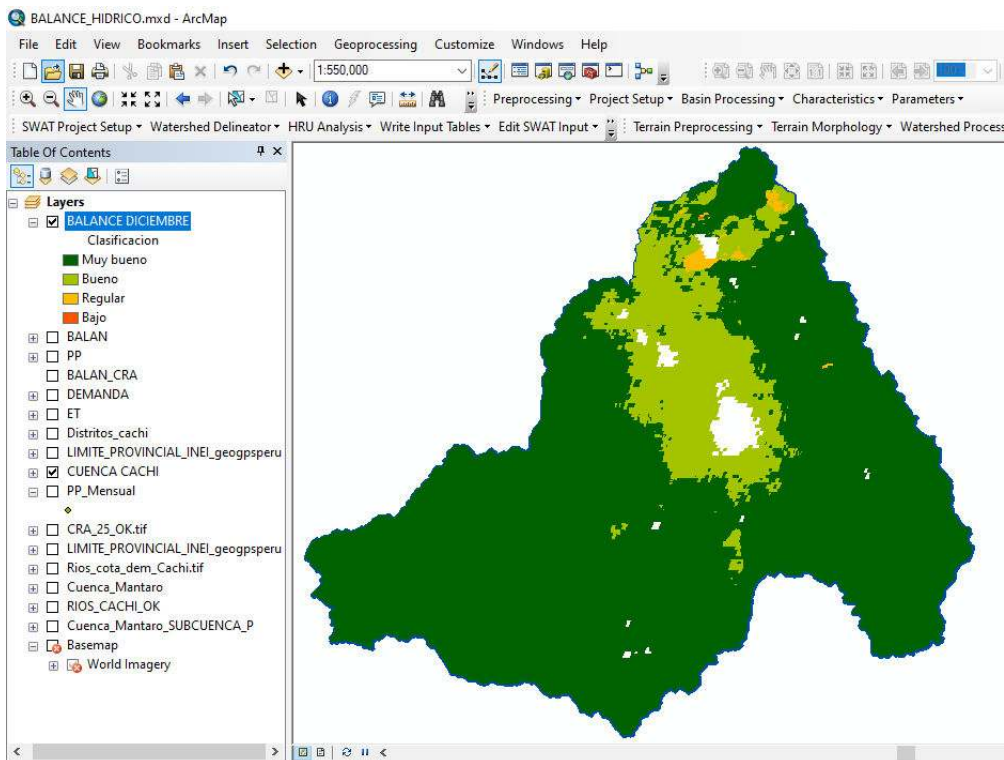
**Figura 2.8:** Mes de junio distribución de disponibilidad hídrica, datos de oferta – demanda para la cuenca Cachi.



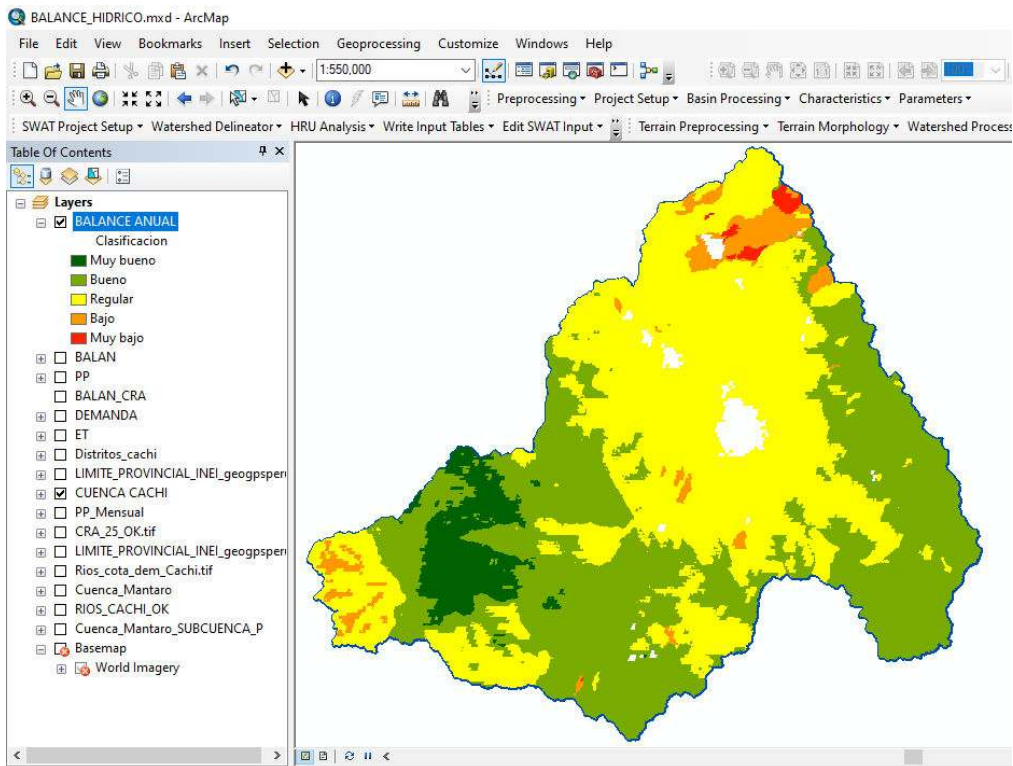
**Figura 2.9:** Mes de agosto distribución de disponibilidad hídrica, datos de oferta – demanda para la cuenca Cachi.



**Figura 2.10:** Mes de octubre distribución de disponibilidad hídrica, datos de oferta – demanda para la cuenca Cachi.



**Figura 2.11:** Mes de diciembre distribución de disponibilidad hídrica, datos de oferta – demanda para la cuenca Cachi.



**Figura 2.12:** Distribución anual de disponibilidad hídrica, datos de oferta – demanda para la cuenca Cachi. El puntaje se asignó linealmente con 100 para el valor mínimo y con 0 para el máximo, el resto de valores dentro de este intervalo (Tabla 2.4).

**Tabla 2.4:** Puntaje en relación a la disponibilidad hídrica de la oferta - demanda.

<b>Disponibilidad Oferta-Demanda</b>	<b>Valor</b>	<b>Puntaje</b>
<b>Mensual</b>		
Mínimo	-80.44	100
Muy bajo	-51.88	80
Bajo	-23.32	60
Regular	5.24	40
Bueno	33.80	20
Muy bueno	62.36	0
<b>Anual</b>		
Mínimo	-965.33	100
Muy bajo	-622.61	80
Bajo	-279.89	60
Regular	62.83	40
Bueno	405.56	20
Muy bueno	748.28	0

**2.3.1.1.5. Disponibilidad hídrica en la cuenca incluido la ( $\Delta S$ ):**

$$B_i = P_i - ET_i - D_i - f(P, CRA)$$

Donde:

$B_i$  = Es disponibilidad hídrica expresado en lámina de agua para la celda

Al no contarse con datos de acuíferos como el volumen, transmisividad, potencia, etc. La misma que está relacionado directamente con la capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA), siendo esta función de la cobertura vegetal (Figura 2.13), textura del suelo (Figura 2.15), pendiente (Figura 2.16); los cuales recargan los acuíferos subyacentes, estos a su vez función de las formaciones geológicas que la originan (Figura 2.17).

De donde podemos generar un mapa entre máxima y mínima capacidad de recarga de almacenamiento, en función a la ponderación y asignación de puntajes para cada una de las variables (capas) descritas anteriormente (Tabla 2.5).

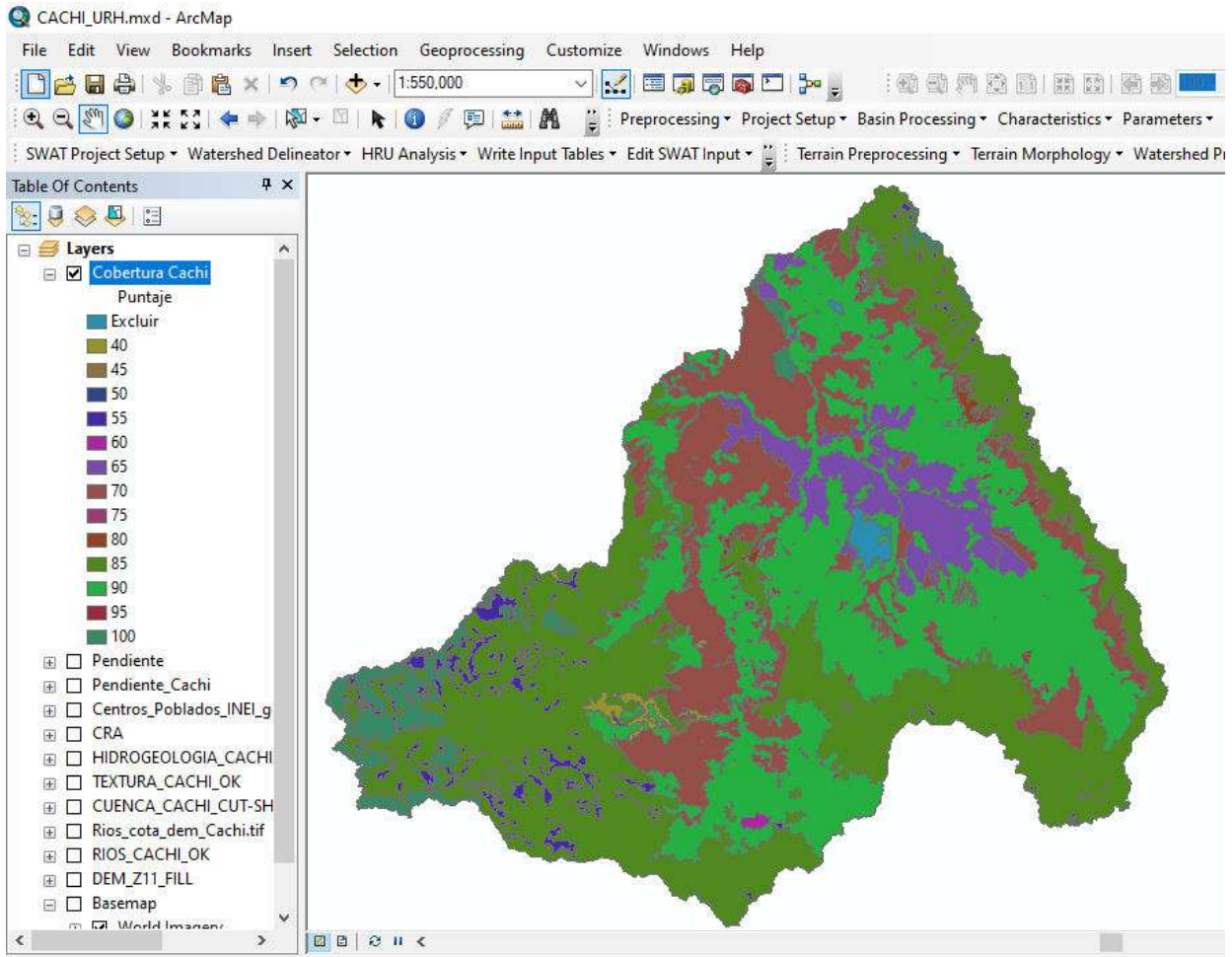
Así:

**Tabla 2.5:** Puntuaciones y umbrales para la capacidad de recarga del acuífero subyacente mínima (CRA)

<b>Característica</b>	<b>Puntaje</b>	<b>Incidencia</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Cobertura vegetal</b>			<b>25 %</b>
Minería	Excluir		0.00%
Uso Urbano	Excluir		0.00%
Tierras desnudas	100	10.99%	3.11%
Ríos y quebradas	95	10.44%	2.80%
Áreas Agrícolas	90	9.89%	2.64%
Herbazal	85	9.34%	2.48%
Plantación forestal	80	8.79%	2.33%
Glaciar	75	8.24%	2.17%
Arbustal	70	7.69%	2.02%
Bosque denso bajo (Bosque Seco)	65	7.14%	1.86%
Lago, laguna	60	6.59%	1.55%
Bofedal	55	6.04%	1.24%
Bosque denso bajo (chachacomo)	50	5.49%	1.09%
Bosque denso bajo (queñua)	45	4.95%	0.93%
Bosque denso bajo (relictos)	40	4.40%	0.78%
<b>Suelo</b>			<b>25 %</b>
Franco arcilloso limoso	100	32.26%	8.06%
franco arcilloso	85	27.42%	6.85%
Limo	70	22.58%	5.65%

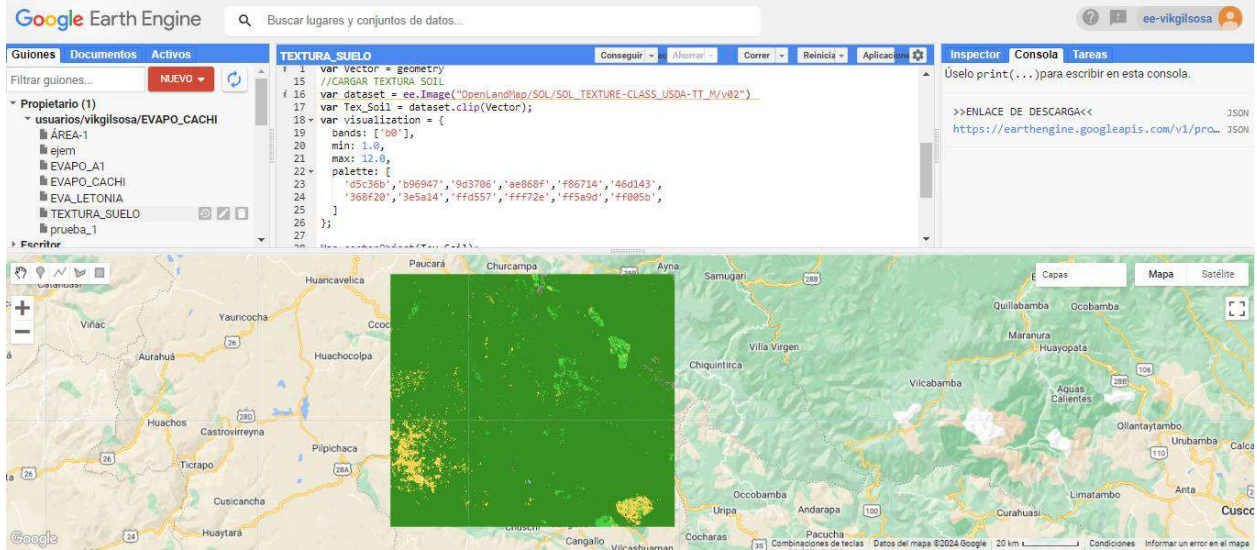
Marga	55	17.74%	4.44%
<b>Pendiente</b>			<b>25%</b>
Pronunciada >50%	100	33.33%	8.33%
Alta 50%-20%	80	26.67%	6.67%
Media 20%-8%	60	20.00%	5.00%
Suave 8%-1%	40	13.33%	3.33%
Despreciable <1%	20	6.67%	1.67%
<b>Hidrogeología</b>			<b>25%</b>
Acuitardo intrusivo	100	26.67%	6.67%
Acuitardo volcánico sedimentario	85	22.67%	5.67%
Acuífero fisurado volcánico	70	18.67%	4.67%
Acuífero fisurado sedimentario	55	14.67%	3.67%
Acuífero fisurado kárstico	40	10.67%	2.67%
Acuífero poroso no consolidado alta	25	6.67%	1.67%

**Cobertura vegetal:** De acuerdo al mapa de cobertura vegetal (Figura 2.13) alojado en la geoservidor del MINAM (<https://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/zee-aprobadas/>), se ponderó y rasterizó las unidades existentes para la cuenca.

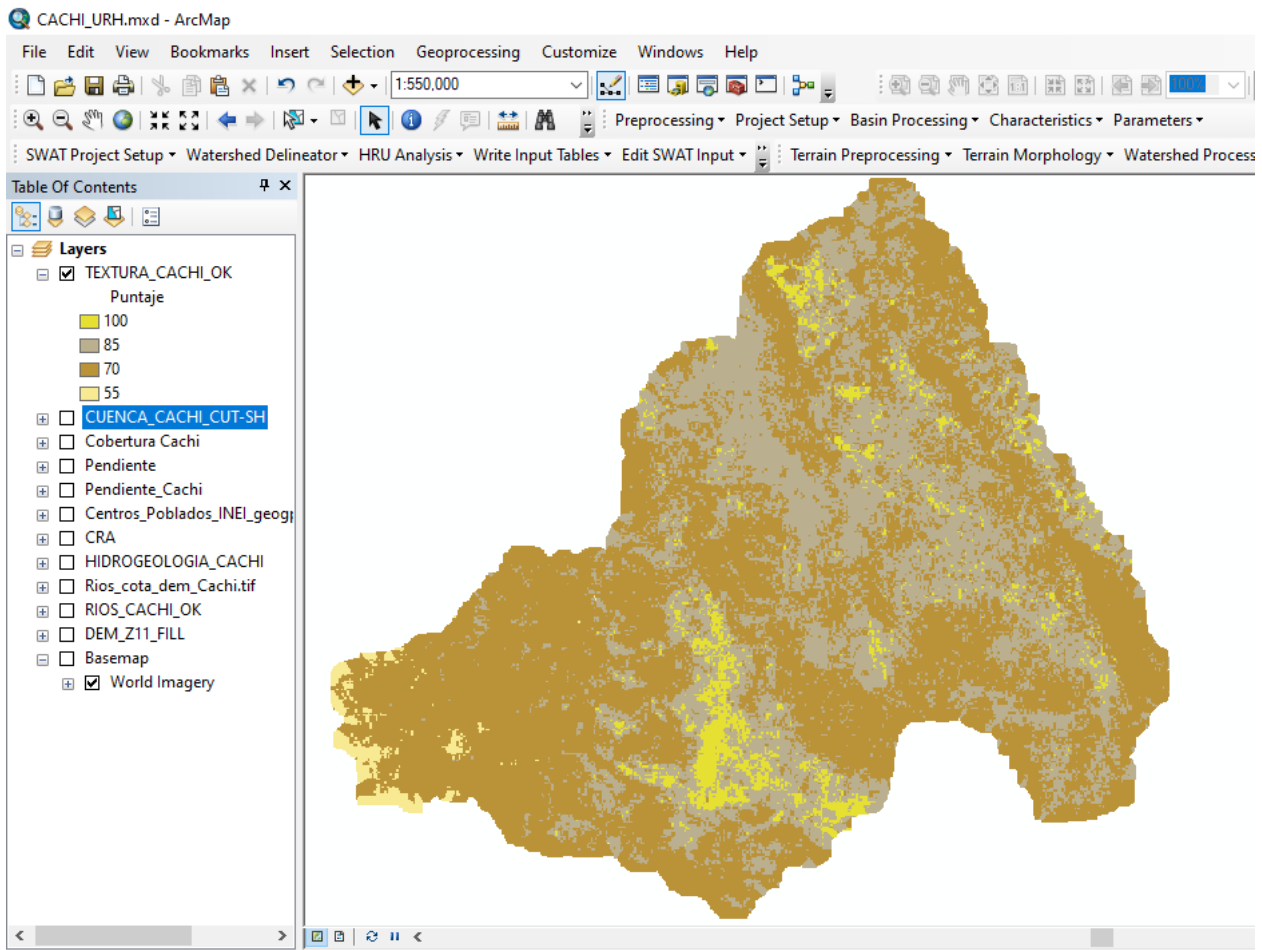


**Figura 2.13:** Asignación de puntajes según la cobertura vegetal existente en la cuenca Cachi.

**Textura del suelo:** Los datos se obtuvieron a partir de Clase de textural (sistema USDA) a 7 profundidades estándar predichas utilizando la compilación global de observaciones del suelo. La evaluación de la precisión de los mapas está disponible en (Hengl, 2018)., en la resolución de celda de 250m, los mismos que se procesaron y extrajeron en formato GeoTIFF (Figura 2.15) desde Google Earth Engine (Figura 2.14).

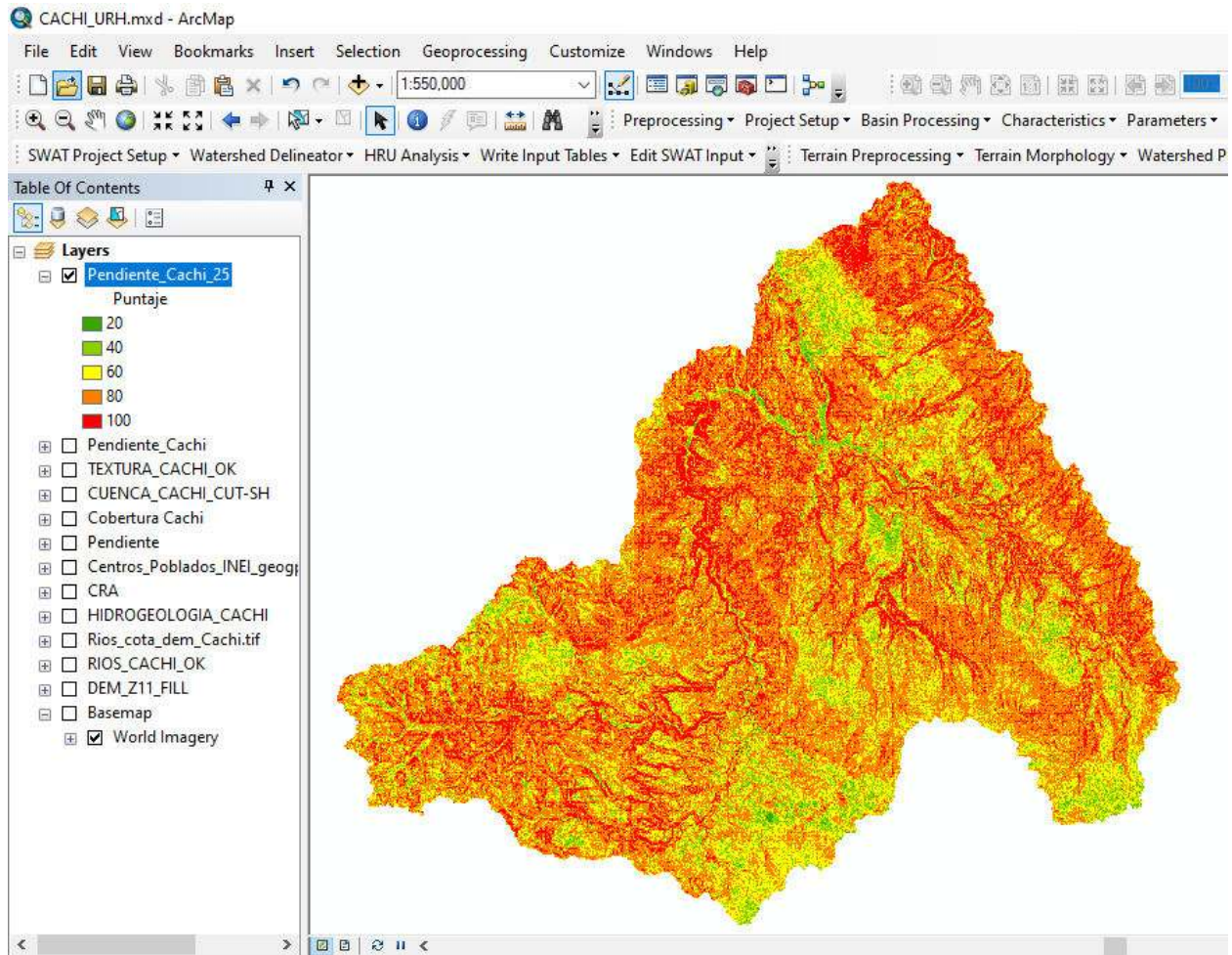


**Figura 2.14:** Interfaz y código en Google Earth Engine para la clase textural en la cuenca Cachi.



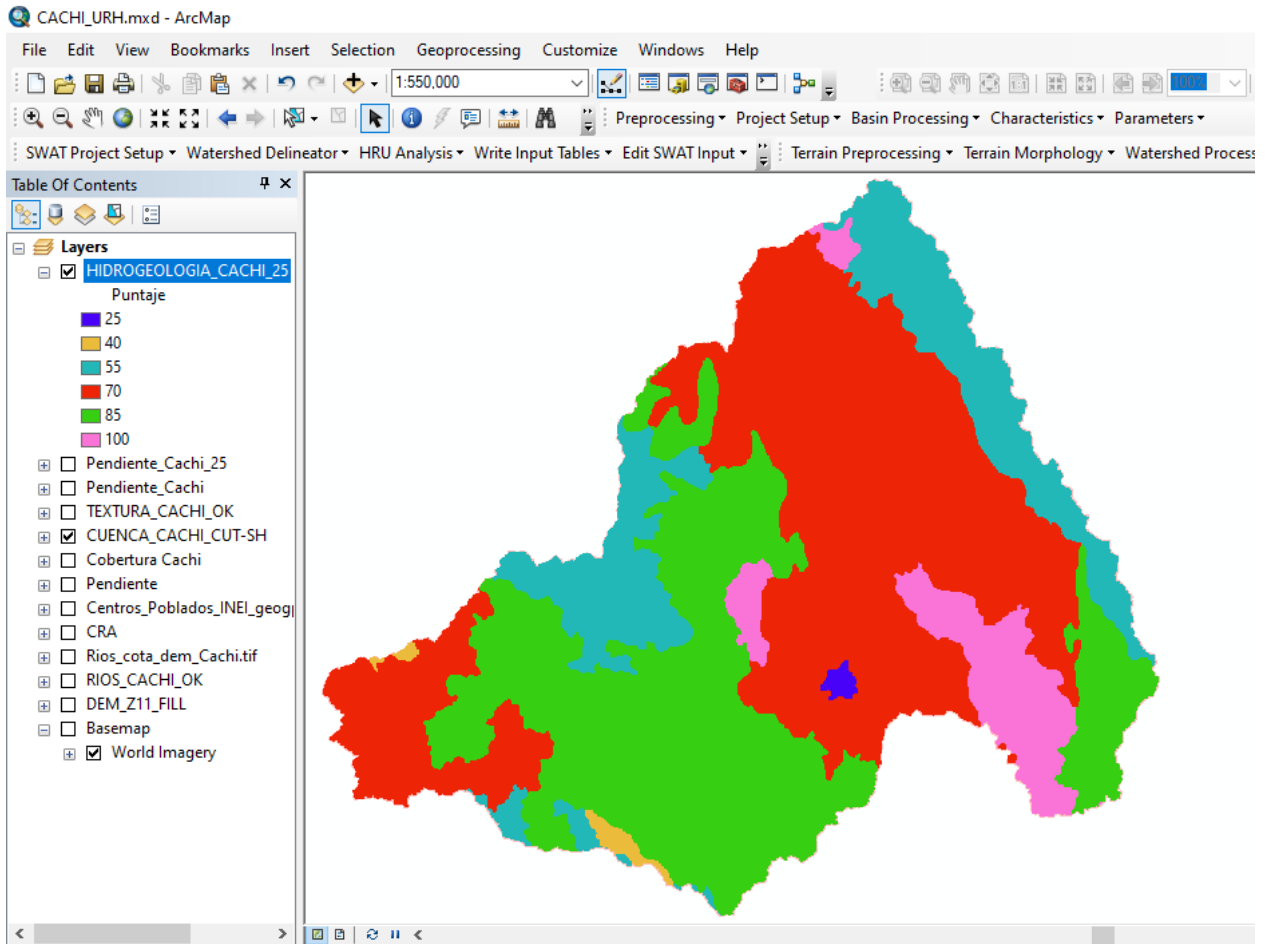
**Figura 2.15:** Asignación de puntajes según la clase textural existente en la cuenca Cachi.

**Pendiente:** Los datos se obtuvieron a partir del DEM en GeoTIFF de la plataforma de LandViewer, de resolución de celda de 25m (Figura 2.16), el cual se procesó en ArcGIS 10.8.2.



**Figura 2.16:** Asignación de puntajes según las pendientes existentes en la cuenca Cachi.

**Hidrogeología:** De acuerdo al mapa de hidrogeología alojado en la geoservidor del Ministerio del Ambiente (MINAM) (<https://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/>), se ponderó y rasterizó las unidades existentes para la cuenca (Figura 2.17).



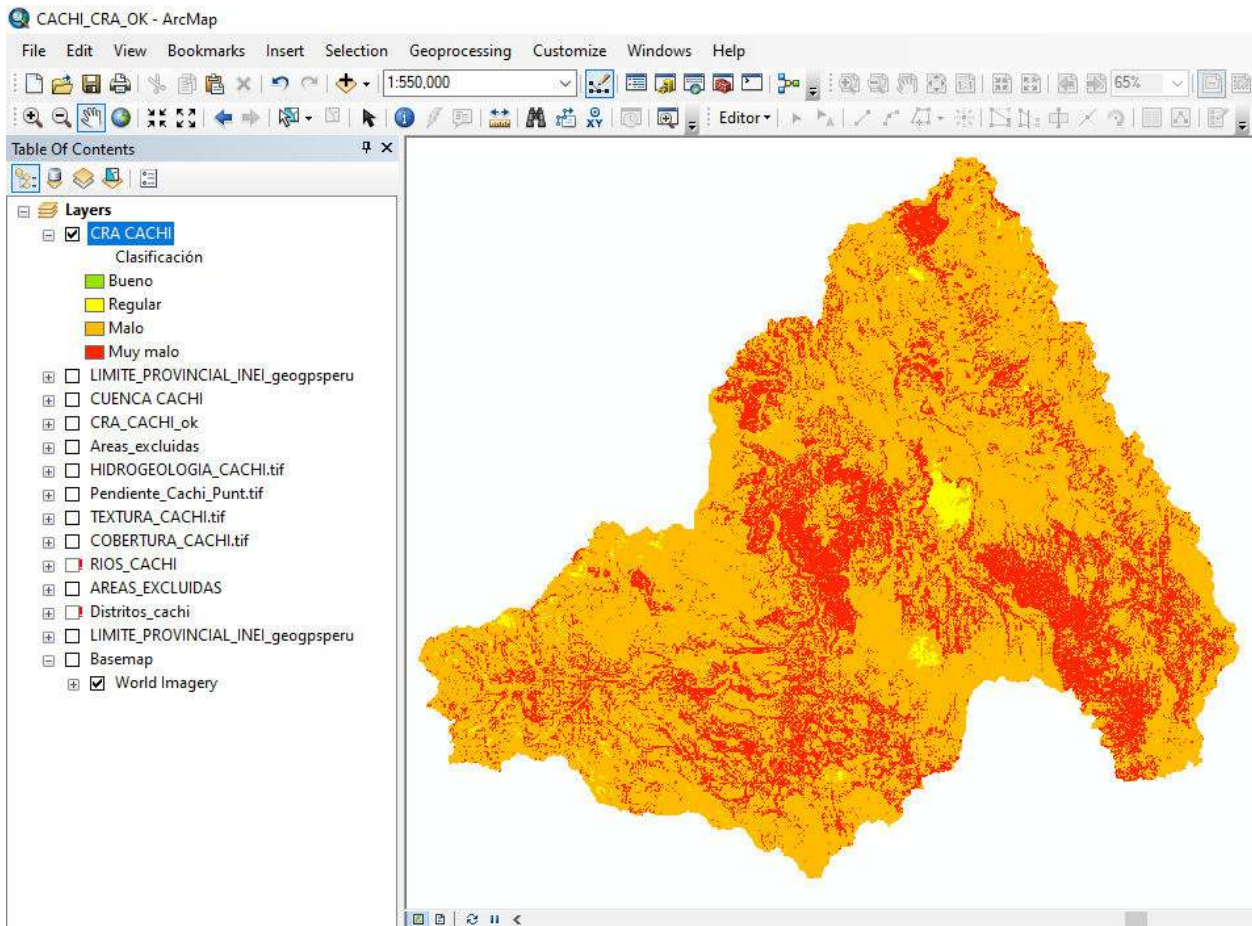
**Figura 2.17:** Asignación de puntajes según la hidrogeología existente en la cuenca Cachi.

Consecuentemente se realiza la sumatoria de las ponderaciones respectivas para las cuatro capas analizadas, cobertura vegetal, clase textural del suelo, pendiente e hidrogeología en la cuenca (Figura 2.18).

La puntuación se realizó linealmente con el mayor valor para un puntaje de 100 y con 0 para el valor del mínimo el resto de los valores dentro de este rango (Tabla 2.6).

**Tabla 2.6:** Clasificación de la capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA) y asignación de puntajes.

Capacidad de recarga del acuífero subyacente	Puntaje
Muy bajo	100-80
Bajo	80-60
Regular	60-40
Bueno	40-20
Muy bueno	20-0



**Figura 2.18:** Asignación de puntajes a la capacidad de recarga al acuífero subyacente (CRA) para la cuenca Cachi.

Finalmente, la disponibilidad hídrica viable en la cuenca expresada como puntajes, resulta de la sumatoria del balance y la CRA.

$$B_i = B_{OD} + f(P_{ma}, CRA)$$

Donde:

**$B_{OD}$**  = Es el puntaje al balance en lámina de agua para la celda, exceptuando la variación del almacenamiento.

**$B_i$**  = Es la disponibilidad hídrica viable expresada como puntaje.

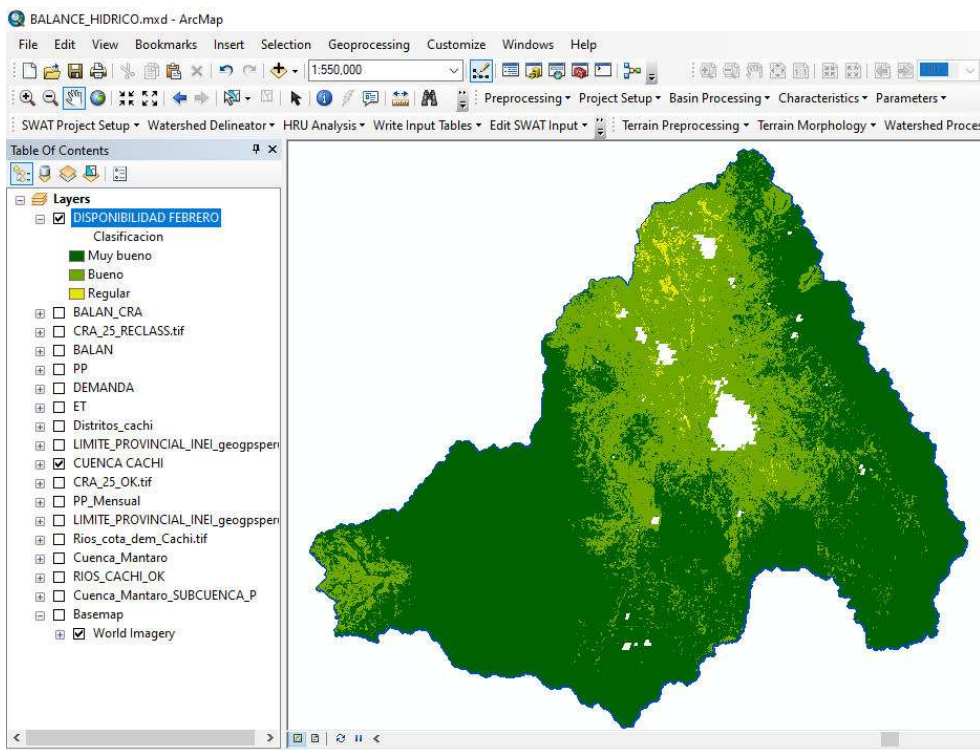
**$f(P_{ma}, CRA)$**  = Es la capacidad de recarga del acuífero subyacente expresado como puntajes.

La clasificación de la disponibilidad hídrica viable se muestra en la Tabla 2.7.

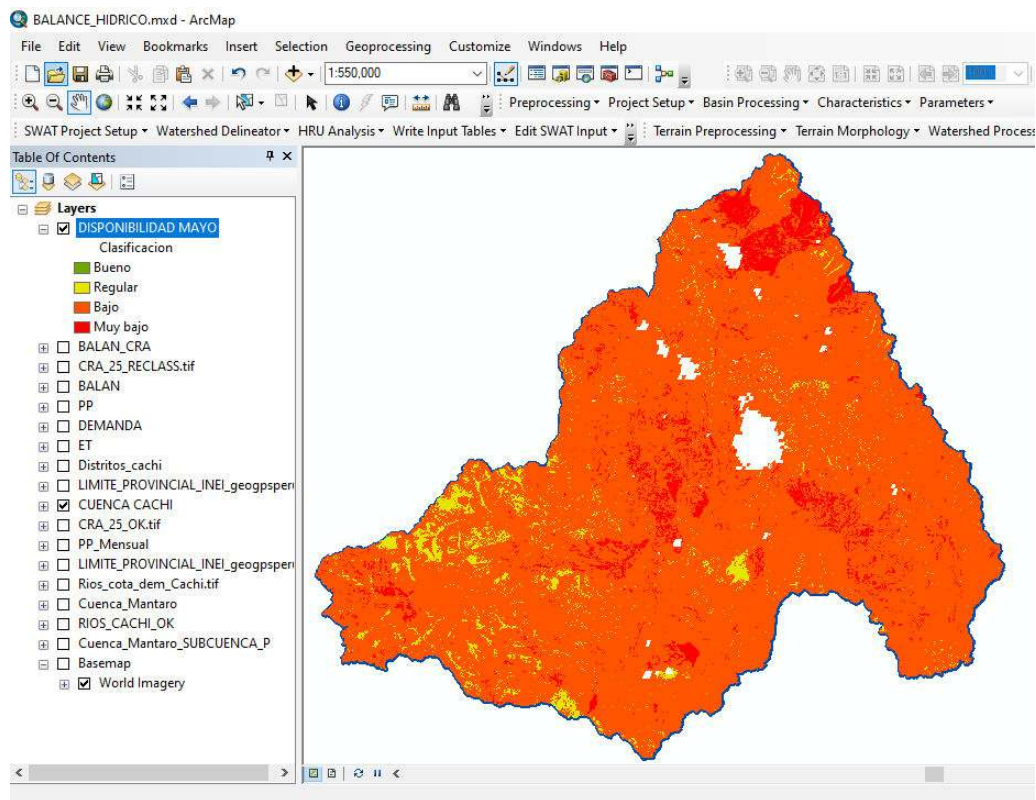
**Tabla 2.7:** Clasificación en relación a la disponibilidad hídrica viable resultado del balance de oferta – demanda y capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA).

Disponibilidad hídrica viable	Puntaje
<b>Mensual</b>	
Mínimo	200
Muy bajo	160
Bajo	120
Regular	80
Bueno	40
Muy bueno	0
<b>Anual</b>	
Mínimo	200
Muy bajo	160
Bajo	120
Regular	80
Bueno	40
Muy bueno	0

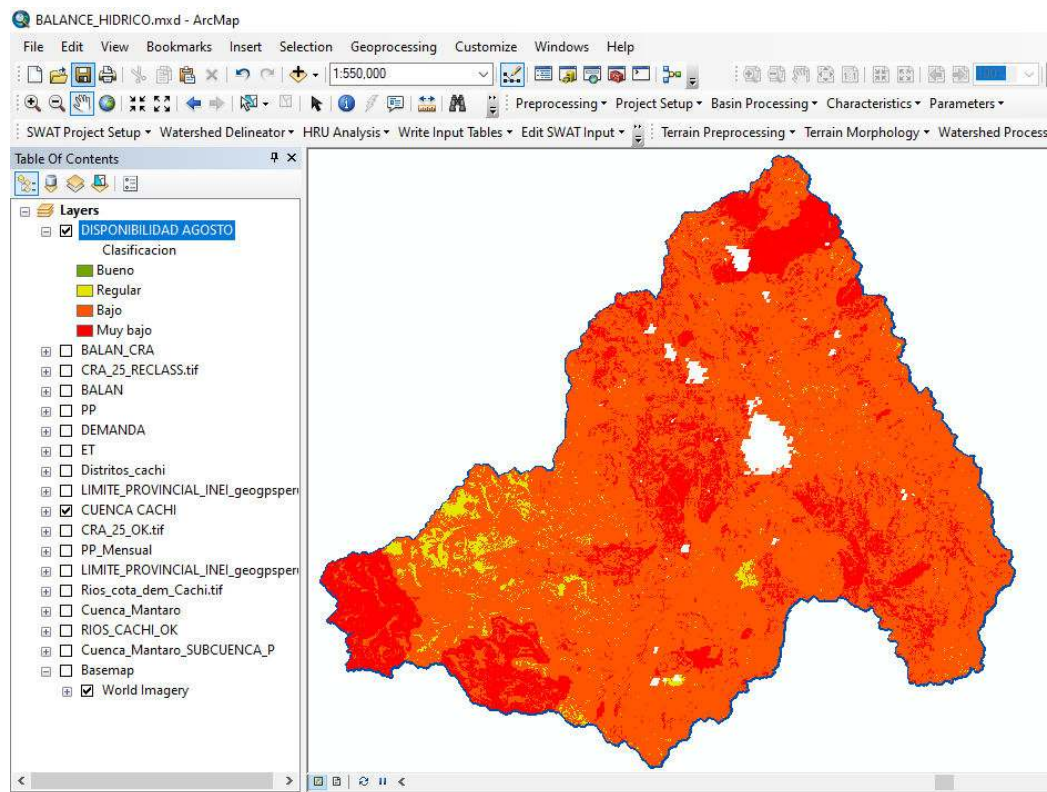
Las Figuras 2.19 a 2.22 presentan la disponibilidad hídrica viable en forma mensualizada para los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre, respectivamente. La disponibilidad hídrica viable anual para la cuenca se encuentra en la Figura 2.23.



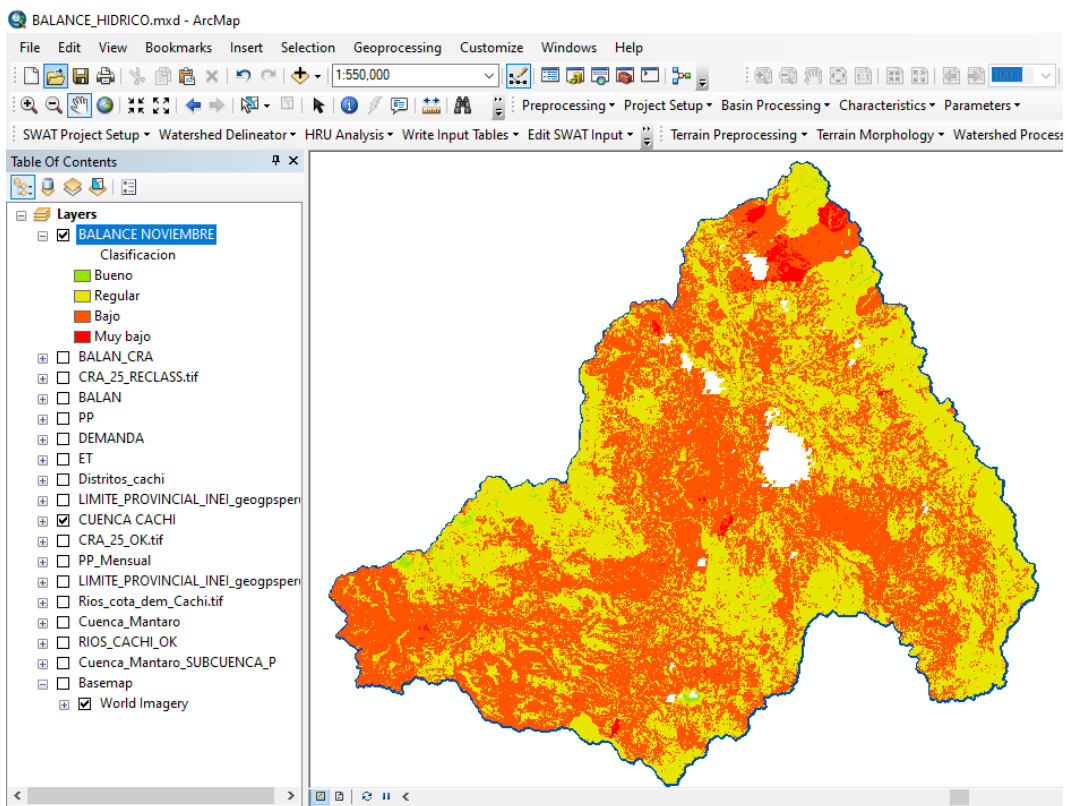
**Figura 2.19:** Mes de febrero, disponibilidad hídrica viable de la cuenca Cachi.



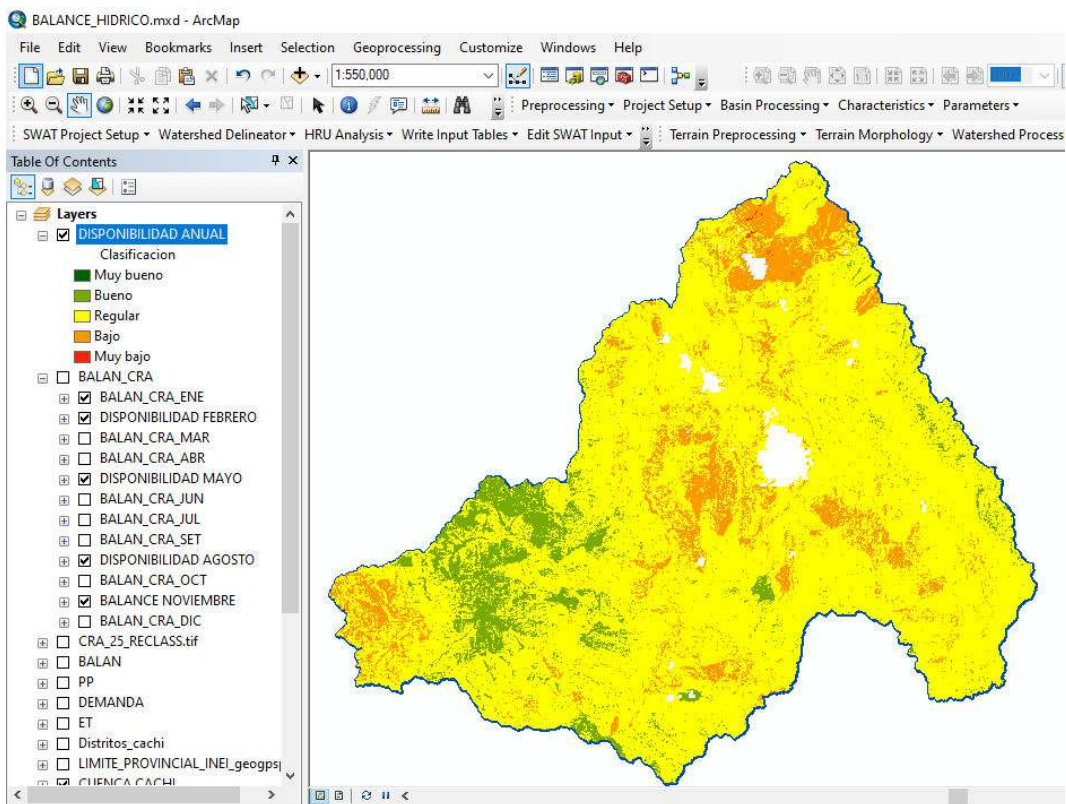
**Figura 2.20:** Mes de mayo, disponibilidad hídrica viable de la cuenca Cachi.



**Figura 2.21:** Mes de agosto, disponibilidad hídrica viable de la cuenca Cachi.



**Figura 2.22:** Mes de noviembre, disponibilidad hídrica viable de la cuenca Cachi



**Figura 2.23:** Distribución anual de disponibilidad hídrica viable de la cuenca Cachi.

### 2.3.2. Oportunidades y desafíos asociados con la implementación de técnicas de recarga artificial en la cuenca del río Cachi.

#### 2.3.2.1. Disponibilidad del recurso hídrico

De los datos obtenidos de la disponibilidad hídrica del balance de la oferta y demanda anual para la cuenca, reclasificamos el ráster según las puntuaciones asignadas, consecuentemente vectorizarlo y obtener las áreas (Tabla 2.8) correspondientes a cada clasificación, esto con el objeto para describir el estado actual del balance a nivel de área en la cuenca.

**Tabla 2.8:** Área y porcentaje de la Figura 2.16, según la clasificación de disponibilidad hídrica balance oferta - demanda.

<b>Disponibilidad hídrica anual (Oferta - Demanda) mm/año</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>
Muy bajo (-965.70 a -600)	20.76	0.57%
Bajo (-600 a -300)	104.52	2.89%
Regular (-300 a 0)	1155.47	31.91%
Bueno (0 a 300)	1913.60	52.84%
Muy bueno (300 a 748.28)	363.00	10.02%
Excluidas (urbano y minería)	64.08	1.77%
<b>Total</b>	<b>3621.42</b>	<b>100.00%</b>

Y finalmente a partir del ráster de la disponibilidad hídrica viable se reclasifica el ráster repitiendo el proceso anterior para obtener el cuadro siguiente de las áreas clasificadas (Tabla 2.9) para la cuenca Cachi:

**Tabla 2.9:** Área y porcentaje de la Figura 2.28, según la clasificación de disponibilidad hídrica viable

<b>Disponibilidad hídrica viable anual</b>	<b>Puntaje</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje</b>
Muy bajo	200-160	0.73	0.02%
Bajo	160-120	401.36	11.08%
Regular	120-80	2891.92	79.86%
Bueno	80-40	258.04	7.13%
Muy bueno	40-0	0.09	0.00%
Excluidas (urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>Total</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>

#### 2.3.2.2. Calidad de las fuentes de agua

Con base en los datos de los últimos 8 monitoreos de calidad de los recursos hídricos en la Unidad Hidrográfica Mantaro (desde 2019-III hasta 2023-I) realizados por el ANA, en la categoría ECA-

3, y según la investigación de Alam et al. (2021), se describen los parámetros y/o contaminantes de acuerdo a su riesgo en la implementación del MAR (Tabla 2.11). Estos parámetros fueron identificados en los diferentes monitoreos y se detallan a continuación en la Tabla 2.10.

**Tabla 2.10:** Puntos de monitoreo de la calidad de recursos hídricos en la cuenca.

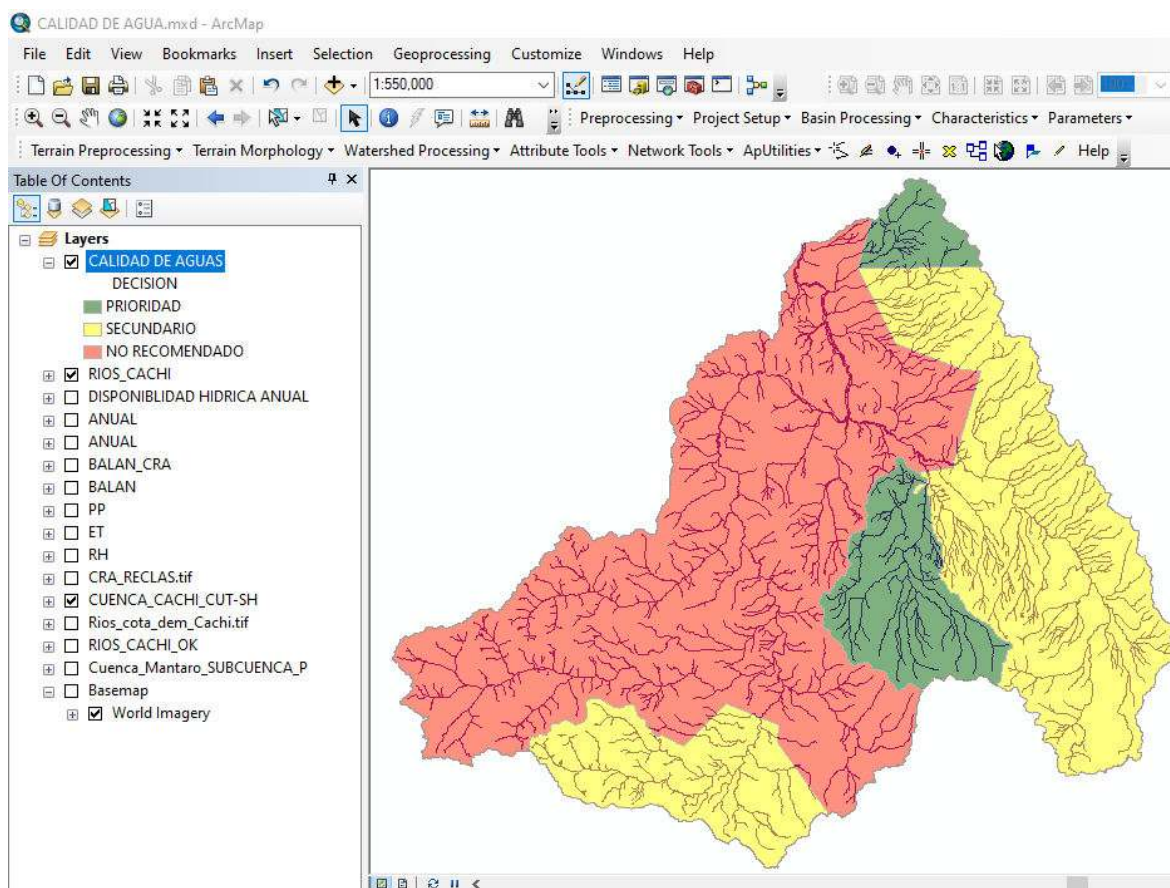
<b>Unidad Hidrográfica Mantaro (Jurisdicción de la ALA Ayacucho)</b>					
<b>Pto. Monit</b>	<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Este</b>	<b>Norte</b>	<b>Altitud</b>
1	ECuc1	Embalse Cuchoquesera, altura de la Centro Poblado Cuchoquesera	572442	8515029	3758
2	ECuc2	Embalse Cuchoquesera, ingreso del embalse, Zona sur del embalse	572301	8513249	3295
3	ECuch3S	Embalse Cuchoquesera, salida del embalse.	574333	8514628	3758
4	QChac1	Quebrada Chacacocha, después de la salida de las lagunas Chacacocha y CCarccacocha	589753	8573249	3981
5	QRiti1	Aguas debajo de las uniones de las lagunas Ritipata-bofedal Ritipata.	534886	8521244	4355
6	RAlam1	Rio Alameda, Aproximadamente 100 m aguas arriba del puente Pérez (Ayacucho).	583291	8542510	2813
7	RAlam2	Rio Alameda, altura del Puente Rumichaca	587826	8547503	2556
8	RApac1	Rio Apacheta, Aproximadamente 50 m arriba de la bocatoma Apacheta	538305	8524066	4174
9	RCach1	Rio Cachi, a 200 m aguas abajo de la unión de los ríos Pongora y Cachi.	578928	8555471	2407
10	RCach2	Río Cachi, altura del puente Laramate unión de los ríos Paccha y Vinchos.	566269	8559076	2803
12	RChaa1	Rio Chaca, altura del puente Pacchancca	584406	8586555	3172
13	RHat1	Rio Hatumpampa , Aproximadamente a 50m arriba del puente Hatumpampa. Comunidad de Hatumpampa.	558021	8524088	3560
14	RHuap1	Rio Huarpa, altura puente Huarpa.	572206	8578231	2173
15	RHuat1	Rio Huatatas, antes de la union con el rio Alameda	587869	8547277	2761
16	RPamp1	Río Pampacocha, después de las lagunas de Yanacocha, Piscococha y Pampacocha.	589780	8571815	3924
17	RParq1	Rio Parqora, antes de la unión con le rio Pallca	588585	8585881	3522
18	RPong1	Rio Pongora, antes de la confluencia con el rio Cachi	582984	8553917	2500

19	RRanr1	Rio Ranramayo, antes de la unión con el rio Casacancha	570814	8525426	3295
20	RVinc1	Rio Vinchos, altura de la comunidad Lengua.	568263	8538253	3100
21	RYuca1	Rio Yucaes, altura del puente Muyurina.	587623	8550226	2494
22	RYuca2	Río Yucaes, altura de la comunidad Pampalqui puente Uvashiyocc.	595877	8548030	2608

**Tabla 2.11:** Contaminantes que superan el límite de la cat. 3 del ECA, para los distintos monitoreos en la cuenca.

<b>CONTAMINANTES QUE SUPERAN EL LIMITE EN LA CAT. 3 DEL ECA</b>	
Parámetros depurados	Demanda Química de Oxígeno (DQO)
	Sulfatos
	Fósforo total
	Detergentes (SAAM)
	Coliformes termotolerantes
Parámetros no depurados	<i>Escherichia coli</i>
	Aluminio (Al)
	Arsénico (As)
	Cobre (Cu)
	Hierro (Fe)
	Manganeso (Mn)

Se cargaron los respectivos puntos a la cuenca y se relacionaron sus áreas de afectación en sus fuentes de agua (Figura 2.24) y cuyas áreas según la calificación a la decisión del tratamiento se representan en la Tabla 2.12.



**Figura 2.24:** Calidad de las fuentes de agua en la cuenca según la prioridad de intervención MAR.

**Tabla 2.12:** Área y porcentaje de la Figura 2.29, según la clasificación de calidad de agua

Calidad del agua en la cuenca	Contaminantes Cat. 3 del ECA	Decisión tratamiento	al Área (Km <sup>2</sup> )	Porcentaje
Bueno	Ningún parámetro supera el límite	Secundario (ninguno)	1297.27	35.82%
Regular	Parámetros depurables que superan el límite	Prioridad	399.13	11.02%
Bajo	Parámetros no depurables que superan el límite	No recomendado	1927.98	53.24%
<b>TOTAL</b>			<b>3621.42</b>	<b>100%</b>

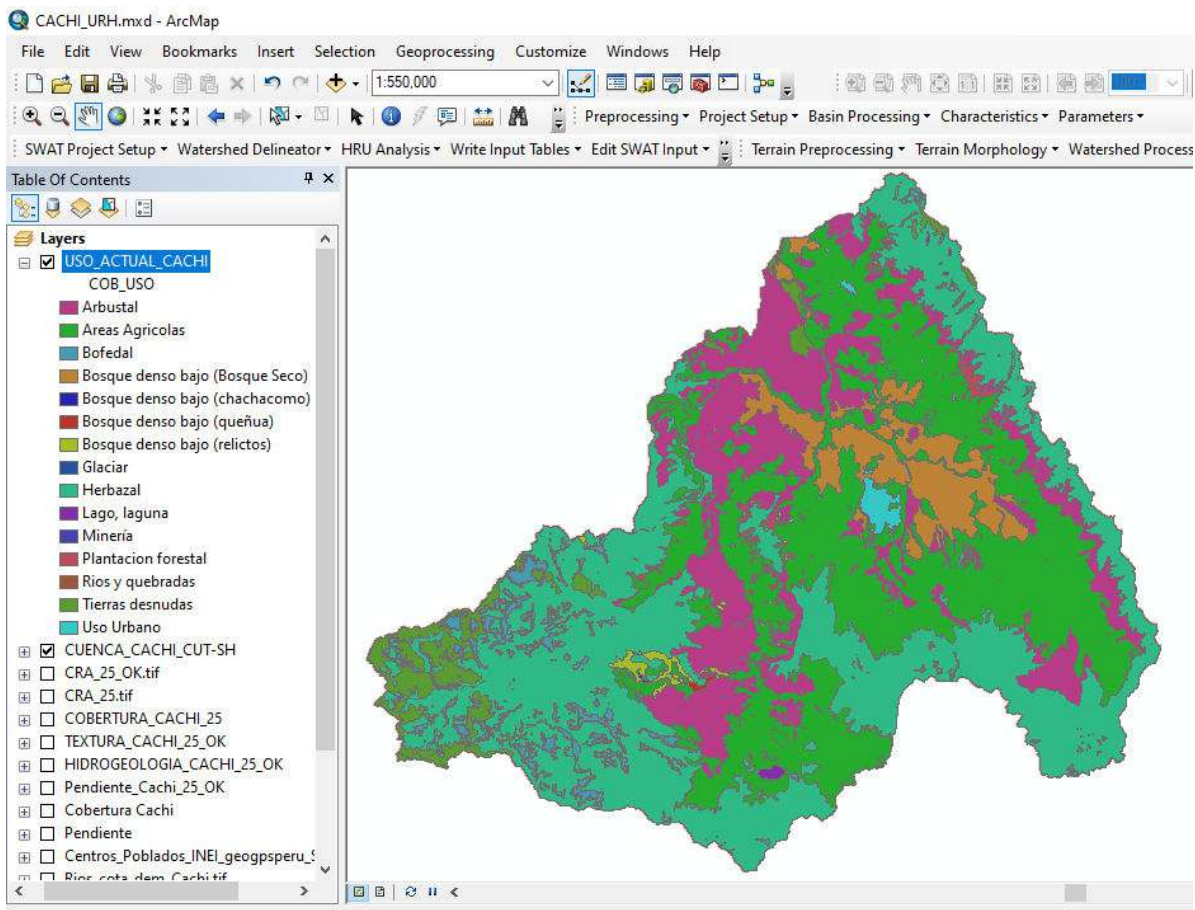
### 2.3.2.3. Uso actual de suelos y densidad poblacional

De acuerdo con el uso actual de suelos proporcionado por el Ministerio del Ambiente (MINAM) y la información poblacional de los centros poblados (INEI, 2017), las zonas urbanas están excluidas en estos criterios. Las áreas más pobladas y dedicadas a actividades agropecuarias

implicarían mayores costos para la implementación de MAR, debido principalmente al costo de los terrenos, así como al control y mitigación de actividades que podrían contaminar las fuentes hídricas destinadas a la recarga.

El Kernel es usualmente una probabilidad simétrica de función de densidad (Baxter et al., 1997). La densidad de probabilidad Kernel, se ajustó para determinar la densidad poblacional con respecto al área circundante a cada centro poblado dentro de la cuenca, y así determinar la influencia de la población en relación a cada centro poblado y su entorno, donde se ajustó la influencia para cada centro poblado una banda de 2 kilómetros.

De donde se generan mapas del uso actual de suelos (Figura 2.25) clasificando las áreas que representan cada uso presente (Tabla 2.13) en la cuenca; y de densidad poblacional (Figura 2.26), el cual se clasificó mostrado en la Tabla 2.14.



**Figura 2.25:** Uso actual de suelos en la cuenca Cachi.

**Tabla 2.13:** Área y porcentaje de la Figura 2.30, según uso actual en la cuenca.

Uso actual	Implementar MAR	Área (Km <sup>2</sup> )	Porcentaje
Arbustal	Prioridad	625.11	17.26%

Áreas agrícolas	Secundario	1179.48	32.57%
Bofedal	Prioridad	81.97	2.26%
Bosque denso bajo (bosque seco)	No recomendado	210.46	5.81%
Bosque denso bajo (chachacomo)	No recomendado	0.65	0.02%
Bosque denso bajo (queñua)	No recomendado	2.13	0.06%
Bosque denso bajo (relictos)	No recomendado	21.30	0.59%
Glaciar	No recomendado	0.10	0.00%
Herbazal	Prioridad	1317.11	36.37%
Lago, laguna	No recomendado	7.58	0.21%
Minería	No recomendado	0.00	0.00%
Plantación forestal	No recomendado	29.55	0.82%
Ríos y quebradas	No recomendado	0.25	0.01%
Tierras desnudas	Prioridad	122.03	3.37%
Uso urbano	No recomendado	23.71	0.65%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>

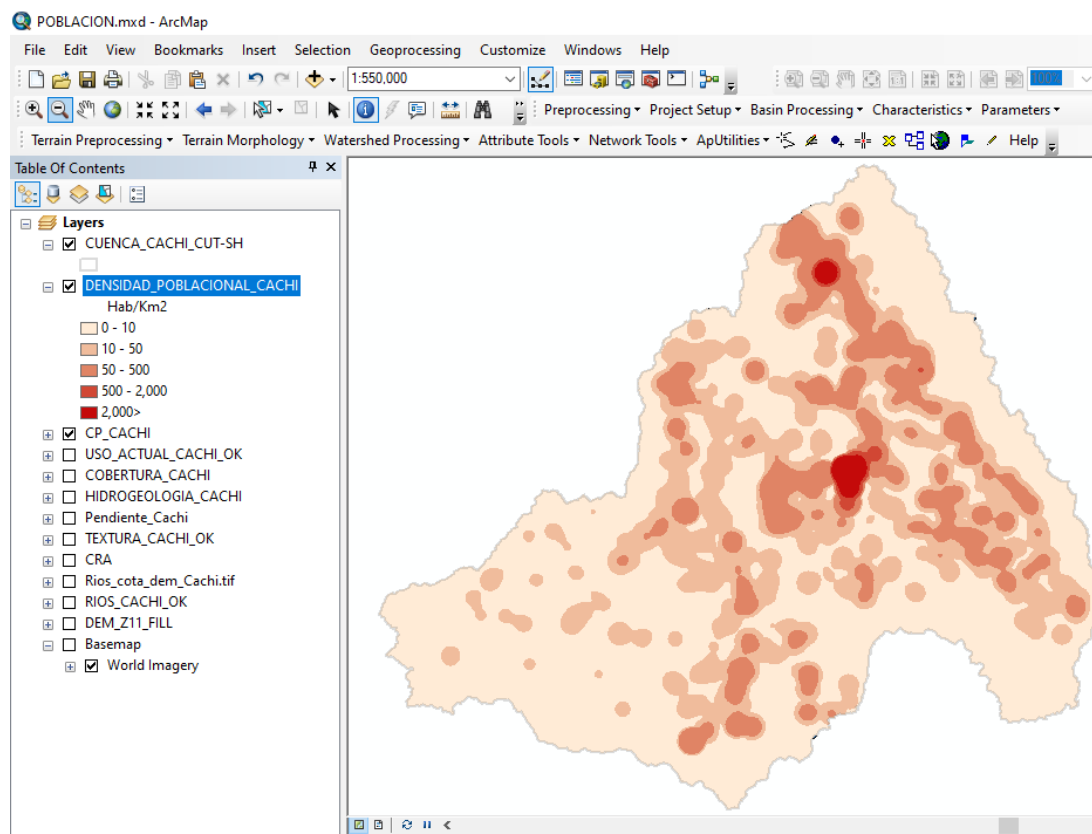


Figura 2.26: Densidad poblacional en la cuenca Cachi.

Tabla 2.14: Área y porcentaje de la Figura 2.31, según densidad poblacional de la cuenca.

Densidad poblacional	Umbral (Hab/Km <sup>2</sup> )	Área (Km <sup>2</sup> )	Porcentaje
Muy alta	2000>	23.68	0.65%

Alta	2000-500	14.48	0.40%
Regular	500-50	495.52	13.70%
Baja	50-10	967.093	26.70%
Muy baja	10-0	2120.69	58.56%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>

#### 2.3.2.4. Demanda futura del recurso hídrico

A lo largo del tiempo, se espera que el recurso hídrico enfrente una mayor demanda y niveles crecientes de contaminación, directamente vinculados al crecimiento poblacional y las actividades necesarias para satisfacer sus necesidades. La proyección de la demanda futura se realizará a un plazo de 20 años, que es el periodo estimado comúnmente como la vida útil de una infraestructura.

$$D_f = D_a(1 + r * 20)$$

Donde:

$D_f$  = Es la demanda futura para 20 años expresado en lámina de agua para la celda (mm/año)

$D_a$  = Es la demanda actual expresado. lámina de agua para la celda (mm/año)

$r$  = Es la tasa de crecimiento poblacional o del sector agrícola

##### 2.3.2.4.1. Para la demanda de consumo poblacional:

De la Tabla 2.15 se tomó para la cuenca la tasa de crecimiento poblacional referente a la provincia de Huamanga al ser la que ocupa en mayor área en relación al total de la cuenca.

Esto se aplicó para todas las licencias de consumo poblacional ya descritas en la Tabla 2.2, para usar la metodología de estimación de la demanda actual en la cuenca.

**Tabla 2.15:** Ayacucho: población censada y tasa de crecimiento promedio anual, según provincia, 2007 y 2017.

Provincia	2007		2017		Variación intercensal 2017		Tasa de crecimiento promedio anual
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%	
<b>Total</b>	<b>612489</b>	<b>100.0%</b>	<b>616176</b>	<b>100.0%</b>	<b>3687</b>	<b>0.6%</b>	<b>0.1%</b>
Huamanga	221390	36.1%	282194	45.8%	60804	27.5%	2.5%
Cangallo	34902	5.7%	30443	4.9%	-4459	-12.8%	-1.4%
Huanca Sancos	10620	1.7%	8409	1.4%	-2211	-20.8%	-2.3%
Huanta	93360	15.2%	89466	14.5%	-3894	-4.2%	-0.4%

La Mar	84177	13.7%	70653	11.5%	-13524	-16.1%	<b>-1.7%</b>
Lucanas	65414	10.7%	51328	8.3%	-14086	-21.5%	<b>-2.4%</b>
Parinacochas	30007	4.9%	27659	4.5%	-2348	-7.8%	<b>-0.8%</b>
Páucar del Sara Sara	11012	1.8%	9609	1.6%	-1403	-12.7%	<b>-1.4%</b>
Sucre	12595	2.1%	9445	1.5%	-3150	-25.0%	<b>-2.8%</b>
Víctor Fajardo	25412	4.1%	20109	3.3%	-5303	-20.9%	<b>-2.3%</b>
Vilcas Huamán	23600	3.9%	16861	2.7%	-6739	-28.6%	<b>-3.3%</b>

Fuente: INEI (2017).

#### 2.3.2.4.2. *Para la demanda del sector agrícola:*

En su investigación, Santana (2022) señala que el crecimiento de la frontera agrícola fue del 4% para las áreas agrícolas registradas hasta el año 2020, con una proyección al 2022. Este valor se utiliza como promedio para toda la cuenca, ya que el sistema hidráulico cubre la mayor parte de la cuenca Cachi y es el más representativo. Este crecimiento se aplicó a todas las licencias del sector agrícola mencionadas en la Tabla 2.3, para estimar la demanda actual en la cuenca. La demanda futura total (Figura 2.27) se calculó sumando la demanda de consumo poblacional y la del sector agrícola. Para proyectar la demanda futura poblacional y agrícola, se utilizó el método aritmético, ya que es el más adecuado para el área de estudio, usando la siguiente expresión:

$$Df = Da \times (1 + r \times t/100)$$

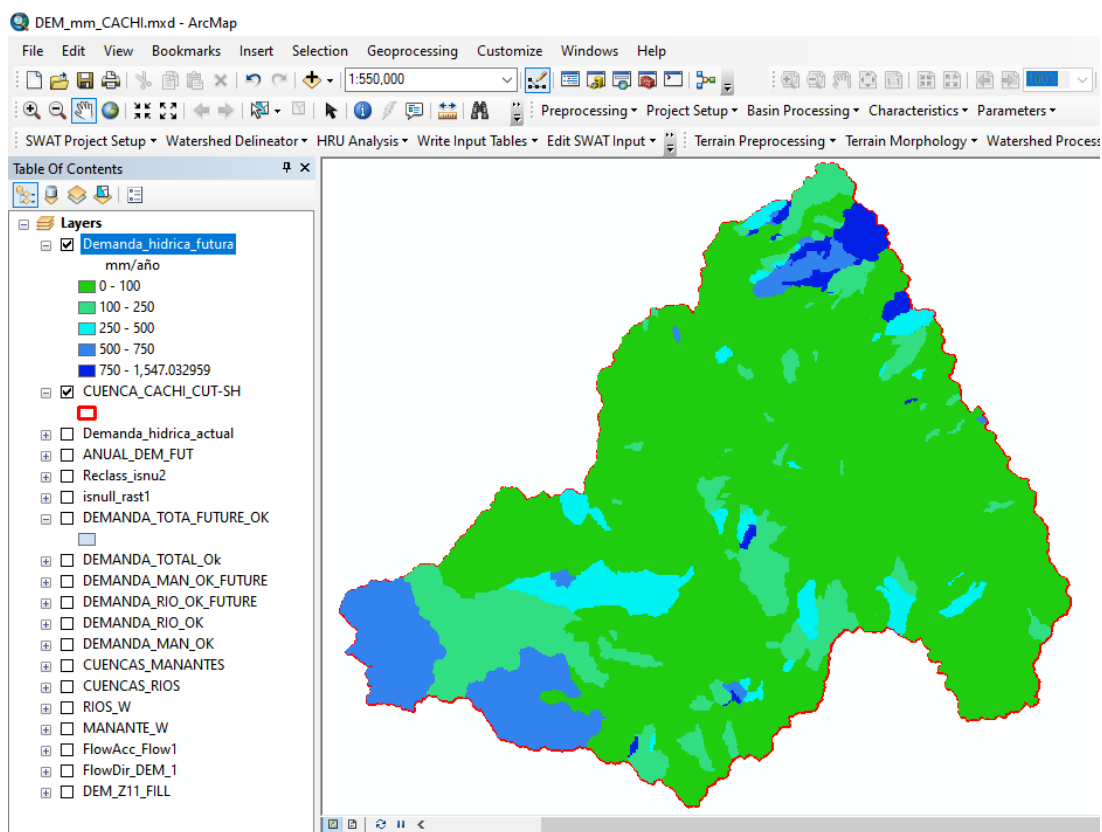
Donde:

Df= Demanda futura

Da= Demanda actual

r = tasa de crecimiento 2.5% y 4%, uso poblacional y agrícola respectivamente

t = años (20)



**Figura 2.27:** Demanda futura del recurso hídrico para la cuenca Cachi.

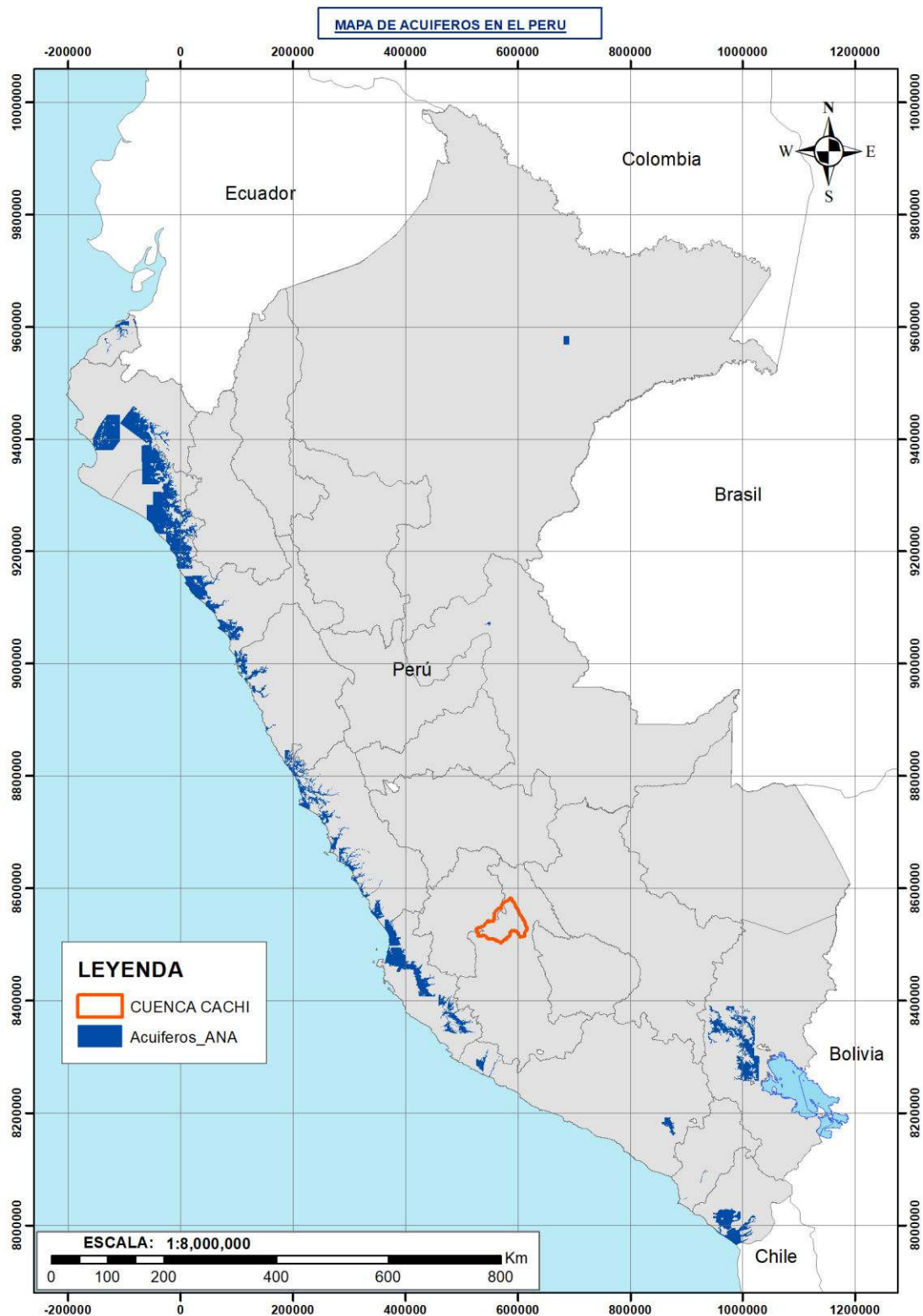
Se clasificó la demanda hídrica futura (Tabla 2.16) y las áreas que representan para observar su distribución en la cuenca.

**Tabla 2.16:** Área y porcentaje de la Figura 2.27, para la demanda hídrica futura en la cuenca.

<b>Demanda hídrica futura</b>	<b>Umbral (mm/año)</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje</b>
Muy alta	750>	66.65	1.84%
Alta	500 a 750	309.00	8.53%
Regular	250 a 500	192.60	5.32%
Baja	100 a 250	483.63	13.35%
Muy baja	0 a 100	2569.53	70.95%
<b>Total</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>

### 2.3.2.5. Información y data sobre los acuíferos existentes

La información respecto a los acuíferos y su caracterización es nula o casi nula en la cuenca, esto contrastado a partir de los acuíferos inventariados por el ANA en el Perú. No se cuenta con estudios de la capacidad, la transmisividad, la potencia, la calidad, y tampoco existe perforaciones donde se mida el nivel piezométrico de los mismos.



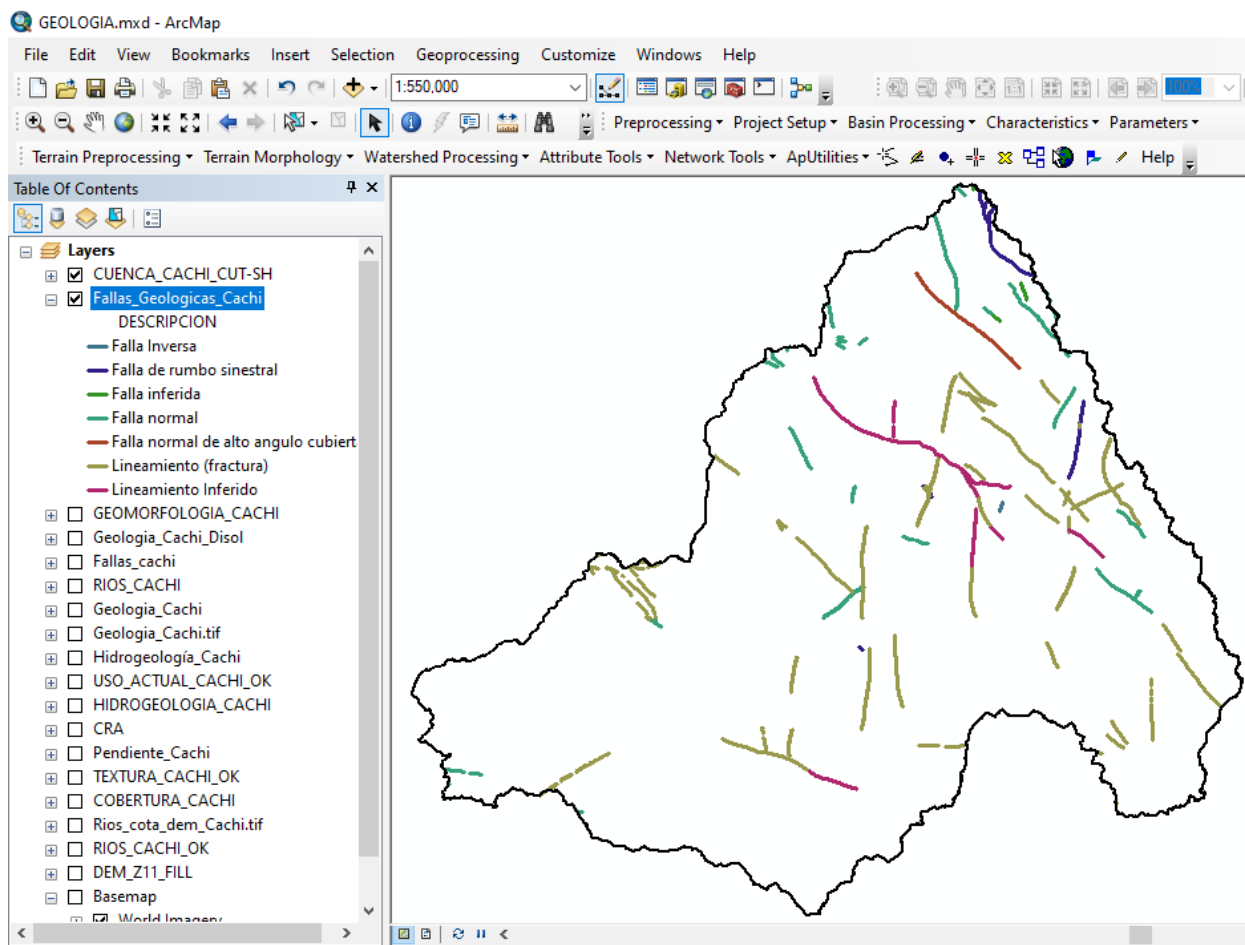
**Figura 2.28:** Delimitación espacial de polígonos para los acuíferos evaluados por la ANA y la cuenca Cachi.

Fuente: ANA (2016).

Como se observa en la Figura 2.28, no se tiene registro de acuíferos para la cuenca Cachi, entonces para la evaluar la implementación de MAR, se apoya de otras variables que determinan la composición de los acuíferos, como son las fallas geológicas, formaciones geológicas, hidrogeología y geomorfología.

#### **2.3.2.5.1. Fallas en la cuenca:**

En geología, una falla es una fisura o zona de fracturas que longitudinalmente acontecen desplazamientos relativos de los bloques paralelos a la zona (Bates y Jackson, 1980). Cuando esta deformación se produce en la corteza superficial (profundidad menor a 1 km), se introduce permeabilidad, heterogeneidad y anisotropía a la roca afectada. En consecuencia, se facilita la conducción del agua a través de las formaciones rocosas a lo largo de la falla. Sin embargo, en el sentido perpendicular se produce el efecto contrario, el desplazamiento de la corteza forma barreras que limitan el flujo subterráneo (Bense et al., 2013). En la presente investigación, se obtuvo los datos de ubicación de las fallas geológicas del Perú a través del Sistema de Información Geológico y Catastral Minero (<https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/main>), este incluye fallas normales, inversas y de rumbo (INGEMMET, 2024). Las fallas presentes en la cuenca Cachi se muestran en la Figura 2.29.



**Figura 2.29:** Mapa de fallas geológicas en la cuenca Cachi

Fuente: adaptado de INGEMMET (2024).

### 2.3.2.5.2. Formaciones geológicas:

Entiéndase como la unidad mínima lito estratigráfica. Cada formación se define por un conjunto de estratos rocosos que poseen características físicas, químicas y biológicas similares (Parker, 1984). El movimiento del agua subterránea queda definido por las estructuras geológicas subterráneas de cada formación. Dependiendo de sus propiedades, estas pueden favorecer el flujo subterráneo o interrumpirlo en su totalidad (Folch, 2010). Para la presente investigación, se empleó la información disponible en la plataforma GEOCATMIN (<https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/main>) para obtener la información geológica de la cuenca Cachi (Figura 2.30).

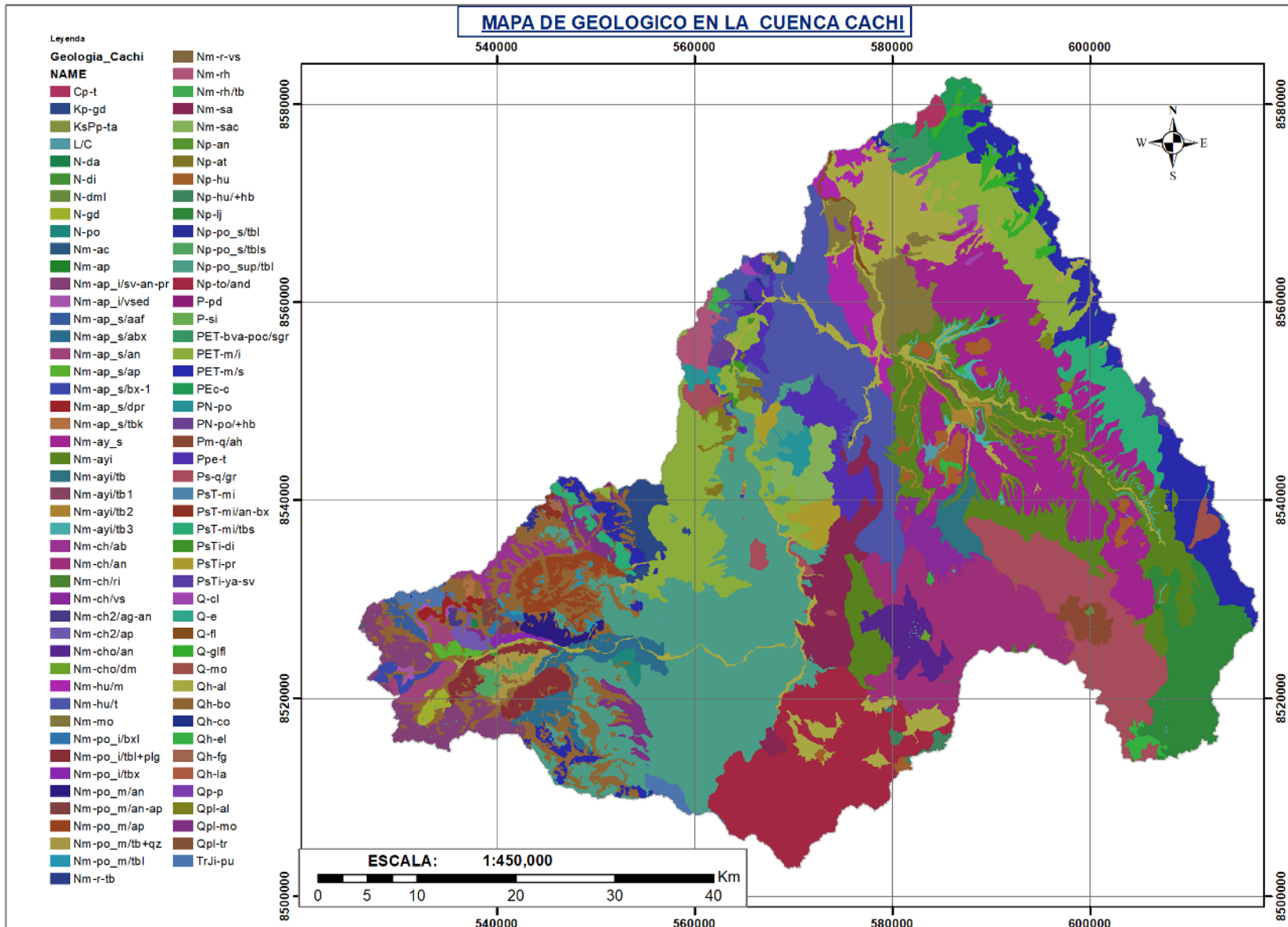
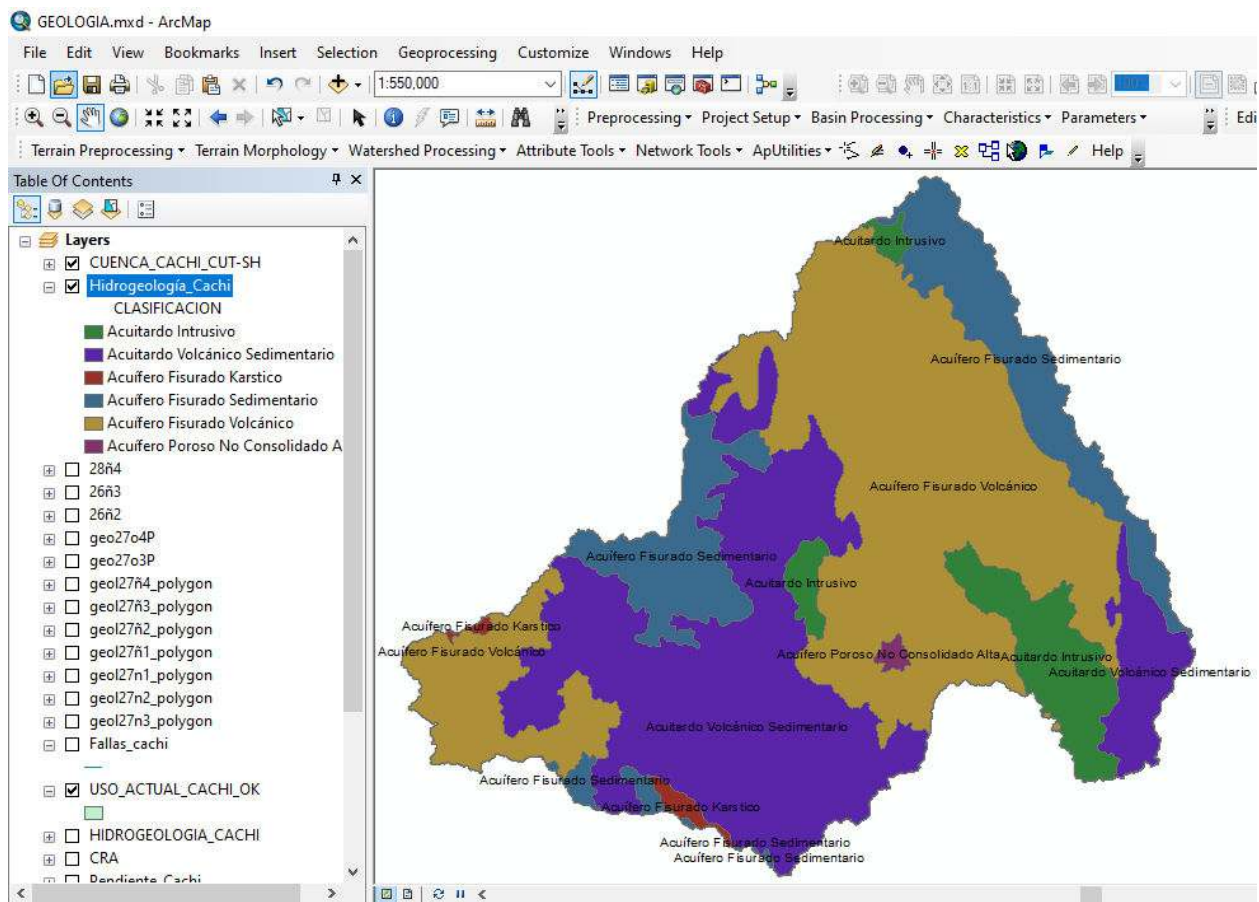


Figura 2.30: Mapa geológico de la cuenca Cachi

### 2.3.2.5.3. Hidrogeología:

Los estudios hidrogeológicos incluyen la evaluación de las condiciones climáticas de una región, su régimen de precipitaciones, la composición química del agua y las características físicas de las rocas, como la permeabilidad, porosidad, fracturas, composición química, así como rasgos geológicos y geotectónicos (Servicio Geológico Mexicano, 2021). Según Mijailov (1985), la hidrogeología o hidrología subterránea es la ciencia que estudia el origen y formación de las aguas subterráneas, su ubicación, movimiento, régimen y reservas, su relación con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido o gaseoso) y sus propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas), además de las condiciones que determinan su aprovechamiento, regulación y evacuación. En esta investigación, los datos hidrogeológicos de la cuenca Cachi se obtuvieron a través del Sistema de Información Geológico y Catastral Minero del INGEMMET (Figura 2.31). (<https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/main>).

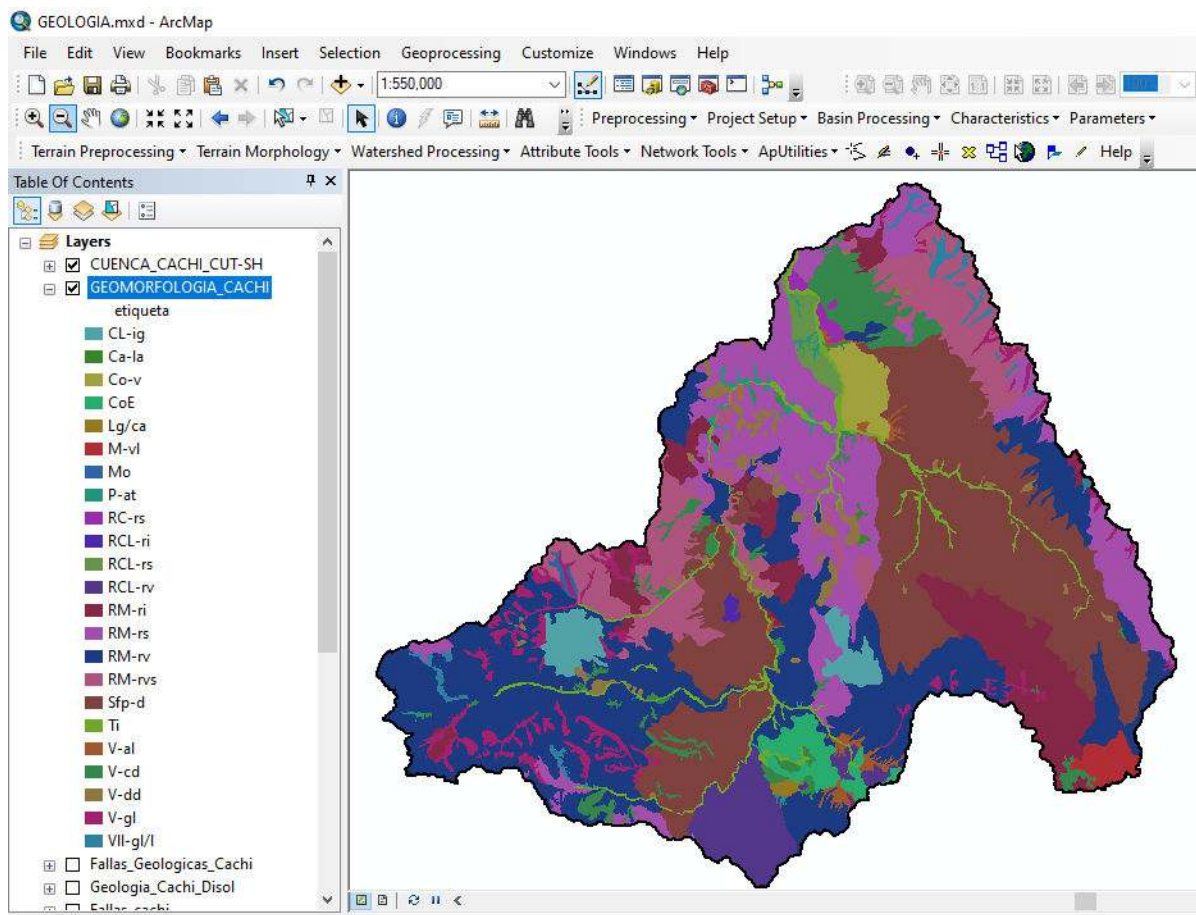


**Figura 2.31:** Hidrogeología en la cuenca Cachi

Fuente: adaptado de INGEMMET (2024).

#### 2.3.2.5.4. Geomorfología:

La geomorfología es la ciencia que estudia las formas del relieve terrestre. Además de analizar la configuración general de la superficie, examina la clasificación, descripción, origen, desarrollo y naturaleza de las formas del terreno, así como sus relaciones con las estructuras geológicas subyacentes y la historia de los cambios geológicos registrados en esas superficies (Instituto Geográfico Nacional de España, 2023). La geomorfología revela diversas características estructurales y del relieve, muchas de las cuales son favorables para la presencia de agua subterránea y se clasifican según su potencial para contenerla. El mapa geomorfológico facilita la identificación de distintas unidades geomórficas y la presencia de agua subterránea en cada una (Selvarani et al., 2016). En este estudio, los datos geomorfológicos de la cuenca Cachi se obtuvieron a través del Sistema de Información Geológico y Catastral Minero del INGEMMET (Figura 2.32). (<https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/main>).



**Figura 2.32:** Geomorfología de la cuenca Cachi

Fuente: adaptado de INGEMMET (2024).

### 2.3.2.6. Pendiente topográfica en la cuenca

Al ser una cuenca de montaña, la pendiente resulta una variable y característica muy importante a considerar, para analizar la implementación de MAR, así las pendientes calculadas mediante la herramienta “Slope” en ArcGIS, aplicados para el DEM en GeoTIFF de la plataforma de LandViewer, de resolución de celda de 25m (Figura 2.33).

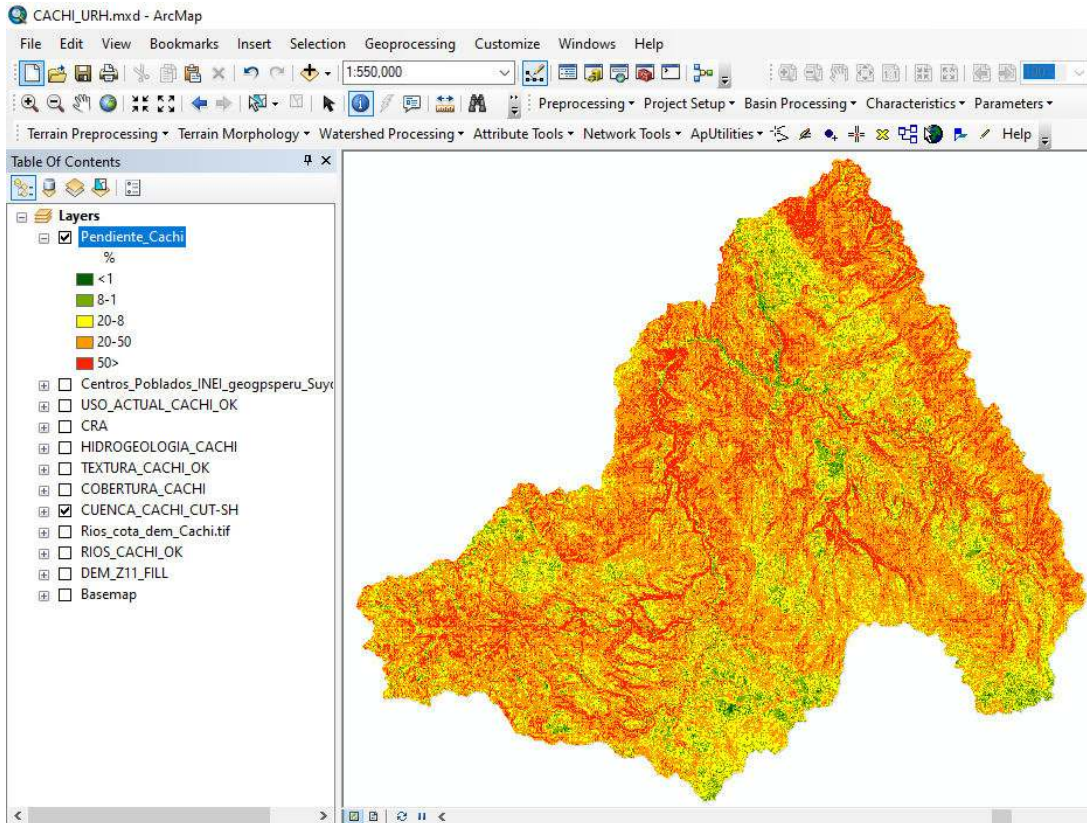


Figura 2.33: Pendiente en la cuenca Cachi

Tabla 2.17: Área y porcentaje de la Figura 2.33, según pendientes en la cuenca.

Pendiente	Umbral (%)	Área (Km <sup>2</sup> )	Porcentaje
Pronunciada	50>	636.97	17.59%
Alta	50-20	1786.46	49.33%
Media	20-8	885.83	24.46%
Suave	8-1	282.17	7.79%
Despreciable	<1	27.64	0.76%
<b>Total</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>

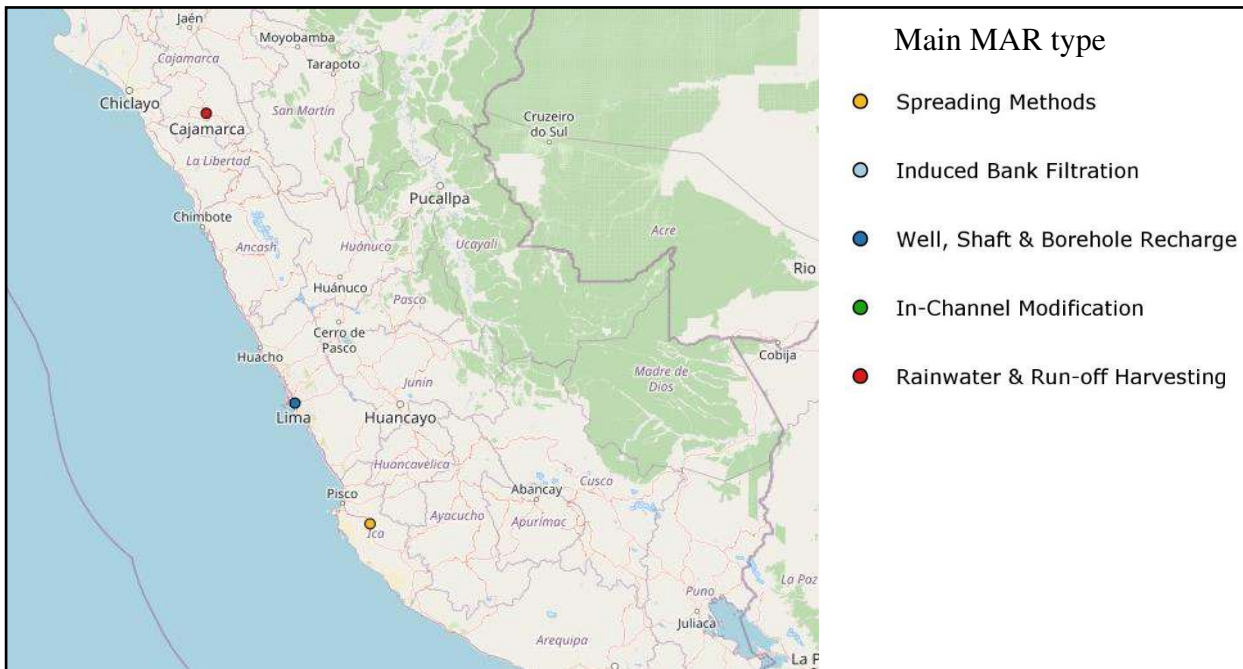
La clasificación de las pendientes (Tabla 2.17) corresponde a los usos para el método racional descritos por Ramírez (2003).

### 2.3.2.7. Nivel de conocimiento y tecnología

Aunque existe el Fondo Sierra Azul, una entidad que formula, ejecuta y supervisa proyectos de siembra y cosecha de agua para uso agrícola a nivel nacional, dependiente del MIDAGRI, su objetivo es aumentar la disponibilidad hídrica agrícola mediante la implementación de siembra y cosecha de agua en las zonas altas de las cuencas, garantizando la sostenibilidad del recurso hídrico en las áreas altoandinas, bajo la supervisión del viceministerio de infraestructura agraria y riego (Sáenz, 2019). Si bien esta entidad ha llevado a cabo labores de MAR en los últimos seis años, las estructuras implementadas se limitan a técnicas de interceptación de agua y captación de agua de lluvia (Figura 2.35). En cuanto al desarrollo de otras tecnologías existentes, no hay experiencia ni avances en la cuenca.

Las qochas son reservorios o lagunas artificiales de pequeño tamaño, construidos en depresiones naturales del terreno utilizando materiales locales como piedras y terrones de tierra. Estas estructuras permiten almacenar e infiltrar el agua de lluvia (MINAM, 2023).

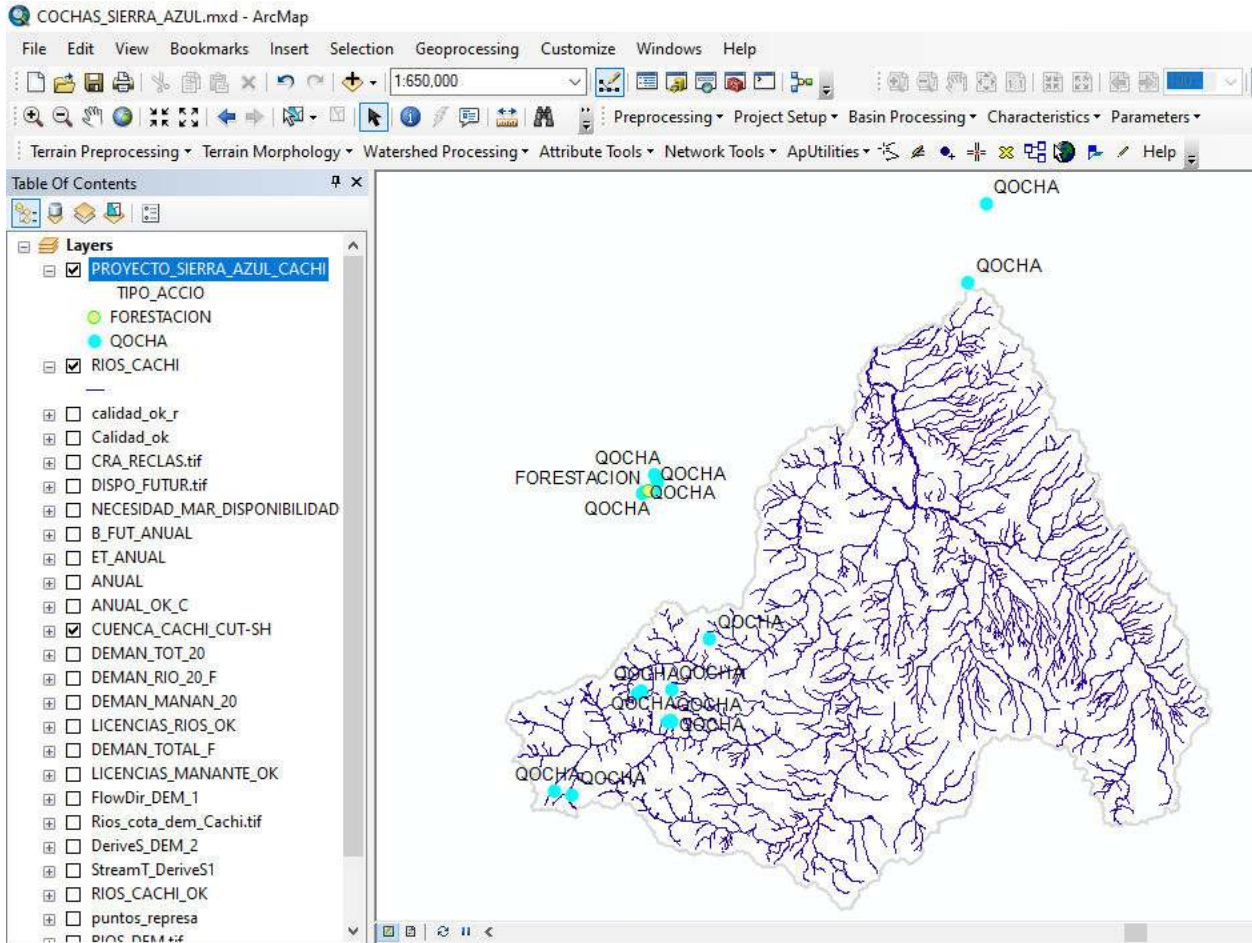
Para las tecnologías usadas y registradas en el IGRAC para el Perú, solo se cuentan con 3 registros: distribución (*Spreading methods*), pozos (*Well, Shaft and Borehole recharge*) y captación de agua de lluvia (*Rainwater and Run-off harvesting*) (Figura 2.34).



**Figura 2.34:** Tecnologías de MAR registrados en el Perú

Fuente: Portal MAR IGRAC.

La Figura 2.35 muestra los proyectos realizados por el Fondo Sierra Azul en el área de influencia de la cuenca Cachi, los cuales se limitan exclusivamente a la tecnología de captación de agua de lluvia.



**Figura 2.35:** Proyectos últimos ejecutados por Fondo Sierra Azul en la zona de influencia de la cuenca Cachi

Fuente: adaptado de Fondo Sierra Azul (2024).

La Tabla 2.18, muestra los proyectos ejecutados en el año 2023 por el Fondo Sierra Azul dentro del ámbito de influencia de la cuenca Cachi, donde se describe la ubicación del proyecto, el costo, el área de recarga que ocupa, el volumen del embalse y el área que beneficia el proyecto.

**Tabla 2.18:** Proyectos MAR del Fondo Sierra Azul ejecutados en el año 2023 en el área de influencia de la cuenca Cachi

Departamento	Distrito	CUI	Tipo acción	de	Tipo	Costo Soles	Este (m)	Norte (m)	Altitud (msnm)	Área recarga (Ha)	Volumen de embalse (m <sup>3</sup> )	Área beneficiada (Ha)
Ayacucho	Chaca	2606189	Qocha			162,327.68	588187	8593723	4048	14.6	15,940.40	4.6
Ayacucho	Chaca	2606189	Qocha			195,799.70	585865	8583533	4259	72.5	85,994.20	24.6
Huancavelica	Congalla	2606269	Qocha		Concreto ciclópeo	219,210.75	545344	8558790	4303	17	6,279.00	1.8
Huancavelica	Congalla	2606269	Qocha			163,212.02	545766	8558225	4324	8	5,082.50	1.5
Huancavelica	Congalla	2606269	Qocha			192,970.30	545189	8556789	4360	7	5,936.20	1.7
Huancavelica	Congalla	2606269	Forestación	-		394,601.18	544592	8556690	4360	25	0	0
Huancavelica	Congalla	2606269	Qocha			182,111.04	545635	8557728	4383	46	11,836.70	3.4
Huancavelica	Congalla	2606269	Qocha			197,390.22	543942	8556558	4416	23	22,288.80	6.4
Huancavelica	Congalla	2606269	Qocha		Concreto ciclópeo	162,934.15	543768	8556315	4430	8	13,087.70	3.7
Ayacucho	Vinchos	2606189	Qocha			175,839.11	552460	8537699	4435	73.6	20,708.20	5.9
Ayacucho	Vinchos	2606189	Qocha			156,469.24	547175	8526981	4447	67	28,192.90	8.1
Ayacucho	Vinchos	2606189	Qocha		Tierra	179,211.34	547594	8531050	4478	15	7,161.70	2
Ayacucho	Vinchos	2606189	Qocha		Concreto ciclópeo	216,979.06	547609	8526980	4506	21.3	36,780.70	10.5
Ayacucho	Vinchos	2606189	Qocha			169,658.45	547381	8527080	4510	5.2	10,005.20	2.9
Ayacucho	Vinchos	2606189	Qocha		Tierra	206,154.40	543705	8530847	4646	19	6,169.80	1.8
Ayacucho	Vinchos	2606189	Qocha		Concreto ciclópeo	137,696.42	543607	8530659	4685	6.4	3,728.40	1.1
Ayacucho	Vinchos	2606189	Qocha		Tierra	167,674.94	543174	8530527	4714	3.4	5,669.40	1.6
Ayacucho	Paras	2616947	Qocha		Concreto ciclópeo	195,842.63	532490	8517990	4738	15.4	81,398.10	23.3
Ayacucho	Paras	2616947	Qocha			129,762.11	534773	8517423	4772	21.7	16,154.70	4.6

Fuente: adaptado de Fondo Sierra Azul (2024).

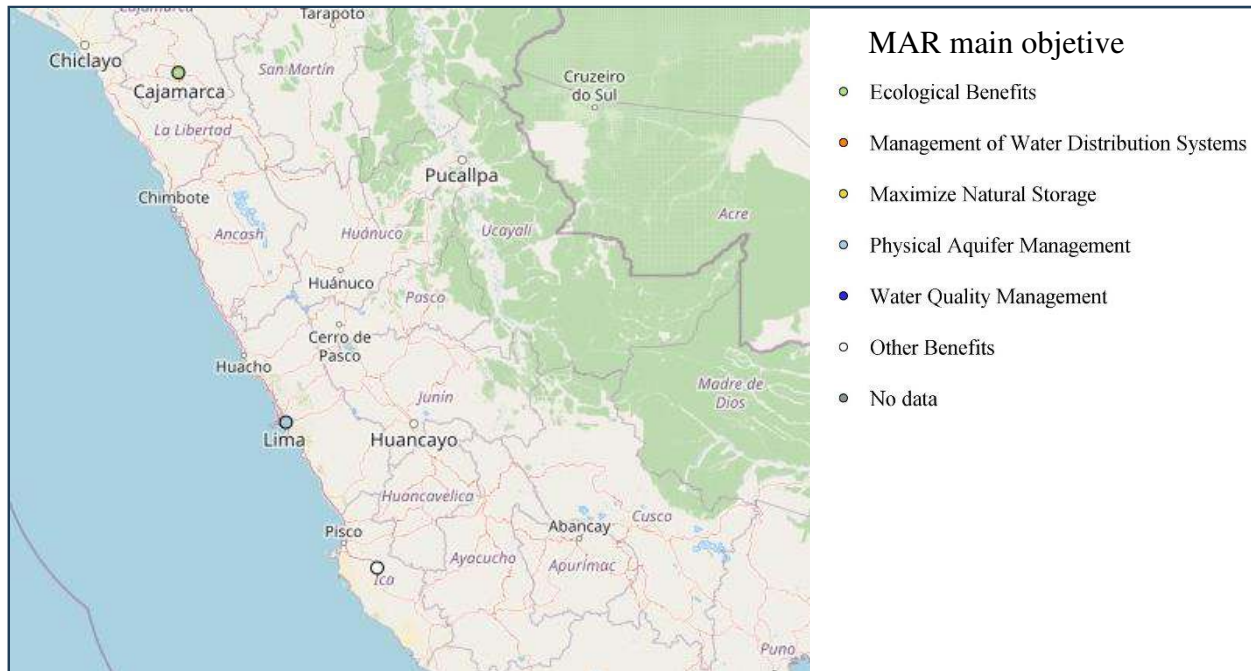
En la tabla 2.18 se observa que todas las intervenciones ejecutadas se encuentran por encima de los 4000 m.s.n.m. Así también corresponden a la tecnología de captación de agua de lluvia.

### 2.3.2.8. Objetivo del MAR

Entre las distintas tecnologías existentes cada una ofrece y resulta en características del agua tras la recarga, principalmente las físico - químico de la misma. Así el objetivo del MAR es el determinante en la elección de la tecnología a implementar.

Para el Perú, así como la cuenca en estudio, los proyectos existentes de la tecnología MAR Captación de agua de lluvia (Fondo Sierra Azul) Tabla 2.18, tienen por objetivo principal de mejorar el almacenamiento del recurso hídrico (recarga de acuíferos, beneficios ecológicos), mas no así su tratamiento (calidad del agua).

En el portal de MAR brindado por el IGRAC, se observa (Figura 2.36) que los objetivos de MAR registrados en el Perú corresponden a beneficios ecológicos (*Ecological benefits*), gestión física de acuíferos (*Physical aquifer management*) y otros beneficios (*other benefits*).



**Figura 2.36:** Objetivo de MAR registrados en el Perú

Fuente: Portal MAR IGRAC.

### 2.3.2.9. Costo del agua recargada

El costo del agua recarga, determina en gran parte el tipo de tecnología a implementar. Como en cualquier proyecto, la viabilidad de la instalación del MAR, responde a un análisis de costo - beneficio.

En la Tabla 2.19 los costos nivelados corresponden al costo para cada esquema MAR expresados en dólares incluidos el costo del capital invertido y el costo de operación, dividido entre los años

de vida útil del esquema MAR, todos estos costos estandarizados a los valores del año del 2016 con el deflactor del PBI.

**Tabla 2.19:** Costos nivelados promedio (AV) de los esquemas MAR en USD por m<sup>3</sup> (año 2016), por fuente de agua (número de esquemas entre paréntesis).

<b>Pozos de agua reciclada e infiltración</b>	<b>Pozos de agua natural e infiltración</b>	<b>Filtración de ribera (RBF)</b>
0.74 (AV) (5)	0.24 (AV) (11)	0.11 (AV) (3)
0.58 (desviación estándar)	0.16 (desviación estándar)	0.03 (Desviación estándar)

Fuente: adaptado de Ross (2022).

**Tabla 2.20:** Relación costo beneficio para diferentes tipos de MAR, fuentes de agua y usos finales.

<b>Factor</b>	<b>Incluyendo esquemas</b>	<b>grandes</b>	<b>Excluyendo grandes esquemas</b>
Agua de fuente	2.8 (16) Agua natural	2.2 (5) Agua reciclada	4.8 (13) Agua natural reciclada
Uso final	2.8 (14) Consumo humano	4.3 (7) Uso no potable y agricultura	4.6 (11) Consumo humano Uso no potable y agricultura
Tipo y tecnología MAR	Pozos de inyección 4.4 (7)	Métodos de infiltración 2.3 (11)	Pozos de inyección 1.8 (6) Métodos de infiltración 3.8 (9) Filtración de ribera 7.2 (3)

Fuente: Ross (2022).

Para determinar el costo de metro cúbico de agua recargada ejecutados por el programa de Fondo Sierra Azul, se consideró la siguiente información de la Tabla 2.21:

**Tabla 2.21:** Vida útil probable mínimas de los materiales básicos de una construcción

<b>Material</b>	<b>Vida útil probable (años)</b>
Instalaciones de agua	
Conductos	35
Pozos filtrantes	35
Pozos filtrantes de concreto	35

Así la vida media de 35 años de las cochas y sumados los S/. 50,000.00 del costo de mantenimiento posterior a la ejecución se obtiene la Tala 2.22:

**Tabla 2.22:** Costo en soles por metro m<sup>3</sup> (año 2023) de agua recargada de los diferentes proyectos ejecutados por el Fondo Sierra Azul dentro del ámbito de influencia de la cuenca Cachi.

CUI	Tipo acción	Costo Soles	Área recarga (Ha)	Volumen de embalse (m <sup>3</sup> )	Área beneficiada (Ha)	Costo Soles/m <sup>3</sup>
2606189	Qocha	162,327.68	14.6	15,940.40	4.6	0.38
2606189	Qocha	195,799.70	72.5	85,994.20	24.6	0.08
2606269	Qocha	219,210.75	17	6,279.00	1.8	1.22
2606269	Qocha	163,212.02	8	5,082.50	1.5	1.20
2606269	Qocha	192,970.30	7	5,936.20	1.7	1.17
2606269	Forestación	394,601.18	25	0	0	-
2606269	Qocha	182,111.04	46	11,836.70	3.4	0.56
2606269	Qocha	197,390.22	23	22,288.80	6.4	0.32
2606269	Qocha	162,934.15	8	13,087.70	3.7	0.46
2606189	Qocha	175,839.11	73.6	20,708.20	5.9	0.31
2606189	Qocha	156,469.24	67	28,192.90	8.1	0.21
2606189	Qocha	179,211.34	15	7,161.70	2	0.91
2606189	Qocha	216,979.06	21.3	36,780.70	10.5	0.21
2606189	Qocha	169,658.45	5.2	10,005.20	2.9	0.63
2606189	Qocha	206,154.40	19	6,169.80	1.8	1.19
2606189	Qocha	137,696.42	6.4	3,728.40	1.1	1.44
2606189	Qocha	167,674.94	3.4	5,669.40	1.6	1.10
2616947	Qocha	195,842.63	15.4	81,398.10	23.3	0.09
2616947	Qocha	129,762.11	21.7	16,154.70	4.6	0.32

Fuente: adaptado de Fondo Sierra Azul (2023).

De la Tabla 2.23, el promedio de costo de agua recargada de los proyectos del Fondo Sierra Azul es de S/. 0.66, y de la Tabla 2.21, el costo del agua recargada es de S/. 0.84 (0.24 USD - año 2016) proyectos MAR de características similares promedio en el mundo.

### 2.3.2.10. Desempeño de las estructuras de recarga

Entre las dos técnicas (infiltrar agua, interceptar agua), las 5 tecnologías de recarga existentes responden a diferentes escenarios. Como características del medio físico, de la fuente de agua a recargar y del objetivo del MAR (Tabla 2.23).

**Tabla 2.23:** Desempeño de las técnicas MAR frente al diseño, condición y función.

MAR			Desempeño frente al diseño, condición y función (baja (*), media (**) y alta (***))									
Técnica	Tecnología	Clasificación	Disponibilidad de agua	Pendiente topográfica	Permeabilidad de la capa superior del suelo	Almacenamiento	Tratamiento	Colmatación y obstrucción	Control y seguimiento	Vida útil	Eficiencia (área instalación/volumen en recargado)	
INFILTRAR AGUA	Distribución	Cuencas y estanques de infiltración	*	*	*	*	***	**	***	**	**	
		Tratamiento de Suelo-Acuífero (TSA)	*	*	*	*	***	*	**	**	*	
		Inundación controlada	*	*	*	**	*	**	**	**	**	
		Zanjas y surcos (amunas)	**	***	*	**	*	*	***	***	**	
	Riego	*	**	*	***	*	*	**	**	***	**	
	Pozos	Pozos de recarga someros	***	**	***	***	**	*	*	*	***	
		ASR	***	***	***	***	*	*	*	*	***	
		ASTR	***	***	***	***	*	*	*	*	***	
INTERCEPTAR AGUA	Modificación del cauce de arroyos y ríos.	Estanques de percolación asociados a represas de control, gaviones	*	*	*	**	**	*	*	*	*	
		Presas de arena para almacenamiento	**	*	***	*	*	**	**	**	*	
		Presas subsuperficiales (subterráneas)	*	*	***	**	*	***	**	**	***	***

	Técnicas de ampliación de los cauces.	*	*	*	**	**	*	*	*	*
Filtración.	Filtro de bancos de río (RBF)	***	**	***	*	***	***	***	**	***
	Filtración Inter-dunar	***	*	***	*	***	**	**	*	**
	Barreras y diques	*	*	*	**	**	**	***	***	*
	Zanjas de infiltración, tinas									
Captación de agua de lluvia	ciegas, surcos, anillos de agua y terraplenes.	*	***	*	**	*	**	***	**	*
	Recolección de agua de lluvia en los tejados	**	***	*	*	*	*	**	**	*

Fuente: adaptado de Alam et al. (2021).

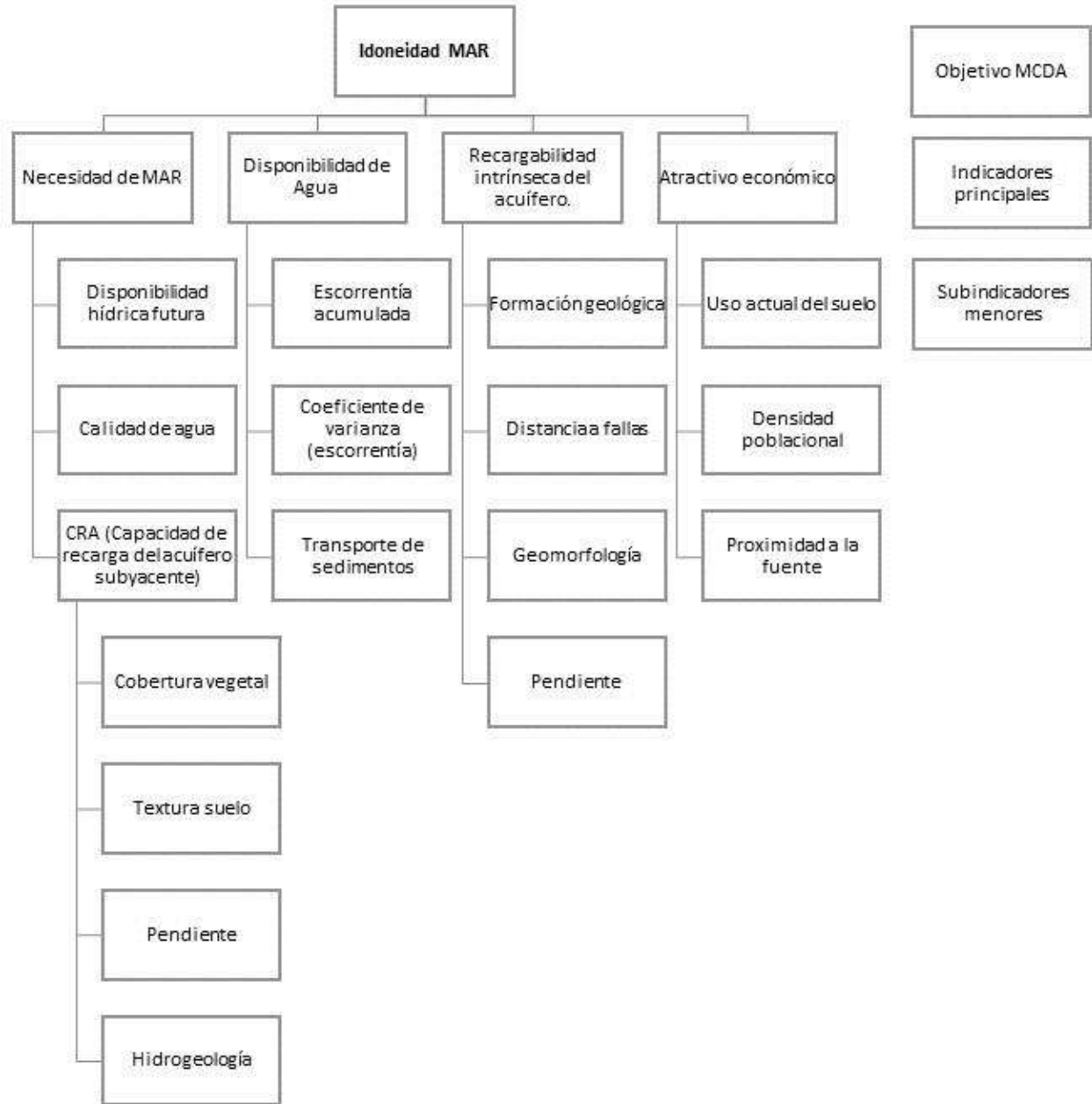
### ***2.3.3. Mapeo de idoneidad para los métodos de Recarga Gestionada de Acuíferos (MAR) en función de atributos y condiciones específicas en la cuenca del río Cachi.***

La selección efectiva de los sitios para la implementación de MAR se lleva a cabo mediante un análisis de decisiones multicriterio (MCDA).

La combinación lineal ponderada (WLC) y el proceso de jerarquía analítica (AHP) (Malczewski, , 2006; Malczewski y Rinner, 2015) se utilizan comúnmente en MCDA geoespacial. El WLC es una suma ponderada aditiva y se utiliza con mayor frecuencia debido a su simplicidad. Similar al WLC, el AHP (Saaty, 1980) es un proceso WLC utilizado con frecuencia; pero puede incorporar múltiples niveles dentro de una jerarquía, lo que permite incluir indicadores mayores y subindicadores menores (Fuentes y Vervoort, 2020; Malczewski y Rinner, 2015). Proporciona un medio para dirigir la atención del tomador de decisiones hacia el establecimiento de una estructura adecuada que capture los componentes y subcomponentes importantes junto con sus interacciones. Por lo tanto, el AHP se utilizó en este estudio para mapear la idoneidad multidimensional del MAR para la cuenca utilizando los cuatro indicadores que contribuyen a ello (necesidad de MAR, disponibilidad de agua, recargabilidad intrínseca del acuífero y atractivo económico). Para cada indicador principal, se definieron varias ramas que representan subcriterios o indicadores menores (Figura 2.37). Los subindicadores complejos también podrían tener ramas de criterios subyacentes (Malczewski y Rinner, 2015).

El objetivo del AHP es la estimación del valor de idoneidad en el nivel más alto de la jerarquía, para cada sitio a lo largo de la cuenca. Esto requiere estimar ponderaciones para todos los componentes de la jerarquía y asignar puntuaciones a los todos indicadores de idoneidad en la base del proceso, estos datos se plasmarán en el mapa de idoneidad del MAR (Itani et al., 2022).

La cuenca hidrográfica y los indicadores de MAR evaluados, se rasterizaron en celdas de 25 m × 25 m. De esta manera, la cuenca Cachi quedó definida por un total de 5,793,600.00 celdas, cada una de las cuales se consideró un sitio potencial de MAR. Además, todos los datos se proyectaron al sistema de coordenadas WGS 1984 UTM Zona 18 S.



**Figura 2.37:** Estructura jerárquica para la idoneidad del sitio de recarga gestionada de acuíferos.

### 2.3.3.1. Asignación de peso.

Los métodos populares para la asignación de ponderaciones en MCDA geoespacial incluyen los métodos de clasificación y calificación, como la lógica booleana y difusa, el factor de influencia múltiple y los métodos de comparación por pares. Si bien los métodos de clasificación y calificación se encuentran con mayor frecuencia en la literatura temprana, la comparación por

pares es actualmente el método más comúnmente utilizado en MCDA geoespacial y es necesaria en AHP (Sallwey I. et al., 2018; Malczewski y Rinner, 2015; Malczewski, 2006; Saaty, 1980).

El método de asignación de ponderaciones es la comparación por pares y es actualmente el método más comúnmente utilizado en MCDA geoespacial y es necesaria en proceso de jerarquía analítica (AHP). El método determinará la matriz de comparación C para un número n de indicadores dentro de la misma categoría principal. La matriz es n por n (Tabla 2.24).

**Tabla 2.24:** Matriz AHP para comparación por pares y cálculo de ponderación para un conjunto de cuatro indicadores.

<b>Indicador</b>	<b>I<sub>1</sub></b>	<b>I<sub>2</sub></b>	<b>I<sub>3</sub></b>	<b>I<sub>4</sub></b>	<b>Peso</b>
I <sub>1</sub>	C <sub>11</sub> =1	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>14</sub>	<b>W<sub>1</sub></b>
I <sub>2</sub>	C <sub>12</sub> <sup>-1</sup>	C <sub>22</sub> =1	C <sub>23</sub>	C <sub>24</sub>	<b>W<sub>2</sub></b>
I <sub>3</sub>	C <sub>13</sub> <sup>-1</sup>	C <sub>23</sub> <sup>-1</sup>	C <sub>33</sub> =1	C <sub>34</sub>	<b>W<sub>3</sub></b>
I <sub>4</sub>	C <sub>14</sub> <sup>-1</sup>	C <sub>24</sub> <sup>-1</sup>	C <sub>34</sub> <sup>-1</sup>	C <sub>44</sub> =1	<b>W<sub>4</sub></b>

### 2.3.3.2. Puntuación.

Se asignó una puntuación a cada indicador en base a la jerarquía presentada para cada pixel (Figura 2.37). Luego las puntuaciones individuales se utilizaron para calcular el valor final de idoneidad, los valores asignados oscilaron entre 0 y 100, asignando 100 al valor más adecuado y cero para el valor más desfavorable.

Tenga en cuenta que, dado que las puntuaciones asignadas a los subindicadores se definieron en una escala común (0 a 100), asumir ponderaciones iguales entre los indicadores indicaría la misma importancia de los elementos de la jerarquía; mientras que asignar un mayor peso a un indicador significa otorgar mayor importancia a ese factor (Hobbs y Meier, 2012).

### 2.3.3.3. Indicadores MAR.

#### 2.3.3.3.1. Necesidad de MAR:

El índice de necesidad de MAR ( $I_{nm}$ ) para la cuenca reflejará la variabilidad dentro de ella, ya que hay áreas prioritarias con alta demanda de agua. Esto se relaciona con la disponibilidad hídrica futura, la calidad del agua y la capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA).

$$I_{nm} = aD + bG + cCRA$$

Donde a, b y c son factores de ponderación asignados a cada criterio (sin unidades); D, G y CRA son puntuaciones de criterios de disponibilidad hídrica futura, calidad de agua y capacidad de recarga del acuífero subyacente, respectivamente.

Además, CRA (capacidad de recarga del acuífero subyacente) queda definido como un subindicador.

$$CRA = dV + eT + fS + gH$$

Donde d, e, f y g son factores de ponderación asignados a cada criterio (sin unidades); V, T, S Y H son puntuaciones de cobertura vegetal, textura de suelo, pendiente e hidrogeología, respectivamente.

- **La disponibilidad hídrica futura ( $B_{if}$ ):** se calculó a partir de los apartados 2.3.1.1.4 y 2.3.2.4, y la fórmula:

$$B_{if} = Q_i - D_f$$

Donde:

**$B_i$**  = Disponibilidad hídrica futura es el caudal libre sin uso expresado en lámina de agua para la celda (mm/año)

**$Q_i$**  = Es caudal ofertado anual expresado en lámina de agua para la celda (mm/año)

**$D_f$**  = Es la demanda hídrica anual futura para la celda (mm/año)

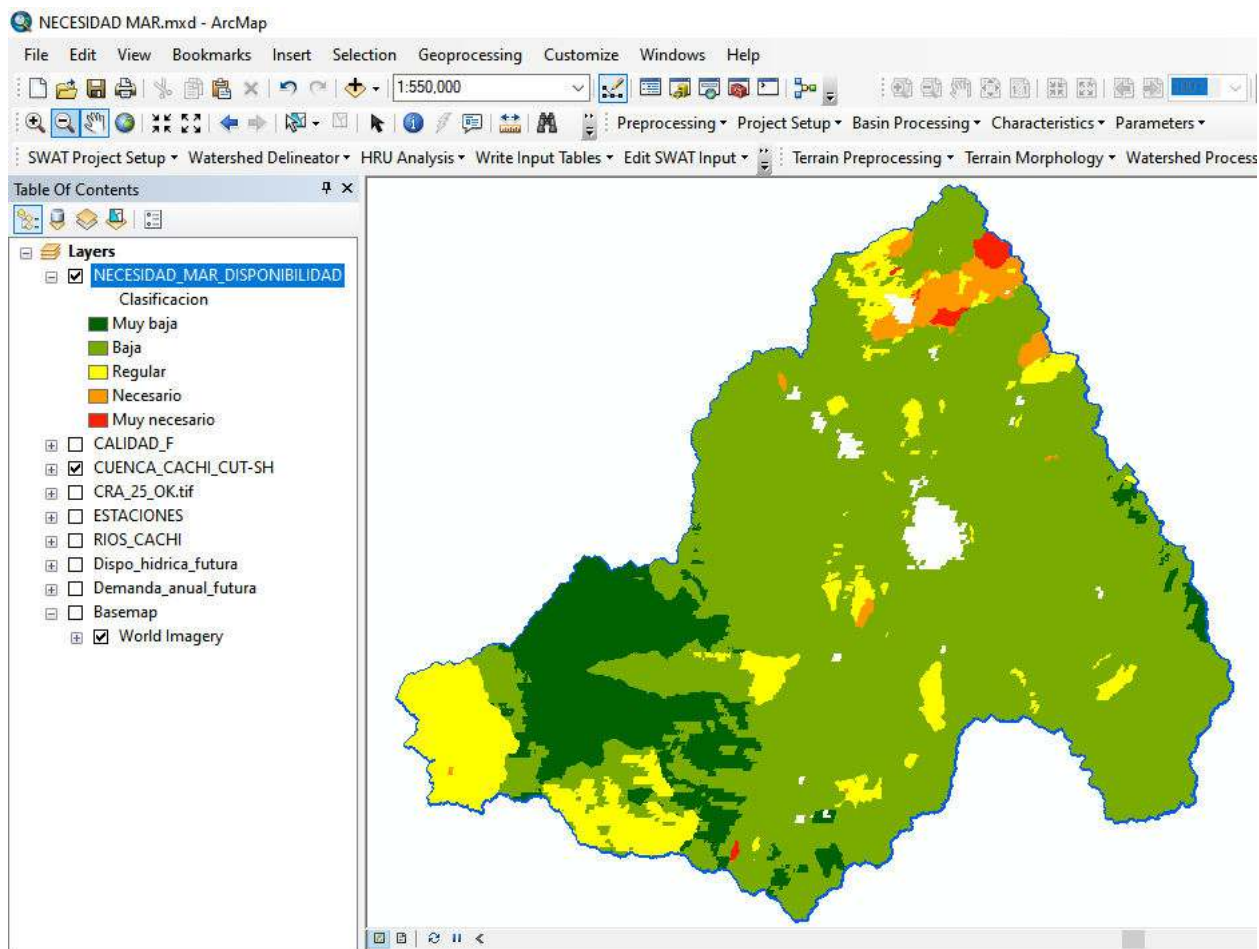
El caudal ofertado anual, queda expresado:

$$Q_i = P_i - ET_i$$

Donde:

**$P_i$**  = Es la precipitación anual promedio (1991-2023) (mm/año)

**$ET_i$**  = Representa la evapotranspiración real anual promedio (2000-2022) en la celda (mm/año).



**Figura 2.38:** Clasificación de disponibilidad hídrica futura en función a la necesidad MAR para la cuenca Cachi.

**Tabla 2.25:** Puntaje en relación a la necesidad MAR de la disponibilidad hídrica futura.

Disponibilidad futura anual	Valor	Puntaje
Muy necesario	-1575.87	100
Necesario	-1121.51	80
Regular	-667.14	60
Bajo	-212.78	40
Muy bajo	241.58	20
Mínimo	695.95	0

En la Figura 2.38, se observa que la parte norte y suroeste de la cuenca corresponde al área de mayor interés para la implementación de MAR, incluidas las zonas de las captaciones para la represa Cuchoquesera que se observan como zonas necesarias y muy necesarias de necesidad MAR.

- **La calidad del agua:** se tomó lo obtenido de la sección 2.3.2.2, de la Figura 2.24 y Tabla 2.12

Para la cuenca de estudio la mayor área corresponde a una calidad baja y de implementación de MAR no recomendado en más de 50% de esta. La asignación de puntajes depende de cada tecnología MAR a usarse así la puntuación queda como en la Tabla 2.26:

**Tabla 2.26:** Asignación de puntaje a la calidad de agua en la cuenca.

Sub- indicador	Atributos	Puntuación según tecnología MAR				
		Lluvia	Pozos	Distribución	Cauce de ríos	Filtración
Calidad de agua	Regular	100	10	100		55
	Bueno	100	100	100		100
	Bajo	55	10	10		10

Dado que los datos e información de calidad son limitados y deficientes, además de no ser objetivo principal de la recarga para la zona de estudio, el peso asignado se tomó como menor.

- **La capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA):** se calculó a partir del apartado 2.3.1.1.5, de la Figura 2.18 y Tabla 2.6.

#### 2.3.3.3.2. Disponibilidad de agua:

La disponibilidad de agua en la cuenca se refiere a la cantidad de agua de escorrentía, sin considerar el flujo base, que está disponible para MAR y para el transporte de sedimentos asociados.

$$I_{wa} = jE + kC + lU$$

Donde  $I_{wa}$  es el índice de disponibilidad de agua calculado para cada celda de la cuadrícula (sin unidades).  $j$ ,  $k$  y  $l$  son factores de ponderación asignados a cada criterio (sin unidades);  $E$  es la puntuación de la profundidad del agua disponible para recarga y se basa en la escorrentía acumulada anual promedio de 23 años (sin unidades),  $C$  es la puntuación que se basó en el coeficiente de varianza (CV) calculado con base en las escorrentías anuales acumuladas durante los mismos 23 años.  $U$  son puntuaciones de transporte de sedimentos hallados en la cuenca.

- **Escorrentía acumulada (Modelamiento hidrológico):**

A escala de macrocuencas (aquellas que superan entre 1,000 y 10,000 km<sup>2</sup> o 100,000 a 1,000,000 ha), la distribución espacio-temporal de las precipitaciones y el seguimiento del caudal influyen de manera significativa en el comportamiento de la respuesta hidrológica (Stehr, 2008). Así la

cuenca Cachi queda definida como una macrocuenca, y el modelamiento hidrológico para el mismo deberá responder a esas características.

Para el estudio se utilizaron los modelos hidrológicos agregados de escala anual de GR1A (Mouelhi et al., 2006) y Fu 1-parámetro (Zhang y Chiew, 2012), y se descartó el modelo de (Budyko, 1958) el cual no reflejó un buen ajuste para las cuencas usadas en la regionalización. Determinándose así solo la escorrentía viable para la implementación de MAR. El modelo escogido responde al libro de (Del Águila, 2024), donde el modelo GR2M tiene un muy buen ajuste y (Mouelhi et al., 2013) menciona que de un modelo anual (GR1A), se adapta mejor, incluso que el uso de un modelo más fino (GR2M o GR4J) agregando las salidas en un paso temporal anual.

Para el estudio se promedió los caudales simulados del modelo de GR1A y Fu de 01 parámetros, cuyos modelos se regionalizaron mediante regresión de parámetros a partir de las estaciones de aforo de Chacco, Chicllarazo y Apacheta, los cuales fueron calibrados previamente. Finalmente, los caudales simulados fueron distribuidos espacialmente en la cuenca con la herramienta de Acumulación de flujo y como capa de ponderación, la inversa del índice de aridez (AI) y seguidamente se validaron los cursos de agua generados con el algoritmo de Acumulación de flujo contrastados con los ríos inventarios por el ANA o para el flujo acumulado en general.

#### **a) Modelos de precipitación-escorrentía**

##### **Modelo Budyko**

La evapotranspiración potencial se transforma a evapotranspiración real mediante la ecuación de Budyko (Budyko, 1958):

$$ET = \left\{ PET * P * \tanh\left(\frac{P}{PET}\right) * \left[ 1 - \cosh\left(\frac{PET}{P}\right) + \sinh\left(\frac{PET}{P}\right) \right] \right\}^{1/2}$$

Donde ET es la evapotranspiración real [mm/año], PET representa la evapotranspiración potencial [mm/año], y P corresponde a la precipitación media en la cuenca [mm/año].

##### **Modelo Fu 1-parámetro**

Zhang et al. (2004) mencionan que Fu (1981) publicó un artículo científico sobre las relaciones entre la evapotranspiración y la precipitación a largo plazo, combinando el análisis dimensional con el razonamiento matemático, y desarrolló soluciones analíticas para la evapotranspiración

media anual. El método de Fu (1981) es similar a la conocida curva de Budyko, en la que Zhang et al. (2008) sugiere que el equilibrio del balance hídrico está regido por la disponibilidad de agua y energía. En este contexto, según Fu (1981), el caudal medio anual puede determinarse mediante la siguiente ecuación:

$$Q = P[1 + (AI)^\alpha]^{1/\alpha} - E_p$$

Donde Q es la escorrentía media anual, P es la precipitación media anual, AI es el índice de aridez ( $E_p/P$ ),  $E_p$  corresponde a la evapotranspiración potencial y  $\alpha$  es un parámetro que representa las características físicas y climáticas de una cuenca determinada.

### Modelo GR1A

El GR1A es un modelo global de lluvia-escorrentía que utiliza un solo parámetro. Fue desarrollado a finales de los años 90 en CEMAGREF (Instituto Francés de Investigación para la Ingeniería Agrícola y Ambiental) con el objetivo de crear un modelo de simulación de lluvia-escorrentía que fuera robusto y confiable para la gestión de recursos hídricos. La estructura del modelo es simple, y se reduce a la siguiente ecuación:

$$Q_k = P_k \left\{ 1 - \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{0.7P_k + 0.3P_{k-1}}{X * E_k} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\}$$

Donde  $Q_k$  representa el caudal simulado del año k,  $P_k$  es la precipitación observada en el año k,  $P_{k-1}$  corresponde a la precipitación observada en el año k-1,  $E_k$  es la evapotranspiración potencial del año k, y X es el parámetro del modelo que se debe optimizar.

#### b) Data usada en el modelamiento

##### Datos de caudales mensuales

La Tabla 2.27 detalla las estaciones hidrométricas disponibles para este estudio. Se utilizaron datos de caudales anuales correspondientes a tres cuencas. La selección de las estaciones se basó en la longitud del registro, abarcando el período entre 1991 y 2017.

**Tabla 2.27:** Características de las principales estaciones hidrométricas del estudio.

N°	Estación	Rio	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Área (Km <sup>2</sup> )	Periodo
1	Puente Chacco	Chacco	-13.09781	-74.207	1,110.70	1995-2002
2	Apacheta	Apacheta	-13.35102	-74.6473	136.59	1994-2017
3	Chicllarazo	Chicllarazo	-13.44933	-74.466272	98.77	1991-2003

## Precipitación

En la presente investigación se usaron datos de 22 estaciones meteorológicas descritas en la Tabla 2.1. con datos disponibles desde enero de 1991 hasta el 2018 y con una extensión de datos hasta diciembre del 2022.

## Evapotranspiración potencial

Los datos de evapotranspiración potencial (PET) utilizados en la investigación fueron obtenidos a partir de información recopilada y generada por el sensor MODIS entre los años 2000 y 2022, con una resolución de celda de 500x500 metros. Los datos de PET están alojados en MOD162A y se calculan mediante el algoritmo basado en la ecuación de Penman-Monteith. La PET de 8 días (0,1 mm/8 días o 0,1 mm/5 días) representa la suma de la PET en esos períodos, procesados anualmente desde Google Earth Engine para la cuenca en estudio.

### c) Calibración y validación individual de parámetros

Como consecuencia de la agregación y parametrización de procesos hidrológicos, los parámetros de un modelo hidrológico conceptual no pueden ser estimados directamente en campo, sino que son ajustados mediante su calibración a través de un algoritmo de optimización (Vrugt et al., 2008; Rwasoka et al., 2013). Este proceso consiste en ajustar la respuesta simulada a la observada, por medio de una función objetivo establecida para su maximización o minimización, según sea el caso (Krause et al., 2005).

En este estudio, la calibración del modelo mensual se llevó a cabo de manera independiente para cada cuenca, utilizando las métricas de ajuste Nash-Shutcliffe (NSE), el Coeficiente de Correlación de Pearson (R) y el Porcentaje de Sesgo (PBIAS) entre las series de datos observadas y simuladas, con el fin de evaluar la precisión de la simulación durante los periodos de calibración y validación.

**Tabla 2.28:** Estadísticos de bondad de ajuste de modelos

Abrev.	Fórmula	Unidades	Definición
r	$r = \frac{S_{obs.gen}}{\sqrt{S_{obs}S_{gen}}}$	-	Expresa la dependencia lineal entre dos variables que, una independiente (X=caudales observados) y la otra dependiente (Y=caudales generados).

NSE	$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{gen,t} - Q_{obs,t})^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{obs,t} - \bar{Q}_{obs})^2}$	$Q_{gen,t}$ $(m^3/s);$ $Q_{obs,t}$ $(m^3/s);$ $\bar{Q}_{obs}$ $(m^3/s)$	El coeficiente de Nash-Sutcliffe es un estadístico normalizado que indica qué porcentaje de la variabilidad de los datos observados es explicado por la simulación. Un valor de NSE=1 corresponde a una simulación perfecta, mientras que un NSE=0 implica que el mejor ajuste sería simplemente el valor promedio de las observaciones.
PBIAS	$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})}{\sum_{i=1}^n Q_i^{obs}} * 100$	-	Es la diferencia entre la predicción esperada del modelo y los valores observados

Fuente: Del Águila (2024).

**Tabla 2.29:** Criterios de rendimiento de modelos hidrológicos

Estadístico	Valores	Calificación de rendimiento
Coeficiente de Nash - Sutcliffe (NSE)	0.75 < NSE ≤ 1.00	Excelente
	0.65 < NSE ≤ 0.75	Bueno
	0.50 < NSE ≤ 0.65	Satisfactorio
	0.40 < NSE ≤ 0.65	Aceptable
	NSE ≤ 0.40	Malo
Coeficiente de correlación (r)	r ≥ 0.5	Satisfactorio
	0 ≤ r < 0.5	Malo
Porcentaje del BIAS	PBIAS < ±10	Excelente
	±10 ≤ PBIAS < ±15	Bueno
	±15 ≤ PBIAS < ±25	Satisfactorio
	PBIAS > ±25	Malo

Fuente: Moriasi et al. (2007).

Estadístico	Valores	Calificación de rendimiento
Coeficiente de Nash - Sutcliffe (NSE)	0.8 < NSE	Excelente
	0.6 < NSE ≤ 0.8	Muy bueno
	0.4 < NSE ≤ 0.6	Bueno
	0.2 < NSE ≤ 0.4	Satisfactorio
	NSE ≤ 0.2	Insuficiente

Fuente: Molnar (2011).

#### d) Regionalización de los modelos - Regresión secuencial

En el caso de la regionalización de modelos hidrológicos, de trabajos anteriores (Guo et al., 2020), menciona que existen dos formas de regionalización con diferentes condiciones aplicables. La primera forma es calibrar uniformemente todas las cuencas en el mismo grupo de agrupación y transponer directamente los parámetros de la cuenca donante más similares a la cuenca objetivo

(Parajka et al., 2005; Zhang y Chiew, 2009). que es adecuado para áreas con menos heterogeneidad espacial. La segunda manera es seleccionar las cuencas donantes dentro del umbral y transponer sus parámetros a la cuenca objetivo mediante ponderación promedio (Kay et al., 2007), que puede usarse en áreas con una cobertura terrestre más compleja.

La regresión secuencial se propone para resolver el problema de “equifinalidad” en el modelo hidrológico (He et al., 2011). En el paso de calibración, los parámetros se clasifican en un orden determinado basándose en el juicio del mecanismo hidrológico o la relación de respuesta entre los parámetros y la función objetivo (Calver et al., 2005). Sólo se calibra un parámetro y luego se hace una regresión, por orden, en cada bucle hasta el último parámetro. La idea de este método procede del esquema de calibración automática en varios pasos (Hogue et al., 2000). La ventaja de la regresión secuencial es que puede mejorar la identificabilidad de los parámetros del modelo (He et al., 2011).

Una vez realizado la calibración para los modelos seleccionados (Fu y GR1A) se promedió el obtenido de ambos para usar el valor medio en la generación de caudales anuales desde el año 2000 al 2022.

$$Q_{m(i)} = \frac{Q_{Fu(i)} + Q_{GR1A(i)}}{2}$$

Donde:

$Q_{m(i)}$  : Caudal medio agregado para el año i, en la cuenca (mm/año)

$Q_{Fu(i)}$  : Caudal calculado agregado por modelo Fu para el año i, en la cuenca (mm/año)

$Q_{GR1A(i)}$  : Caudal calculado agregado por modelo GR1A para el año i, en la cuenca (mm/año)

#### **e) Acumulación de caudales mensuales**

Los caudales como lámina de agua (mm/año) simulados durante la regionalización fueron ponderados en relación al índice de aridez (AI) obtenido para cada año y para cada celda. Finalmente, acumulados automáticamente considerando su topología en base a un DEM de entrada. Esto se realiza aplicando un algoritmo de Acumulación Ponderada del Flujo también

llamada *Weighted Flow Accumulation* (WFAC). El WFAC toma en cuenta la Dirección del Flujo (*Flow Direction*) generada a partir del DEM proporcionado para la zona de estudio. Las ponderaciones o pesos corresponden a los caudales simulados previamente para cada subcuenca y cada mes. De esta manera, los valores de cada celda son acumulados en función de la dirección del flujo; obteniendo así los caudales simulados en una versión distribuida de los modelos.

Se distribuyó el caudal para cada celda mediante la relación inversamente proporcional al índice de aridez de la siguiente forma:

$$Q_{m(i,j)} = \frac{Q_{m(i)} * AI_{m(i)}}{AI_{(i,j)}}$$

$Q_{m(i,j)}$  : Caudal distribuido para el año i y la celda j, en la cuenca (mm/año)

$Q_{m(i)}$  : Caudal medio agregado para el año i, en la cuenca (mm/año)

$AI_{m(i)}$  : Índice de aridez medio agregado para el año i.

$AI_{(i,j)}$  : Índice de aridez para el año i y la celda j.

- **Coefficiente de varianza (escorrentía):**

El CV (coeficiente de varianza) se determinó para los 23 años de los caudales registrados en cada una de las celdas de la escorrentía (en los cursos de agua validados mediante los ríos inventarios por el ANA) o para el flujo acumulado en general, esto del cálculo de las escorrentías explicadas en el ítem anterior.

- **Transporte de sedimentos:**

El transporte de sedimentos se calculó con ayuda del método de RUSLE, para cada una de las celdas de la cuenca, que finalmente se acumuló mediante el algoritmo de Acumulación Ponderada del Flujo también llamada *Weighted Flow Accumulation* (WFAC). El WFAC toma en cuenta la Dirección del Flujo (*Flow Direction*) generada a partir del DEM proporcionado para la zona de estudio.

La ecuación RUSLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada) es una actualización de la USLE, que ha sido ampliamente utilizada desde los años 60. Su primera versión fue descrita en el Agriculture Handbook N° 282 en 1965, seguida por una segunda versión en el Handbook N° 537 en 1978. La tercera versión, RUSLE, fue publicada en el Manual de Agricultura N° 703 en 1996 por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, en Washington D.C., y mantiene,

en cierta medida, la estructura de ecuaciones de la USLE (Camacho et al., 2022). La ecuación RUSLE se expresa en el sistema métrico internacional (SI) y se compone de los siguientes factores:

$$A = R * K * LS * C * P$$

Donde:

A : Es la pérdida de suelo promedio anual ( $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ).

R : Factor de erosividad de las lluvias ( $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ).

K : Es el factor de erodabilidad del suelo ( $\text{ton}\cdot\text{ha}\cdot\text{hr}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ ).

LS : Factor topográfico de la longitud L y pendiente S (adimensional).

C : Factor de cobertura vegetal del área de estudio (adimensional).

P : Es el factor de conservación de la estructura del suelo (adimensional).

#### a) Factor de erosividad de la lluvia (R)

La erosión es causada por la energía cinética de la lluvia, que desagrega los gránulos del suelo, compacta la superficie y genera escorrentía superficial cuando el suelo se satura y supera su capacidad de infiltración. (González M. , 1991).

$$R = E * I_{30}$$

Siendo E la energía de la lluvia determinada a su vez por la fórmula:

$$E = 210.2 + 89 * \log I$$

E : Es la energía cinética de la lluvia (julios/m<sup>2</sup> por cm de lluvia)

I : Es la intensidad máxima de lluvia (cm/h)

I<sub>30</sub> : es la intensidad máxima en treinta minutos de lluvia (cm/h).

En numerosos casos, la falta de datos nos lleva a utilizar nuevas metodologías para calcular este factor. En este contexto, Wischmeier y Smith (1978) desarrollaron la siguiente fórmula:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 * 10^{(1.5 \log_{10} \left(\frac{P_i^2}{p}\right) - 0.08188)}$$

Donde:

R : Factor de erosividad de lluvias ( $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{hr}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ).

P<sub>i</sub> : Precipitación mensual (mm).

p : Precipitación anual en (mm).

Este factor se calculó a partir de los datos obtenidos de la Tabla 2.2 (datos de precipitación mensualizada para la cuenca).

### b) Factor de erodabilidad del suelo (K)

Teniendo los datos de textura, estructura, permeabilidad y materia orgánica se puede determinar el factor K, mediante la ecuación de Wischmeier y Smith (1978), que se presenta a continuación:

$$100k = 2.1M^{1.14}(10^{-4})(12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3)$$

Donde:

M : (% limo + % arena muy fina) \* (% limo + % arena - % arena fina)

a : % de materia orgánica

b : Parámetro de tipo de estructura de suelo

c : Clase de permeabilidad

Del mismo modo, Sharley y Williams (1990) explican que es posible calcular el factor K utilizando los datos de textura y materia orgánica del estrato superior del suelo, a través de las siguientes ecuaciones:

$$K_{usle} = f_{csand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hisand}$$

$$K_{Rusle} = K \text{ factor} = K_{usle} * 0.1317$$

Donde:

$$f_{csand} = \left[ 0.2 + 0.3 * \exp \left( -0.256 * m_s * \left( 1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right) \right]$$

$$f_{cl-si} = \left( \frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3}$$

$$f_{orgc} = \left( 1 - \frac{0.25 * orgC}{orgC + \exp(3.75 - 2.95 * orgC)} \right)$$

$$f_{hisand} = \left( 1 - \frac{0.7 * \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left( -5.51 + 22.9 * \left( 1 - \frac{m_s}{100} \right) \right)} \right)$$

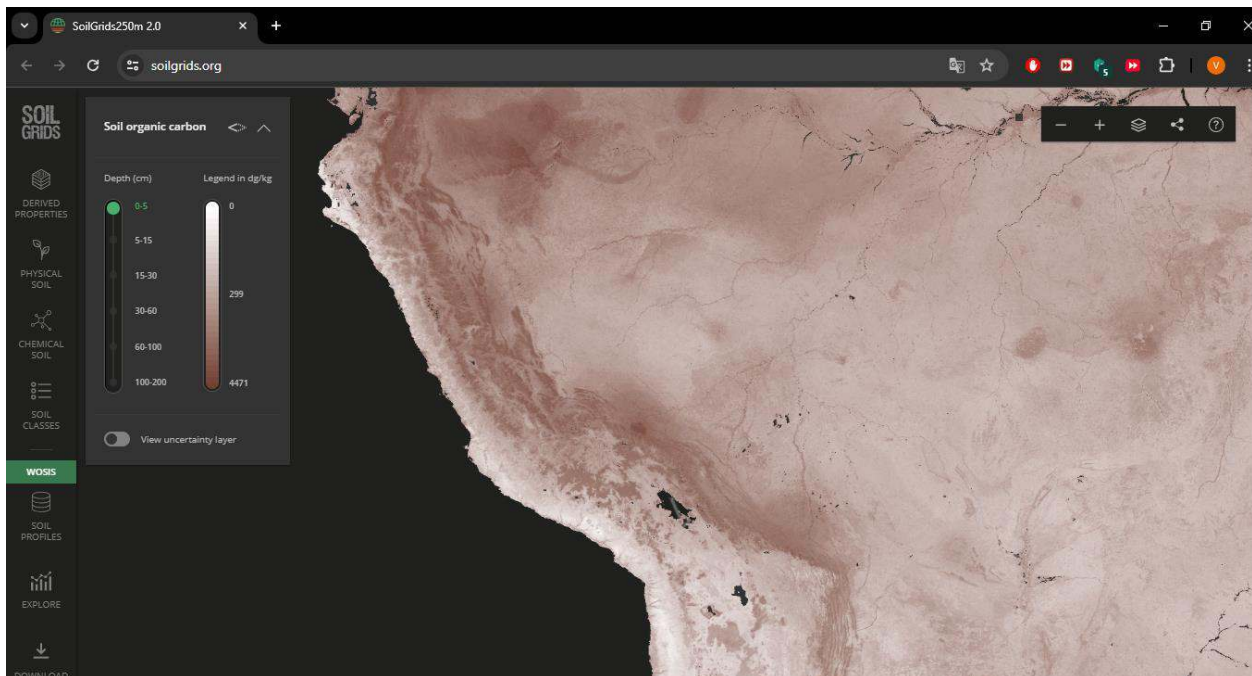
$m_s$  : % de contenido de fracción de arena ( $\phi$  de 0,5 – 2 mm)

$m_{silt}$  : % de contenido de fracción de limo ( $\phi$  de 0,002 – 0,05 mm)

$m_c$  : % de contenido de fracción de arcilla ( $\phi < 0,002$  mm)

orgC : % de contenido de fracción de carbono orgánico

Los datos de textura del suelo se obtuvieron a partir de la clasificación textural (sistema USDA) en siete profundidades estándar, predichos utilizando una compilación global de observaciones de suelo. La precisión de los mapas se evaluó según lo descrito por Hengl (2018), con una resolución de celda de 250 m, y se procesaron y extrajeron en formato GeoTIFF a través de Google Earth Engine. Para el contenido de carbono orgánico, se utilizó la información proporcionada por SoilGrids (Figura 2.39), disponible de forma gratuita en la página web: <https://soilgrids.org/>. Este servidor genera mapas de propiedades del suelo a una resolución espacial media de 250 m (Poggio et al., 2021), con la opción de descarga en formato ráster GeoTIFF.



**Figura 2.39:** Interfaz de la página del SoilGrids.

### c) Factor de longitud de la pendiente e inclinación (LS)

Desmet y Govers (1996) presentan la siguiente metodología para obtener el factor LS, a través de estas ecuaciones:

$$L = \left( \frac{\gamma}{22.13} \right)^m$$

$$m = \frac{F}{(1 + F)}$$

$$F = \frac{\sin\beta / 0.0896}{3(\sin\beta)^{0.8} + 0.56}$$

Para su uso dentro de los SIG se hace de la ecuación:

$$L_{(i,j)} = \frac{[A_{(i,j)} + D^2]^{(m+1)} - A_{(i,j)}^{m+1}}{x^m * D^{m+2} * (22.13)^m}$$

Donde:

L : Factor de longitud

$\beta$  : pendiente a nivel de pixel

m : pendiente

F : factor en función de la pendiente

D : Tamaño de pixel (cell size)

x : Coeficiente de forma (x = 1 para sistemas pixeleados)

determinado L, se determina el factor S, mediante la siguiente ecuación:

$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10.8\sin\beta_{(i,j)} + 0.03 & \tan\beta_{(i,j)} < 0.09 \\ 16.8\sin\beta_{(i,j)} - 0.5 & \tan\beta_{(i,j)} \geq 0.09 \end{cases}$$

#### d) Factor de cobertura de suelo (C)

El factor de vegetación, conocido como factor C, representa la efectividad de la cobertura vegetal para proteger el suelo contra la erosión causada por la energía cinética de las gotas de lluvia y la fuerza del flujo superficial, siendo un valor adimensional. En el modelo USLE, el factor C se calcula mediante ecuaciones empíricas basadas en mediciones de campo de la cobertura del suelo (Camacho et al., 2022). Para la asignación y clasificación de los valores de cobertura vegetal, se utilizó como referencia el Mapa de Cobertura Vegetal del Perú, elaborado por el MINAM.

**Tabla 2.30:** Valores del Factor C

Usos del suelo	% Cobertura	Factor C
Zonas industriales o comerciales		1.000
Zonas de extracción minera		1.000
Viñedos		0.525
Tierras de labor seco		0.435
Terrenos regados permanentemente		0.507
Terrenos principalmente agrícolas con vegetación natural		0.435
Tejido urbano discontinuo		1.000
Tejido urbano continuo		1.000
Pastizales naturales		0.130
Olivares		0.525
Mosaico de cultivos		0.435
Matorrales esclerófilos		0.153
Matorral boscoso en transición		0.153

Lámina de agua		0.000
Frutales		0.525
Espacios con vegetación escasa		0.900
Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes		0.435
Bosque mixto	Inferior al 2%	0.186
Bosque mixto	> 2% & <7%	0.086
Bosque mixto	Superior al 7%	0.041
Bosque de frondosas	Inferior al 2%	0.186
Bosque de frondosas	> 2% & <7%	0.086
Bosque de frondosas	Superior al 7%	0.041
Bosque de coníferas	Inferior al 2%	0.186
Bosque de coníferas	> 2% & <7%	0.086
Bosque de coníferas	Superior al 7%	0.041

Fuente: (Dumas , 2012)

**Tabla 2.31:** Tabla de valores de factor C para ecuación USLE.

<b>Práctica</b>	<b>Promedio anual factor C</b>
Suelo desnudo	1.00
Bosque o matorral denso, cultivos con cobertura alta	0.001
Sabana o pradera en buen estado	0.01
Sabana sobrepastoreada o pradera de hierba	0.10
Maíz, sorgo o mijo; alta productividad; labranza convencional	0.2-0.55
Maíz, sorgo o mijo; baja productividad; labranza convencional	0.50-0.90
Maíz, sorgo o mijo; alta productividad; arado de cincel en los residuos	0.12-0.20
Maíz, sorgo o mijo; baja productividad; arado de cincel en los residuos	0.30-0.45
Maíz, sorgo o mijo; alta productividad; sin labranza o labranza mínima	0.02-0.10
Algodón	0.40-0.70
Pradera de pasto	0.01-0.025
Soya	0.20-0.50
Trigo	0.10-0.40
Arroz	0.10-0.20
Maní	0.30-0.80
Palmeras, café, cacao con cultivos de cobertura	0.10-0.30
Piña al contorno; residuos eliminados	0.10-0.40
Piña al contorno; con residuos superficiales	0.01
Papas; surcos cuesta abajo	0.20-0.50
Papas; surcos a lo largo de la pendiente	0.10-0.40
Garbanzos	0.30-0.40
Fresas; con cubierta antihierba	0.27
Granada; con cubierta de maleza	0.08
Granada; limpia de malas hierbas	0.56

Teff etíope	0.25
Caña de azúcar	0.13-0.40
Batatas	0.40-0.50
Gandules	0.60-0.70
Frijol mungo	0.04
Chile	0.33
Café: después de la primera cosecha	0.05
Plátanos: después del establecimiento	0.05-0.10
Papaya	0.21

Fuente: adaptado de Morgan (2005).

Los factores C de cobertura vegetal se asignaron siguiendo tablas de referencia de la literatura para cada tipo de sistema de cultivo. En este caso, se tomaron en cuenta las establecidas por Dumas (2012) y las propuestas por Morgan (2005) en su libro "*Soil Erosion & Conservation*", según lo mostrado en las Tablas 2.31 y 2.32, respectivamente. Finalmente, la Tabla 2.33 presenta los tipos de cobertura y el Factor C asignados a la cuenca.

**Tabla 2.32:** Cobertura vegetal y Factor C, para la cuenca Cachi

<b>Tipo de Cobertura</b>	<b>Factor C</b>
Arbustal	0.153
Áreas agrícolas	0.435
Bofedal	0.1
Bosque denso bajo (bosque seco)	0.186
Bosque denso bajo (chachacomo)	0.041
Bosque denso bajo (queñua)	0.041
Bosque denso bajo (relictos)	0.041
Glaciar	0
Herbazal	0.13
Lago, laguna	0
Minería	0.9
Plantación forestal	0.086
Ríos y quebradas	0
Tierras desnudas	0.9
Uso urbano	1

#### e) **Factor de prácticas de manejo (P)**

Conocido como factor de medidas de conservación, este refleja la eficiencia en el control de la erosión alcanzada mediante la implementación de prácticas de conservación del suelo. El valor de este factor varía según el tipo de práctica utilizada y la pendiente del terreno; cuando no se han aplicado medidas de conservación, se asigna un valor de 1 (Camacho et al., 2022).

Finalmente, para los indicadores de escorrentía acumulada se asignó una puntuación de 100 al píxel con el caudal anual promedio acumulado más alto que admite un sistema MAR ( $10^6 \text{ m}^3$ ) excepto para la metodología de captación de agua de lluvia donde el límite se fijó en antecedentes de proyectos ejecutados por el proyecto Fondo Sierra Azul en el orden de  $2 \times 10^5 \text{ m}^3$  y se asignó un valor de cero a la celda con el menor. Mientras tanto para el coeficiente de varianza de los caudales, se asignó una puntuación de cero cuando el valor de CV era 100 y una puntuación de 100 cuando el valor de CV fue 0. Tenga en cuenta que la variabilidad del CV dentro de la cuenca del estudio fue bastante estrecha. En el transporte de sedimentos U, se puntuó con 0 para el valor máximo y con 100 para el valor mínimo calculado.

A los valores de E y C para los píxeles que quedan fuera de la red fluvial se les asignó el valor de la celda que se consideró más cercana a ellos y ubicada en la red fluvial, fijándose un límite de distancia para las tecnologías de Modificación del cauce de arroyos y ríos y Filtración a la distancia de la faja marginal (ANA) y 300 m (Talozi et al., 2023) respectivamente. Esto se logró mediante el uso de la asignación euclidiana que permite asignar la profundidad de la escorrentía acumulada (promedio anual durante 23 años) de las celdas del río a otras celdas dentro de la cuenca en función de la distancia. Este procedimiento se exceptuó en la tecnología MAR de captación de agua de lluvia, donde la puntuación se realizó para las celdas en general calculas de la acumulación de flujo; además supone el agua in situ sin traslado de la misma al sitio MAR. De manera similar, el CV para cada celda se asignó mediante la asignación euclidiana. La asignación euclidiana tiene en cuenta la posibilidad de trasladar agua del río a lugares adecuados cercanos. La asignación euclidiana se realizó utilizando la barra de herramientas *Spatial Analyst* en ArcGIS 10.8.2.

#### **2.3.3.3.3. Recargabilidad intrínseca del acuífero:**

La recargabilidad intrínseca del acuífero está asociada al medio físico por el que circulará el agua producto de MAR.

La recargabilidad intrínseca, para la cuenca expresará la variabilidad en la misma, debido a la gran variabilidad asociada a este como respuesta a las variables descritas a continuación.

$$I_{rt} = m(FG) + n(DF) + o(GM) + pS$$

Donde  $I_{rt}$  es el índice de recargabilidad intrínseca del acuífero calculado para cada celda de la cuadrícula (sin unidades). m, n, o y p son factores de ponderación asignados a cada criterio (sin unidades); FG es la puntuación de cada formación geológica existente disponible y se basa en la

capacidad posible de esta en permitir el almacenamiento y la circulación del agua subterránea sobre este, DF es la puntuación que se basó en proximidad de la instalación MAR respecto a las fallas geológicas, calculado con la distancia euclidiana en metros entre cada píxel y la falla más cercana. GM son puntuaciones asignadas a cada unidad geomórfica existente en la zona de estudio, en relación a su potencialidad para la presencia y recarga de aguas subterráneas. S es la pendiente con puntuaciones inversamente proporcional a la pendiente, así a mayor pendiente, mayor será la escorrentía y, por tanto, menor será la recarga de aguas subterráneas.

- **Formación geológica:**

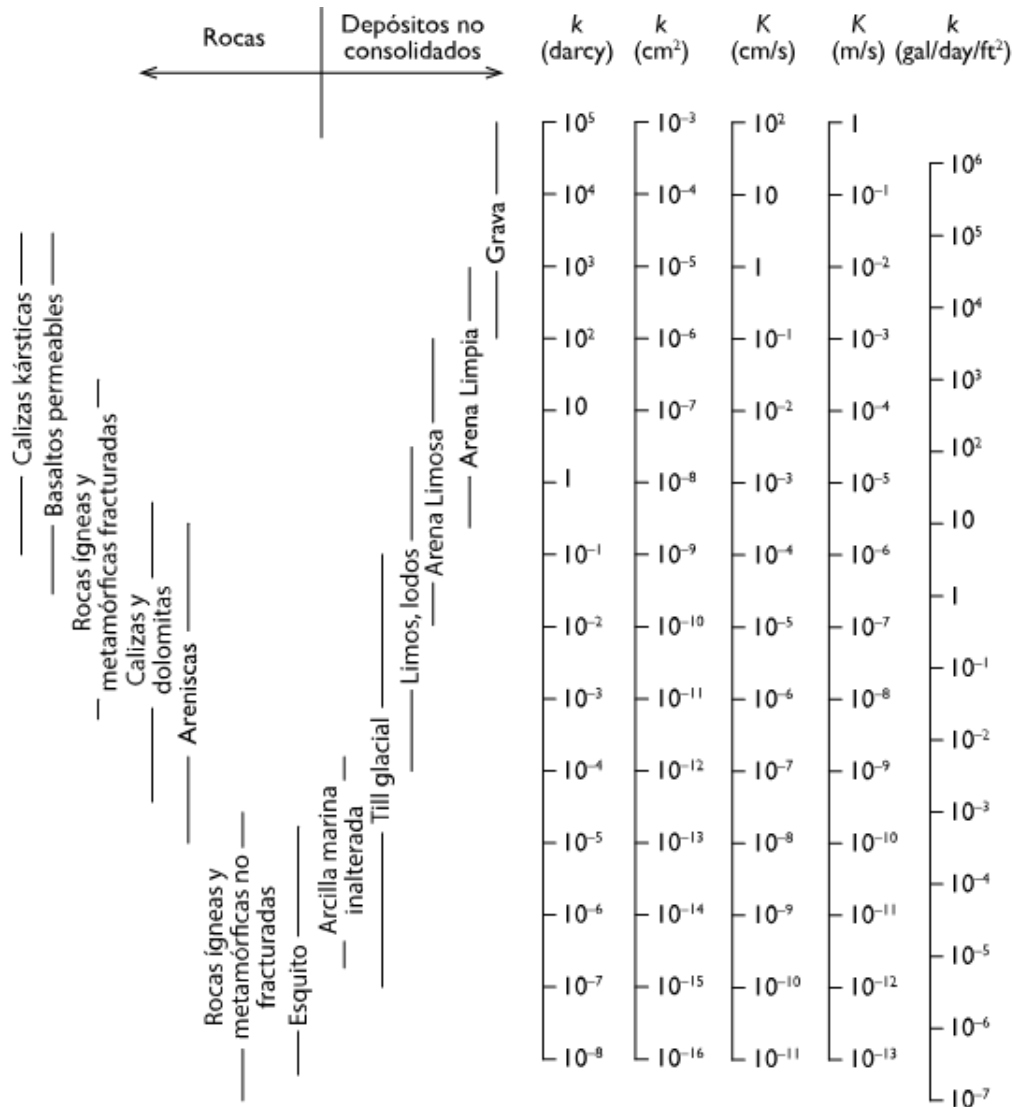
Para generación de esta capa se recurrió a las Tablas: 1.4, 2.35, 2.36 y 2.37

**Tabla 2.33:** Resumen de la tabla de atributos Litología y Permeabilidad

<b>Permeabilidad primaria</b>	<b>Litología</b>
Alta	Depósito aluvial
	Terraza aluvial
Media	Depósito glacial
	Conglomerado arenisco
	Toba
Baja a media	Aglomerado
	Flujos de lava andesítica
	Andesítica basáltica
	Conglomerado arcilla
	Andesitas
	Arcillas
	Caliza
Baja	Pizarra
	Rocas metamórficas
	Cuarcita
	Lutita
	Rocas volcánicas
	Intercalaciones de lava
	Intercalaciones de sedimentos
	Capas de lava
	Capas metavolcánicas
	Granodiorita
Granito	
Muy baja	Peridotita
	Filita
	Esquistos
	Anfibolita
	Riolita, tonalita

Fuente: Macas y López (2018).

**Tabla 2.34:** Intervalo de valores de conductividad hidráulica y permeabilidad



Fuente: Davis (1969).

**Tabla 2.35:** Clasificación de algunos materiales sedimentarios según su permeabilidad

PERMEABILIDAD EN (m/día)	
	10 <sup>4</sup> 10 <sup>3</sup> 10 <sup>2</sup> 10 1 10 <sup>-1</sup> 10 <sup>-2</sup> 10 <sup>-3</sup> 10 <sup>-4</sup> 10 <sup>-5</sup> 10 <sup>-6</sup>
CLASIFICACIÓN GEOLÓGICA	GRAVAS LIMPIAS      GRAVAS Y ARENAS, O ARENAS GRUESAS      ARENAS FINAS O CON MEZCLA DE LIMOS      LIMOS O ARCILLAS ARENOSAS      ARCILLAS COMPACTAS
CLASIFICACION HIDROGEOLÓGICA	BUEN ACUIFERO      ACUIFERO POBRE      ACUITARDO      PRACTICAMENTE IMPERMEABLE

Fuente: Custodio y Llamas (1983).

A partir de las Tablas 2.33, 2.34 y 2.35 anteriores se clasificó y asignó peso a las distintas formaciones geológicas existentes como se detalla a continuación:

**Tabla 2.36:** Asignación de puntaje de las formaciones geológicas existentes.

<b>Permeabilidad</b>			
<b>Calificación</b>	<b><math>k</math> (m/día) (darcy)</b>	<b>Litología</b>	<b>Puntaje</b>
Muy alta	$k > 10^2$	Grava Arena gruesa limpia Calizas kársticas	N/A
Alta	$10 < k < 10^2$	Basaltos permeables Depósito aluvial Terraza aluvial Arenas finas	100
Media	$1 < k < 10$	Depósito glacial Conglomerado arenisco Arena limosa	83
Baja a media	$10^{-1} < k < 1$	Rocas ígneas y metamórficas fracturadas Toba Aglomerado Flujos de lava andesítica Limos, lodos	67
Baja	$10^{-2} < k < 10^{-1}$	Rocas ígneas y metamórficas Conglomerado arcilla Caliza Dolomitas Lutita Arcillas	50
Muy baja	$10^{-4} < k < 10^{-2}$	Rocas volcánicas Intercalaciones de lava Intercalaciones de sedimentos Capas de lava Capas metavolcánicas Arcilla inalterada Granodiorita Granito	33
Impermeable	$10^{-8} < k < 10^{-4}$	Peridotita Filita Esquistos Anfibolita Riolita, tonalita	17

**Tabla 2.37:** Formaciones geológicas en la cuenca y calificación.

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Calificación de permeabilidad</b>
Cp-t	Grupo Tarma - limolitas, areniscas con lutitas y limoarcillitas	Baja
Kp-gd	Rocas Ígneas - Granodiorita	Impermeable
KsPp-ta	Formación Tambo - limolitas y areniscas arcósicas rojas	Baja a media
L/C	Laguna/Ciudad	N/A
N-da	Neógeno, dacita	Muy baja
N-di	Rocas intrusivas - Diorita	Impermeable
N-dml	domo de lava con diferenciación magmática	Muy baja
N-gd	Rocas intrusivas - Granodiorita	Impermeable
N-po	Pórfidos de plagioclasa y cuarzo	Impermeable
Nm-ac	Formación Acobamba - areniscas de grano grueso y medio, de color grisáceo, intercalados con conglomerados	Media
Nm-ap	dique de andesita porfídica	Impermeable
Nm-ap_i/sv-an-pr	Fm. Apacheta, mbro. inferior, rocas sub-volcanicas, felsicas	Muy baja
Nm-ap_i/vsed	Fm. Apacheta, Flujos piroclásticos, volcanoclásticos, volcanosedimentarios	Muy baja
Nm-ap_s/an	Fm. Apacheta, andesitas afaníticas	Muy baja
Nm-ap_s/ap	Fm. Apacheta, andesita porfídica	Muy baja
Nm-ap_s/bx-1	Fm. Apacheta, brechas hidrotermales	Baja a media
Nm-ap_s/dpr	Fm. Apacheta, dacita porfídica	Muy baja
Nm-ap_s/tbk	Fm. Apacheta, toba de cristales	Baja a media
Nm-ay_s	Fm. Ayacucho, miembro superior, secuencia sedimentaria	Baja
Nm-ayi	Fm. Ayacucho, miembro inferior, secuencia sedimentaria, grano decreciente	Baja
Nm-ayi/tb	Fm. Ayacucho, miembro inferior, secuencia de ignimbritas proximales	Baja
Nm-ayi/tb1	Fm. Ayacucho, miembro inferior, nivel de ignimbrita, toba de ceniza	Baja a media
Nm-ayi/tb2	Fm. Ayacucho, miembro inferior, nivel de ignimbritas, toba lítica	Baja a media
Nm-ayi/tb3	Fm. Ayacucho, miembro inferior, ignimbritas con matriz de ceniza	Baja a media
Nm-ch/ab	Fm. Chahuarma2, andesitas basálticas	Baja
Nm-ch/an	Fm. chaupi orcco, intercalación de andesitas afaníticas y porfiríticas	Muy baja
Nm-ch/ri	Fm. chaupi orcco, lavas oscuras de composición riolítica	Muy baja
Nm-ch/vs	Fm. cahupi orcco, conglomerados de naturaleza volcánica (debris flow)	Baja a media

Nm-ch2/ag-an	Fm. Chahuarma2, ag-andesitas	Muy baja
Nm-ch2/ap	Fm. Chahuarma2, andesitas porfídicas	Muy baja
Nm-cho/an	Fm. choccehuacgra, flujos de lava color gris	Baja
Nm-cho/dm	Fm. choccehuacgra, domo lava riolítico	Baja
Nm-hu/m	Formación Huanta - Miembro Mayoc - limolitas verdes amarillentas con intercalaciones de calizas lacustrinas y algunos niveles de conglomerado	Baja a media
Nm-hu/t	Formación Huanta - Miembro Tingrayoc - limoarcillitas rojizas, conglomerados polimícticos , areniscas, lodolitas y tobas.	Baja a media
Nm-mo	Formación Molinoyoc - Lavas volcánicas. oscuras de composición andesítica intercaladas con brechas.	Baja a media
Nm-po_i/bxl	Fm. Portuguesa mbro. inferior, brechas y lavas	Muy baja
Nm-po_i/tbl+plg	Fm. Portuguesa mbro. inferior, toba de lapilli	Baja a media
Nm-po_i/tbx	Fm. Portuguesa mbro. inferior, toba de brecha	Baja a media
Nm-po_m/an	Fm. Portuguesa mbro. medio, Andesitas	Muy baja
Nm-po_m/ap	Fm. Portuguesa mbro. medio, Andesita porfídica	Muy baja
Nm-po_m/tb+qz	Fm. Portuguesa mbro. medio, toba grisácea	Baja a media
Nm-po_m/tbl	Fm. Portuguesa mbro. medio, toba de lapilli	Baja a media
Nm-r-tb	Formación Rumihuasi - toba	Baja a media
Nm-r-vs	Formación Rumihuasi-Volcano clástico	Baja
Nm-rh	Fm. Rumihuasi - Tobas con pómez grandes en la base y alternados limos con material de erupciones volcánicas	Baja
Nm-sa	Fm. Quenamari - M. Sapanuta - Tobas cristaloclasticas de composición riolítica con abundante	Baja a media
Nm-sac	Fm. sacrakure, tobas soldadas	Baja
Np-an	Dique andesítico	Muy baja
Np-at	Fm. Atunsulla, material coluvial y fluvial	Alta
Np-hu	Gpo. Barroso, Fm.huari, Flujos de lavas grises	Baja
Np-hu/+hb	Fm. huari, lavas grises oscuras, cristales de hb	Baja
Np-lj	Estrato volcán Lucho Jahuana Pampa, lavas	Muy baja
Np-po_s/tbl	Fm. Portuguesa mbro. superior, tobas líticas	Baja a media
Np-po_s/tbls	Fm. Portuguesa mbro. superior, toba soldada silicificada y mineralizada	Baja
Np-po_sup/tbl	Fm. Portuguesa mbro. superior, toba de lapilli, líticos y pómez	Baja a media
Np-to/and	Lavas Andesíticas de textura porfirítica con fenocristales de plagioclasa	Muy baja
P-pd	Paleógeno, pórfido dacítico	Baja
P-si	Sienita	Muy baja
PEc-c	Grupo Copacabana - estratos de calizas color gris y marrón de grano medio	Baja a media
PET-bva-poc/sgr	Batolito Villa Azul - Palta Orjo Chico - Sienogranito	Impermeable

PET-m/i	Grupo Mitu - Miembro inferior - Lavas andesítica y riolitas intercaladas con tobas soldadas con fiamea y líticos, areniscas y conglomerados más abundantes al tope	Baja
PET-m/s	Grupo Mitu - Miembro superior - Lavas andesítica y riolitas intercaladas con tobas soldadas con fiamea y líticos, areniscas y conglomerados más abundantes al tope	Baja
Pm-q/ah	granito querobamba, con alteración hidrotermal	Baja
PN-po	pórfido de cuarzo y plagioclasa	Muy baja
PN-po/+hb	pórfido cuarzo y plagioclasa enriquecido en hornblenda	Muy baja
Ppe-t	Formación Ticllas, areniscas	Baja
Ps-q/gr	Querobamba, granito	Impermeable
PsT-mi	Grupo Mitu - Miembro inferior - Lavas andesítica y riolitas intercaladas con tobas soldadas con fiamea y líticos, areniscas y conglomerados más abundantes al tope	Baja
PsT-mi/an-bx	Grupo Mitu, Lavas andesíticas, brechas.	Baja
PsT-mi/tbs	Grupo Mitu, tobas cenizas,	Baja a media
PsTi-di	diorita	Impermeable
PsTi-pr	pórfido ácido runtulla	Impermeable
PsTi-ya-sv	Grupo Mitu - Miembro lávico - intercalaciones de lavas oscuras, dacítica intercaladas con niveles de tobas soldadas de color rosado y niveles sedimentarios	Muy baja
Q-cl	Depósito coluvial	Alta
Q-e	Depósito eluvial	Alta
Q-fl	Depósito fluvial	Alta
Q-mo	Depositos Morrénicos - Fragmentos angulosos a subangulosos, diámetro variable en matriz.	Media
Qh-al	Depósito aluvial	Alta
Qh-bo	Depósitos de bofedal - Intercalación de limos, arenas y niveles orgánicos.	Media
Qh-fg	Depósitos Fluvioglaciares - Gravas, arenas en matriz limoarenosas. Arenas y materiales residuales no consolidados.	Alta
Qh-la	Deposito lacustrino, arcillas limosas y arenas	Media
Qp-p	Formación Pachachuayjo - limoarcillas, lodolitas intercaladas con esporádicos niveles de caliza color blanco	Baja
Qpl-tr	Depósito de travertino	Baja
TrJi-pu	Gpo. Pucara - Calizas gris azulinas en bancos medios a gruesos con nódulos de chert.	Baja a media

- **Distancia a fallas:**

Para esta capa se determinó la distancia euclidiana en metros entre cada píxel y la falla más cercana de la Figura 2.34 y Tabla 2.38, donde la distancia mínima le corresponde el valor de 100 y la máxima como valor de 0. La asignación euclidiana se realizó utilizando la barra de herramientas Spatial Analyst en ArcGIS 10.8.2.

**Tabla 2.38:** Fallas existentes en la cuenca y longitud acumulada.

<b>Código</b>	<b>Tipo de falla</b>	<b>Longitud (Km)</b>
4	Falla normal	88.15
5	Falla inferida	3.64
6	Falla Inversa	1.06
7	Lineamiento (fractura)	205.92
9	Falla de rumbo siniestral	26.13
60	Lineamiento Inferido	52.71

- **Geomorfología:**

Selvarani et al. (2016), indica un puntaje para las siguientes unidades geomórficas en la Tabla 2.39, de donde se toma como referencia para generar puntajes para la cuenca en estudio Tabla 2.40.

**Tabla 2.39:** Unidades geomórficas y pesos sobre la base de la recarga artificial.

<b>Tipo de falla</b>	<b>Peso normalizado</b>
Arena paleogénica	0.20
Pendiente cóncava poco profunda	0.08
Duricrust	0.04
Pendiente cóncava enterrado poco profundo	0.08
Colina residual	0.04
Cerros denudacionales	0.04
Pendiente cóncava profundo	0.16
Relleno de valle	0.16
Pendiente cóncava	0.04
Llanura de inundación	0.16
Talud compuesto	0.04

Fuente: adaptado de Selvarani et al. (2016).

**Tabla 2.40:** Unidades geomórficas cuenca Cachi y puntajes.

<b>Código</b>	<b>Sub unidad</b>	<b>Calificación a la infiltración</b>	<b>Puntaje</b>
Ti	Terraza indiferenciada		
VII-gl/l	Valle glaciario con laguna	Muy rápida	100
P-at	Vertiente o piedemonte aluvio-torrencial		

V-al	Vertiente o piedemonte aluvial		
V-cd	Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial		
Mo	Morrenas		
V-dd	Vertiente con depósito de deslizamiento	Rápida	85
V-gl	Vertiente glacial o de gelifracción		
Lg/ca	Laguna y cuerpos de agua		
CL-ig	Colina y lomada ignimbrítica		
RC-rs	Colina en roca sedimentaria	Moderadamente rápida	70
RCL-rs	Colina y lomada en roca sedimentaria		
Sfp-d	Superficie de flujo piroclástico disectado o erosionado	Moderada	55
Ca-la	Coladas o campo de lavas basalto-andesíticas		
Co-v	Complejo volcánico		
CoE	Cono de escoria monogenético	Moderadamente lenta	40
M-vl	Meseta volcánica lávica		
RCL-ri	Colina y lomada en roca intrusiva		
RCL-rv	Colina y lomada en roca volcánica	Lenta	25
RM-rs	Montaña en roca sedimentaria		
RM-rvs	Montaña en roca volcano-sedimentaria		
RM-ri	Montaña en roca intrusiva	Muy lenta	10
RM-rv	Montaña en roca volcánica		

- **Pendiente:**

La pendiente también es un parámetro crucial para las condiciones de ocurrencia y recarga de aguas subterráneas en un área particular. Cuanto mayor sea la pendiente, mayor será la escorrentía y, por tanto, menor será la recarga de aguas subterráneas. (Selvarani et al., 2016). Todo el mapa de pendientes se divide en cinco categorías a partir de la Tabla 2.17 y Figura 2.33 de la siguiente manera para el estudio en la Tabla 2.41:

**Tabla 2.41:** Clasificación de pendiente topográfica y puntajes asignados.

<b>Clasificación de pendiente</b>	<b>Umbral (%)</b>	<b>Puntaje</b>
Pronunciada	50>	20.00
Alta	50-20	40.00
Media	20-8	60.00
Suave	8-1	80.00
Despreciable	<1	100.00

#### 2.3.3.3.4. *Atractivo económico:*

El índice de atractivo económico ( $I_{ae}$ ) para la cuenca expresará el coste relativo de una posible instalación MAR, y es la suma de las puntuaciones y ponderaciones para los indicadores descritos.

$$I_{ae} = qUs + rDp + tPf$$

Donde q, r y t son factores de ponderación asignados a cada criterio (sin unidades); Us, Dp y Pf son puntuaciones de criterios de uso actual del suelo, densidad poblacional, y proximidad a la fuente, respectivamente. El indicador Us, contribuye al atractivo económico del MAR, ya que el costo del terreno representa de manera importante a los costos generales del proyecto de recarga. La Dp, expresa la influencia de la población en relación al área que ocupa, el coste de los terrenos, y el riesgo de la implementación de MAR, asociados al vandalismo y posibles fuentes de contaminación. La proximidad del sitio de recarga a la fuente Pf de agua se calculó con base en la distancia euclidiana. Los sitios alejados del río se ven así penalizados, dado el costo adicional necesario para trasladar el agua del río. Las distancias euclidianas calculadas se calificaron linealmente (Malczewski y Rinner, 2015) para garantizar que las puntuaciones asignadas oscilaran entre 0 y 100.

- **El uso actual del suelo:** se tomó lo obtenido de la sección 2.3.2.3, de la Figura 2.25 y Tabla 2.13, puntuados en la Tabla 2.42.

**Tabla 2.42:** Asignación de puntaje del uso actual del suelo en la cuenca.

<b>Uso actual del suelo</b>	<b>Puntaje</b>
Tierras desnudas	100
Herbazal	86
Arbustal	72
Bofedal	72
Bosque denso bajo (chachacomo)	58
Bosque denso bajo (queñua)	58
Bosque denso bajo (relictos)	58
Bosque denso bajo (bosque seco)	44
Plantación forestal	30
Áreas agrícolas	16
Glaciar	Excluir
Lago, laguna	Excluir
Minería	Excluir
Ríos y quebradas	Excluir
Uso urbano	Excluir

- **Densidad poblacional:** Teniéndose en cuenta la sección 2.3.2.3, de la Figura 2.26 y Tabla 2.14, puntuados en la Tabla 2.43.

**Tabla 2.43:** Asignación de puntaje a la densidad poblacional en la cuenca.

Densidad poblacional	Umbral (Hab/Km <sup>2</sup> )	Puntaje
Muy alta	2000>	0
Alta	2000-500	25
Regular	500-50	50
Bajo	50-10	75
Muy baja	10-0	100

- **Proximidad a la fuente:**

Se puntuó con 0 para distancia máxima, 100 para distancia mínima, interpolación lineal para valores dentro del intervalo.

#### 2.3.3.4. Análisis de sensibilidad.

En el análisis de idoneidad geoespacial, donde es complicado y costoso obtener información sobre los errores en los datos de entrada, se puede emplear el análisis de sensibilidad para identificar cuáles de estos datos deben medirse con mayor precisión para mejorar la calidad y confiabilidad de los resultados del análisis de idoneidad del sitio. El método de eliminación de mapas para estimar la sensibilidad (Lodwick et al., 1990) es comúnmente utilizado en el análisis geoespacial (Itani et al., 2022; Shahab et al., 2019; Fenta et al., 2015). Según este método, se calcula un índice de variación de sensibilidad (VI) eliminando cada indicador que contribuye a la puntuación final de idoneidad del MAR.

$$VI = 100 * \frac{\left| \frac{S_c}{N} - \frac{S'_c}{N-1} \right|}{S_c}$$

Donde VI es el índice de variación de sensibilidad en porcentaje, Sc es la puntuación de idoneidad MAR real del MCDA primario utilizando los parámetros N, y Sc' es la puntuación de idoneidad ajustada con el uso de indicadores N-1 (Lodwick et al., 1990).

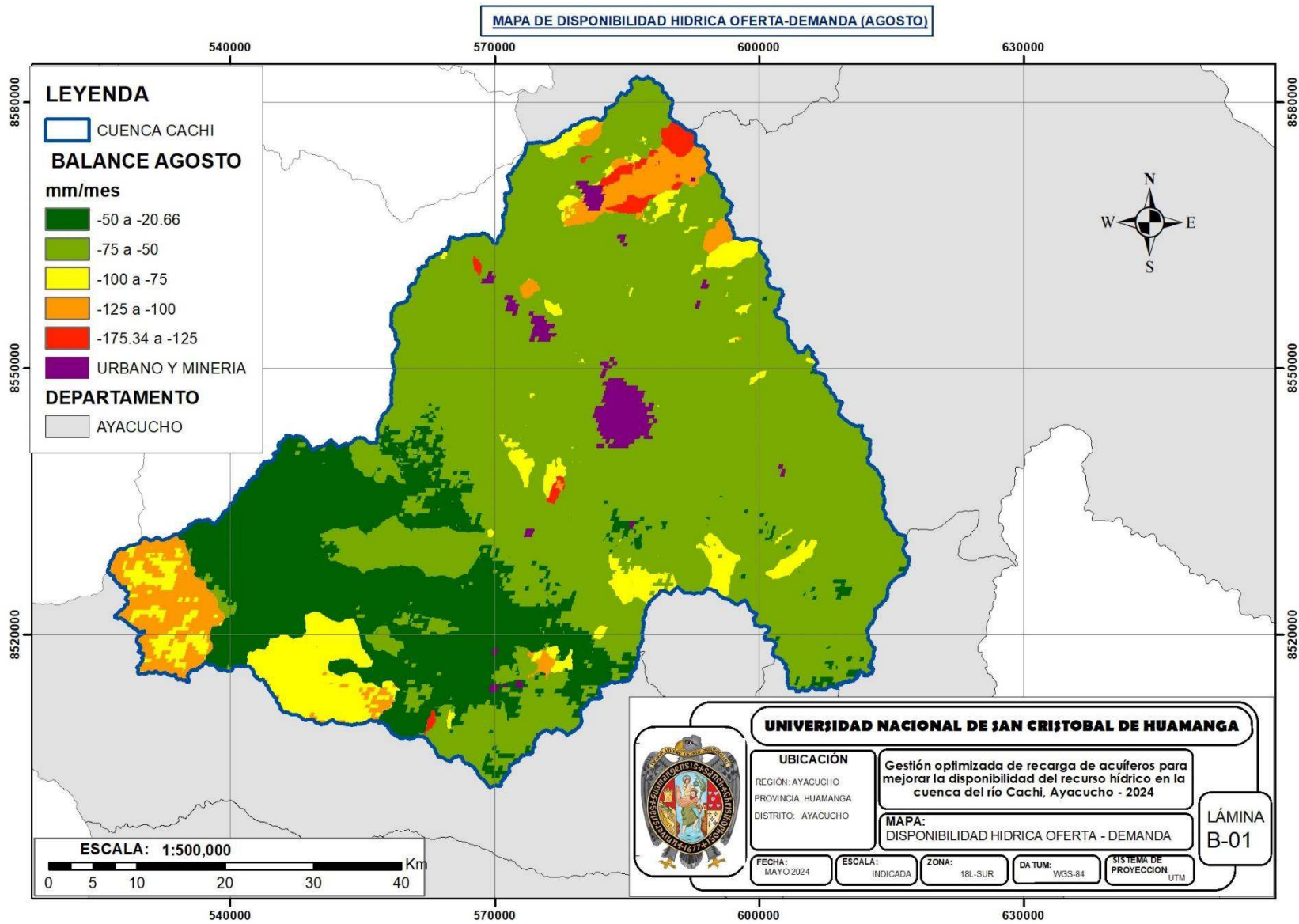
## **CAPÍTULO III**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1. Análisis de la disponibilidad hídrica espacial y temporal en la cuenca del río Cachi, considerando sus particularidades en cantidad y calidad, durante el año 2024**

##### **3.1.1. Distribución de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Cachi y áreas más afectadas durante los periodos de estiaje**

Luego de analizar la distribución de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Cachi, se obtuvo los siguientes resultados con las áreas más afectadas, los cuales correspondieron para los meses de abril a noviembre (meses de estiaje), entre los cuales el mes crítico corresponde al de agosto:



**Figura 3.1:** Distribución de disponibilidad hídrica en la cuenca Cachi, datos de oferta – demanda, mes de agosto.

En la Figura 3.1 se muestra la disponibilidad hídrica del mes más crítico en la cuenca, en la cual nos presenta los resultados de las áreas críticas inferiores a -100 mm/mes, vemos que los mínimos en la cuenca se corresponden a la zona baja de la cuenca del valle del distrito de Huanta y las captaciones de la represa de Cuchoquesera, exceptuándose las zonas urbanizadas y minería.

Donde la paleta de colores representa en relación a la disponibilidad hídrica: Verde oscuro (muy bueno), verde claro (bueno), amarillo (regular), naranja (bajo) y rojo (muy bajo).

**Tabla 3.1:** Disponibilidad hídrica (oferta – demanda) y área en la cuenca mes de agosto.

<b>Disponibilidad hídrica (Oferta - demanda) mm/mes</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>
Muy bajo (-175.34 a -125)	30.23	0.83%
Bajo (-125 a -100)	179.26	4.95%
Regular (-100 a -75)	270.54	7.47%
Bueno (-75 a -50)	2309.25	63.77%
Muy bueno (-50 a -20.66)	764.66	21.11%
Excluidas (Urbano y minería)	67.49	1.86%
<b>Total</b>	<b>3621.42</b>	<b>100.00%</b>

En la anterior Tabla 3.1 se observa que el 100% de la cuenca, con la tendencia del crecimiento demográfico y de la frontera agrícola actual quedaría bajo déficit hídrico. Y más del 10 % de la cuenca se encuentra con una disponibilidad entre regular a muy baja, esto correspondiente a resultados entre oferta – demanda, sin considerar la capacidad de recarga del acuífero subyacente.

**Tabla 3.2:** Disponibilidad hídrica muy baja mes en el de agosto (oferta – demanda) según distritos.

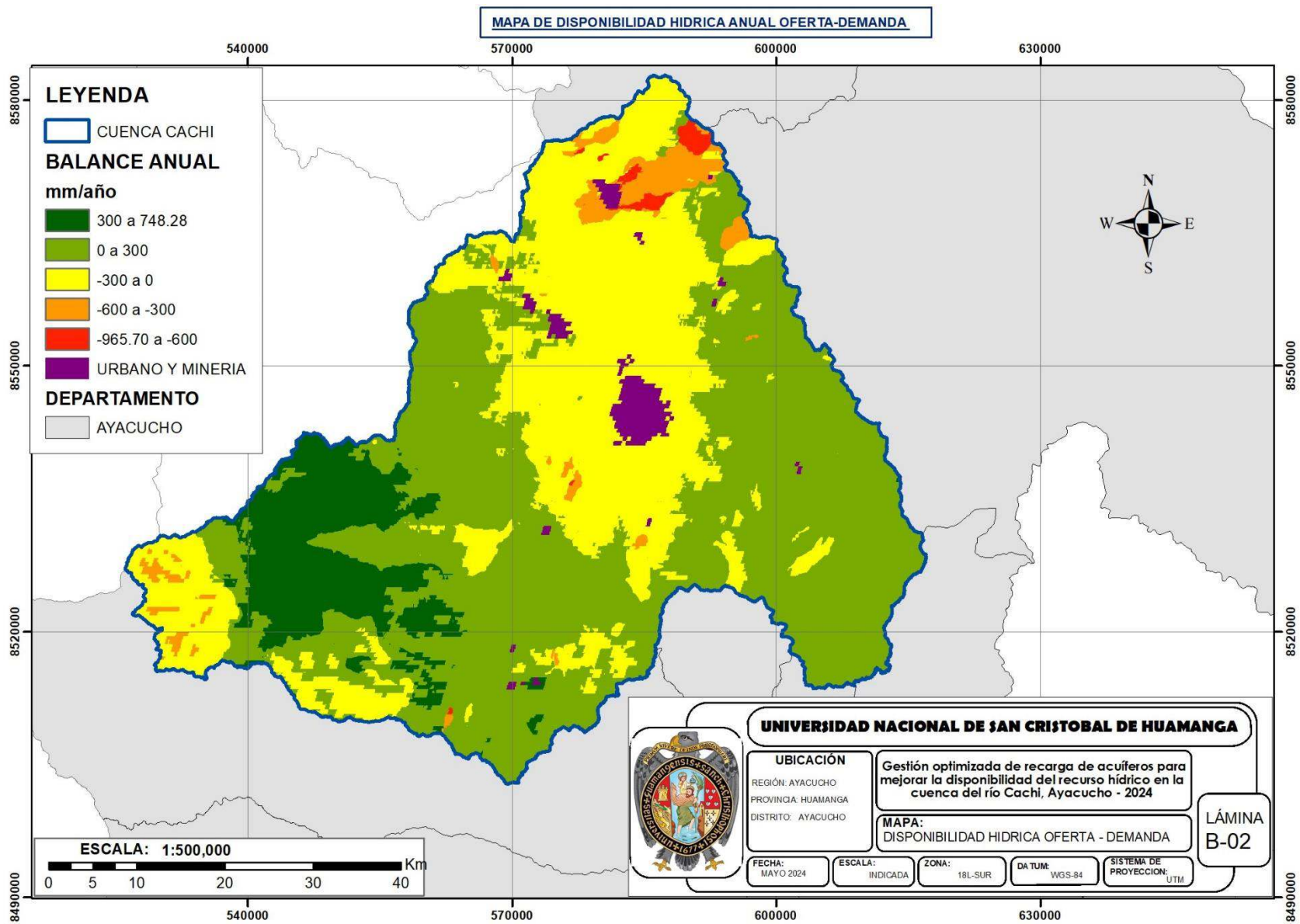
<b>Disponibilidad hídrica (oferta - demanda) crítica según distritos</b>				
<b>Departamento</b>	<b>Provincia</b>	<b>Distrito</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>
Ayacucho	Cangallo	Chuschi	9266.61	19.31%
Ayacucho	Huanta	Huanta	8402.12	17.51%
Ayacucho	Cangallo	Paras	6988.52	14.56%
Huancavelica	Huaytará	Pilpichaca	6523.12	13.59%
Ayacucho	Huamanga	Vinchos	4229.60	8.81%
Ayacucho	Huamanga	Chiara	3867.30	8.06%
Ayacucho	Huamanga	Socos	1670.82	3.48%
Ayacucho	Huanta	Luricocha	1611.79	3.36%
Ayacucho	Huanta	Huamanguilla	1299.55	2.71%
Ayacucho	Huamanga	Acocro	1020.54	2.13%
Huancavelica	Angaraes	Chincho	686.50	1.43%
Ayacucho	Huamanga	Quinua	625.59	1.30%
Ayacucho	La Mar	Tambo	578.14	1.20%
Ayacucho	Cangallo	Los Morochucos	471.49	0.98%

Ayacucho	Huanta	Iguain	351.28	0.73%
Ayacucho	Huamanga	Acos Vinchos	250.46	0.52%
Huancavelica	Angaraes	Julcamarca	61.29	0.13%
Huancavelica	Angaraes	Lircay	25.18	0.05%
Ayacucho	Huamanga	Ayacucho	22.01	0.05%
Ayacucho	Huamanga	San José de Ticllas	20.29	0.04%
Ayacucho	Huamanga	Pacaycasa	17.50	0.04%
Ayacucho	Huamanga	Tambillo	2.89	0.01%
Ayacucho	La Mar	Patibamba	1.47	0.00%
		<b>Total</b>	<b>47994.06</b>	<b>100.00%</b>

De la Tabla 3.2 de disponibilidad hídrica muy baja según distritos; corresponden para los distritos de Chuschi, Huanta, Paras y Pilpichaca más del 64.79% del área.

Anualmente el balance hídrico (Figura 3.2) muestra la disponibilidad hídrica anual del balance en la cuenca, en la cual se muestra los resultados de las áreas críticas inferiores a 0 mm/año, vemos que los mínimos en la cuenca se corresponde a la zona baja de la cuenca equivalente en gran parte a la zona climática C(o,i) B'2 H3 (templado y semiseco) , incluidas las áreas de las captaciones de la represa Cuchoquesera.

Donde la paleta de colores representa en relación a la disponibilidad hídrica: Verde oscuro (muy bueno), verde claro (bueno), amarillo (regular), naranja (bajo) y rojo (muy bajo).



**Figura 3.2:** Distribución de disponibilidad hídrica anual en la cuenca Cachi, balance datos de oferta – demanda.

**Tabla 3.3:** Disponibilidad hídrica anual (oferta – demanda) y área en la cuenca.

<b>Disponibilidad hídrica anual (Oferta - Demanda) mm/año</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>
Muy bajo (-965.70 a -600)	20.76	0.57%
Bajo (-600 a -300)	104.52	2.89%
Regular (-300 a 0)	1155.47	31.91%
Bueno (0 a 300)	1913.60	52.84%
Muy bueno (300 a 748.28)	363.00	10.02%
Excluidas (urbano y minería)	64.08	1.77%
<b>Total</b>	<b>3621.42</b>	<b>100.00%</b>

En la anterior Tabla 3.3 se observa que más del 30% de la cuenca actualmente se encuentra bajo déficit hídrico, esto correspondiente a resultados entre oferta – demanda, sin considerar la capacidad de la recarga del acuífero subyacente.

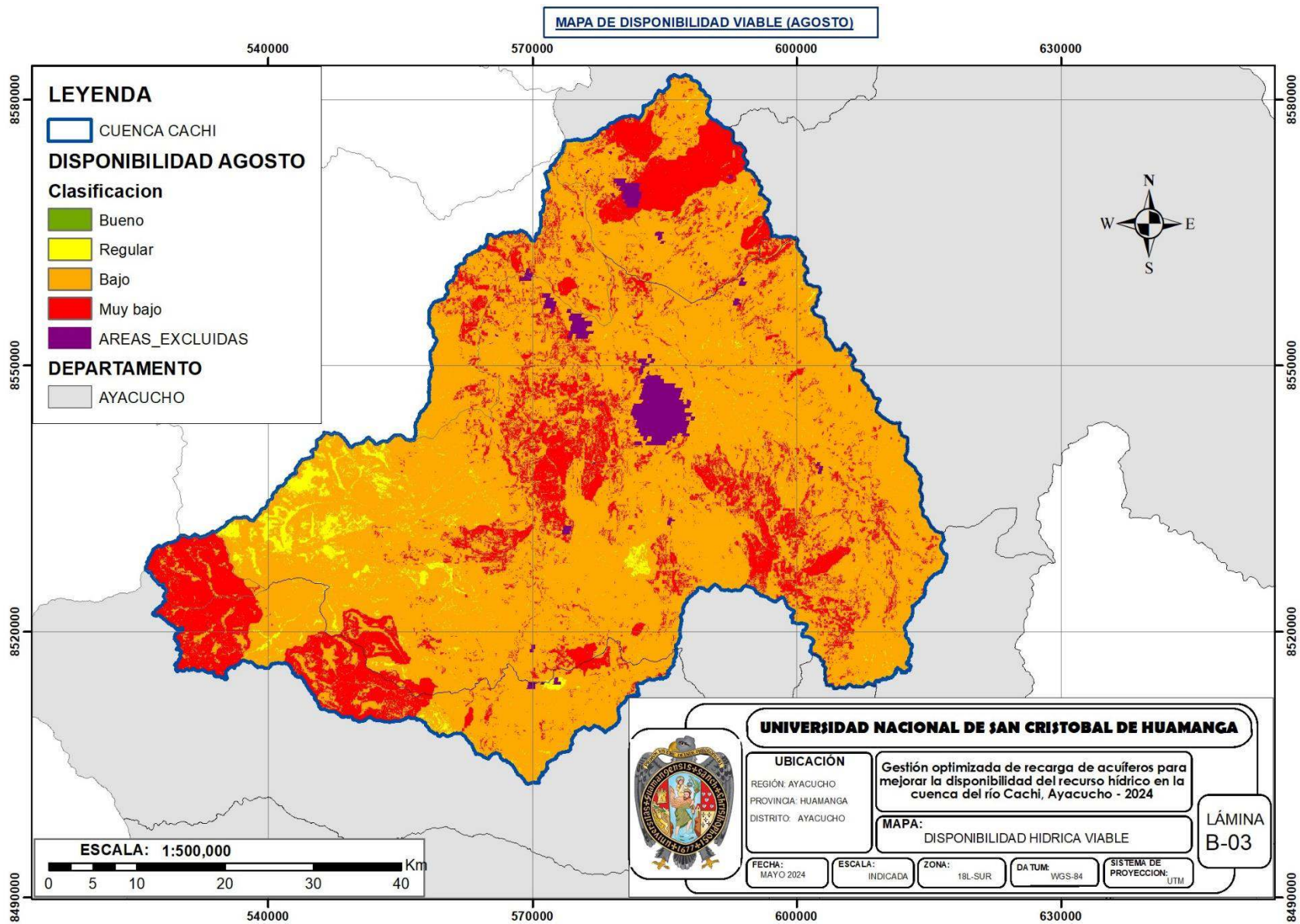
**Tabla 3.4:** Disponibilidad hídrica anual en déficit (oferta – demanda) según distritos.

<b>Disponibilidad hídrica anual en déficit (Oferta - Demanda) según distritos</b>				
<b>Departamento</b>	<b>Provincia</b>	<b>Distrito</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>
Ayacucho	Huanta	Huanta	15070.23	11.77%
Ayacucho	Huamanga	Socos	11347.47	8.86%
Huancavelica	Angaraes	Chincho	10287.16	8.03%
Ayacucho	Huamanga	Chiara	9754.27	7.62%
Ayacucho	Cangallo	Paras	6910.61	5.40%
Huancavelica	Huaytará	Pilpichaca	6445.48	5.03%
Ayacucho	Huamanga	Ayacucho	6412.49	5.01%
Ayacucho	Huamanga	San José de Ticllas	6399.89	5.00%
Ayacucho	Huamanga	Tambillo	6036.72	4.71%
Ayacucho	Huanta	Luricocha	6034.32	4.71%
Ayacucho	Huanta	Huamanguilla	5905.19	4.61%
Ayacucho	Huanta	Iguain	5476.44	4.28%
Ayacucho	Huamanga	Vinchos	5462.89	4.27%
Ayacucho	Huamanga	Pacaycasa	5378.84	4.20%
Ayacucho	Cangallo	Chuschi	5236.02	4.09%
Ayacucho	Huamanga	Quinua	3890.21	3.04%
Ayacucho	Huamanga	Santiago de Pischa	3095.90	2.42%
Ayacucho	Huamanga	Carmen Alto	1967.58	1.54%
Huancavelica	Angaraes	Julcamarca	1828.69	1.43%
Ayacucho	Cangallo	Los Morochucos	1478.87	1.15%
Ayacucho	Huamanga	Acocro	1211.35	0.95%
Ayacucho	Huamanga	Jesús Nazareno	1191.81	0.93%
Ayacucho	La Mar	Tambo	581.54	0.45%

Ayacucho	Huamanga	Andrés Avelino Cáceres Dorregaray	234.73	0.18%
Ayacucho	Huamanga	San Juan Bautista	186.93	0.15%
Ayacucho	Huamanga	Acos Vinchos	167.32	0.13%
Huancavelica	Angaraes	Santo Tomas de Pata	27.15	0.02%
Huancavelica	Angaraes	Lircay	25.92	0.02%
Huancavelica	Angaraes	San Antonio de Antaparco	9.81	0.01%
Huancavelica	Acobamba	Marcas	5.51	0.00%
Ayacucho	La Mar	Patibamba	1.52	0.00%
<b>Total</b>			<b>128062.85</b>	<b>100.00%</b>

De la Tabla 3.4 para la disponibilidad hídrica en déficit según distritos, corresponden a los distritos de Huanta, Socos, Chincho, Chiara, Paras, Pilpichaca y Ayacucho más del 50% del área.

Para la disponibilidad hídrica viable, la cual incluye la capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA), los resultados también son críticos para el mes de agosto, según la puntuación asignada (Figura 3.3):



**Figura 3.3:** Distribución de disponibilidad hídrica viable en la cuenca Cachi, mes de agosto

En la Figura 3.3 muestra la disponibilidad hídrica viable del mes más crítico en la cuenca, en la cual nos presenta los resultados de las áreas críticas puntuadas como muy baja, vemos que los mínimos en la cuenca se corresponden a la zona suroeste de la cuenca (captaciones de la represa Cuchoquesera), incluyéndose la mayoría de la superficie del distrito de Huanta.

**Tabla 3.5:** Disponibilidad hídrica viable y área en la cuenca, mes de agosto

<b>Disponibilidad Hídrica Viable</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>%</b>
Muy bajo (200 a 160)	727.31	20.08%
Bajo (160 a 120)	2736.51	75.56%
Regular (120 a 80)	88.32	2.44%
Bueno (80 a 40)	0.02	0.00%
Excluidas (Urbano y minería)	69.27	1.91%
<b>Total</b>	<b>3621.42</b>	<b>100.00%</b>

En la anterior Tabla 3.5 se observa que más del 90% de la cuenca se encuentra con una disponibilidad entre baja y muy baja, esto correspondiente a resultados de disponibilidad viable que incluye la capacidad de recarga del acuífero subyacente.

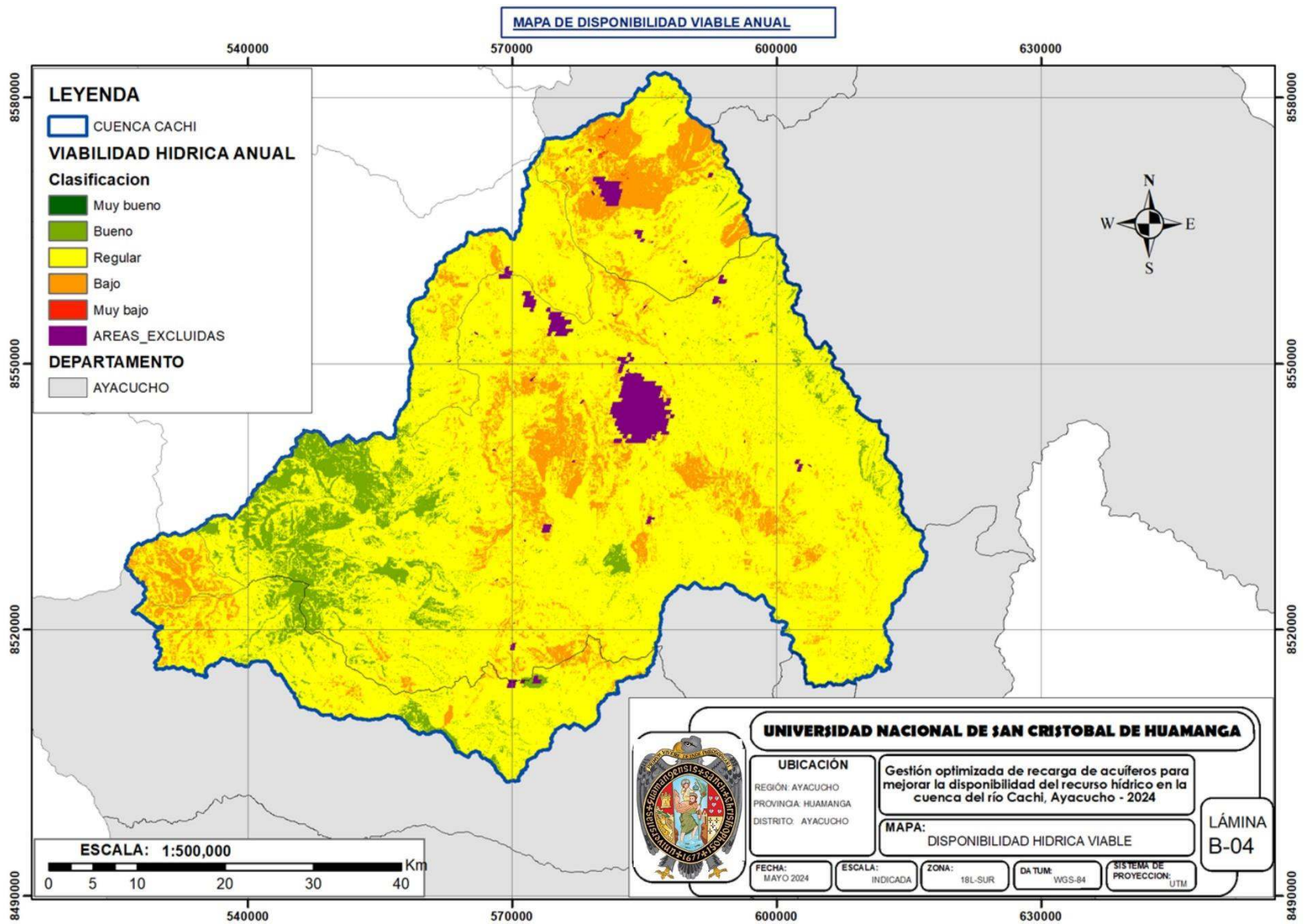
**Tabla 3.6:** Disponibilidad hídrica viable muy baja, mes de agosto según distritos.

<b>Disponibilidad viable del mes de agosto baja y muy baja según distritos</b>				
<b>Departamento</b>	<b>Provincia</b>	<b>Distrito</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>
Ayacucho	Huamanga	Vinchos	84398.69	24.38%
Ayacucho	Huamanga	Acocro	42446.52	12.26%
Ayacucho	Cangallo	Chuschi	23821.79	6.88%
Ayacucho	Huamanga	Chiara	21187.98	6.12%
Ayacucho	Huamanga	Socos	16719.99	4.83%
Ayacucho	Huanta	Huanta	15554.54	4.49%
Ayacucho	Huamanga	Acos Vinchos	15272.04	4.41%
Ayacucho	Huamanga	Tambillo	14907.92	4.31%
Huancavelica	Angaraes	Chincho	11668.02	3.37%
Ayacucho	Huamanga	Quinua	11218.26	3.24%
Ayacucho	Cangallo	Paras	10948.17	3.16%
Ayacucho	Huanta	Huamanguilla	9250.66	2.67%
Ayacucho	Huamanga	Santiago de Pischa	8366.60	2.42%
Ayacucho	Huamanga	San Jose de Tiellas	7731.85	2.23%
Huancavelica	Huaytara	Pilpichaca	6773.12	1.96%
Ayacucho	Huamanga	Ayacucho	6406.62	1.85%
Ayacucho	Cangallo	Los Morochucos	6304.89	1.82%
Huancavelica	Angaraes	Santo Tomas de Pata	6179.58	1.79%

Ayacucho	Huanta	Luricocha	5966.86	1.72%
Ayacucho	Huanta	Iguain	5952.48	1.72%
Ayacucho	Huamanga	Pacaycasa	5353.79	1.55%
Huancavelica	Angaraes	San Antonio de Antaparco	3308.84	0.96%
Huancavelica	Angaraes	Julcamarca	2133.05	0.62%
Ayacucho	Huamanga	Carmen Alto	1954.38	0.56%
Ayacucho	Huamanga	Jesus Nazareno	1181.40	0.34%
Ayacucho	La Mar	Tambo	577.27	0.17%
Ayacucho	Huamanga	Andres Avelino Dorregaray	221.00	0.06%
Ayacucho	Huamanga	San Juan Bautista	155.28	0.04%
Huancavelica	Angaraes	Lircay	100.17	0.03%
Ayacucho	Huamanga	Ocos	38.88	0.01%
Ayacucho	La Mar	Ninabamba	17.38	0.01%
Ayacucho	Vilcas Huamán	Vischongo	10.18	0.00%
Huancavelica	Acobamba	Marcas	4.82	0.00%
Ayacucho	Cangallo	María Parado de Bellido	4.25	0.00%
Ayacucho	La Mar	Patibamba	3.56	0.00%
Ayacucho	La Mar	Luis Carranza	3.15	0.00%
<b>Total</b>			<b>346143.99</b>	<b>100.00%</b>

De la Tabla 3.6 obtenida para la disponibilidad hídrica muy baja y baja según distritos, corresponden para los distritos de Vinchos, Acocro, Chuschi, Chiara, Socos y Huanta más del 50% del área de disponibilidad hídrica muy baja a baja.

Anualmente la disponibilidad hídrica incluida la capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA) (Figura 3.4):



**Figura 3.4:** Distribución de disponibilidad hídrica viable anual en la cuenca Cachi

En la Figura 3.4 se muestra la disponibilidad hídrica anual viable incluida la capacidad de recarga del acuífero subyacente en la cuenca, en la cual se presenta los resultados de las áreas muy bajas y bajas en color naranja y rojo respectivamente, vemos que los mínimos en la cuenca corresponden a la zona norte de la cuenca, incluidas las áreas de las captaciones de la represa Cuchoquesera.

**Tabla 3.7:** Disponibilidad hídrica viable anual y área en la cuenca.

<b>Disponibilidad hídrica viable anual</b>	<b>Puntaje</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje</b>
Muy bajo	200-160	0.73	0.02%
Bajo	160-120	401.36	11.08%
Regular	120-80	2891.92	79.86%
Bueno	80-40	258.04	7.13%
Muy bueno	40-0	0.09	0.00%
Excluidas (urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>Total</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>

En la anterior Tabla 3.7 se observa que más del 10 % de la cuenca se encuentra con una disponibilidad entre baja a muy baja, esto correspondiente a resultados incluidos la capacidad de recarga del acuífero subyacente.

**Tabla 3.8:** Disponibilidad hídrica viable anual según distritos.

<b>Disponibilidad viable anual baja y muy baja según distritos</b>				
<b>Departamento</b>	<b>Provincia</b>	<b>Distrito</b>	<b>Área (Ha)</b>	<b>%</b>
Ayacucho	Huanta	Huanta	7715.41	19.19%
Ayacucho	Huamanga	Vinchos	5257.30	13.08%
Ayacucho	Huamanga	Socos	4497.66	11.19%
Huancavelica	Huaytará	Pilpichaca	2975.92	7.40%
Ayacucho	Huanta	Luricocha	2892.49	7.19%
Ayacucho	Huamanga	Acocro	2654.41	6.60%
Ayacucho	Huamanga	Tambillo	2234.85	5.56%
Ayacucho	Cangallo	Paras	1844.14	4.59%
Ayacucho	Huamanga	San Jose de Ticllas	1768.36	4.40%
Ayacucho	Huamanga	Chiara	1129.37	2.81%
Ayacucho	Huanta	Huamanguilla	1043.73	2.60%
Huancavelica	Angaraes	Chincho	858.31	2.13%
Ayacucho	Huamanga	Ayacucho	774.80	1.93%
Ayacucho	Huamanga	Pacaycasa	762.48	1.90%
Ayacucho	Cangallo	Los Morochucos	662.61	1.65%

Ayacucho	Huanta	Iguain	597.76	1.49%
Ayacucho	Cangallo	Chuschi	549.60	1.37%
Ayacucho	Huamanga	Carmen Alto	474.94	1.18%
Huancavelica	Angaraes	San Antonio de Antaparco	378.18	0.94%
Huancavelica	Angaraes	Julcamarca	325.35	0.81%
Ayacucho	Huamanga	Quinoa	255.91	0.64%
Ayacucho	Huamanga	Santiago de Pischa	252.13	0.63%
Huancavelica	Angaraes	Santo Tomas de Pata	116.49	0.29%
Ayacucho	Huamanga	Acos Vinchos	60.62	0.15%
Ayacucho	Huamanga	Andrés Avelino Cáceres Dorregaray	42.44	0.11%
Ayacucho	Huamanga	Jesús Nazareno	37.24	0.09%
Ayacucho	Huamanga	San Juan Bautista	33.68	0.08%
Ayacucho	La Mar	Tambo	5.91	0.01%
<b>Total</b>			<b>40202.11</b>	<b>100.00%</b>

De la Tabla 3.8, la disponibilidad hídrica viable entre baja y muy baja según distritos, corresponden a los distritos de Huanta, Vinchos, Socos y Pilpichaca más del 50% del área.

### **3.2. Identificación y evaluación de las metodologías de recarga artificial de acuíferos, analizando su viabilidad técnica, económica y ambiental en la selección de ubicaciones óptimas de recarga artificial, basándose en análisis de datos de geología, hidrogeología, clima, teledetección y uso del suelo, en la cuenca Cachi durante el año 2024.**

#### **3.2.1. Oportunidades y desafíos asociados con la implementación de técnicas de recarga artificial en la cuenca del río Cachi**

En resumen, la Tabla 3.9 muestra las características descritas evaluadas para la implementación de MAR, donde se evalúa su estado en la cuenca, la representación de la cuenca y la tecnología óptima según la característica analizada.

**Tabla 3.9:** Oportunidades y desafíos asociados con la implementación de MAR en la cuenca Cachi.

Ítem	Característica	Análisis	Información en la cuenca	Representación en la cuenca	Tecnología MAR recomendada			
1	Disponibilidad del recurso hídrico	Un 62.82% de la cuenca dispone anualmente al menos agua por encima de 1 mm de lluvia acumulada, como posible fuente MAR. Esto representa más de la mitad del área en estudio.	O	oportunidad	LI	C	P	D F
2	Calidad de las fuentes de agua	La calidad de aguas en la cuenca no cuenta con data suficiente, para realizar una estimación precisa, pero en general la zona suroeste de la cuenca el cual representa más del 50 % del área, presenta contaminantes los cuales no son depurados mediante ninguna tecnología MAR, seguido por más de una tercera parte que no requiere tratamiento alguno (35.87%).	D	desafío	LI	P	C	D F
3	Uso actual de suelos y densidad poblacional	El uso actual de suelos en la cuenca muestra con más de un 60% (arbustal, herbazal, tierras desnudas) de su área, con condiciones prioritarias para implementar MAR, y hasta un 25 % a evaluar (áreas agrícolas). La densidad poblacional para la cuenca, es inferior a 10 Hab/Km <sup>2</sup> , para más del 50% de la cuenca, el cual facilita la implementación de tecnologías MAR	O	oportunidad	D	LI	C	P F
4	Demanda futura del recurso hídrico	La demanda futura en la cuenca muestra una variabilidad grande, lo que amerita enfocarse en zonas en específico dentro de la misma, a pesar de que menos del 15% de la cuenca se encuentra con una demanda superior a lo regular.	R	desafío	P	D	LI	C F
5	Información y data sobre los acuíferos existentes	Los datos sobre los acuíferos en la cuenca son inexistentes, por lo que se usaron otras variables geológicas (Fallas geológicas, Formaciones geológicas, Hidrogeología y geomorfología), obtenidos desde la plataforma de GEOCATMIN, que determinan la existencia y características de los acuíferos subyacentes.	NE	desafío	LI	P	C	D F

6	Pendiente topográfica	Las pendientes presentes en la cuenca, superan el 65 % de su área como zonas de pendiente alta. La variable de la pendiente es un factor determinante en la mayoría de las tecnologías MAR.	O	desafío	P	F	LI	C	D
7	Nivel de conocimiento y tecnología	La experiencia y conocimientos de las tecnologías MAR, para el Perú en general, es deficiente, excepto por el Fondo Sierra Azul, basado en la tecnología de captación de agua de lluvia, y otros dos casos de tecnologías (Pozos y distribución), ambos en la costa, registrados en la plataforma del IGRAC	D	desafío	LI	D	C	F	P
8	Objetivo del MAR	Para el Perú, así como la cuenca en estudio, los proyectos existentes (Fondo Sierra Azul), tienen por objetivo de mejorar el almacenamiento del recurso hídrico (recarga de acuíferos, beneficios ecológicos), mas no así su tratamiento (calidad del agua). Basados en este hecho, la elección de la tecnología MAR, se ve simplificada.	R	oportunidad	C	P	LI	D	F
9	Costo del agua recargada	El costo de agua recargada depende en gran medida de la metodología usada, siendo que en nuestro medio se espera inversiones de costo menor e impacto mayor. Así de la Tabla 2.20 la relación costo beneficio para las tecnologías de pozos, distribución y filtración es de 1.8, 3.8, 7.2 respectivamente	D	desafío	F	D	LI	C	P
10	Desempeño de las estructuras de recarga	Las diferentes tecnologías ofrecen y adaptan el MAR, para diversos escenarios y necesidades, los mismos que existen en la cuenca Cachi, descritos anteriormente. Aunque solo se tiene experiencia en una de las cinco tecnologías existentes, captación de agua de lluvia.	D	oportunidad					

Donde las distintas simbologías descritas representan lo siguiente:

**Tabla 3.10:** Simbología de evaluación de las oportunidades y desafíos asociados a la implementación de MAR.

<b>Información en la Cuenca</b>	
O	Óptima
R	Regular
D	Deficiente
NE	No hay evidencia

<b>Tecnología MAR</b>	
1	Distribución (D)
2	Pozos (P)
3	Modificación del cauce de arroyos y ríos (C)
4	Filtración (F)
5	Captación de agua de lluvia (LI)

Finalmente, en la cuenca según la importancia de cada característica evaluada para la implementación de MAR, se obtiene la siguiente Tabla 3.11:

**Tabla 3.11:** Puntuación obtenida para cada metodología en orden de importancia para la cuenca

<b>Tecnología MAR</b>	<b>#Veces / importancia</b>					<b>Suma total</b>
	<b>Peso</b>					
	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>Peso x #Veces</b>
Distribución (D)	1	3	0	4	1	26
Pozos (P)	2	3	1	1	2	29
Modificación del cauce de arroyos y ríos (C)	1	1	4	3	0	27
Filtración (F)	1	1	0	1	6	17
Captación de agua de lluvia (LI)	4	1	4	0	0	36

**Tabla 3.12:** Clasificación de viabilidad de las tecnologías MAR para la cuenca Cachi

<b>Cod</b>	<b>Clasificación de la tecnología MAR según viabilidad en la cuenca Cachi</b>	<b>Viabilidad</b>
LI	Captación de agua de lluvia	Muy alta
P	Pozos	Alta
D	Distribución	Regular
C	Modificación del cauce de arroyos y ríos	Baja
F	Filtración	Muy baja

En la Tabla 3.12 obtenida para la viabilidad de las tecnologías MAR para la cuenca se observa que la captación de agua de lluvia que se viene aplicando actualmente en la cuenca, responde a una viabilidad muy alta, seguida de pozos y distribución, las cuales aún no se tiene registro de su implementación en la cuenca Cachi, y las últimas para modificación del cauce de arroyos y ríos, filtración.

### 3.3. Mapeo de la idoneidad, identificando y evaluando las diferentes metodologías de recarga de acuíferos en la cuenca Cachi, considerando factores físicos, hidrológicos, ecológicos y sociales, durante el año 2024

#### 3.3.1. Distribución de puntuaciones y pesos.

Tabla 3.13: Puntuaciones y umbrales.

Indicadores	Subindicadores	Criterio-Subyacente	Atributos	Puntuación					
				LI	P	D	C	F	
Necesidad de MAR	Disponibilidad hídrica futura		Caudal libre sin uso expresado en lámina de agua para la celda (mm/año)	0 para caudal máximo; 100 para caudal mínimo; interpolación lineal para valores dentro del intervalo					
			Regular	100	10	100	55		
	Calidad de agua		Bueno	100	100	100	100		
			Bajo	55	10	10	10		
			Tierras desnudas	100					
	CRA (Capacidad de recarga del acuífero subyacente)	Cobertura vegetal	Ríos y quebradas	95					
			Áreas agrícolas	90					
			Herbazal	85					
			Plantación forestal	80					
			Glaciar	75					
			Arbustal	70					
			Bosque denso bajo (bosque seco)	65					
			Lago, laguna	60					
	Bofedal	55							
	Bosque denso bajo (chachacomo)	50							

Indicadores	Subindicadores	Criterio-Subyacente	Atributos	Puntuación				
				LI	P	D	C	F
			Bosque denso bajo (queñua)	45				
			Bosque denso bajo (relictos)	40				
			Minería	Excluir				
			Uso urbano	Excluir				
			Franco arcilloso limoso	100				
		Textura suelo	Franco arcilloso	85				
			Limo	70				
			Marga	55				
			Pronunciada >50%	100				
			Alta 50%-20%	80				
		Pendiente	Media 20%-8%	60				
			Suave 8%-1%	40				
			Despreciable <1%	20				
			Acuitardo Intrusivo	100				
			Acuitardo volcánico	85				
			Sedimentario					
			Acuífero Fisurado	70				
			Volcánico					
		Hidrogeología	Acuífero Fisurado	55				
			Sedimentario					
			Acuífero Fisurado	40				
			kárstico					
			Acuífero poroso					
			No consolidado	25				
			Alta					
Disponibilidad de agua	Escorrentía acumulada		Profundidad de escorrentía acumulada		0 para profundidad mínima; 100 para profundidad máxima que admite un sistema MAR; interpolación lineal para valores dentro del intervalo			

Indicadores	Subindicadores	Criterio-Subyacente	Atributos	Puntuación					
				LI	P	D	C	F	
Recargabilidad intrínseca del acuífero	Coeficiente de varianza (escorrentía)	Criterio-Subyacente	Coeficiente de variación (CV) del escurrimiento acumulado	0 para un CV de 100 o más, 100 para CV de 0, interpolación lineal para valores dentro del intervalo					
			Transporte de sedimentos	0 para la erosión máxima; 100 para la erosión mínima; interpolación lineal para valores dentro del intervalo					
	Formación geológica (permeabilidad - m/día)		Alta $10 < k < 10^2$	100					
			Medja $1 < k < 10$	83					
			Baja a media $10^{-1} < k < 1$	67					
			Baja $10^{-2} < k < 10^{-1}$	50					
			Muy baja $10^{-4} < k < 10^{-2}$	33					
			Impermeable $10^{-8} < k < 10^{-4}$	17					
	Distancia a fallas		Criterio-Subyacente	Distancia	0 para distancia máxima, 100 para distancia mínima, interpolación lineal para valores dentro del intervalo				
				Muy rápida	100				
	Rápida			85					
	Geomorfología (Calificación a la infiltración)			Moderadamente rápida	70				
				Moderada	55				
				Moderadamente lenta	40				
Lenta		25							
Muy lenta		10							
Despreciable <1%		100							
Pendiente	Suave 8%-1%	80							
	Media 20%-8%	60							
	Alta 50%-20%	40							

Indicadores	Subindicadores	Criterio-Subyacente	Atributos	Puntuación				
				LI	P	D	C	F
Atractivo económico	Uso actual del suelo		Pronunciada >50%	20				
			Tierras desnudas	100				
			Herbazal	86				
			Arbustal	72				
			Bofedal	72				
			Bosque denso bajo (chachacomo)	58				
			Bosque denso bajo (queñua)	58				
			Bosque denso bajo (relictos)	58				
			Bosque denso bajo (Bosque seco)	44				
			Plantación forestal	30				
			Áreas agrícolas	16				
			Glaciar	Excluir				
			Lago, laguna	Excluir				
			Minería	Excluir				
			Ríos y quebradas	Excluir				
	Uso urbano	Excluir						
	Densidad poblacional			Muy baja	100			
				Baja	75			
				Regular	50			
				Alta	25			
Proximidad a la fuente			Distancia	0 para distancia máxima, 100 para distancia mínima, interpolación lineal para valores dentro del intervalo				

La Tabla 3.13. resume la distribución de las puntuaciones obtenidas utilizando las funciones lineales, donde una puntuación de 100 indica la idoneidad más alta y 0 la idoneidad más baja en relación con el área de estudio, además de otros subindicadores puntuados conforme a revisión

bibliográfica y criterios de investigaciones anteriores para las cinco metodologías evaluadas en el estudio: distribución (D), pozos (P), modificación del cauce de arroyos y ríos (C), filtración (F), captación de agua de lluvia (L1). Todos los sub indicadores y criterios fueron puntuados con el mismo puntaje para todas las metodologías MAR, excepto en el indicador de calidad de agua, en el cual los puntajes respondieron a los requerimientos de la calidad del agua para la implementación de las distintas metodologías MAR. También en la disponibilidad de agua se ajustó los puntajes, donde se acumularon los flujos en los ríos reconocidos por el ANA y se puntuaron con 100 para el máximo volumen que admite un sistema MAR ( $10^6 \text{ m}^3$ ) y 0 para el mínimo calculado, esta puntuación fue diferente para la metodología de captación de agua de lluvia, en la que se excluyeron los ríos y la puntuación se realizó para toda la cuenca donde la acumulación de flujo mayor igual a  $2 \times 10^5 \text{ m}^3$  (capacidad máxima de captación de agua de lluvia – proyectos del Fondo Sierra Azul) se puntuó con 100 y 0 para el mínimo calculado en la cuenca.

**Tabla 3.14:** Matriz de comparación por pares para evaluar la importancia relativa y los pesos.

Indicadores principales de MAR (Número de comparaciones = 4, CR = 0%)						
	Necesidad MAR	Disponibilidad de agua	Recargabilidad del acuífero	intrínseca	Atractivo económico	Peso (%)
Necesidad MAR	1	1	1		1	25
Disponibilidad de agua	1	1	1		1	25
Recargabilidad intrínseca del acuífero	1	1	1		1	25
Atractivo económico	1	1	1		1	25

Subindicadores de necesidad de MAR (Número de comparaciones = 3, CR = 0%)																				
	Disponibilidad hídrica futura					Calidad de agua					CRA (Capacidad de recarga del acuífero subyacente)					Peso (%)				
	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F
Disponibilidad hídrica futura	1	1	1	1	1	4.5	1	2	2	1	1	1	1	1	1	45	33	40	40	33
Calidad de agua	0.22	1	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	0.22	1	0.5	0.5	1	10	33	20	20	33
CRA (Capacidad de recarga del acuífero subyacente)	1	1	1	1	1	4.5	1	2	2	1	1	1	1	1	1	45	33	40	40	33

Subindicadores de disponibilidad de agua (Número de comparaciones = 3, CR = 0%)

	Escorrentía acumulada					Coeficiente de varianza					Transporte de sedimentos					Peso (%)				
	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F
<b>Escorrentía acumulada</b>	1	1	1	1	1	2.5	2	3	3	4	1.667	1	1.7	1.7	7	50	40	50	50	70
<b>Coeficiente de varianza</b>	0.4	0.5	0.4	0.4	0.29	1	1	1	1	1	0.667	0.5	0.7	0.7	2	20	20	20	20	20
<b>Transporte de sedimentos</b>	0.6	1	0.6	0.6	0.14	1.5	2	2	2	1	1	1	1	1	1	30	40	30	30	10

Subindicadores de recargabilidad intrínseca del acuífero (Número de comparaciones = 4, CR = 0%)

	Formación geológica					Distancia a fallas					Geomorfología					Pendiente					Peso (%)				
	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F
<b>Formación geológica</b>	1	1	1	1	1	3	2	2	3	4	1	1	1	0.8	1	1	3.5	0.71	1.5	4	30	35	25	30	40
<b>Distancia a fallas</b>	0.3	0.57	0.6	0.3	0.25	1	1	1	1	1	0.3	0.6	0.6	0.3	0.25	0.3	2	0.43	0.5	1	10	20	15	10	10
<b>Geomorfología</b>	1	1	1	1.3	1	3	2	2	4	4	1	1	1	1	1	1	3.5	0.71	2	4	30	35	25	40	40
<b>Pendiente</b>	1	0.29	1.4	0.7	0.25	3	1	2	2	1	1	0.3	1.4	0.5	0.25	1	1	1	1	1	30	10	35	20	10

Subindicadores de atractivo económico (Número de comparaciones = 3, CR = 0%)

	Uso actual del suelo					Densidad poblacional					Proximidad a la fuente					Peso (%)				
	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F
<b>Uso actual del suelo</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4.5	0.4	1	0.2	0.13	45	20	33	15	10
<b>Densidad poblacional</b>	1	1.5	1	1	1	1	1	1	1	1	4.5	0.6	1	0.2	0.13	45	30	33	15	10
<b>Proximidad a la fuente</b>	0.22	2.5	1	4.7	8	0.22	2	1	5	8	1	1	1	1	1	10	50	33	70	80

Criterio subyacente de MAR (Número de comparaciones = 4, CR = 0%)

	<b>Cobertura vegetal</b>	<b>Textura de suelo</b>	<b>Pendiente</b>	<b>Hidrogeología</b>	<b>Peso (%)</b>
<b>Cobertura vegetal</b>	1	1	1	1	25.0
<b>Textura de suelo</b>	1	1	1	1	25.0
<b>Pendiente</b>	1	1	1	1	25.0
<b>Hidrogeología</b>	1	1	1	1	25.0

El peso asignado a cada indicador se justifica en relevancia de las características de estos. Los cuatro índices analizados: Necesidad de MAR, Índice de disponibilidad de agua, Índice de recargabilidad intrínseca del acuífero y el Índice de atractivo económico, se les asignó un peso homogéneo para estos y así como para todas las metodologías, asumiéndose la misma importancia para todos ellos. La disponibilidad hídrica futura para un sistema MAR basado en la cada metodología se le asignó un peso a cada metodología conforme a la capacidad paliativa una vez implementada, en cambio la calidad del agua quedó puntuada en función a capacidad depuradora de cada sistema MAR a ciertos parámetros químicos presentes en el agua de origen para la recarga, y finalmente la capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA) se le asignó puntajes más altos para los sistemas dependientes a la relevancia de las características de la superficie para un sistema MAR. Los subindicadores que conforman la capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA), al ser una característica de la cuenca de su recarga natural de sus acuíferos, sus pesos fueron los mismos para los criterios de cobertura vegetal, textura de suelo, pendiente y la hidrogeología. El peso para la escorrentía acumulada al ser un indicador importante se le asignó el mayor posible para todas las metodologías; en contraposición al coeficiente de varianza (CV); el cual, al ser poco variable, quedo asignado con pesos menores. Al indicador de transporte de sedimentos se le asignó un mayor peso para las metodologías más propensas a la colmatación de sus componentes. Los indicadores de formación geológica y geomorfología se asignó un peso alto en comparación al de distancia a fallas, el cual solo tuvo pesos altos para la metodología de pozos y distribución; el indicador de pendiente se asignó pesos altos para las metodologías MAR en superficie. Los indicadores de uso actual de suelo y densidad poblacional se les asignó menor peso a las metodologías que no ocupan demasiada superficie o quedan restringidas a espacios sin uso, al contrario, el peso para el indicador de proximidad a fuentes de agua, donde se le asignó pesos altos a las metodologías donde el costo de su implementación es muy dependiente de esta o está limitada a cierta distancia a la fuente de agua.

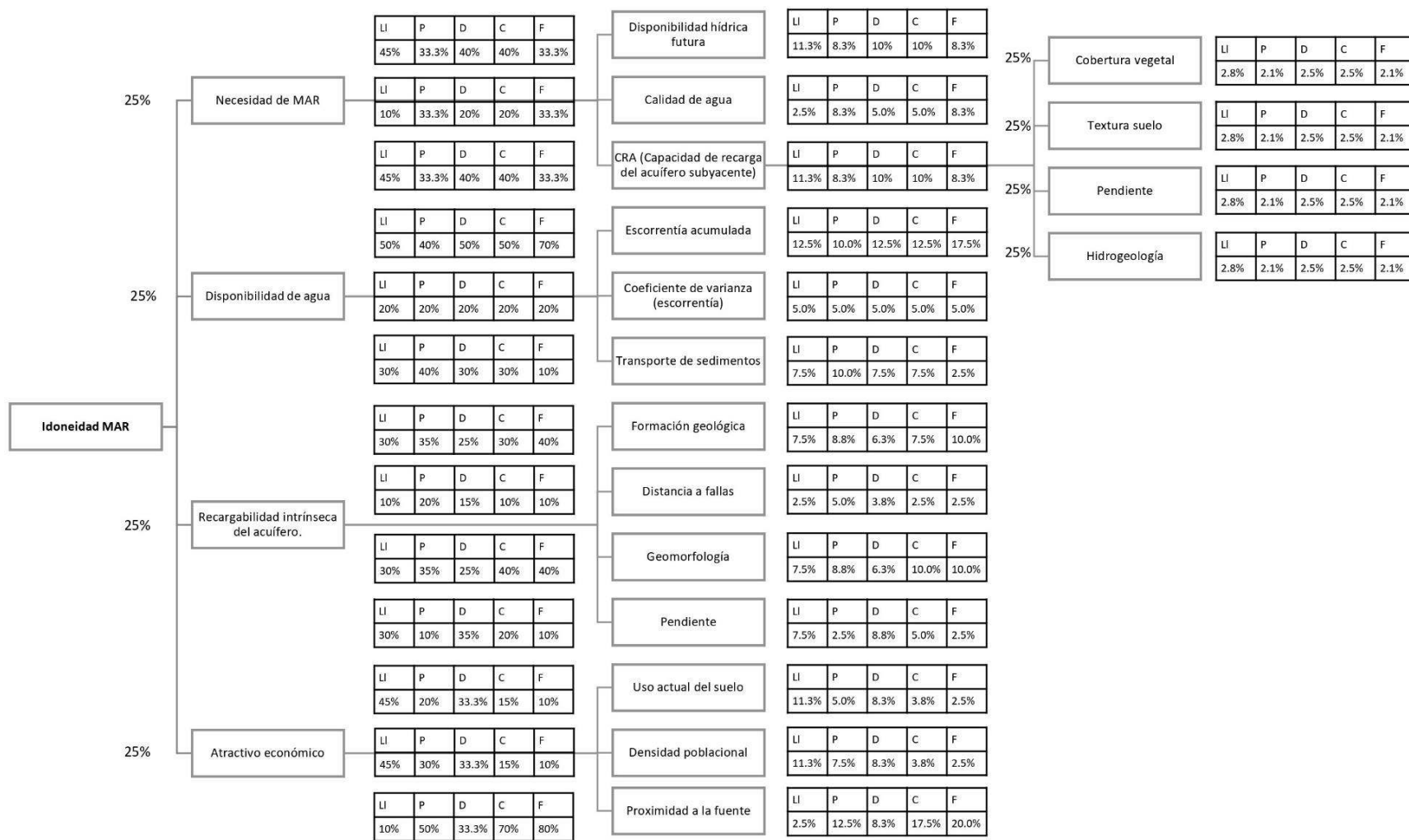
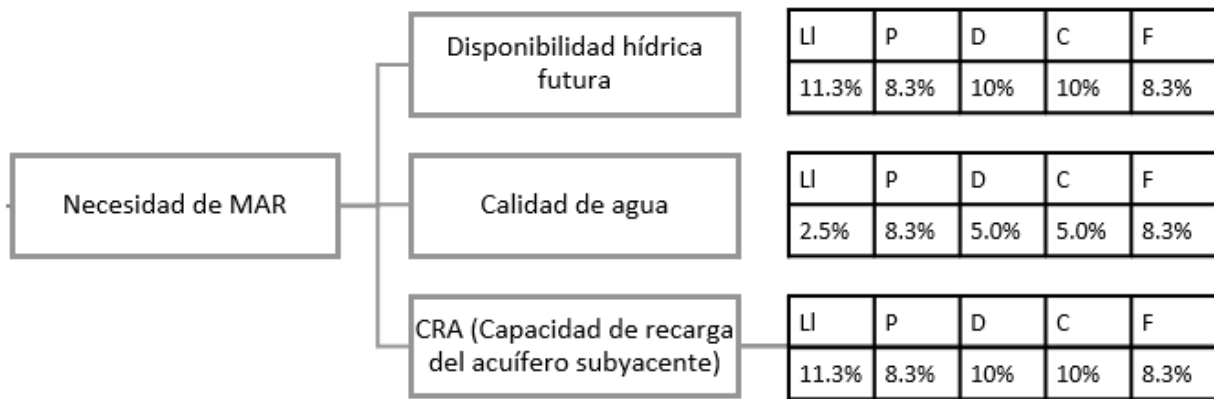


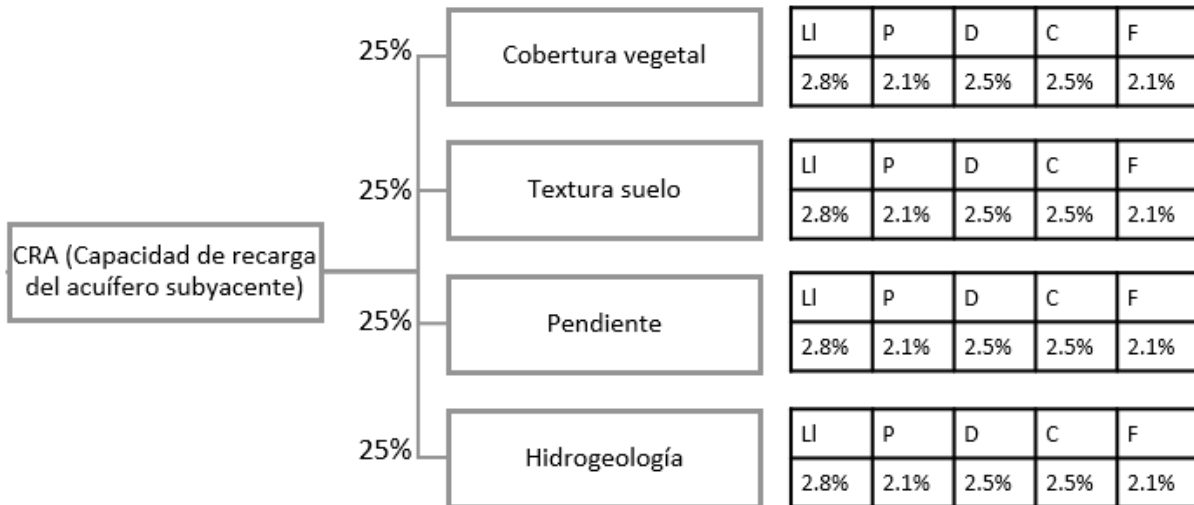
Figura 3.5: Distribuciones de peso general.

La comparación por pares de los subindicadores (Tabla 3.14) generó la distribución de peso final entre los indicadores (Fig. 3.5). Los pesos asignados para cada subindicador responden a las características y de la metodología MAR y el objetivo de la mismas, los cuales se desglosan entre la Figura 3.6 a la Figura 3.10.

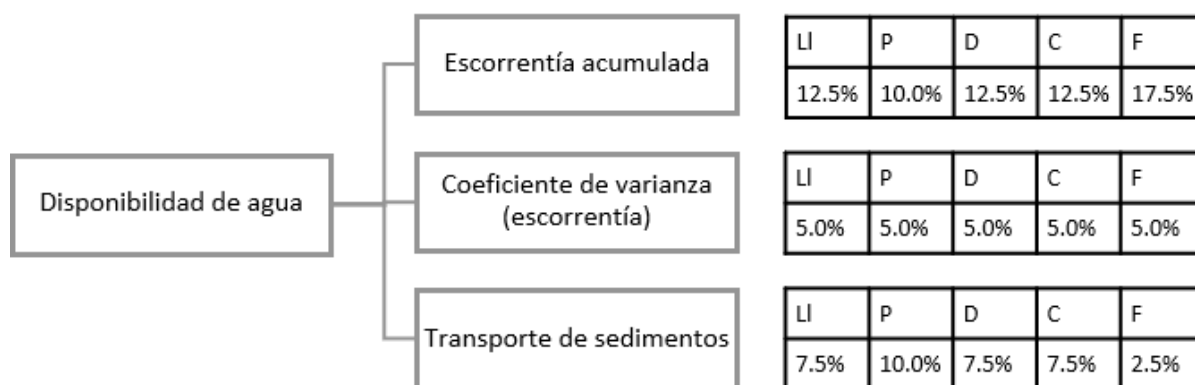
En adición a estudios de idoneidad MAR anteriores, la inclusión de la necesidad de la implementación de MAR como indicador principal en el mapeo de idoneidad prioriza áreas con estrés alto y mayor demanda del recurso hídrico.



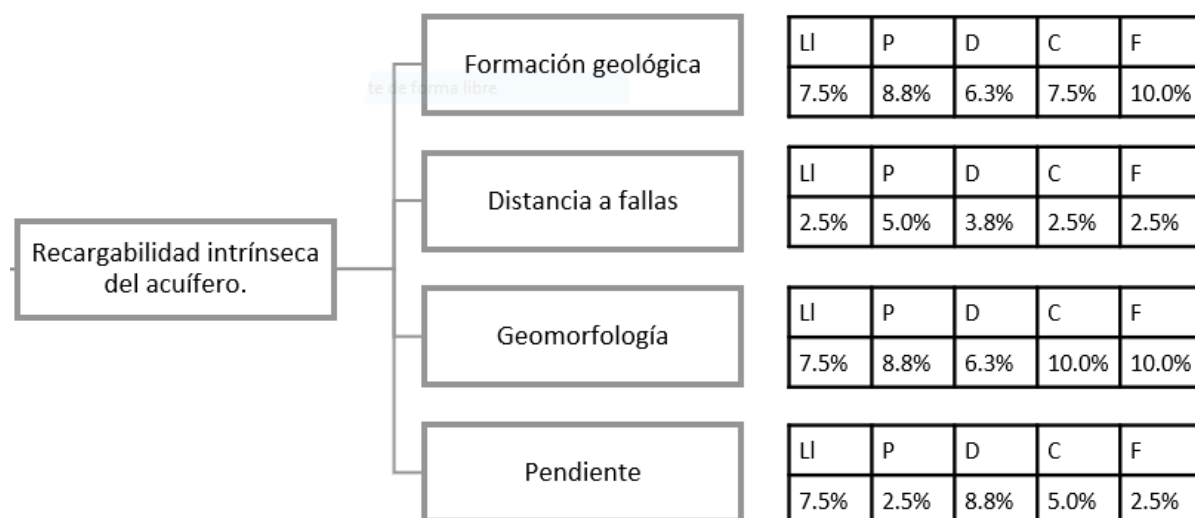
**Figura 3.6:** Distribuciones de peso del indicador de necesidad de MAR y sus criterios correspondientes.



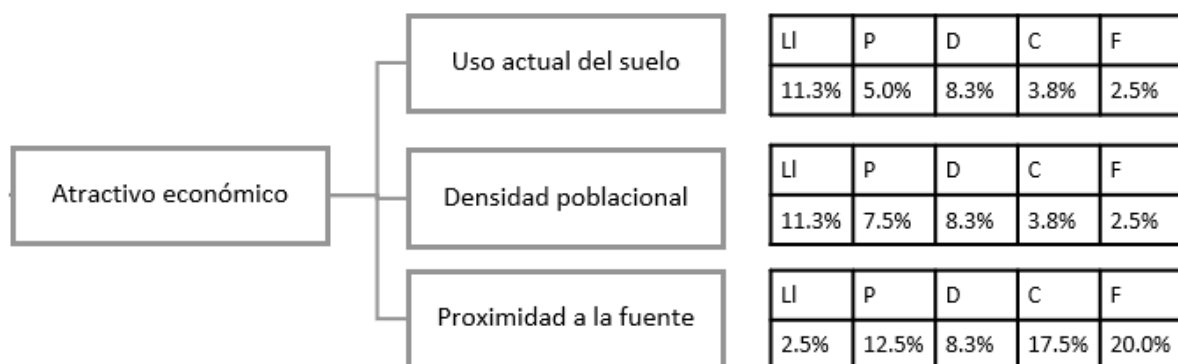
**Figura 3.7:** Distribuciones de peso del indicador de CRA y sus criterios correspondientes.



**Figura 3.8:** Distribuciones de peso del indicador de disponibilidad de agua y sus criterios correspondientes.



**Figura 3.9:** Distribuciones de peso del indicador de recargabilidad intrínseca del acuífero y sus criterios correspondientes.



**Figura 3.10:** Distribuciones de peso del indicador de Atractivo económico y sus criterios correspondientes.

### 3.3.2. Disponibilidad de agua

#### 3.3.2.1. Escorrentía acumulada (Modelamiento hidrológico)

El modelado hidrológico anual realizado para los modelos de Budyko, GR1A y Fu 1-parámetro utilizó como datos de entrada la evapotranspiración potencial anual generada por el sensor MODIS, con información alojada en MOD16 a una resolución de celda de 500x500 m, complementada por datos del producto PISCOpet con un factor de corrección para la evapotranspiración potencial. La precipitación media mensual y anual se obtuvo mediante interpolación Kriging de las 22 estaciones pluviométricas utilizadas (ver Tabla 2.2).

Para la calibración se usaron los caudales observados del río Chacco, Chicellarazo y Apacheta (Tabla 2.27); sin embargo, en la etapa de validación, el modelo de Budyko mostró una bondad de ajuste mala para todos los criterios de rendimiento.

- **Calibración y validación de los modelos:**

Los modelos GR1A y Fu 1-parámetro se calibraron independientemente para las tres cuencas con datos de aforo, excepto el modelo Budyko, el cual solo se ejecutó en función a sus variables correspondientes.

#### Modelo Budyko

**Tabla 3.15:** Resultados de aplicación del modelo Budyko.

Estación	Año	P mm/año	ETP mm/año	AI	Qsi mm/año	Qob mm/año
Chacco Área (Km <sup>2</sup> ) 1111.86	1995	739.19	1403.85	1.90	86.54	213.83
	1996	736.72	1419.48	1.93	83.94	143.13
	1997	825.83	1415.34	1.71	116.42	166.23
	1998	682.25	1381.86	2.03	70.58	138.05
	1999	748.84	1351.33	1.80	96.32	179.37
	2000	808.13	1417.22	1.75	109.41	234.90
	2001	797.70	1371.07	1.72	111.89	92.24
	2002	827.55	1390.51	1.68	120.73	216.94
<b>Promedio</b>		<b>770.78</b>	<b>1,393.83</b>	<b>1.82</b>	<b>99.48</b>	<b>173.09</b>
Apacheta Área (Km <sup>2</sup> ) 136.59	1994	712.85	1363.57	1.91	82.34	548.21
	1995	705.58	1337.90	1.90	82.85	514.55
	1996	741.88	1344.26	1.81	94.73	597.50
	1997	881.95	1357.46	1.54	148.89	348.04
	1998	714.21	1321.50	1.85	87.77	423.38
	1999	775.86	1289.02	1.66	115.39	272.50

	2000	786.74	1263.64	1.61	123.86	564.29
	2001	874.49	1457.37	1.67	129.38	626.19
	2002	1007.25	1450.45	1.44	188.83	291.69
	2003	836.02	1314.40	1.57	136.35	624.62
	2004	874.64	1380.78	1.58	141.69	471.78
	2005	752.55	1213.89	1.61	117.64	402.37
	2006	661.95	1397.17	2.11	63.08	404.68
	2007	847.23	1364.38	1.61	132.81	370.45
	2008	686.33	1220.71	1.78	90.62	450.79
	2009	1040.34	1248.55	1.20	253.40	501.40
	2010	848.83	1221.31	1.44	159.33	468.15
	2011	1051.01	1373.10	1.31	227.60	510.27
	2012	1007.40	1312.06	1.30	219.12	398.08
	2013	1047.66	1278.30	1.22	249.55	526.81
	2014	1124.30	1247.61	1.11	303.30	394.33
	2015	1127.15	1224.44	1.09	312.30	409.63
	2016	752.84	1210.42	1.61	118.33	323.95
	2017	1024.84	1332.58	1.30	223.44	395.15
<b>Promedio</b>		<b>870.16</b>	<b>1,313.54</b>	<b>1.55</b>	<b>158.44</b>	<b>451.62</b>
Chicllarazo Área (Km <sup>2</sup> ) 98.77	1991	943.45	1271.81	1.35	195.25	409.00
	1992	900.37	1274.61	1.42	173.24	150.46
	1993	1288.28	1360.15	1.06	369.68	736.63
	1994	894.03	1421.65	1.59	143.11	596.73
	1995	850.06	1404.08	1.65	127.69	440.09
	1996	902.69	1412.90	1.57	148.30	552.11
	1997	1043.77	1420.37	1.36	213.05	432.76
	1998	958.32	1384.37	1.44	178.78	734.53
	1999	1112.55	1350.04	1.21	266.99	728.59
	2000	1218.73	1300.35	1.07	345.25	679.57
	2001	877.00	1582.58	1.80	112.81	456.51
	2002	1053.18	1540.03	1.46	192.82	520.73
	2003	934.54	1419.40	1.52	161.17	918.35
<b>Promedio</b>		<b>998.23</b>	<b>1,395.57</b>	<b>1.42</b>	<b>202.17</b>	<b>565.85</b>

A continuación, la Tabla 3.16 muestra los indicadores de bondad de ajuste para el modelo Budyko.

**Tabla 3.16:** Resumen de indicadores de bondad de ajuste del modelo Budyko.

Estación	Etapa	Periodo	Indicador	Valor Calculado	Calificación de rendimiento
----------	-------	---------	-----------	-----------------	-----------------------------

Chacco	Validación	1995- 2005	NSE	-2.65	Insuficiente
			PBIAS	43%	Malo
			R	0.13	Malo
Apacheta	Validación	1994- 2017	NSE	-9.76	Insuficiente
			PBIAS	65%	Malo
			R	0.13	Malo
Chicllarazo	Validación	1991- 2003	NSE	-3.56	Insuficiente
			PBIAS	64%	Malo
			R	0.27	Malo

Ningún criterio de eficiencia para el modelo Budyko resultó suficiente para alguna de las cuencas.

### Modelo Fu

Se ejecutó el modelo para optimizar el parámetro  $\alpha$  (características físicas y clima de la cuenca) usando la opción Solver de Excel (maximizando el coeficiente de NSE).

**Tabla 3.17:** Resultados de aplicación del modelo Fu 1-parámetro.

ESTACION	Año	P mm/año	ETP mm/año	AI	Qsi mm/año	Qob mm/año
Chacco	1995	739.19	1403.85	1.90	156.93	213.83
Área (Km <sup>2</sup> )	1996	736.72	1419.48	1.93	154.13	143.13
1111.86	1997	825.83	1415.34	1.71	194.34	166.23
Parámetro $\alpha$ :	1998	682.25	1381.86	2.03	135.62	138.05
2.13627	1999	748.84	1351.33	1.80	167.39	179.37
	2000	808.13	1417.22	1.75	185.88	234.90
	2001	797.70	1371.07	1.72	187.19	92.24
	2002	827.55	1390.51	1.68	198.59	216.94
<b>Promedio</b>		<b>770.78</b>	<b>1,393.83</b>	<b>1.82</b>	<b>172.51</b>	<b>173.09</b>
Apacheta	1994	712.85	1363.57	1.91	384.35	548.21
Área (Km <sup>2</sup> )	1995	705.58	1337.90	1.90	409.84	514.55
136.59	1996	741.88	1344.26	1.81	414.42	597.50
Parámetro $\alpha$ :	1997	881.95	1357.46	1.54	440.63	348.04
1.37978	1998	714.21	1321.50	1.85	406.03	423.38
	1999	775.86	1289.02	1.66	406.17	272.50
	2000	786.74	1263.64	1.61	402.96	564.29
	2001	874.49	1457.37	1.67	458.76	626.19
	2002	1007.25	1450.45	1.44	486.92	291.69
	2003	836.02	1314.40	1.57	422.74	624.62
	2004	874.64	1380.78	1.58	443.33	471.78

	2005	752.55	1213.89	1.61	386.47	402.37
	2006	661.95	1397.17	2.11	427.35	404.68
	2007	847.23	1364.38	1.61	434.65	370.45
	2008	686.33	1220.71	1.78	377.69	450.79
	2009	1040.34	1248.55	1.20	475.25	501.40
	2010	848.83	1221.31	1.44	410.19	468.15
	2011	1051.01	1373.10	1.31	490.12	510.27
	2012	1007.40	1312.06	1.30	469.36	398.08
	2013	1047.66	1278.30	1.22	480.17	526.81
	2014	1124.30	1247.61	1.11	507.90	394.33
	2015	1127.15	1224.44	1.09	508.23	409.63
	2016	752.84	1210.42	1.61	385.84	323.95
	2017	1024.84	1332.58	1.30	477.25	395.15
<b>Promedio</b>		<b>870.16</b>	<b>1,313.54</b>	<b>1.55</b>	<b>437.78</b>	<b>451.62</b>
Chicllarazo	1991	943.45	1271.81	1.35	538.33	409.00
Área (Km <sup>2</sup> )	1992	900.37	1274.61	1.42	505.50	150.46
98.77	1993	1288.28	1360.15	1.06	794.23	736.63
Parámetro $\alpha$ :	1994	894.03	1421.65	1.59	482.56	596.73
1.42468	1995	850.06	1404.08	1.65	452.84	440.09
	1996	902.69	1412.90	1.57	489.88	552.11
	1997	1043.77	1420.37	1.36	593.73	432.76
	1998	958.32	1384.37	1.44	534.40	734.53
	1999	1112.55	1350.04	1.21	656.81	728.59
	2000	1218.73	1300.35	1.07	748.95	679.57
	2001	877.00	1582.58	1.80	452.91	456.51
	2002	1053.18	1540.03	1.46	584.91	520.73
	2003	934.54	1419.40	1.52	512.40	918.35
<b>Promedio</b>		<b>998.23</b>	<b>1,395.57</b>	<b>1.42</b>	<b>565.19</b>	<b>565.85</b>

A continuación, la Tabla 3.18 contiene los indicadores de bondad de ajuste en la etapa de calibración para el modelo Fu 1-parámetro.

**Tabla 3.18:** Resumen de indicadores de bondad de ajuste del modelo Fu 1-parámetro.

Estación	Etapa	Periodo	Indicador	Valor Calculado	Calificación de rendimiento
Chacco	Validación	1995-2005	NSE	0.01	Insuficiente
			PBIAS	0%	Excelente
			R	0.27	Malo

Apacheta	Validación	1994-2017	NSE	-0.26	Insuficiente
			PBIAS	3%	Excelente
			R	0.03	Malo
Chicllarazo	Validación	1991-2003	NSE	0.13	Insuficiente
			PBIAS	0%	Excelente
			R	0.44	Malo

El criterio de eficiencia PBIAS analizados del modelo Fu 1-parámetro para todas las cuencas fue excelente.

## Modelo GR1A

### Calibración del modelo GR1A

Se ejecutó el modelo para optimizar el parámetro X (coeficiente de corrección de ETP) usando la opción Solver de Excel (maximizando el coeficiente de NSE), mostrado en la Tabla 3.19. La cantidad de datos usados en la calibración comprendió los 2/3 de la totalidad.

**Tabla 3.19:** Resultados de aplicación del modelo GR1A -Fase de calibración.

<b>Nom du bassin</b>	Chacco
<b>Superficie du bassin (km<sup>2</sup>)</b>	1111.86
<b>Paramètres modèle</b>	<b>Transf.</b> <b>Réels</b>
x: Coefficient de correction de l'ETP (mm)	-0.35 0.70
<b>Valeur initiale de la pluie</b>	
PK-1	1500.00
<b>Période</b>	
Durée de la période test (années)	5
Date de départ	1996
Date de fin	2000
Moyenne des pluies observées (mm/an)	760.4
Moyenne des ETP observées (mm/an)	1397.0
Moyenne des débits observés (mm/an)	172.3
Moyenne des racines des débits observés	13.1
Moyenne des log des débits observés	5.2
<b>Critères d'efficacité (%)</b>	
Nash(Q)	25.6
Nash(VQ)	30.1
Nash(ln(Q))	34.4

Bilan	91.7
-------	------

<b>Nom du bassin</b>	Apacheta
----------------------	----------

<b>Superficie du bassin (km<sup>2</sup>)</b>	136.59
--	--------

<b>Paramètres modèle</b>	<b>Transf.</b>	<b>Réels</b>
x: Coefficient de correction de l'ETP (mm)	-1.40	0.25

<b>Valeur initiale de la pluie</b>	
Pk-1	1000.00

<b>Période</b>	
Durée de la période test (années)	11
Date de départ	1995
Date de fin	0

Moyenne des pluies observées (mm/an)	783.0
Moyenne des ETP observées (mm/an)	1338.7
Moyenne des débits observés (mm/an)	478.1
Moyenne des racines des débits observés	21.7
Moyenne des log des débits observés	6.2

<b>Critères d'efficacité (%)</b>	
Nash(Q)	-26.4
Nash(VQ)	-26.1
Nash(ln(Q))	-25.9
Bilan	99.6

<b>Nom du bassin</b>	Chicllarazo
----------------------	-------------

<b>Superficie du bassin (km<sup>2</sup>)</b>	98.77
--	-------

<b>Paramètres modèle</b>	<b>Transf.</b>	<b>Réels</b>
x: Coefficient de correction de l'ETP (mm)	-0.97	0.38

<b>Valeur initiale de la pluie</b>	
Pk-1	100.00

<b>Période</b>	
Durée de la période test (années)	7
Date de départ	1992
Date de fin	1998

Moyenne des pluies observées (mm/an)	976.8
Moyenne des ETP observées (mm/an)	1382.6
Moyenne des débits observés (mm/an)	520.5
Moyenne des racines des débits observés	22.3

Moyenne des log des débits observés	6.2
-------------------------------------	-----

Critères d'efficacité (%)	
Nash(Q)	18.4
Nash(VQ)	13.6
Nash(ln(Q))	8.0
Bilan	99.7

El criterio de eficiencia NSE del modelo GR1A para las cuencas de Apacheta y Chicllarazo fue insuficiente, excepto para la cuenca de Chaccho donde resultó satisfactorio.

### Validación del modelo GR1A

El periodo de validación cubrió el 1/3 de la totalidad de datos, esta etapa se exceptuó para la cuenca de Apacheta con una eficiencia de NSE muy baja, la Tabla 3.20 muestra los resultados de validación para las cuencas de Chacco y Chicllarazo.

**Tabla 3.20:** Resultados de aplicación del modelo GR1A -Fase de validación.

<b>Nom du bassin</b>	Chacco	
<b>Superficie du bassin (km<sup>2</sup>)</b>	1111.86	
<b>Paramètres modèle</b>	<b>Transf.</b>	<b>Réels</b>
x: Coefficient de correction de l'ETP (mm)	-0.34	0.71
<b>Valeur initiale de la pluie</b>		
PK-1	1500.00	
<b>Période</b>		
Durée de la période test (années)	3	
Date de départ	2000	
Date de fin	2002	
Moyenne des pluies observées (mm/an)	811.1	
Moyenne des ETP observées (mm/an)	1392.9	
Moyenne des débits observés (mm/an)	181.4	
Moyenne des racines des débits observés	13.2	
Moyenne des log des débits observés	5.2	
<b>Critères d'efficacité (%)</b>		
Nash(Q)	-4.2	
Nash(VQ)	-4.3	
Nash(ln(Q))	-6.0	
Bilan	99.9	

<b>Nom du bassin</b>	Chicllarazo	
<b>Superficie du bassin (km<sup>2</sup>)</b>	98.77	
<b>Paramètres modèle</b>	<b>Transf.</b>	<b>Réels</b>
x: Coefficient de correction de l'ETP (mm)	-0.97	0.38
<b>Valeur initiale de la pluie</b>		
Pk-1	2000.00	
<b>Période</b>		
Durée de la période test (années)	4	
Date de départ	1999	
Date de fin	2002	
Moyenne des pluies observées (mm/an)	1065.4	
Moyenne des ETP observées (mm/an)	1443.2	
Moyenne des débits observés (mm/an)	596.3	
Moyenne des racines des débits observés	24.3	
Moyenne des log des débits observés	6.4	
<b>Critères d'efficacité (%)</b>		
Nash(Q)	68.1	
Nash(VQ)	71.7	
Nash(ln(Q))	74.4	
Bilan	97.7	

El coeficiente de criterio de eficiencia NSE, para la cuenca de Chacco resultó insuficiente, en cambio para la cuenca de Chicllarazo fue muy bueno.

- **Regionalización de los modelos - Regresión secuencial:**

La regionalización se realizó para los modelos de Fu 1-parámetro y GR1A, los cuales presentaron criterios de rendimiento porcentaje de BIAS y NSE respectivamente como aceptables. Por el contrario, se descartó el modelo de Budyko por no presentar un adecuado ajuste.

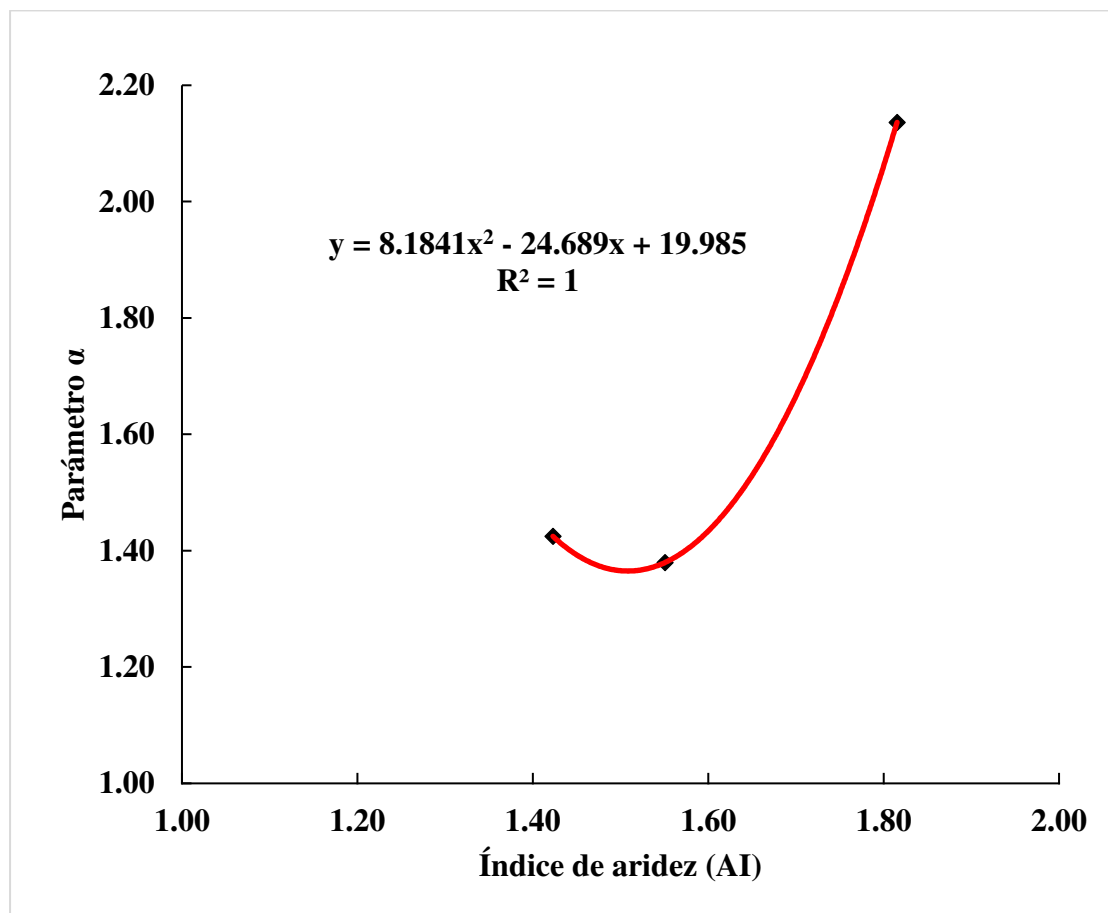
### Modelo Fu

Se realizó una regionalización en relación al índice de aridez (AI) y el parámetro  $\alpha$ , con un ajuste a una regresión polinómica de segundo grado.

**Tabla 3.21:** Índice de aridez y parámetro  $\alpha$  para las cuencas en regionalización.

	<b>AI</b>	<b><math>\alpha</math> de Fu</b>
<b>Chacco</b>	1.82	2.13626575

Apacheta	1.55	1.37977502
Chicllarazo	1.42	1.42468173



**Figura 3.11:** Tendencia del índice de aridez y el parámetro  $\alpha$  de Fu para las cuencas Chacco, Apacheta y Chicllarazo.

Graficado la tendencia del índice de aridez el parámetro  $\alpha$ , se describe un ajuste para el polinomio  $\alpha = 8.1841(AI)^2 - 24.689(AI) + 19.985$  con una correlación de  $R^2 = 1$ , lo cual significa que el parámetro  $\alpha$  está siendo explicado en 100 % para las tres cuencas en estudio. Aplicando la correlación en la cuenca Cachi para un índice de aridez (AI) de 1.8 el parámetro  $\alpha = 2.06498$ .

**Tabla 3.22:** Resultados de los caudales simulados del modelo Fu 1-parámetro para la cuenca Cachi.

ESTACION	Año	P	ETP	AI	Qsi
		mm/año	mm/año		mm/año
Cachi	2000	902.16	1431.10	1.59	244.88
Área (Km <sup>2</sup> )	2001	828.59	1429.50	1.73	208.28
3621.424858	2002	867.27	1429.08	1.65	227.41

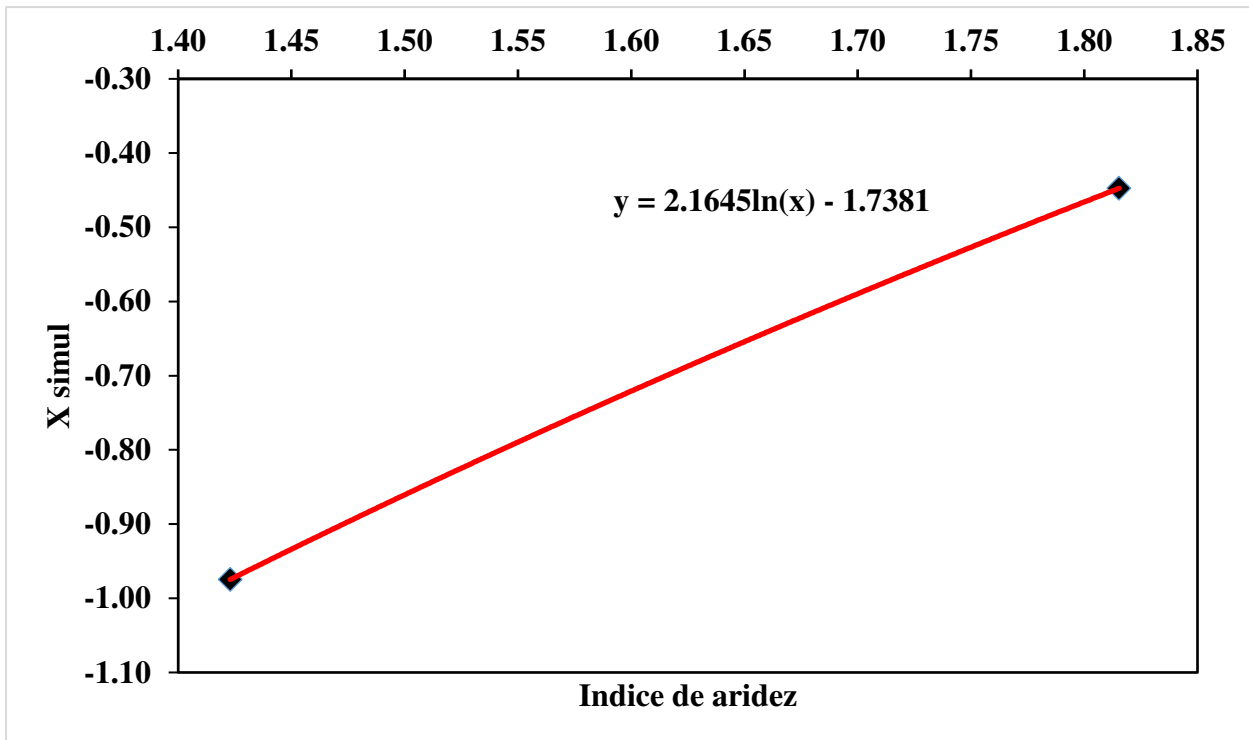
Parámetro $\alpha$ :	2003	792.64	1429.72	1.80	191.16
2.06498	2004	733.27	1429.76	1.95	164.30
	2005	700.28	1434.79	2.05	149.65
	2006	799.29	1430.38	1.79	194.19
	2007	706.83	1428.91	2.02	153.00
	2008	683.63	1434.32	2.10	142.79
	2009	793.46	1432.47	1.81	191.19
	2010	742.69	1433.88	1.93	167.99
	2011	978.29	1429.46	1.46	285.78
	2012	900.40	1430.25	1.59	244.11
	2013	845.20	1429.90	1.69	216.33
	2014	906.38	1432.30	1.58	246.88
	2015	932.15	1431.56	1.54	260.51
	2016	581.19	1440.72	2.48	103.10
	2017	862.49	1429.96	1.66	224.88
	2018	851.83	1430.47	1.68	219.51
	2019	804.92	1429.10	1.78	197.01
	2020	763.29	1435.01	1.88	177.05
	2021	824.68	1430.48	1.73	206.26
	2022	739.81	1440.48	1.95	165.99
<b>Promedio</b>		<b>806.12</b>	<b>1431.90</b>	<b>1.80</b>	<b>199.23</b>

### Modelo GR1A

Se realizó una regionalización en relación al índice de aridez (AI) y el parámetro X (corrección de la PET), excluyendo la cuenca de Apacheta debido al ajuste insuficiente al modelo. Se realizó un ajuste a una regresión logarítmica, se elige esta línea de tendencia en relación a que el modelo transforma el parámetro X de manera exponencial.

**Tabla 3.23:** Índice de aridez y parámetro X para las cuencas en regionalización.

	<b>AI</b>	<b>X: Coefficient de correction del PET (mm)</b>
<b>Chacco</b>	1.82	-0.45
<b>Chicllarazo</b>	1.42	-0.97



**Figura 3.12:** Tendencia del índice de aridez (AI) y el parámetro simulado (Xsimul) para las cuencas Chacco y Chicellarazo.

Graficando la tendencia del índice de aridez y el parámetro X se describe mediante la ecuación  $X = 2.1645\ln(AI) - 1.7381$  con una correlación de  $R^2 = 1$ . Aplicando la correlación en la cuenca Cachi para un índice de aridez (AI) de 1.8 el parámetro  $X = -0.44754$ . Se realizó una correlación para los modelos Fu 1-parametro y GR1A.

**Tabla 3.24:** Resultados de la aplicación del modelo GR1A comparados con caudales simulados de modelo Fu 1-parámetro para la cuenca Cachi.

<b>Nom du bassin</b>	Cachi		
<b>Superficie du bassin (km<sup>2</sup>)</b>	3621.424858		
<b>Paramètres modèle</b>	<b>Transf.</b>	<b>Réels</b>	
x: Coefficient de correction de l'ETP (mm)	-0.45	0.64	
<b>Valeur initiale de la pluie</b>			
PK-1	800.00		
<b>Période</b>			
Durée de la période test (années)	22		
Date de départ	2001		
Date de fin	2022		

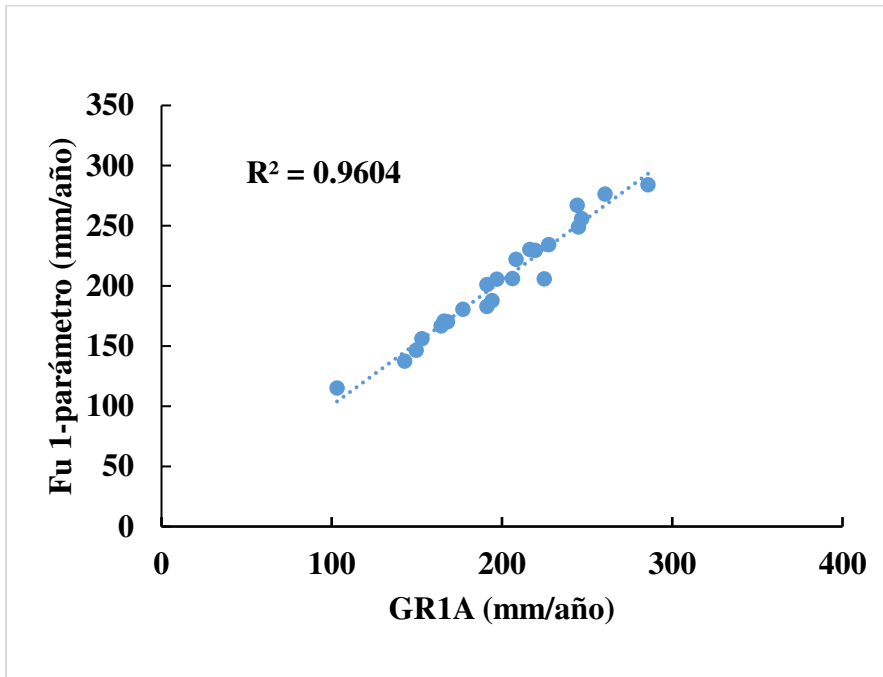
Moyenne des pluies observées (mm/an)	801.8
Moyenne des ETP observées (mm/an)	1431.9
Moyenne des débits observés (mm/an)	197.2
Moyenne des racines des débits observés	14.0
Moyenne des log des débits observés	5.3

Critères d'efficacité (%)	
Nash(Q)	94.1
Nash(VQ)	94.7
Nash(ln(Q))	95.1
Bilan	102.2

**Tabla 3.25:** Caudales regionalizados y simulados para la cuenca Cachi con los modelos de Fu 1-parámetro y GR1A.

ESTACION	Año	P mm/año	ETP mm/año	AI	Q <sub>Fu</sub> mm/año	Q <sub>GR1A</sub> mm/año	Q <sub>medio</sub> mm/año
Cachi	2000	902.16	1431.10	1.59	244.88	248.98	246.93
Área (Km <sup>2</sup> ) 3621.424858	2001	828.59	1429.50	1.73	208.28	222.13	215.20
	2002	867.27	1429.08	1.65	227.41	234.32	230.86
	2003	792.64	1429.72	1.80	191.16	201.08	196.12
	2004	733.27	1429.76	1.95	164.30	166.77	165.53
	2005	700.28	1434.79	2.05	149.65	146.60	148.12
	2006	799.29	1430.38	1.79	194.19	187.79	190.99
	2007	706.83	1428.91	2.02	153.00	156.03	154.52
	2008	683.63	1434.32	2.10	142.79	137.58	140.18
	2009	793.46	1432.47	1.81	191.19	183.08	187.14
	2010	742.69	1433.88	1.93	167.99	170.34	169.16
	2011	978.29	1429.46	1.46	285.78	284.22	285.00
	2012	900.40	1430.25	1.59	244.11	267.04	255.57
	2013	845.20	1429.90	1.69	216.33	230.24	223.28
	2014	906.38	1432.30	1.58	246.88	255.78	251.33
	2015	932.15	1431.56	1.54	260.51	276.39	268.45
	2016	581.19	1440.72	2.48	103.10	115.22	109.16
	2017	862.49	1429.96	1.66	224.88	205.74	215.31
	2018	851.83	1430.47	1.68	219.51	229.65	224.58
	2019	804.92	1429.10	1.78	197.01	205.61	201.31
	2020	763.29	1435.01	1.88	177.05	180.49	178.77
	2021	824.68	1430.48	1.73	206.26	206.13	206.19
	2022	739.81	1440.48	1.95	165.99	170.85	168.42
	<b>Promedio</b>		<b>806.12</b>	<b>1431.90</b>	<b>1.80</b>	<b>199.23</b>	<b>203.57</b>

Para el caso del estudio se calculó y usó la media entre ambos modelos para distribuirlos en la cuenca y generar la escorrentía mediante la herramienta acumulación de flujo de ArcGIS.



**Figura 3.13:** Correlación de caudales simulados entre el modelo Fu 1-parámetro con respecto al modelo GR1A.

La Figura 3.13 muestra la correlación que existe entre los caudales simulados por el modelo Fu 1-parámetro con respecto al modelo GR1A, donde se observa que los caudales de GR1A están sobreestimados con respecto a los caudales de Fu 1-parámetro, logrando explicarlos en un 96.04 %.

### 3.3.3. Análisis de idoneidad del sitio MAR.

El índice general de idoneidad para cinco tecnologías analizadas y mapeadas para la cuenca se generó ejecutando una superposición ponderada de los cuatro mapas ráster generados para cada uno de los índices (necesidad MAR, disponibilidad hídrica, recargabilidad intrínseca del acuífero y atractivo económico), utilizando las ponderaciones determinadas por AHP (Tabla 3.13 y Tabla 3.14). Luego, la idoneidad final se dividió en cinco categorías de idoneidad MAR que incluían: muy bajo ( $I < 20$ ), bajo ( $20 < I < 40$ ), regular ( $40 < I < 60$ ), alto ( $60 < I < 80$ ), y muy alto ( $80 < I < 100$ ).

### **3.3.3.1. Análisis de Necesidad de MAR.**

- **CRA (Capacidad de recarga del acuífero subyacente):**

La capacidad de recarga del acuífero subyacente (Figura 3.14) se puntuó en relación a la necesidad de una intervención por parte de una MAR, para mejorar la recarga en zonas que naturalmente tienen un bajo potencial de recarga. Así las zonas con mayor puntuación se relacionan a mayor necesidad MAR y menor capacidad de recarga del acuífero subyacente. En esta capa se asignó el mismo peso de ponderación para las cinco tecnologías MAR.

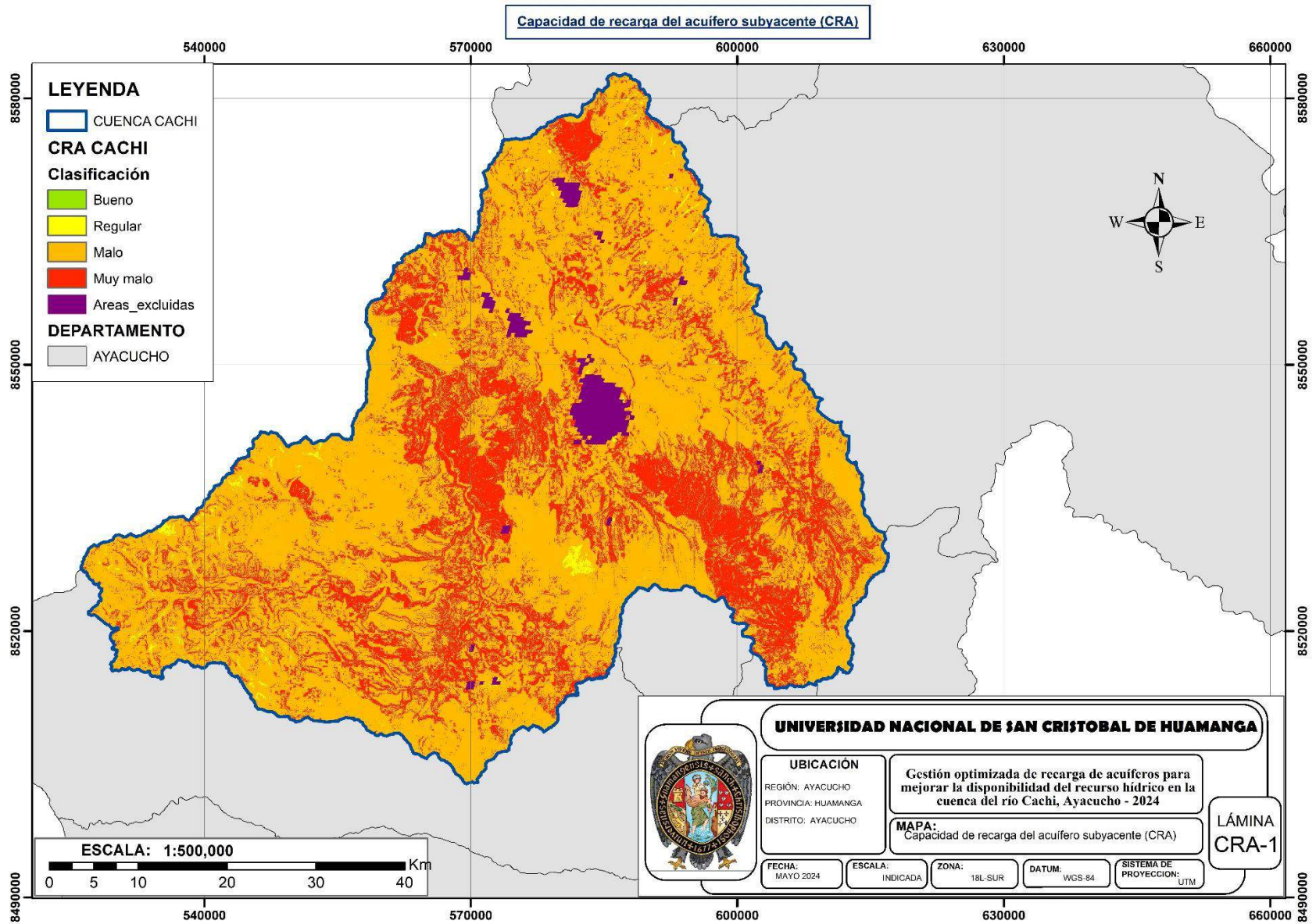


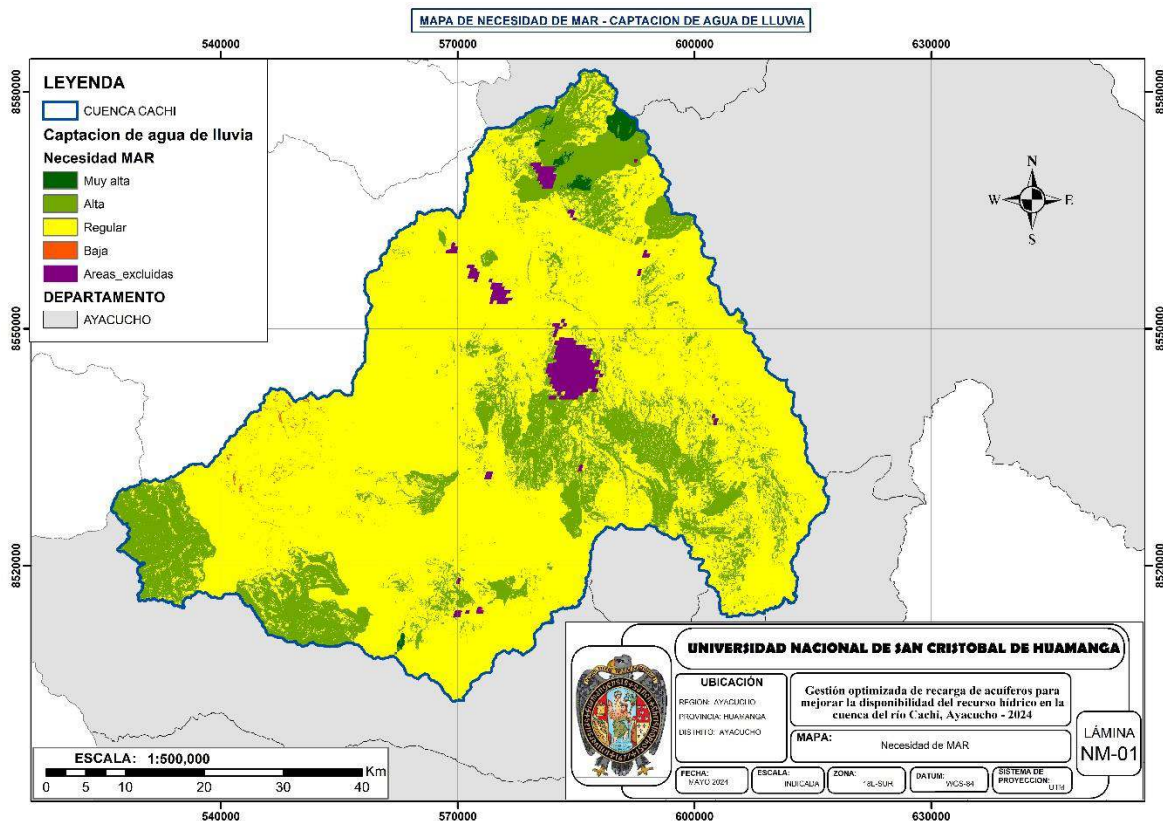
Figura 3.14: Capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA) en la cuenca Cachi.

**Tabla 3.26:** Clasificación de la capacidad de recarga del acuífero subyacente en la cuenca Cachi.

Capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA)	Necesidad MAR	Puntaje	Área (Km <sup>2</sup> )	Porcentaje
Bueno	Bajo	40-20	0.01	0.00%
Regular	Regular	60-40	24.51	0.68%
Malo	Necesario	80-60	2562.08	70.75%
Muy malo	Muy necesario	100-80	968.74	26.75%
Excluidas (Urbano y minería)	-	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>			<b>3621.42</b>	<b>100%</b>

No se encontró (Tabla 3.26) zonas de muy buena capacidad de recarga del acuífero subyacente, y las zonas de calificación buena son despreciables, solo menos del 1% de la cuenca tiene una calificación regular y resto de la cuenca es mala y muy mala en relación a la capacidad de recarga del acuífero subyacente.

- **Necesidad de MAR en general:**



**Figura 3.15:** Necesidad MAR - Captación de agua de lluvia.

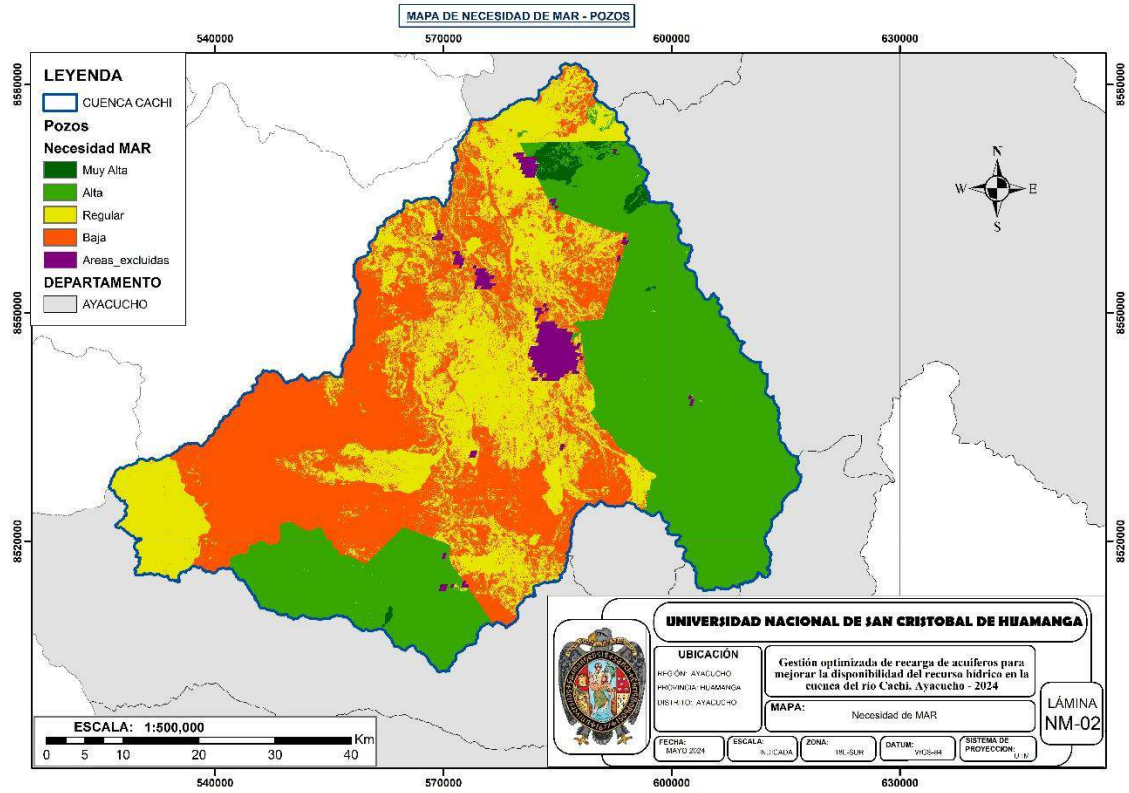


Figura 3.16: Necesidad MAR - Pozos.

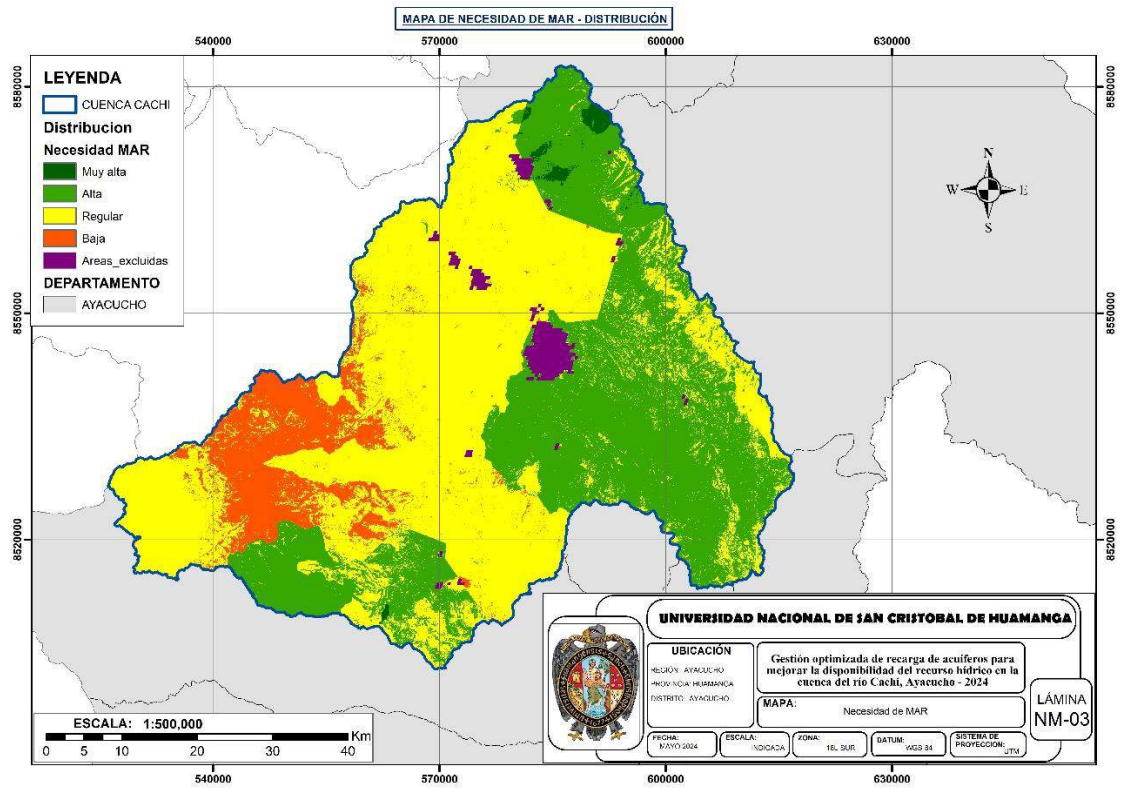


Figura 3.17: Necesidad MAR - Distribución.

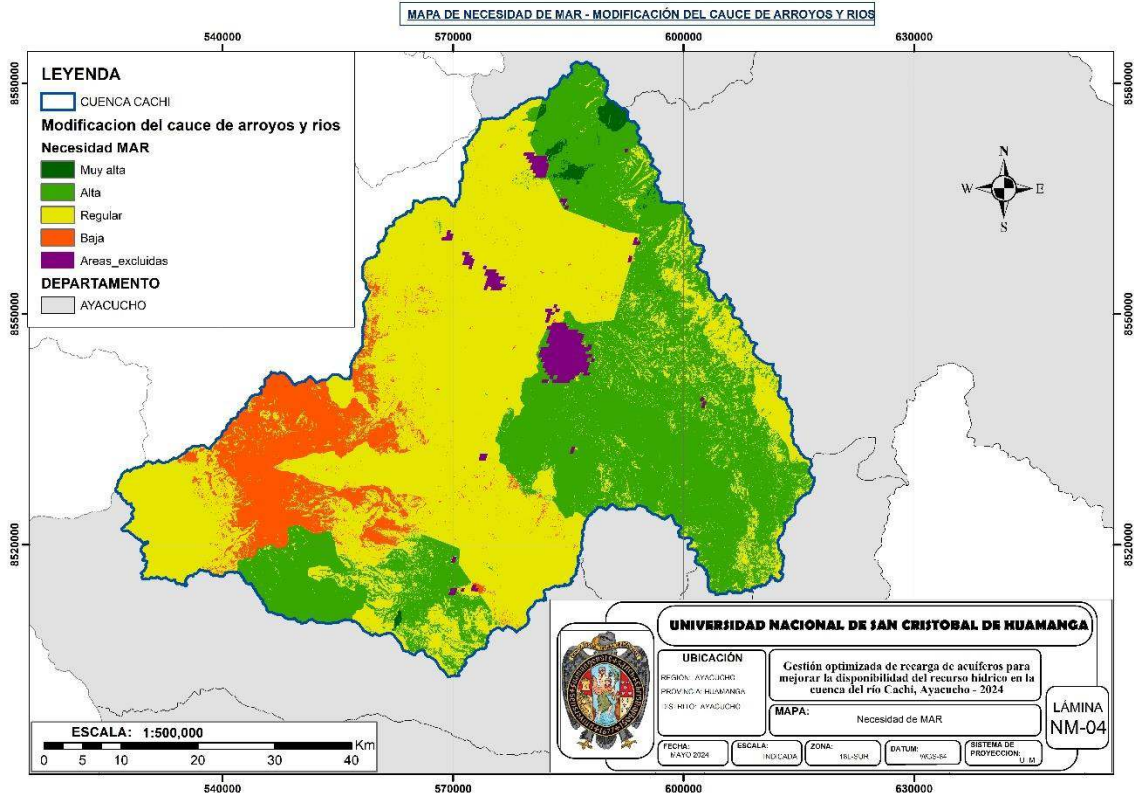


Figura 3.18: Necesidad MAR – Modificación del cauce de arroyos y ríos.

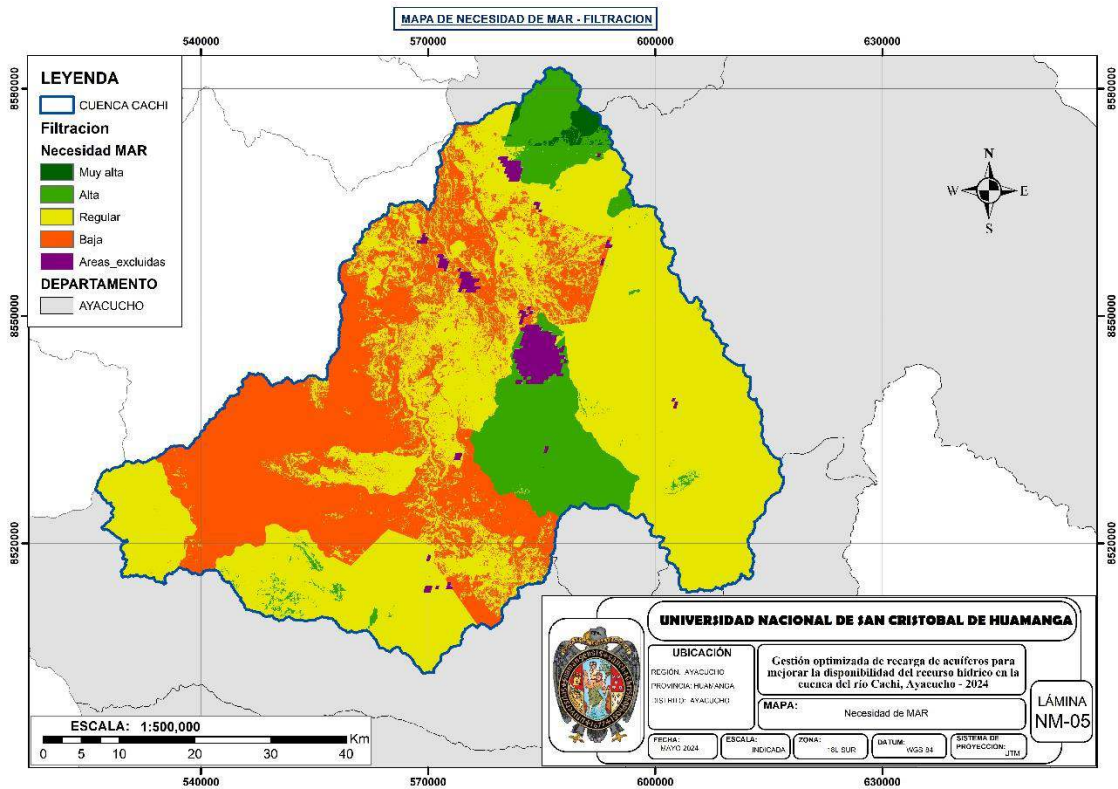


Figura 3.19: Necesidad MAR - Filtración.

En la Tabla 3.27 se muestra la clasificación de la Necesidad MAR para las cinco tecnologías MAR.

**Tabla 3.27:** Clasificación de la Necesidad MAR para las cinco tecnologías.

<b>Necesidad MAR</b>	<b>Puntaje</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Captación de agua de lluvia</b>			
Muy bajo	0-20	0.00	0.00%
Bajo	40-20	5.42	0.15%
Regular	60-40	2746.61	75.84%
Alta	80-60	784.52	21.66%
Muy alta	100-80	18.97	0.52%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Pozos</b>			
Muy bajo	0-20	0.00	0.00%
Bajo	40-20	1257.19	34.72%
Regular	60-40	1008.21	27.84%
Alta	80-60	1255.88	34.68%
Muy alta	100-80	34.22	0.94%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Distribución</b>			
Muy bajo	0-20	0.00	0.00%
Bajo	40-20	347.24	9.59%
Regular	60-40	1853.17	51.17%
Alta	80-60	1331.10	36.76%
Muy alta	100-80	23.97	0.66%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Modificación del cauce de arroyos y ríos</b>			
Muy bajo	0-20	0.00	0.00%
Bajo	40-20	347.24	9.59%
Regular	60-40	1853.17	51.17%
Alta	80-60	1331.10	36.76%
Muy alta	100-80	23.97	0.66%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Filtración</b>			
Muy bajo	0-20	0.00	0.00%
Bajo	40-20	1122.31	30.99%
Regular	60-40	2005.82	55.39%
Alta	80-60	406.71	11.23%
Muy alta	100-80	20.69	0.57%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>

La necesidad de MAR para las distintas tecnologías (Figura 3.15 a la Figura 3.19) varía entre regular y alta por encima del 50% para las cinco tecnologías, siendo la tecnología de pozos, la de menor necesidad MAR y el mayor la tecnología de captación de agua de lluvia con porcentajes para regular y buena de 62.52 % y 97.51 % respectivamente para cada tecnología.

### 3.3.3.2. Idoneidad MAR al análisis de Disponibilidad de agua.

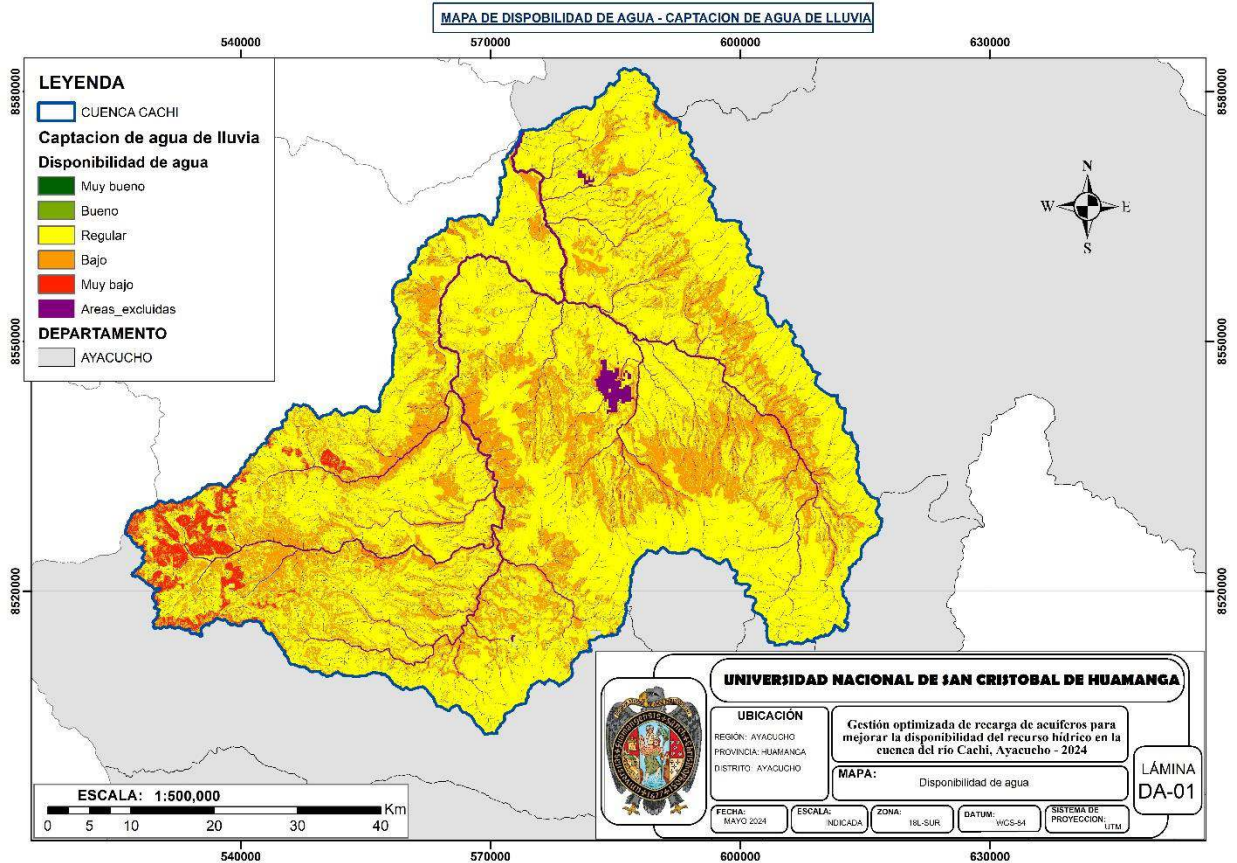


Figura 3.20: Disponibilidad de agua - Captación de agua de lluvia.

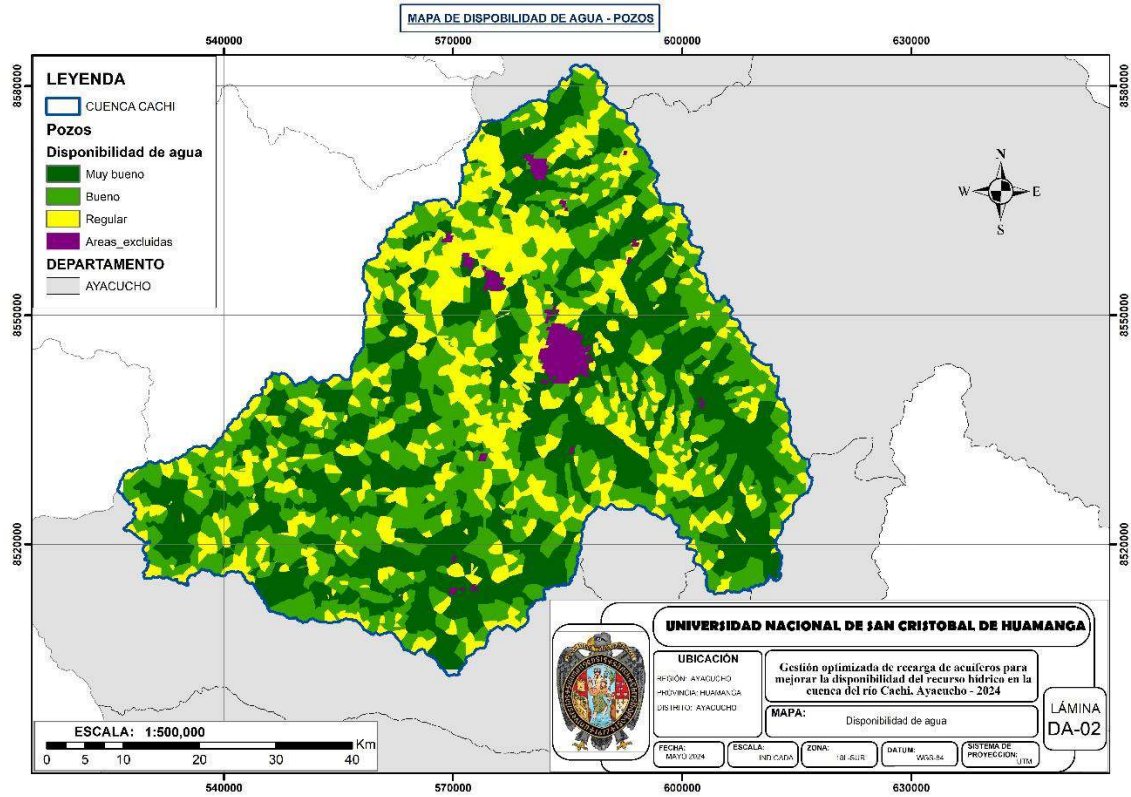


Figura 3.21: Disponibilidad de agua - pozos.

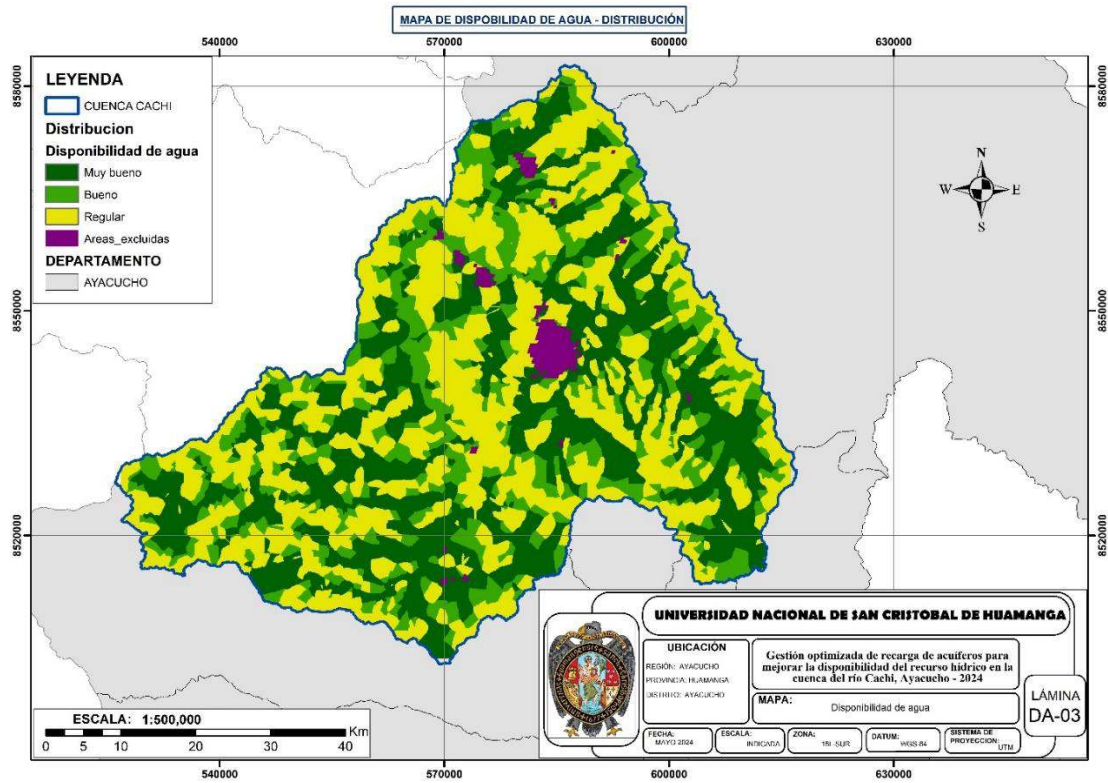


Figura 3.22: Disponibilidad de agua - distribución.

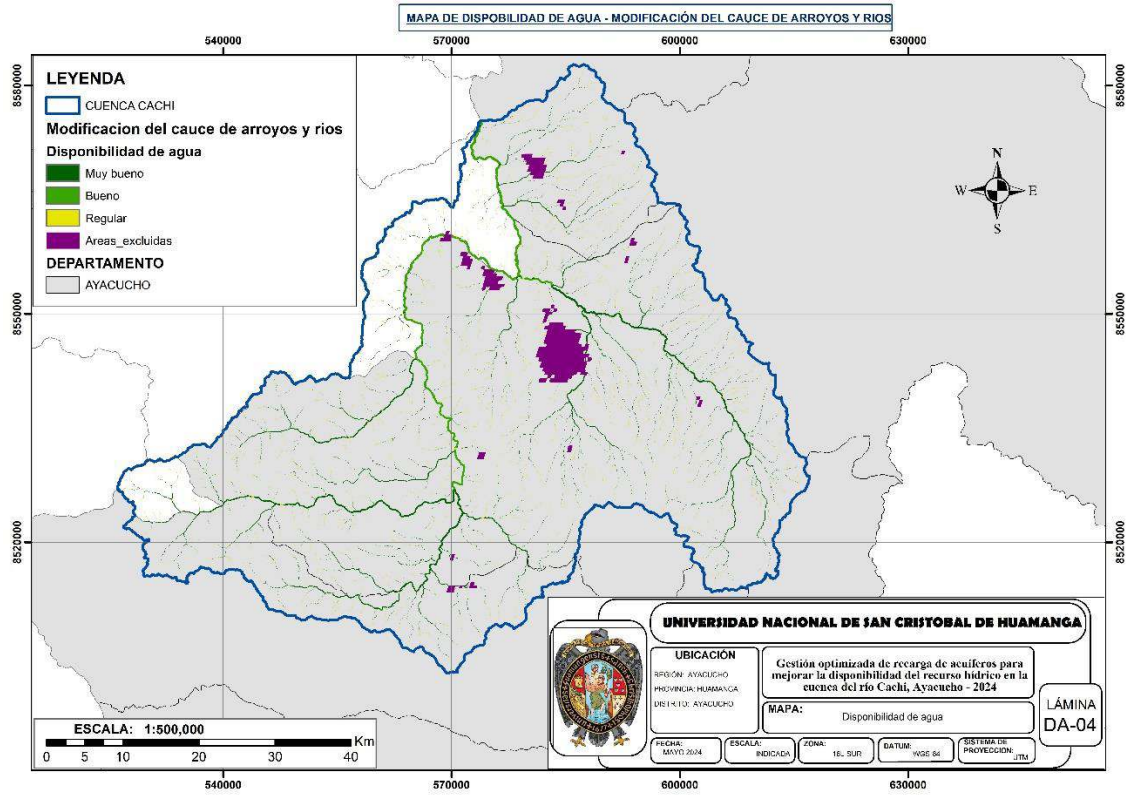


Figura 3.23: Disponibilidad de agua – modificación del cauce de arroyos y ríos.

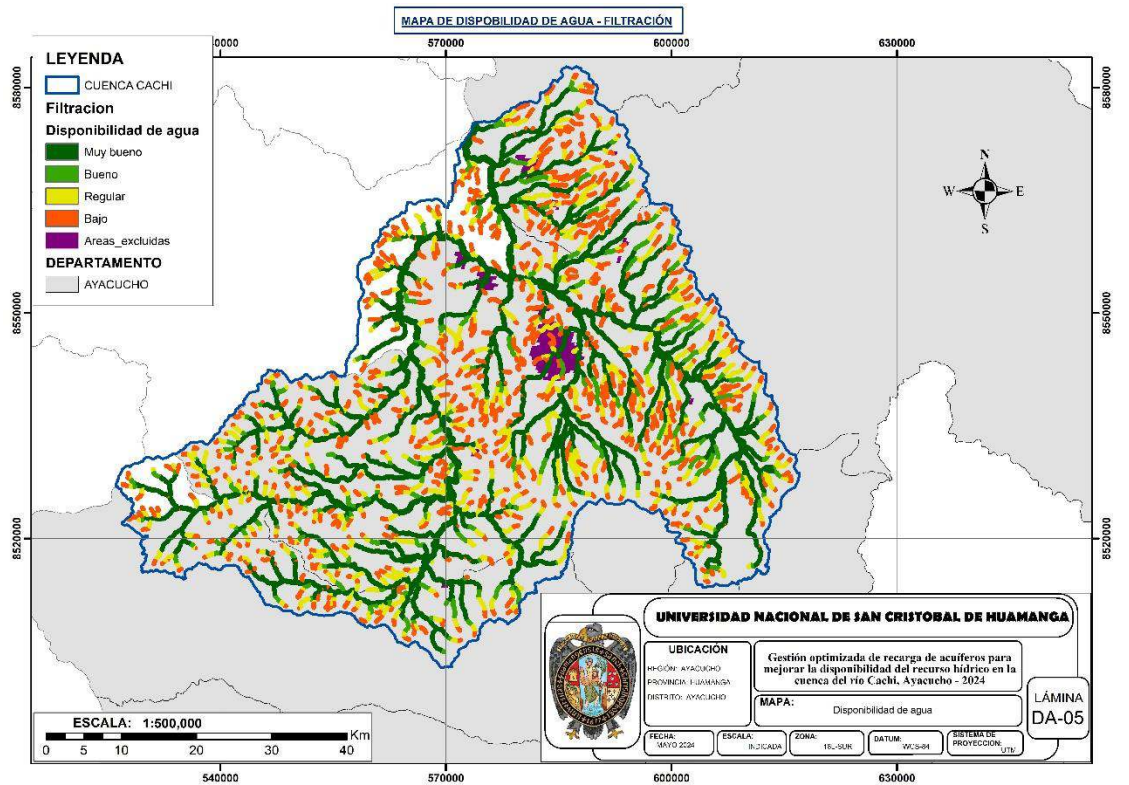


Figura 3.24: Disponibilidad de agua - Filtración.

En la Tabla 3.28 se muestra la clasificación de la disponibilidad de agua para las cinco tecnologías MAR.

**Tabla 3.28:** Clasificación de la disponibilidad de agua para las cinco tecnologías.

<b>Disponibilidad de agua</b>	<b>Puntaje</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Captación de agua de lluvia</b>			
Muy bajo	0-20	77.79	2.15%
Bajo	40-20	822.97	22.73%
Regular	60-40	2452.91	67.73%
Alta	80-60	25.68	0.71%
Muy alta	100-80	24.83	0.69%
Excluidas (Cauce de arroyos y ríos)	-	147.97	4.09%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Pozos</b>			
Muy bajo	0-20	0.00	0.00%
Bajo	40-20	0.00	0.00%
Regular	60-40	895.95	24.74%
Alta	80-60	1332.44	36.79%
Muy alta	100-80	1324.27	36.57%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Distribución</b>			
Muy bajo	0-20	0.00	0.00%
Bajo	40-20	0.00	0.00%
Regular	60-40	1537.46	42.45%
Alta	80-60	745.74	20.59%
Muy alta	100-80	1269.52	35.06%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Modificación del cauce de arroyos y ríos</b>			
Muy bajo	0-20	0.00	0.00%
Bajo	40-20	0.00	0.00%
Regular	60-40	18.36	0.51%
Alta	80-60	34.82	0.96%
Muy alta	100-80	63.91	1.76%
Excluidas (Fuera del cauce de arroyos y ríos)	-	3435.06	94.85%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Filtración</b>			
Muy bajo	0-20	0.00	0.00%
Bajo	40-20	463.68	12.80%
Regular	60-40	313.17	8.65%
Alta	80-60	141.84	3.92%

Muy alta	100-80	654.28	18.07%
Excluidas (Fuera del área de influencia de un pozo)	-	1979.18	54.65%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>

El índice de disponibilidad de agua para las distintas tecnologías en general (Figura 3.20 a la Figura 3.24) varía entre regular a muy bueno por encima de 50% del área de la cuenca, excepto para las tecnologías de modificación del cauce de arroyos y ríos, y filtración, las cuales quedan restringidas a áreas específicas de la cuenca que demandan las mismas, donde las áreas aplicables en general no llegan al 50% de la cuenca. Las tecnologías de pozos y distribución presentan un alto potencial en relación a la disposición de agua para la implementación de las mismas.

### 3.3.3.3. Idoneidad MAR a la recargabilidad intrínseca del acuífero.

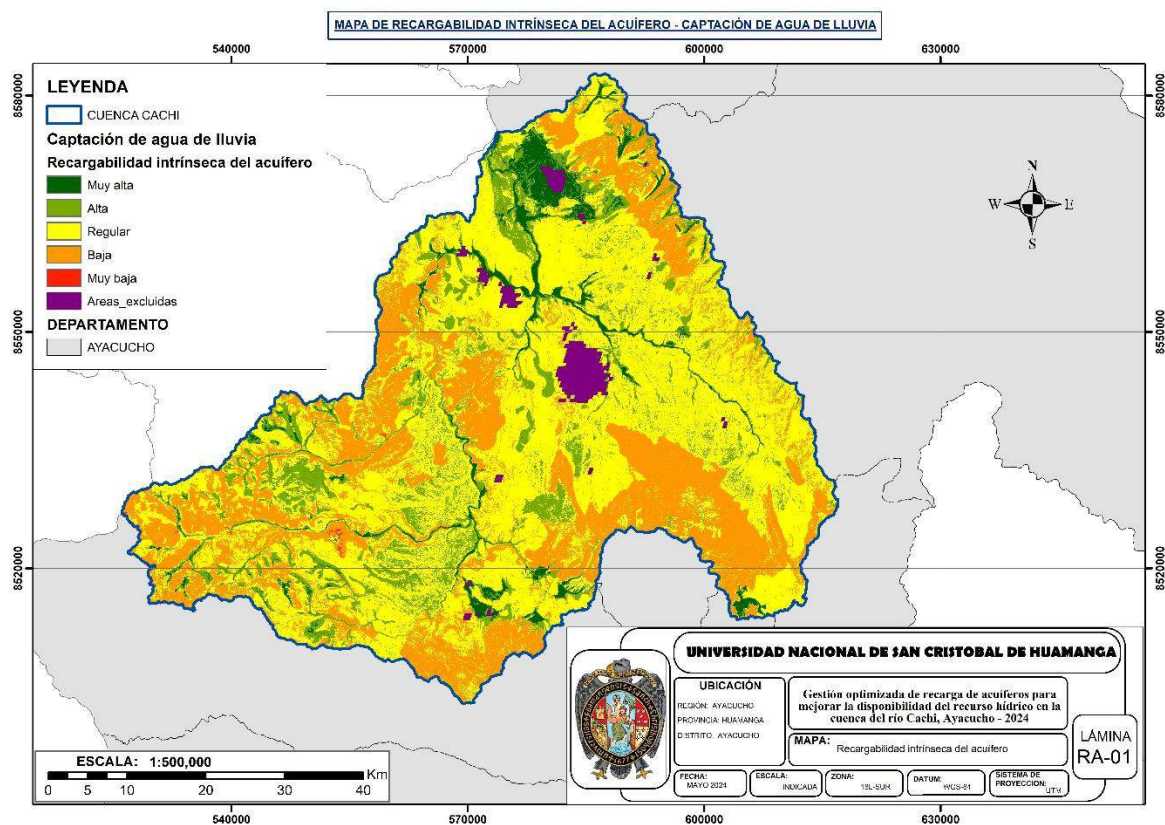


Figura 3.25: Recargabilidad intrínseca del acuífero - Captación de agua de lluvia.

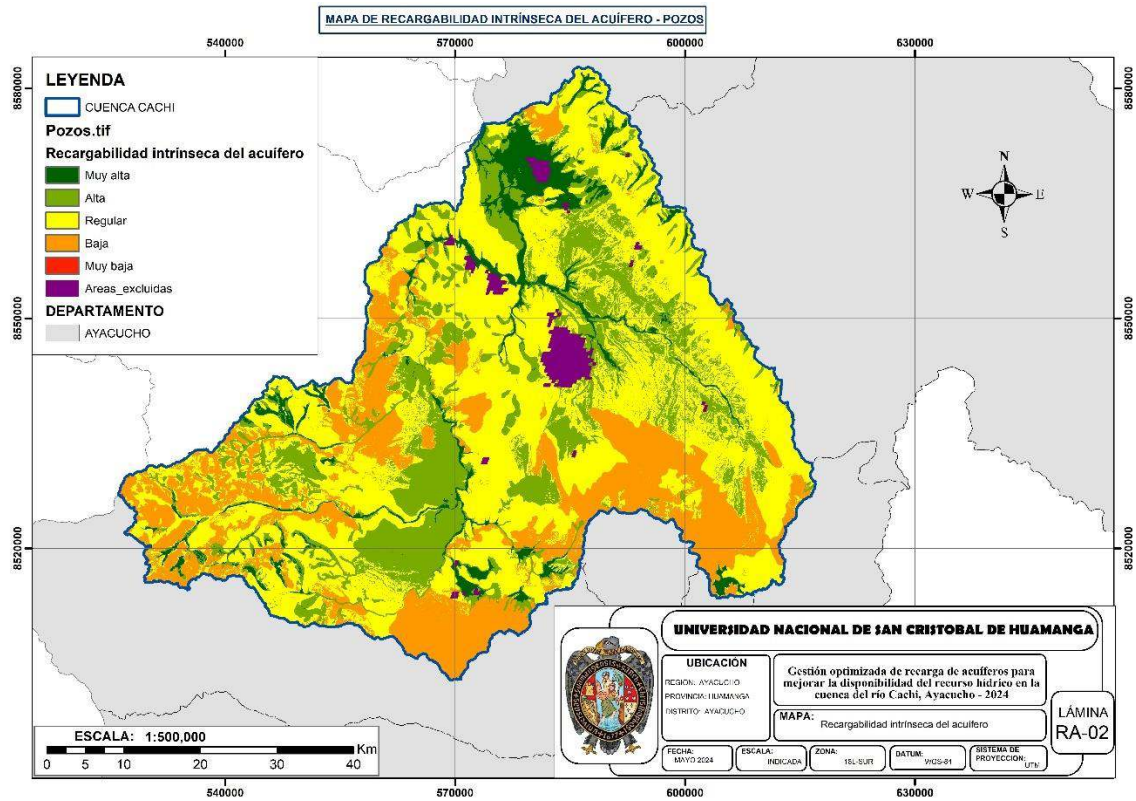


Figura 3.26: Recargabilidad intrínseca del acuífero - Pozos.

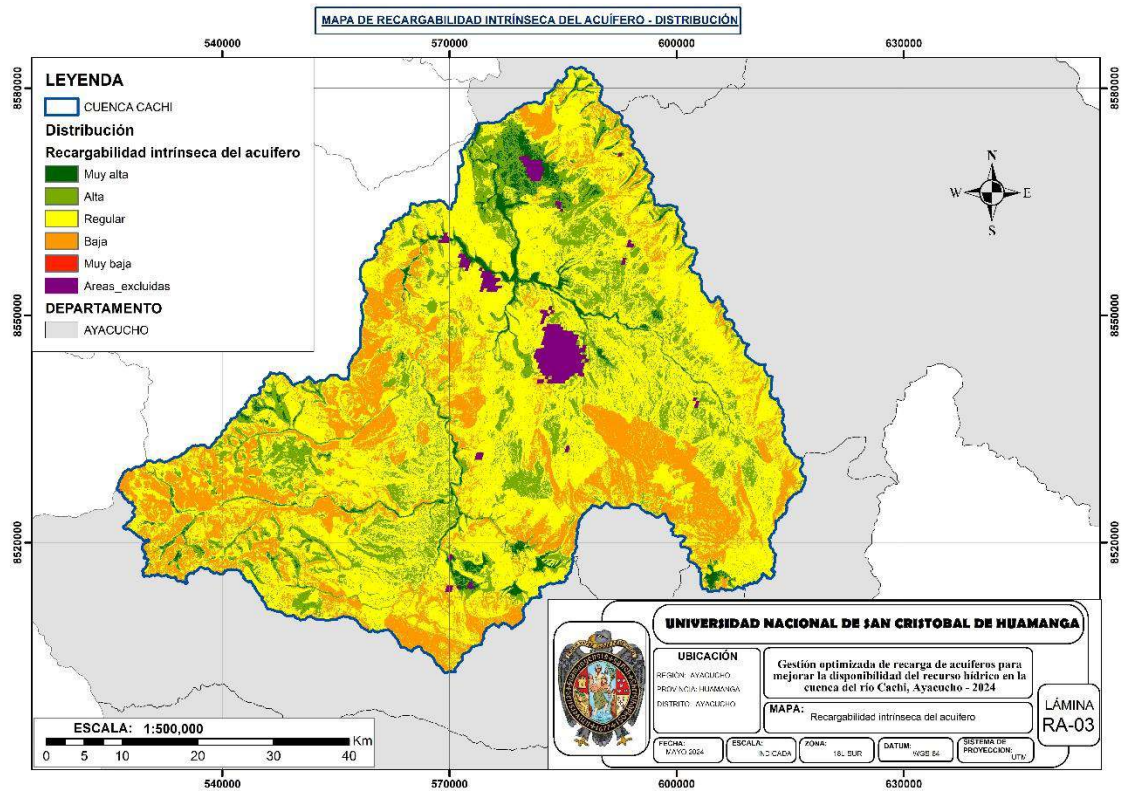


Figura 3.27: Recargabilidad intrínseca del acuífero - Distribución.

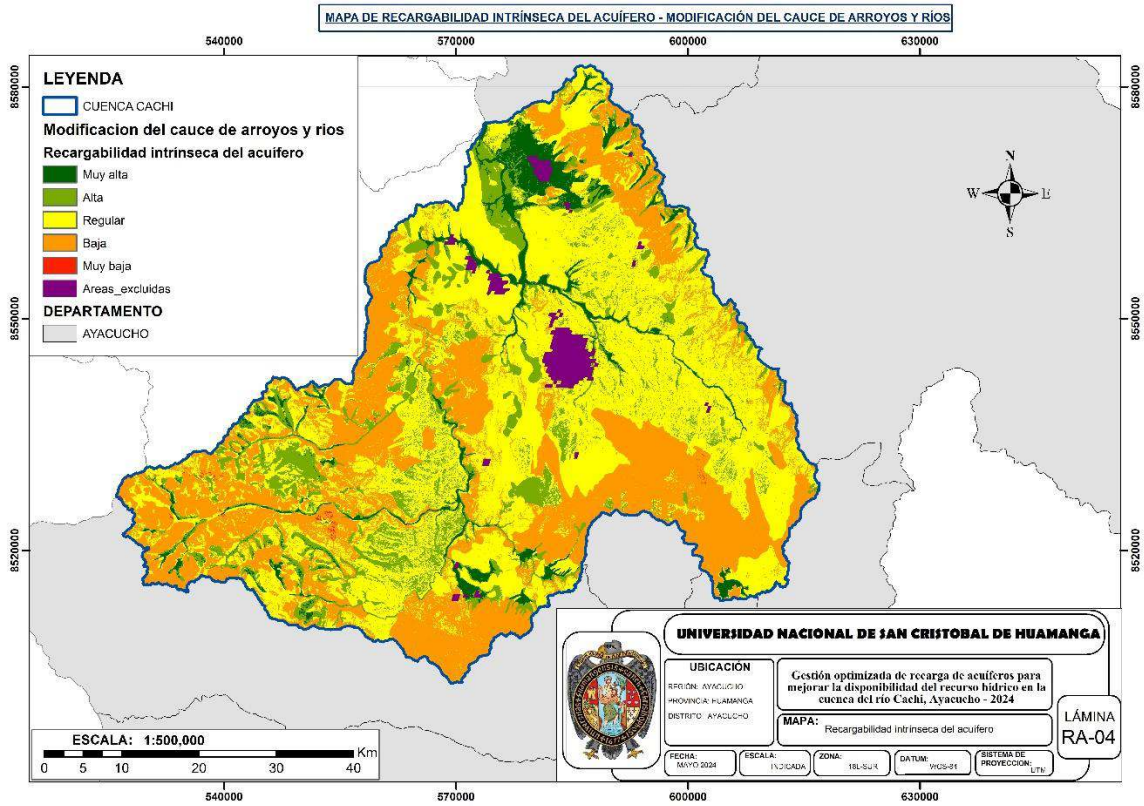


Figura 3.28: Recargabilidad intrínseca del acuífero – Modificación del cauce de arroyos y ríos.

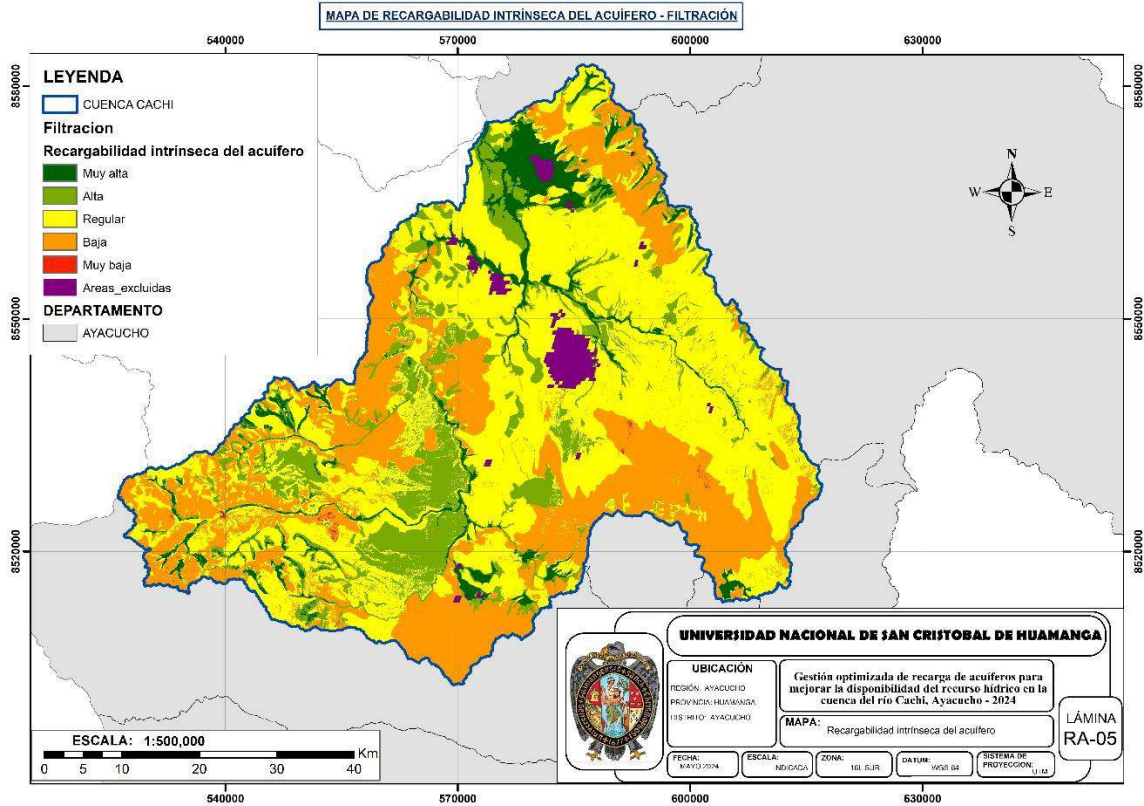


Figura 3.29: Recargabilidad intrínseca del acuífero - Filtración.

En la Tabla 3.29 se muestra la clasificación de la recargabilidad intrínseca para las cinco tecnologías MAR.

**Tabla 3.29:** Clasificación de la recargabilidad intrínseca del acuífero para las cinco tecnologías.

<b>Recargabilidad intrínseca del acuífero</b>	<b>Puntaje</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Captación de agua de lluvia</b>			
Muy bajo	0-20	1.21	0.03%
Bajo	40-20	1081.48	29.86%
Regular	60-40	1849.86	51.08%
Alta	80-60	486.55	13.44%
Muy alta	100-80	136.06	3.76%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Pozos</b>			
Muy bajo	0-20	0.14	0.00%
Bajo	40-20	824.37	22.76%
Regular	60-40	1731.42	47.81%
Alta	80-60	797.55	22.02%
Muy alta	100-80	201.81	5.57%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Distribución</b>			
Muy bajo	0-20	0.06	0.00%
Bajo	40-20	798.25	22.04%
Regular	60-40	2026.36	55.95%
Alta	80-60	628.46	17.35%
Muy alta	100-80	102.01	2.82%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Modificación del cauce de arroyos y ríos</b>			
Muy bajo	0-20	2.58	0.07%
Bajo	40-20	1274.75	35.20%
Regular	60-40	1618.47	44.69%
Alta	80-60	487.54	13.46%
Muy alta	100-80	171.91	4.75%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Filtración</b>			
Muy bajo	0-20	4.06	0.11%
Bajo	40-20	1112.78	30.73%
Regular	60-40	1687.71	46.60%
Alta	80-60	546.19	15.08%
Muy alta	100-80	204.54	5.65%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%

TOTAL

3621.42

100%

El índice de la recargabilidad intrínseca de la cuenca para las distintas metodologías MAR (Figura 3.25 a la Figura 3.29) mostró que la zona norte de la cuenta tiene una clasificación alta en general para todas las tecnologías MAR, variando para una alta y muy alta recargabilidad del acuífero para captación de agua de lluvia, pozos, distribución, modificación del cauce de arroyos y ríos y filtración en 17.19 %, 27.60%, 20.17%, 18.21% y 20.73%; respectivamente, donde la tecnología de pozos tiene mejor relación de aplicabilidad a la recargabilidad intrínseca del acuífero para la cuenca Cachi. En contraposición la tecnología de modificación del cauce de arroyos resulta entre una baja y muy baja clasificación con un 35.27% el área de la cuenca.

### 3.3.3.4. Idoneidad MAR al índice del atractivo económico

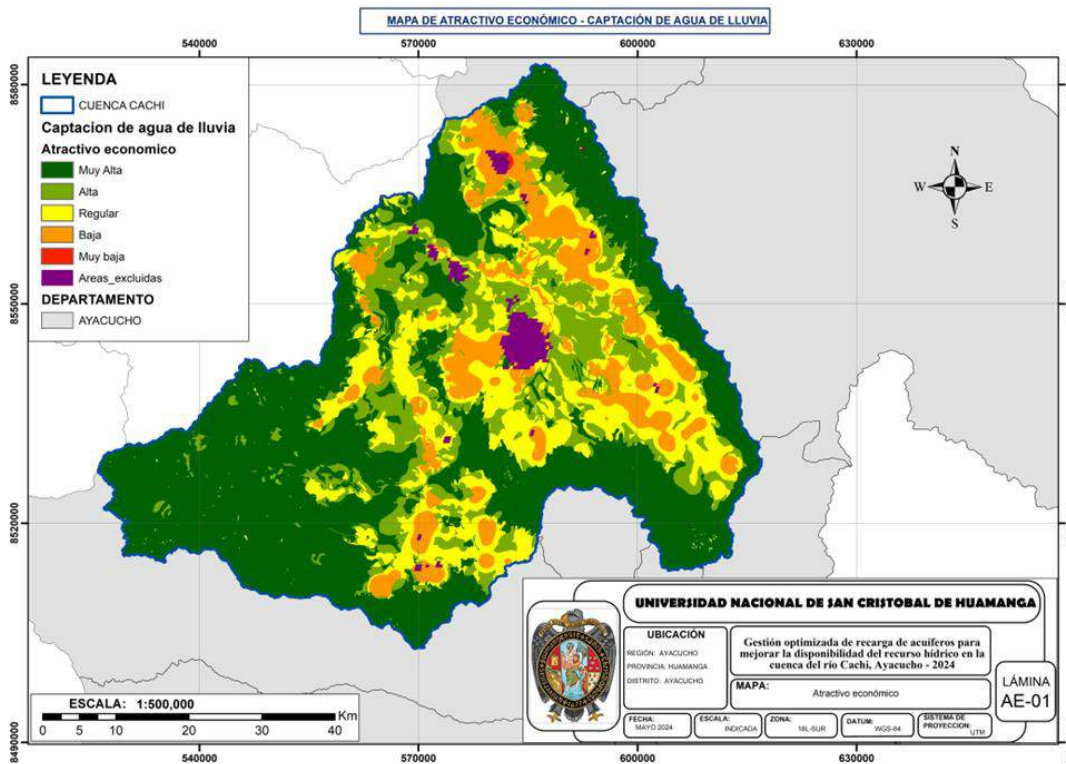


Figura 3.30: Atractivo económico - Captación de agua de lluvia.

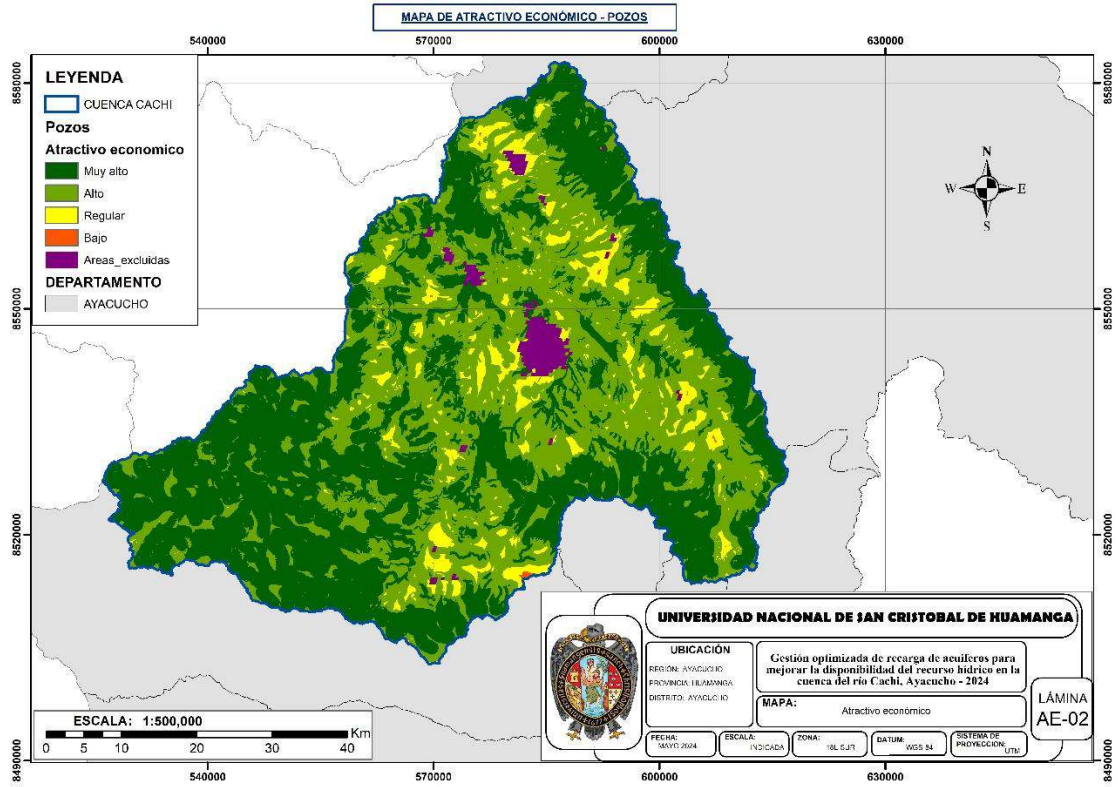


Figura 3.31: Atractivo económico - Pozos.

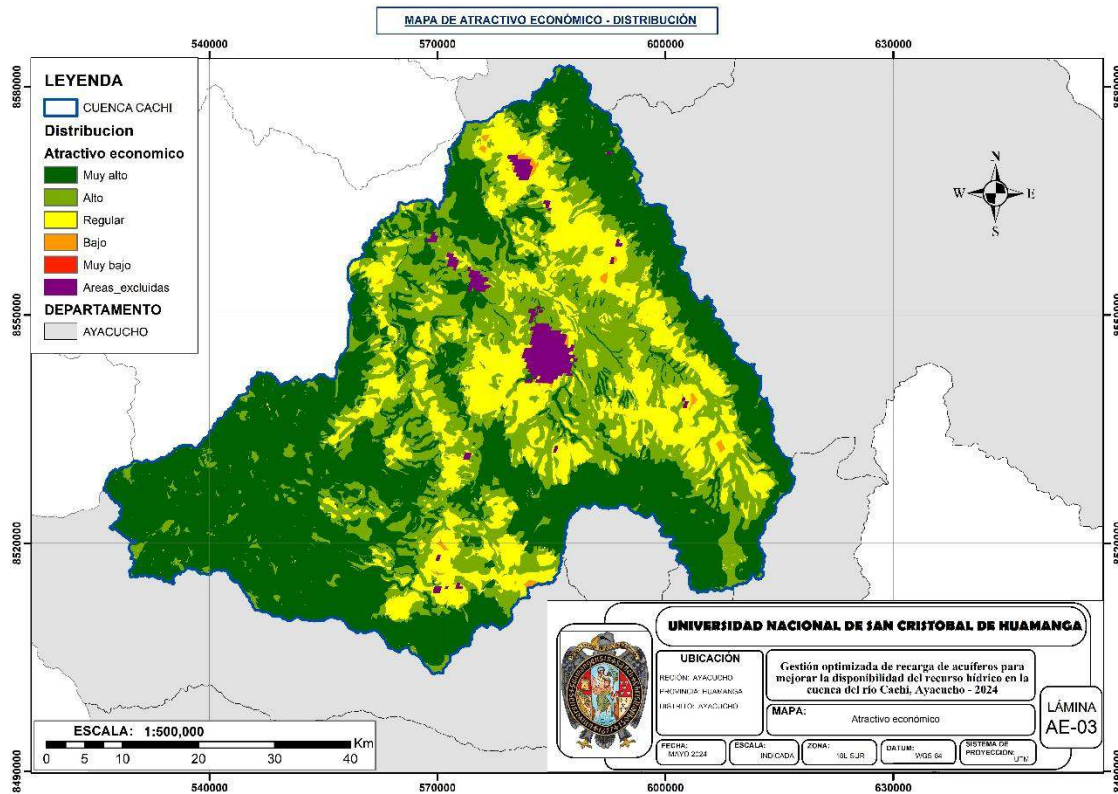


Figura 3.32: Atractivo económico - Distribución.

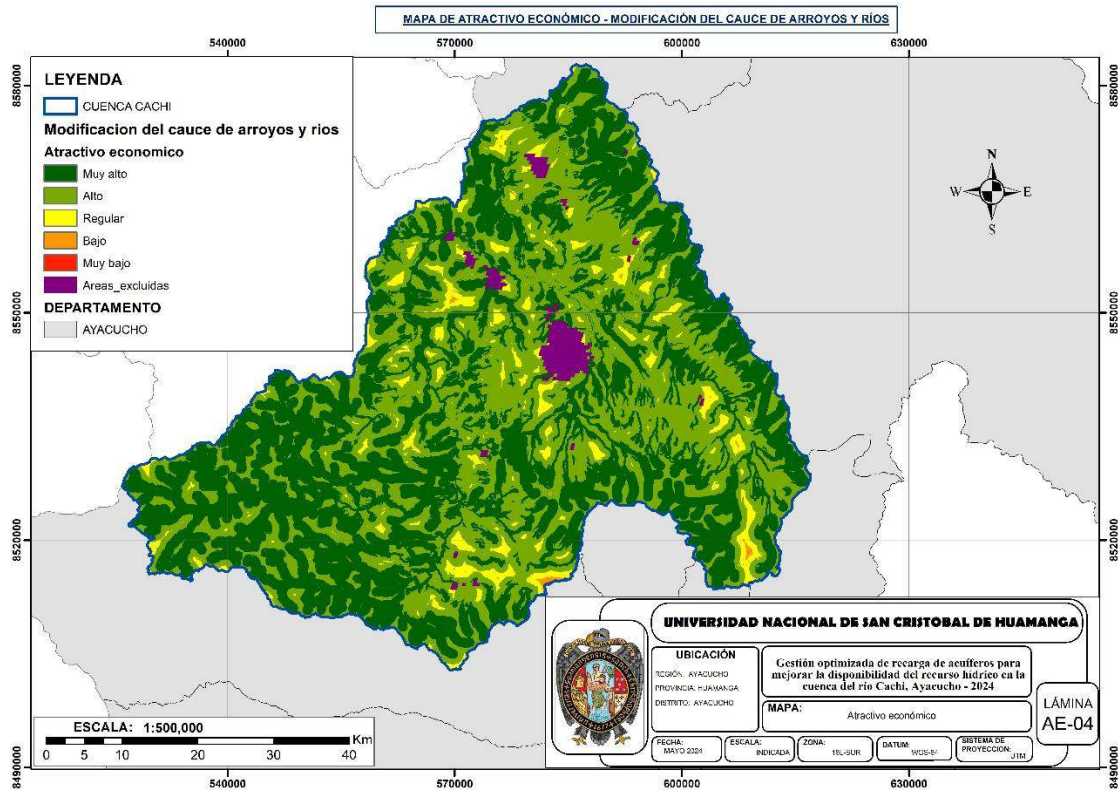


Figura 3.33: Atractivo económico – Modificación del cauce de arroyos y ríos.

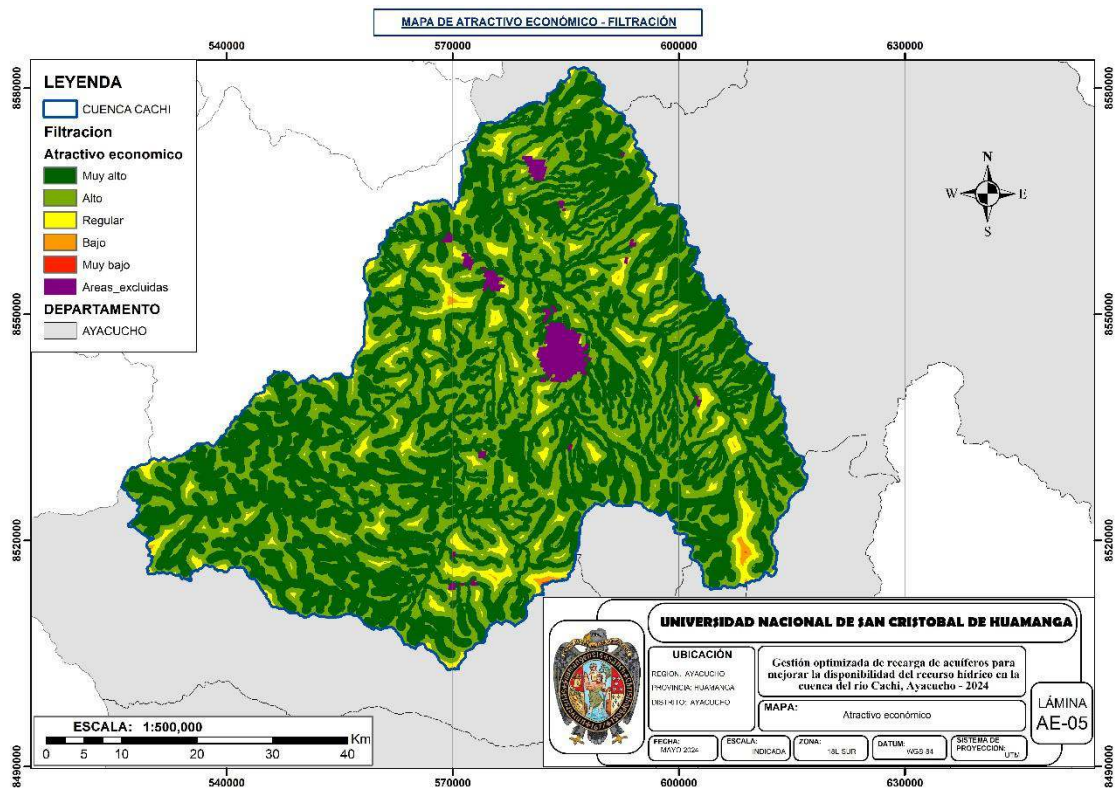


Figura 3.34: Atractivo económico - Filtración.

En la Tabla 3.30 se muestra la clasificación del atractivo económico para las cinco tecnologías MAR.

**Tabla 3.30:** Atractivo económico para las cinco tecnologías.

<b>Atractivo económico</b>	<b>Puntaje</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Captación de agua de lluvia</b>			
Muy bajo	0-20	1.92	0.05%
Bajo	40-20	402.39	11.11%
Regular	60-40	645.39	17.82%
Alta	80-60	660.49	18.24%
Muy alta	100-80	1844.88	50.94%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Pozos</b>			
Muy bajo	0-20	0.00	0.00%
Bajo	40-20	2.41	0.07%
Regular	60-40	202.75	5.60%
Alta	80-60	1538.34	42.48%
Muy alta	100-80	1811.48	50.02%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Distribución</b>			
Muy bajo	0-20	0.00	0.00%
Bajo	40-20	11.87	0.33%
Regular	60-40	713.12	19.69%
Alta	80-60	1053.03	29.08%
Muy alta	100-80	1777.01	49.07%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Modificación del cauce de arroyos y ríos</b>			
Muy bajo	0-20	0.20	0.01%
Bajo	40-20	5.82	0.16%
Regular	60-40	160.73	4.44%
Alta	80-60	1574.75	43.48%
Muy alta	100-80	1813.49	50.08%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Filtración</b>			
Muy bajo	0-20	0.30	0.01%
Bajo	40-20	10.25	0.28%
Regular	60-40	163.08	4.50%
Alta	80-60	1280.49	35.36%
Muy alta	100-80	2100.86	58.01%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%

---

<b>TOTAL</b>	<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
--------------	----------------	-------------

---

El índice atractivo económico para las distintas metodologías (Figura 3.30 a la Figura 3.34) mostró una gran variabilidad espacialmente entre las mismas. La filtración mostró un muy alto atractivo (58.01%) principalmente para las zonas cercanas a los márgenes de las fuentes de agua y modificación del cauce de arroyos y ríos con un 50.08%, La captación de agua de lluvia mostró un muy alto atractivo para las zonas altas en general de la cuenca (50.94%), seguido por pozos de un 50.02% y distribución (49.07%), donde se puede observar en general que alrededor del 50% del área de la cuenca aplica a un muy alto atractivo económico, siendo así la disposición de las áreas distintas para cada tecnología.

#### **3.3.3.5. Idoneidad general del sitio MAR.**

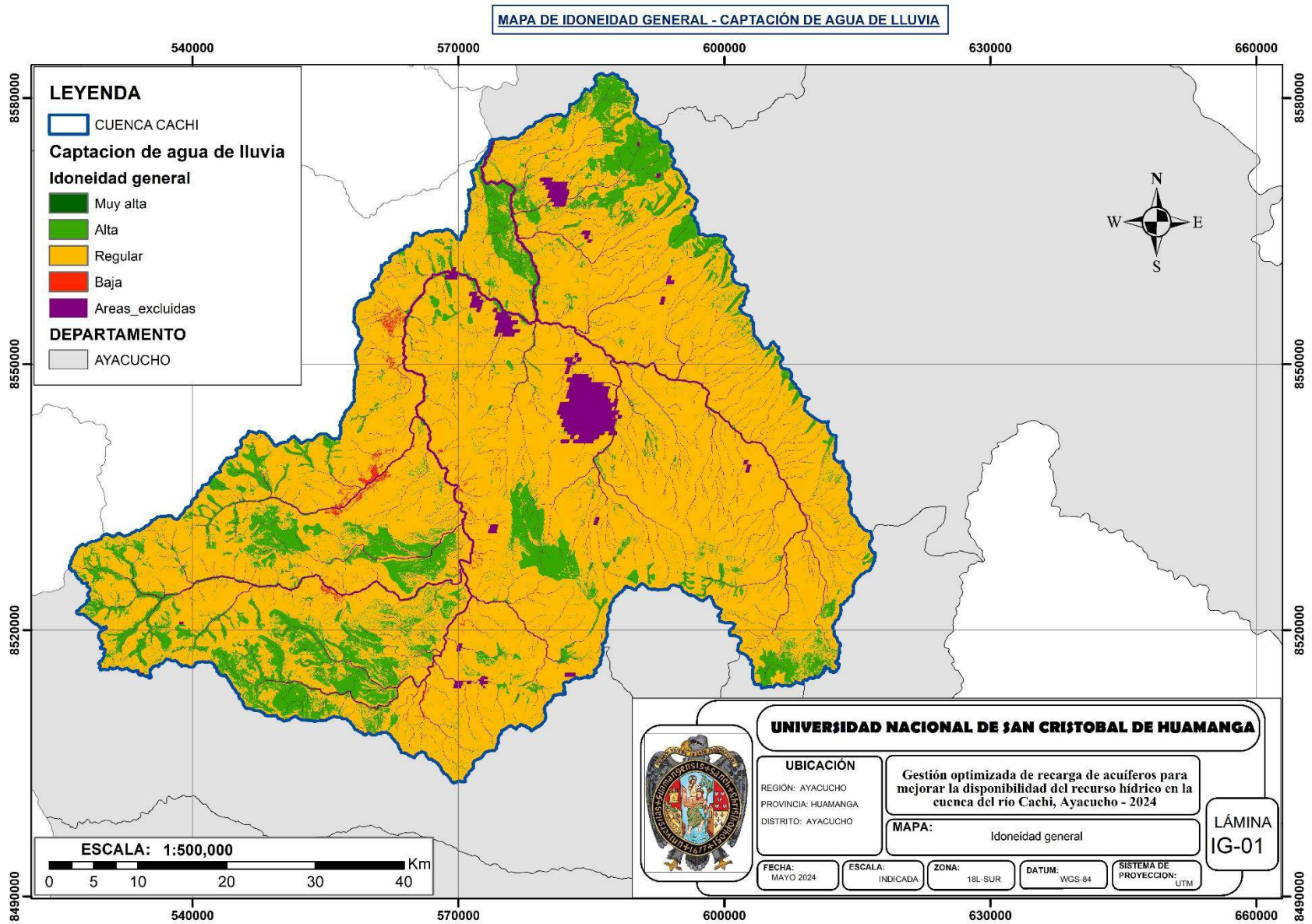


Figura 3.35: Idoneidad general - Captación de agua de lluvia.

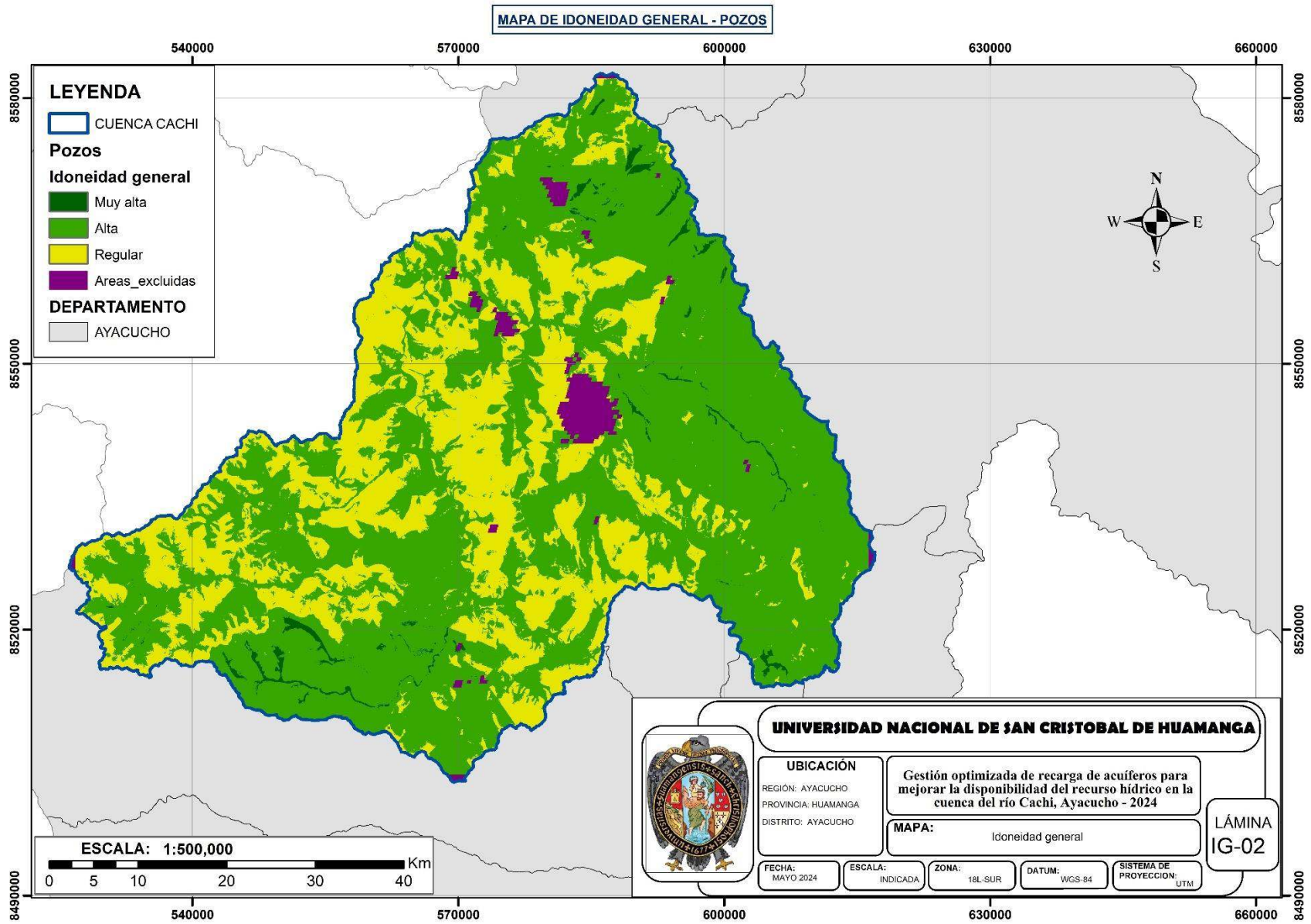


Figura 3.36: Idoneidad general - Pozos.

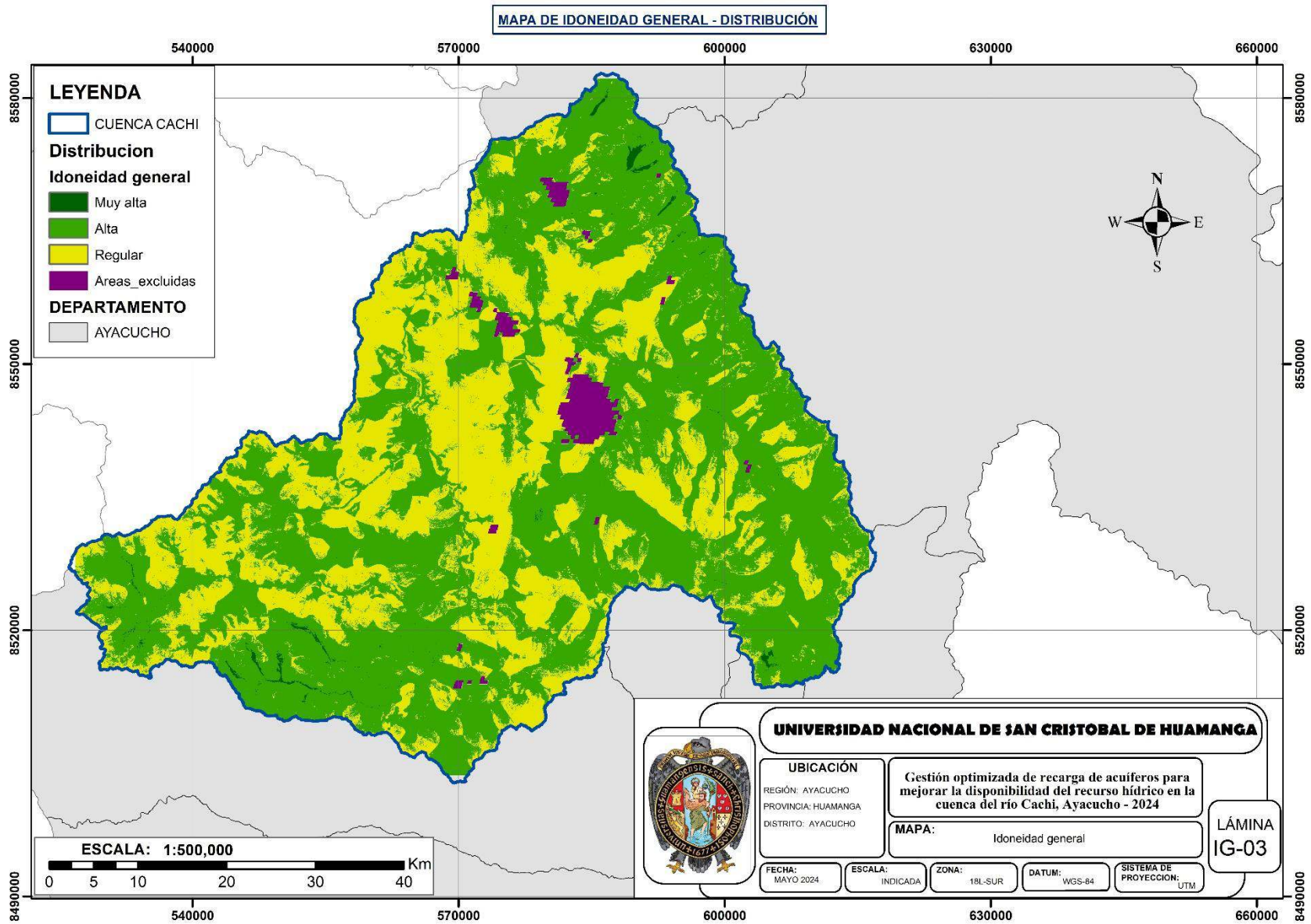


Figura 3.37: Idoneidad general - Distribución.

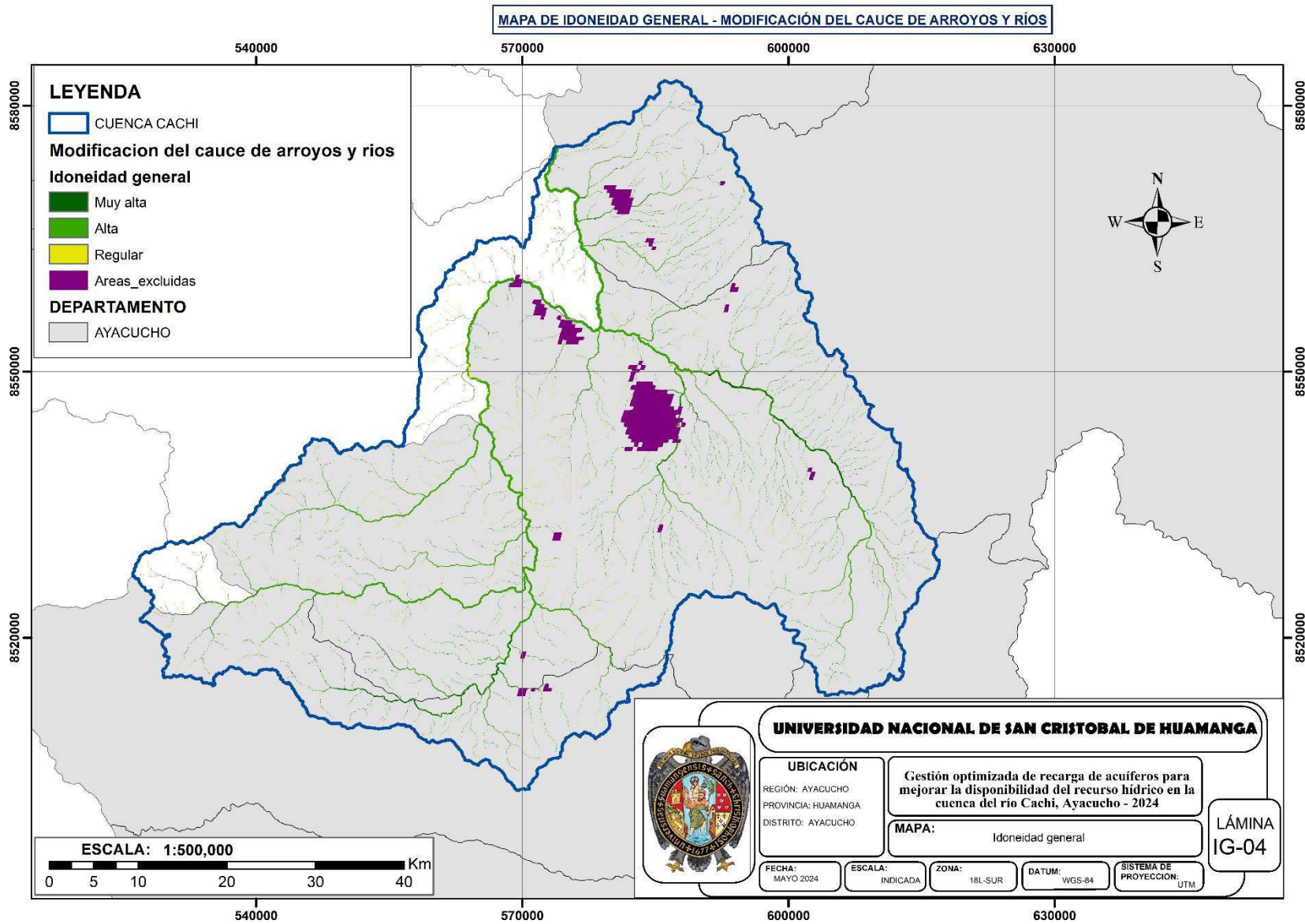


Figura 3.38: Idoneidad general – Modificación del cauce de arroyos y ríos.

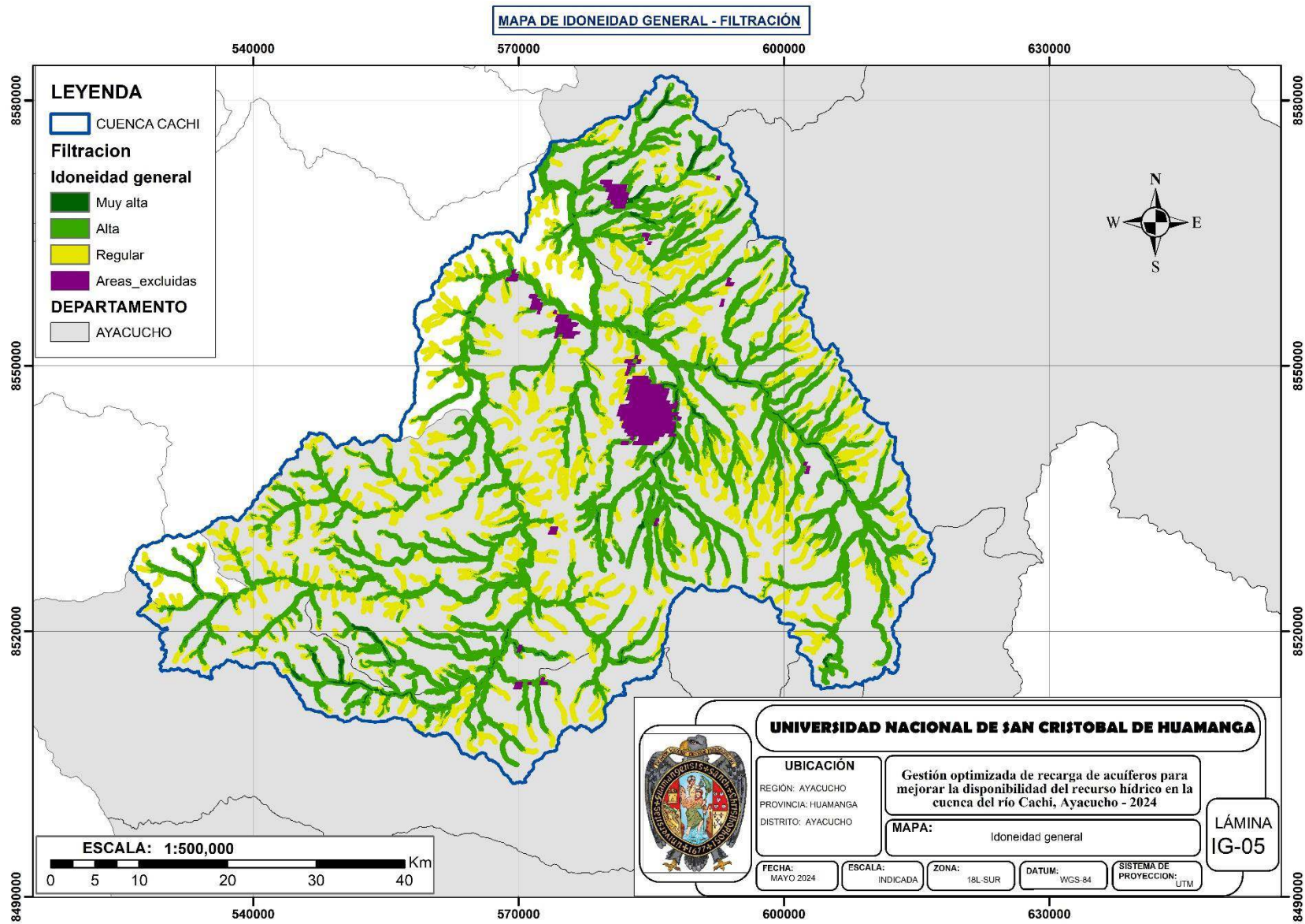


Figura 3.39: Idoneidad general - Filtración.

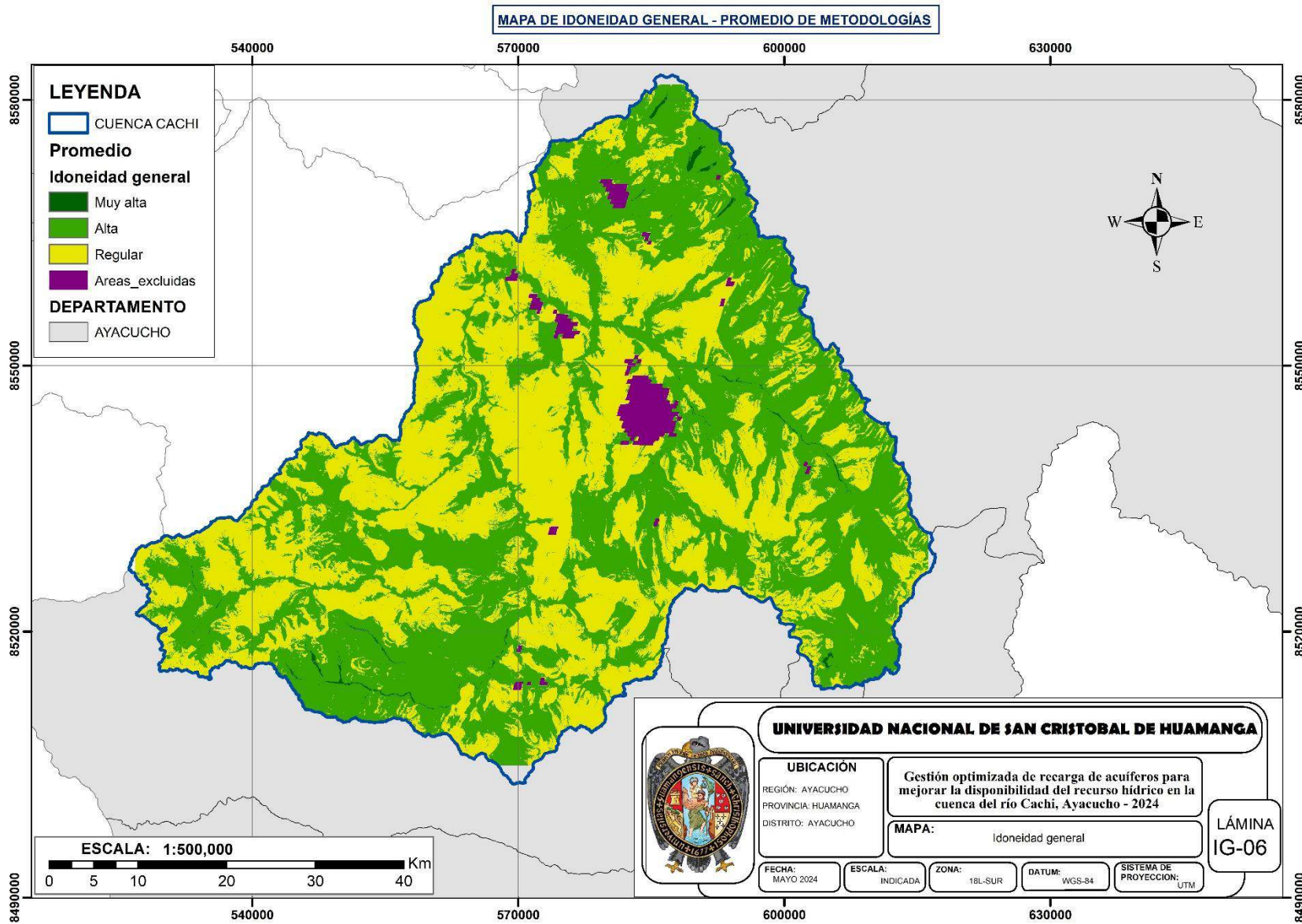


Figura 3.40: Idoneidad general – Promedio de metodologías.

En la Tabla 3.31 se muestra la clasificación de la idoneidad general de MAR para las cinco tecnologías MAR.

**Tabla 3.31:** Clasificación de la Idoneidad general para las cinco tecnologías.

<b>Idoneidad general de MAR</b>	<b>Puntaje</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Captación de agua de lluvia</b>			
Muy bajo	0-20	0.00	0.00%
Bajo	40-20	12.17	0.34%
Regular	60-40	2832.11	78.20%
Alta	80-60	561.64	15.51%
Muy alta	100-80	0.65	0.02%
Excluidas (Cauce de arroyos y ríos)	-	145.58	4.02%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Pozos</b>			
Muy bajo	0-20	0.00	0.00%
Bajo	40-20	0.00	0.00%
Regular	60-40	1100.45	30.39%
Alta	80-60	2405.29	66.42%
Muy alta	100-80	40.69	1.12%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Distribución</b>			
Muy bajo	0-20	0.00	0.00%
Bajo	40-20	0.00	0.00%
Regular	60-40	1311.11	36.20%
Alta	80-60	2221.06	61.33%
Muy alta	100-80	14.18	0.39%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Modificación del cauce de arroyos y ríos</b>			
Muy bajo	0-20	0.00	0.00%
Bajo	40-20	0.00	0.00%
Regular	60-40	7.59	0.21%
Alta	80-60	100.30	2.77%
Muy alta	100-80	9.16	0.25%
Excluidas (Fuera del cauce de arroyos y ríos)	-	3435.10	94.86%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>
<b>Filtración</b>			
Muy bajo	0-20	0.00	0.00%
Bajo	40-20	0.00	0.00%
Regular	60-40	599.16	16.54%

Alta	80-60	942.44	26.02%
Muy alta	100-80	30.55	0.84%
Excluidas (Fuera del área de influencia de un pozo)	-	1980.00	54.67%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>

**Tabla 3.32:** Clasificación de la Idoneidad general promedio de las metodologías.

<b>Idoneidad general de MAR</b>	<b>Puntaje</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Promedio de metodologías</b>			
Muy bajo	0-20	0.00	0.00%
Bajo	40-20	0.00	0.00%
Regular	60-40	1651.40	45.60%
Alta	80-60	1888.75	52.15%
Muy alta	100-80	12.00	0.33%
Excluidas (Urbano y minería)	-	69.27	1.91%
<b>TOTAL</b>		<b>3621.42</b>	<b>100%</b>

La idoneidad general de MAR (Figura 3.40 a la Figura 3.35), muestra que cada tecnología tiene zonas en específico donde se hace más adecuada su implementación, así para la tecnología de captación de agua de lluvia, queda alrededor de un 15% de la cuenca aplica como alta idoneidad, quedando restringida para las zonas altas de la cuenca como se aprecia en la Figura 3.30, incluso parte del valle de Huanta, además los proyectos ejecutados por el Fondo Sierra Azul, quedan dentro de las zonas de una idoneidad regular y alta de puntuaciones de entre 50 a 64. La metodología de pozos se califica como la mejor en relación de las áreas más favorables en su implementación con un 67.54 % de la cuenca entre alta y muy alta. Seguido por la tecnología de distribución con un 61.72% del área de la cuenca para una calificación entre alta y muy alta. La tecnología de modificación del cauce de arroyos y ríos es el menos favorable con solo un 3.02 % del área de la cuenca con calificación entre muy alta y alta, esto debido a que la tecnología está restringida a la faja marginal de los ríos. La tecnología de filtración cubre un área de 26.87% de la cuenca, para la calificación entre alta y muy alta; esto restringido con el radio de influencia de un pozo instalada a la fuente a filtrar en 300 metros.

Así al ordenarse los resultados de la viabilidad,  $LI > P > D > C > F$ . No coincide con el obtenido en el mapeo que muestrea las áreas superiores a la calificación a alta en el siguiente orden:  $P > D > F > LI > C$ . El promedio de las metodologías MAR (Figura 3.40), cubren el 52.49% del área de

la cuenca con una calificación entre muy alta y alta, para su implementación. Las zonas cercanas a las fuentes de agua tienen mejor puntuación como parece intuitivo y gran parte de las zonas altoandinas del mismo modo, califican como un alto potencial de MAR.

#### **3.3.3.6. Análisis de sensibilidad.**

En la Tabla 3.33 se muestra los puntajes del índice de variación, donde cada tecnología MAR, es sensible a ciertos subindicadores. En general los resultados del índice de variación VI, demostró que ningún subindicador causó una gran variación en los puntajes de idoneidad general, al eliminarse; lo que indica que el método propuesto resulta equilibrado en la distribución de peso para los subindicadores.

La captación de agua de lluvia es mayormente sensible a la densidad poblacional seguido del uso actual de suelos. La tecnología de pozos, se mostró más sensible a la distancia a la fuente seguido por el transporte de sedimentos. En la distribución se mostró que la escorrentía acumulada es la más sensible seguida del transporte de sedimentos. La modificación del cauce de arroyos y ríos; y la filtración son más sensibles a la distancia a la fuente de agua y para el indicador de la escorrentía acumula; esto debido a que ambas tecnologías se restringen a cierta distancia de las fuentes de agua.

Así se observa que es de crucial importancia en general desarrollar un buen modelamiento hidrológico para generar las escorrentías, así como el transporte de sedimentos, seguido de un adecuado criterio de asignación de umbrales para la densidad poblacional y un rango máximo de distancia a las fuentes de agua; este último asociado con el costo para el MAR y las características que requieren las mismas.

**Tabla 3.33:** Análisis de sensibilidad de eliminación junto con la distribución de peso original.

Indicador eliminado	Índice de variación VI (%)																				Distribución del peso (%)					
	Mínimo					Máximo					Media					Desviación estándar					LI	P	D	C	F	
	L	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F						
Disponibilidad hídrica	0	00	00	00	00	13	49	62	48	46	11	16	12	14	16	10	07	08	07	07	11	8.	10	10	8.	3
Calidad de agua	0	18	00	00	00	31	76	39	38	66	18	35	24	24	23	07	05	13	16	14	5	3	5	5	8.	3
Cobertura vegetal	0	12	06	19	11	42	42	42	42	42	13	23	19	22	23	05	03	19	03	04	8	1	5	5	2.	1
Textura de suelo	0	09	03	10	11	29	32	30	29	32	15	25	21	23	24	04	03	03	03	03	8	1	5	5	2.	1
Pendiente	0	10	02	09	09	03	39	38	38	39	03	25	21	26	25	07	04	05	06	05	8	1	5	5	2.	1
Hidrogeología	0	12	03	09	10	36	37	36	36	37	16	25	22	24	25	05	03	04	03	25	8	1	5	5	2.	1
Escorrentía acumulada	0	00	00	00	00	37	10	40	12	68	39	34	44	57	66	06	19	30	25	49	12	10	12	12	17	.5
Coficiente de varianza	0	00	00	00	00	43	19	23	14	23	06	04	04	06	05	05	03	03	03	03	5	5	5	5	5	5
Transporte de sedimentos	0	00	00	00	00	84	15	79	62	42	35	61	38	26	16	10	14	38	12	06	7.	10	7.	7.	2.	5
Formación geológica	0	00	00	00	00	99	82	49	53	05	15	16	12	15	23	11	12	08	15	16	5	8	3	5	10	10
Distancia a fallas	0	00	00	09	04	41	40	40	39	39	17	08	10	22	20	06	07	08	04	05	2.	5	3.	2.	2.	5
Geomorfología	0	00	00	00	00	82	80	51	86	01	23	23	22	33	26	11	12	13	16	13	7.	8.	6.	10	10	10
Pendiente	0	04	00	00	02	79	38	85	34	38	12	30	12	17	30	09	05	10	09	05	7.	2.	8.	5	2.	5
Uso actual del suelo	0	00	00	00	05	31	42	73	42	42	47	15	28	26	28	26	13	10	11	09	11	5	8.	3.	2.	5
Densidad poblacional	0	00	00	00	00	64	75	92	42	42	77	27	35	13	19	22	14	17	07	06	.3	5	3	8	5	5

Proximidad a la	0	0.	0.	0.	0.	0.	1.	0.	2.	2.	0.	0.	0.	1.	1.	0.	0.	0.	0.	0.	2.	12	8.	17	20
fuelle		00	00	81	87	42	27	82	00	69	16	67	32	22	59	05	18	12	17	28	5	.5	3	.5	

El enfoque propuesto en la investigación agrega la necesidad de MAR como indicador, calculados superficialmente con datos de las licencias de agua actualmente otorgadas por el ANA en la cuenca Cachi, para el mapeo de idoneidad, esto como respuesta al estrés al que está sometido la cuenca en el uso del recurso hídrico, esto debido a que en la cuenca no se cuenta con pozos, y en consecuencia con datos de acuíferos para determinar el estrés y estado de los mismos. El modelamiento hidrológico y el transporte de sedimentos que representan en gran medida la disponibilidad para implementación de las distintas tecnologías, quedando demostrado por el análisis de sensibilidad, donde los caudales fueron producto de modelos anuales con uso de datos obtenidos mediante teledetección y estaciones meteorológicas e hidrométricas en el ámbito de la cuenca. El índice de la recargabilidad intrínseca de los acuíferos al no contarse con datos de estos, queda como función de los indicadores puntuados y peso asignados con trabajos precedentes y bibliografía revisada, así es el índice que mayor incertidumbre representa actualmente en la cuenca. El índice de atractivo económico, considera la densidad poblacional y el uso actual de suelos, como parte en relación a los costos de los terrenos; además de mostrar mayor sensibilidad para la mayoría de las tecnologías el indicador de proximidad a las fuentes de agua. Exceptuando el factor social, del cual no se cuenta con datos.

El análisis geoespacial mediante SIG, permite un mapeo de idoneidad para las cinco tecnologías de MAR, y permite ajustar los pesos de cada indicador a criterio de los desafíos y oportunidades asociadas a cada tecnología MAR en relación con el área de estudio, estos tomados por parte de los tomadores de decisiones en priorizar zonas de la cuenca más idóneas para implementar las distintas tecnologías.

## CONCLUSIONES

1. Se analizó la disponibilidad hídrica espacial y temporal en la cuenca del río Cachi, mostrando su particularidad en la cantidad y la calidad de la misma. Siendo la disponibilidad hídrica en la cuenca Cachi en el mes de agosto el mínimo y con déficit hídrico anual un 35.37 % del área de la cuenca, donde las áreas afectadas corresponden al valle del distrito de Huanta, el suroeste de la cuenca (zona de influencia de las captaciones de la represa Cuchoquesera) y el centro (zonas agrícolas de los distritos de Socos, Chiara y Tambillo); la calidad del agua en la cuenca implica que solo un 35.82% del área cumple los niveles de concentración del ECA categoría 3(uso agropecuario).
2. Se identificó y evaluó las metodologías de recarga artificial de acuíferos, analizados la viabilidad técnica, económica y ambiental en la selección de la ubicación óptimas de implementación; mediante el uso de los datos disponibles de las variables meteorológicas, geología, ambiente y teledetección para la cuenca del río Cachi. Así se identificó en relación a su viabilidad de muy alta a muy baja, el orden de las metodologías MAR para la cuenca Cachi: captación de agua de lluvia (1°), pozos (2°), distribución (3°), modificación del cauce de arroyos y ríos (4°), filtración (5°).
3. Se mapeó la idoneidad, identificados y evaluados las distintas metodologías de recarga de acuíferos para la cuenca del río Cachi, considerados los indicadores físicos, hidrológicos, ecológicos y sociales. Mostrándose en el mapeo para las distintas metodologías en relación a las áreas de calificación superiores a alta el siguiente orden: pozos (67.54%), distribución (61.72%), filtración (26.87%), captación de agua de lluvia (15.53%) y modificación del cauce de arroyos y ríos (3.02%).

En promedio las metodologías MAR, cubren más del 50% del área de la cuenca con una calificación entre muy alta y alta, para su implementación; entonces la cuenca Cachi en general posee un buen potencial para la aplicación de tecnologías MAR, como medio paliativo para mejorar la disponibilidad hídrica espacio temporal en calidad y cantidad.

Concluyéndose que la metodología con mayor viabilidad técnica es la captación de lluvia, seguido por la tecnología de pozos, que cubre una mayor área en idoneidad para su implementación.

## **RECOMENDACIONES**

Con base en los resultados obtenidos y los objetivos planteados en esta investigación, se proponen las siguientes recomendaciones:

1. Se recomienda ampliar los puntos de monitoreo de calidad de agua, para mejorar la precisión del indicador y ajustar mejor su peso para las metodologías más sensibles a este.
2. Generar información y data, identificando acuíferos para las zonas más estresadas de la cuenca, y mejorar la asignación de puntajes y pesos al índice de recargabilidad intrínseca del acuífero.
3. Se recomienda revisar y examinar más modelos hidrológicos para mejorar el indicador de escorrentía como disponibilidad de agua, el cual resultó ser uno de los parámetros más sensibles para la mayoría de las metodologías MAR.
4. Se sugiere validar los mapas, para los proyectos de la metodología de Captación de agua de lluvia del Fondo Sierra Azul ya ejecutados, analizando y extrapolando la viabilidad para otras metodologías MAR.
5. Se recomienda a los tomadores de decisiones priorizar aquellas áreas más estresadas en relación a la disponibilidad hídrica, la implementación y la evaluación de las distintas metodologías MAR.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alam, S., Borthakur, A., Ravi, S., Gebremichael, M., & Mohanty, S. (2021). *Managed aquifer recharge implementation criteria to achieve water sustainability*.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144992>
- Apaéstegui, J., & Peña, F. (2017). *Capítulo 2: Disponibilidad de agua*. En: N. Bernex, et al. *El Agua en el Perú: Situación y Perspectiva*.
- Arreguín, F., Chávez, R., & Rosengaus, M. (2008). *Impacto del cambio climático sobre los acuíferos mexicanos*. Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Asociación Geohidrológica Mexicana.
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2014). *Política y estrategia Nacional de los Recursos Hídricos*. Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2015-07708.  
[https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/default\\_images/politica\\_y\\_estrategia\\_nacional\\_de\\_recursos\\_hidricos\\_ana.pdf](https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/default_images/politica_y_estrategia_nacional_de_recursos_hidricos_ana.pdf).
- Bates, R., & Jackson, J. (1980). *Glossary of Geology*. 2nd Edition, American Geological Institute, Virginia.
- Baxter, M., Beardah, C., & Wright, R. (1997). "Some Archaeological Applications of Kernel Density Estimates". *Journal of Archaeological Science*.
- Bense, V., Gleeson, T., Loveless, S., Bour, O., & Scibek, J. (2013). *Fault zone*. *Earth-Science Reviews*, 127, 171–192. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01104.x>
- Bonilla Valverde, J., Stefan, C., Palma, A., Bernardo, E., & Pivaral, H. (2016). *Inventory of managed aquifer recharge schemes in Latin America*. Proceedings of 9th International Symposium on Managed Aquifer Recharge (ISMAR) 2016, Mexico City, Mexico.
- Bouwer, H. (2002). *Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering*. Hydrogeol. J.
- Budyko, M. (1958). *The Heat Balance of the Earth's Surface*. US Department of Commerce, Washington.
- Burbery, L., Flintoft, M., & Close, M. (2013). *Applications of the re-circulating tracer well test method to determine nitrate reaction rates in shallow unconfined aquifers*. *J. Contam. Hydrol.*
- Calver, A., Crooks, S., Jones, D., Kay, A., Kjeldsen, T., & Reynard, N. (2005). *National river catchment flood frequency method using continuous simulation*.

- Camacho, Z., Gómez, L., & Gallo, R. (2022). *Guía práctica de erosión hídrica. Casos de estudio: subcuenca Cumbaza y Yuracyacu - Amazonía peruana*. Environmental and Hydrologic Engineering S.A.C. <https://doi.org/https://sites.google.com/view/enhydro>
- Casanova, J., Pettenati, M., & Devau, N. (2016). *Managed Aquifer Recharge: An Overview of Issues and Options*. In: Jakeman, A.J., Barreteau, O., Hunt, R.J., Rinaudo, J.D., Ross, A. (eds) Integrated Groundwater Management. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_16)
- Ccasani, M. (2024). *Valorización Económica De Los Servicios Ecosistémicos Del Recurso Hídrico En La Cuenca Del Río Cachi, Huamanga, Ayacucho*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/6056>.
- Cikurel, H., Guttman, J., & Guttman, A. (2012). *Managed aquifer recharge for agricultural reuse in Shafdan, Israel*. Water Reclamation Technologies for Safe Managed Aquifer Recharge, London, UK.
- CONAGUA. (2003). *Norma oficial mexicana NOM-014-CONAGUA-2003. Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada*. México D.F. (México): Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/94219/NOM-014-CONAGUA-2003.pdf>.
- CONAGUA. (2016). *ATLAS DEL AGUA EN MÉXICO 2016*. México D.F. (México): Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). <https://agua.org.mx/biblioteca/atlas-del-agua-en-mexico-2016/>.
- CONAGUA. (2019). *Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Procesos avanzados con fines de reúso . Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS), libro 35*. México D.F. (México): Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro35.pdf>.
- Custodio, E., & Llamas, M. (1983). *Hidrología subterránea*. Ed. Omega.
- Davis, S. (1969). *Porosity and permeability of natural materials. Flow Through Porous Media*. R. J. M. De Wiest. Academic Press, New York.
- De La Cruz, F. (2022). Metales pesados en el agua y trucha de las piscigranjas ubicadas en el río Apacheta, Vinchos, Huamanga, Ayacucho.

- De La Orden, J. (2006). *Estudio de la recarga artificial en la plana de Gandía - Denia. Diseño de una instalacion a nivel industrial*. [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid].
- Del Águila, S. (2024). *Modelamiento hidrológico de cuencas andinas*. Fondo Editorial de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.  
<https://oficinas.unsch.edu.pe/vri/index.php/libros-unsch/>.
- Desmet, P., & Govers, G. (1996). *A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units*. *Journal of Soil and Water Conservation*.
- Dillon, P. (2005). *Future management of aquifer recharge*. *Hydrogeol. J.*
- Dillon, P., Pavelic, P., Page, D., Beringen, H., & Ward, J. (2009). *Managed Aquifer Recharge: An Introduction. Waterlines Report Series No 13. Canberra*.
- DINA MAR. (2010). *La gestión de la recarga artificial de Acuíferos en el Marco del Desarrollo Sostenible*. UNESCO-MAR Working Group, IGS-TH. Grafinat, Madrid.
- DINA MAR. (2017). *La recarga gestionada de acuíferos. Su estado del Arte*.  
<https://dinamar.tragsa.es/pdfs/1-Catedra%20Dal-Re.%2027nov2017.%20JAOG.pdf>
- DOF. (2009). *Norma Oficial Mexicana NOM-015-CNA-2009*. México, D.F.: Secretaría de Medio.
- Dumas , A. (2012). *Riesgo de Erosión Hídrica en la cuenca hidrográfica del Río Mundo (Tesis de maestría)*. [Tesis de Maestría, Universidad Complutense de Madrid, España]. Biblioteca Complutense. <https://hdl.handle.net/20.500.14352/46543>.
- Dupont, F. (2018). *Managed Aquifer Recharge (MAR), suitability maps and standardized suitability index, the casestudy of the Occitanie region (South France)*. International Groundwater Resources Assessment Centre, Wageningen University and Research.
- Escolero, O., Gutiérrez, C., & Mendoza, E. (2017). *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica*. En *Manejo de la Recarga de Acuíferos: Un Enfoque Hacia Latinoamérica*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Espinoza, M. (2015). *Caracterización del agua del rio Alameda y tipificación según índice de calidad del agua*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/1693>.
- Fattorelli, S., & Fernández, P. (2011). *Diseño Hidrológico*. Segunda edición. Zaragoza.

- Fenta, A., Kifle, A., Gebreyohannes, T., & Hailu, G. (2015). *Spatial analysis of groundwater potential using remote sensing and GIS-based multi-criteria evaluation in Raya Valley, northern Ethiopia*. Hydrogeology Journal, 23 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1198-x>
- Fernandez, A., Cordero, R., Villarroja, F., & García, M. (2006). *La recarga artificial de acuíferos: técnicas de divulgación y educación ambiental, en Tecnología y Desarrollo*. Vol IV.
- Folch, A. (2010). *Geological and human influences on groundwater flow systems in range range-and basin areas: the case of the Selva Basin (Catalonia, NE Spain)*. [Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Barcelona]. <https://hdl.handle.net/10803/3452>.
- Fondo de Agua para Lima y Callao – AQUAFONDO. (2019). *Amunas - Siembra de agua para Lima*. <https://aquafondo.org.pe/amunas/>
- Fu, B. (1981). *On the calculation of the evaporation from land surface*. Chinese Journal of Atmospheric Sciences.
- Fuentes, I., & Vervoort, R. (2020). *Site suitability and water availability for a managed aquifer recharge project in the Namoi basin, Australia*. J. Hydrol. (Amst.): Reg. Stud., 27. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100657>
- Gale, I. (2005). *Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas*. UNESCO IHP, Paris, France.
- Gale, I., Neumann, I., Calow, R., & Moench, M. (2002). *The Effectiveness of Artificial Recharge of Groundwater: a Review*. British Geological Survey Commissioned Report, CR/02/108N.
- Garciadiego, H., & Herreras, G. (2016). *Obtención de agua y conservación de suelos a través de la regeneración de cuencas*.
- González, M. (1991). *La ecuación universal de pérdidas de suelo. Pasado, Presente y futuro*. Ecología. [https://www.miteco.gob.es/es/parques-nacionales-oapn/publicaciones/ecologia\\_05\\_02\\_tcm30-100846.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/parques-nacionales-oapn/publicaciones/ecologia_05_02_tcm30-100846.pdf).
- González, R. (2005). *Vida Útil Ponderada de Edificaciones*. [Tesis de maestría, San Jose: Universidad Estatal a Distancia de Costa Rica].

- Guo, Y., Zhang, Y., Zhang, L., & Zhonggen, W. (2020). *Regionalization of hydrological modeling for predicting streamflow in ungauged catchments: A comprehensive review*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water. <https://doi.org/10.1002/wat2.1487>
- He, Y., Bárdossy, A., & Zehe, E. (2011). *A review of regionalisation for continuous streamflow simulation*. Hydrology and Earth System Sciences.
- Heath, R. (1982). *Basic groundwater hydrogeology*. U.S.: Geology Survey.
- Hengl, T. (2018). *Soil texture classes (USDA system) for 6 soil depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m*. OpenAIRE. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.2525817>
- Hobbs, B., & Meier, P. (2012). *Energy Decisions and the Environment: A Guide to the Use of Multicriteria Methods, International Series in Operations Research & Management Science*. Springer Science & Business Media.
- Hogue, T., Sorooshian, S., Gupta, H., Holz, A., & Braatz, D. (2000). *A multistep automatic calibration scheme for river forecasting models*. Journal of Hydrometeorology.
- Huallanca, K., & Toscano, R. (2019). *Aplicación del método “Índice de calidad de agua The National Sanitation Foundation – ICA NSF” en un tramo de la microcuenca de Huatatas, provincia de huamanga, departamento de Ayacucho*. [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana Unión]. <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/2169>.
- Ian, G. (2005). *Estrategias para la Gestión de la recarga de Acuíferos*. (1 ed.). [http://recharge.iah.org/recharge/downloads/MAR\\_Strategies\\_spanish.pdf](http://recharge.iah.org/recharge/downloads/MAR_Strategies_spanish.pdf) 35 p.
- Ian, S., Beekma, J., Kelleners, T., Boers, T., Chaudhry, M., & Van Dam, J. (1997). *Recharge from irrigated lands*. En Simmers, I. (editor), *Recharge of Phreatic Aquifers in (Semi-) Arid Areas*.
- IGME - Instituto Geológico y Minero de España. (2010). *Actividad 8: Selección e identificación de masas de agua donde es preciso plantear estudios y actuaciones de recarga artificial de acuíferos*. [http://info.igme.es/SidPDF/143000/464/143464\\_0000001.pdf](http://info.igme.es/SidPDF/143000/464/143464_0000001.pdf)
- IGRAC - International Groundwater Resources Assessment Center. (2019). *Recarga Artificial de Aguas Subterráneas en el Mundo*. <https://ggis.un-igrac.org/view/marportal/>
- INEI, Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). *Censos Nacionales 2017*. [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1539/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1539/libro.pdf).

- INGEMMET. (2024). *Geological, mining and energy information for Peru and the world*.  
<https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>
- INOWAS - Innovative Groundwater Solutions. . (2018). *MAR Methods*.  
<https://www.inowas.com/mar-methods/>
- Instituto Geográfico Nacional de España. (2023). *Compendios del Atlas Nacional de España*.  
[https://www.google.com/url?client=internal-element-cse&cx=001649875520509517946:xgta5bqepiq&q=http://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/ANE/Capitulos/03\\_3\\_Geomorfologia\\_2020\\_20230606.pdf&sa=U&ved=2ahUKEwi80dHJ64OIAxXZA7kGHXBmDw8QFnoECAkQAg&usg=AOvVaw3F](https://www.google.com/url?client=internal-element-cse&cx=001649875520509517946:xgta5bqepiq&q=http://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/ANE/Capitulos/03_3_Geomorfologia_2020_20230606.pdf&sa=U&ved=2ahUKEwi80dHJ64OIAxXZA7kGHXBmDw8QFnoECAkQAg&usg=AOvVaw3F)
- Itani, N., Harik, G., Alameddine, I., & El-Fadel, M. (2022). *Managed aquifer recharge in karstic systems: Site suitability mapping by coupling multi- multicriteria decision analysis with remote sensing and hydrologic modeling*. *Journal of Environmental Management*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116162>.
- Jensen, M. (1981). *Design and Operation of Farm Irrigation Systems. Monograph. No. 3*, ASAE, St Joseph, MI.
- JUDRA. (2022). *Junta de Regantes de la Región de Ayacucho – Área de Estadística. Ayacucho – Perú*.
- Kay, A., Jones, D., Crooks, S., Kjeldsen, T., & Fung, C. (2007). *An investigation of site-similarity approaches to generalisation of a rainfall-runoff model*. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*.
- Kowsar, S. (2011). *Flood water spreading and spate irrigation in Iran*. UNESCO-IHE.
- Krause, P., Boyle, D., & Båse, F. (2005). *Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment*. *Advances in Geosciences*.
- Lavado, W., Traverso, K., & Gutierrez, L. (2021). *ATLAS de Hidrología superficial del Perú: Una evaluación presente y futura*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). <https://hdl.handle.net/20.500.12542/1252>
- Lodwick, W., Monson, W., & Svoboda, L. (1990). *Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical informations systems: suitability analysis*. En t. J. Geogr. inf. Ciencia. <https://doi.org/10.1080/02693799008941556>
- 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.  
<https://doi.org/10.4995/raet.2018.7592>
- Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science, Advances in Geographic Information Science*. Springer-Verlag, Berlín Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4>
- Malczewski, J. (2006). *GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature*. En t. J. Geogr. inf. Ciencia. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>
- Maliva, R., & Missimer, T. (2011). *Aquifer storage and recovery and managed aquifer recharge using wells: planning, hydrogeology, design and operation*. Schlumberger Water Services. Methods in Water Resources Evaluation Series No. 2.
- Marwaha, N., Kourakos, G., Levintal, E., & Dahlke, H. (2021). *Identifying agricultural managed aquifer recharge locations to benefit drinking water supply in rural communities*. Water Resources Research. <https://doi.org/10.1029/2020WR028811>
- Masson, L., Guardia, F., Colte, J., & Ore, M. (1993). *Gestión del agua y crisis institucional tecnología intermedia*. (ITDG).
- Mendoza, Y. (2017). *Clasificación de tecnologías MAR*. En: Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Mijailov, L. (1985). *Hidrogeología*. Editorial Mir. Moscú, Rusia.
- MINAM - Ministerio del Ambiente. (2023). *Las Qochas: sistemas de recargas de agua en microcuencas altoandinas*. <https://www.minam.gob.pe/glaciares/historia-inspiradoras/las-qochas-sistemas-de-recargas-de-agua-en-microcuencas-altoandinas/>
- Molnar, P. (2011). *"Calibration"*. *Watershed Modelling, SS 2011*. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland. .
- Moncada, W. (2021). *Análisis del balance de masa para la evaluación del régimen hidrológico empleando técnicas de teledetección satelital y modelos hidrológicos – Caso estudio: Cabecera de la cuenca Cachi-Apacheta, Región Ayacucho*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/17546>. <https://doi.org/10.15381/rif.v23i2.20296>
- Morgan, R. (2005). *Soil Erosion and Conservation*. Environmental Conservation. <https://doi.org/10.1017/S0376892906272928>

- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., & Veith, T. (2007). *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations*. Transactions of the ASABE. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Mouelhi, S., Madani, K., & Lebdi, F. (2013). *A Structural Overview through GR(s) Models Characteristics for Better Yearly Runoff Simulation*. Open Journal of Modern Hydrology. <https://doi.org/10.4236/ojmh.2013.34022>
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006). *Linking stream flow to rainfall at the annual time step: The Manabe bucket model revisited*. Journal of Hydrology.
- Murray, R., van der Merwe, B., & van Rensburg, P. (2021). *Managing Aquifer Recharge: A Showcase for Resilience and Sustainability*. Zheng, Y., Ross, A., Villhoth, K., Eds.; UNESCO: Paris, France. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379962.locale=es>.
- NRMMC, E. NHMRC. (2009). *Australian guidelines for water recycling: managed aquifer recharge*. National Water Quality Management Strategy Document No. 24. Natural Resource Management Ministerial Council, Environment Protection and Heritage Council, and National Health and Medical Research Council. <https://www.waterquality.gov.au/sites/default/files>.
- ONU. (2005). *Abordar la escasez y la calidad del agua*. <https://es.unesco.org/themes/garantizar-suministro-agua/hidrologia/escasez-calidad>
- Pachauri, R., Meyer, L., Hallegatte, S., Bank, W., Hegerl, G., Brinkman, S., . . . Van Boxmeer., N. (2014). *Climate change 2014: synthesis report*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Parajka, J., Merz, R., & Blöschl, G. (2005). *A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters*. Hydrology and Earth System Sciences.
- Parker, S. (1984). *McGraw-Hill concise encyclopedia of science & technology*. McGraw-Hill.
- Pereda, A., Moncada, W., & Verde, L. (2018). *Respuesta nival de la cabecera de cuenca Cachi - Apacheta, región Ayacucho, frente a la variación de la temperatura*.
- Perzan, Z., Osterman, G., & Maher, K. (2023). Controls on flood managed aquifer recharge through a heterogeneous vadose zone: hydrologic modeling at a site characterized with surface geophysics. *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-27-969-2023>

- Poggio, L., De Sousa, L., Batjes, N., Heuvelink, G., Kempen, B., Ribeiro, E., & Rossiter, D. (2021). *SoilGrids 2.0: Producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty*. SOIL. 7. <https://doi.org/10.5194/soil-7-217-2021>
- Ponsin, V. (2014). *In situ biostimulation of petroleum hydrocarbon degradation by nitrate and phosphate injection using a dipole well configuration*. Journal of Contaminant Hydrology.
- Proyecto GESSAM. (2016). *Diagnóstico sobre gestión del agua y del ambiente en la microcuenca del río Cachi 2015*. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12543/4609>
- Rahman, M. (2010). *"A new spatial multi-criteria decision support tool for site selection for implementation of managed aquifer recharge*.
- Ramírez, M. (2003). *Hidrología Aplicada*. Universidad de Los Andes.
- Ramsar. (2007). *Glosario de términos empleados en el Marco estratégico y lineamientos para el desarrollo futuro de la Lista de Humedales de Importancia Internacional de la Convención sobre los Humedales*. (Ramsar, Irán, 1971).
- Ringleb, J., Sallwey, J., & Stefan, C. (2016). *Assessment of managed aquifer recharge through modeling—a review*. Water Resources Research. <https://doi.org/10.3390/w8120579>
- Rodríguez, D. (2013). *Análisis de la Técnica de Recarga Artificial en la Cubeta de Sant Andreu de la Barca (Barcelona)*. [Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://oa.upm.es/21593/>.
- Ross, A. (2022). *Benefits and Costs of Managed Aquifer Recharge: Further Evidence*. Fenner School of Environment and Society, Australian National University, Canberra 0200, Australia. <https://doi.org/10.3390/w14203257>
- Russo, S., Sillmann, J., & Fischer, E. (2015). *Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades*. Environ. Res. Lett. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124003>
- Rwasoka, D., Madamombe, C., Gumindoga, W., & Kabobah, A. (2013). *Calibration , validation , parameter indentifiability and uncertainty analysis of a 2 – parameter parsimonious monthly rainfall-runoff model in two catchments in Zimbabwe*. JOURNAL OF PHYSICS AND CHEMISTRY OF THE EAR. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.09.015>.
- Saaty, T. (1980). *The analytic hierarchy process mcgraw hill, New York*. Agric. Econ. Rev., 70.

- Sáenz, M. (2019). *Unidad Ejecutora FONDO SIERRA AZUL Proyectos de Inversión de Optimización de Siembra y Cosecha de Agua*.  
<https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/rediagro/2019/minagri-alcance/Cajamarca/servicios-sierra-azul.pdf>
- Sagarpa. (2009). *Ollas de agua, Jagüeyes, cajas de agua o aljibes*. Secretaria de Agricultura Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Sallwey, I., Bonilla, J., Vásquez, F., Junghanns, R., & Stefan, C. (2018). *Suitability maps for managed aquifer recharge: a review of multi-criteria decision analysis studies*. *Environ. Rev.*, 27 (2018). <https://doi.org/10.1139/er-2018-0069>
- Sallwey, J., Bonilla, J., Stefan, C., & Schlick, R. (2019). *Suitability Mapping for Managed Aquifer Recharge: Development of Web-Tools*. *Water* 11(11):2254.  
<https://doi.org/10.3390/w11112254>
- Sánchez, J. (2017). *Hidrología superficial y subterránea*. (Createspac).
- Santana, A. (2022). *Análisis de la oferta y demanda del uso del agua y sus efectos económicos a futuro de la presa Cuchoquesera en la región de Ayacucho – Perú 2022*. [Tesis de maestría, Universidad de Alcalá]. <http://hdl.handle.net/10017/53450>.
- Selvarani, A., Maheswaran, G., & Elangovan, K. (2016). *Identification of Artificial Recharge Sites for Noyyal River Basin Using GIS and Remote Sensing*. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1007/s12524-015-0542-5>
- Servicio Geológico Mexicano. (2021). *Hidrogeología*. <https://www.gob.mx/sgm/acciones-y-programas/programa-de-hidrogeologia>
- Shahab, A., Shihua, Q., Rad, S., Keita, S., Khan, M., & Adnan, S. (2019). *Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC method in the irrigated and coastal region of Sindh province, Pakistan*. *Nord. Hydrol*, 50 (2019).  
<https://doi.org/10.2166/nh.2018.001>
- Sharley, A., & Williams, J. (1990). *Erosion/Productivity Impact Calculator*. USA Department of Agriculture. Technical Bulletin.
- Sheahan. (1977). *Injection/Extraction Well System—A Unique Seawater Intrusion Barrier*. Ground Water.
- Shiklomanov, L. (1993). *World Freshwater Resources*. . In: Gleick, P.H., Ed. *Water in Crisis: A Guide to World's Freshwater Resources*, Oxford University Press, New York.

- Stefan, C., & Ansems, N. (2016). *Web-GIS of global inventory of managed aquifer recharge applications*. in: Proceedings of 9th International Symposium on Managed Aquifer Recharge (ISMAR9). Presented at the ISMAR9, June 20-24, 2016, Mexico City, Mexico.
- Stehr, A. (2008). *Análisis del comportamiento hidrológico y disponibilidad de agua, bajo escenarios de cambio climático, para dos subcuencas del río Biobío incorporando el impacto del aporte nival en la zona cordillerana*. [Tesis de Doctorado, Universidad de Concepción, Chile]. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/810>.
- Talozi, S., Alharahsheh, T., & Hamdan, I. (2023). *Selecting suitable sites for groundwater recharge in Jordan using the spreading techniques via the integration of multi-criteria decision analysis and geographic information system tools*. *Groundw. Sustain. Dev.* <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100948>
- Tovar, J., Sayan, J., Pérez, G., & Guzmán, A. (2006). *Estado del conocimiento de la hidrogeología en Perú*. *Boletín Geológico y Minero*. [https://www.igme.es/Boletin/2006/117\\_1\\_2006/Art.10.PDF](https://www.igme.es/Boletin/2006/117_1_2006/Art.10.PDF).
- Tuinhof, A., & Heederik, J. (2003). *Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage - Making Better Use of Our Largest Reservoir*. NNC-IAH. Netherlands National Committee for the IAH, Wageningen.
- Villanueva, M., & Iglesias, A. (1984). *Pozos y acuíferos*. IGME.
- Villón, M. (2002). *Hidrología*. Lima- Perú.
- Vörösmarty, C., Green, P., Salisbury, J., & Lammers, R. (2000). *Global water resources: vulnerability from climate change and population growth*. Institute for the Study of Earth, Oceans, and Space, Earth Sciences Department, University of New Hampshire.
- Vrugt, J., ter Braak, C., Clark, M., Hyman, J., & Robinson, B. (2008). *Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation*. *Water Resources Research*.
- Wayne, A. (1981). *Introduction to Artificial Ground Water Recharge (Nwwa/Epa Series)*. Natl Water Well Assn. Ada, Okla.
- Wischmeier, W., & Smith, D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses*. USDA Agr. Res. Ser Handbook.
- Zhang, L., Hickel, K., & Dawes, W. (2004). *A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration*. *Water Resources Research*.

- Zhang, L., Potter, N., Hickel, K., Zhang, Y., & Shao, Q. (2008). *Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework - Model development and testing*. *Journal of Hydrology*, 360(1-4). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.021>
- Zhang, Y., & Chiew, F. (2009). *Evaluation of regionalisation methods for predicting runoff in ungauged catchments in southeast Australia*. *Water Resources Research*.
- Zhang, Y., & Chiew, F. (2012). *Estimation of mean annual runoff across southeast Australia by incorporating vegetation types into Budyko framework*. *Australian Journal of Water Resources*. <https://doi.org/10.7158/13241583.2012.11465394>

## **ANEXOS**

**Anexo 1** Datos de precipitaciones mensuales de las estaciones meteorológicas usadas

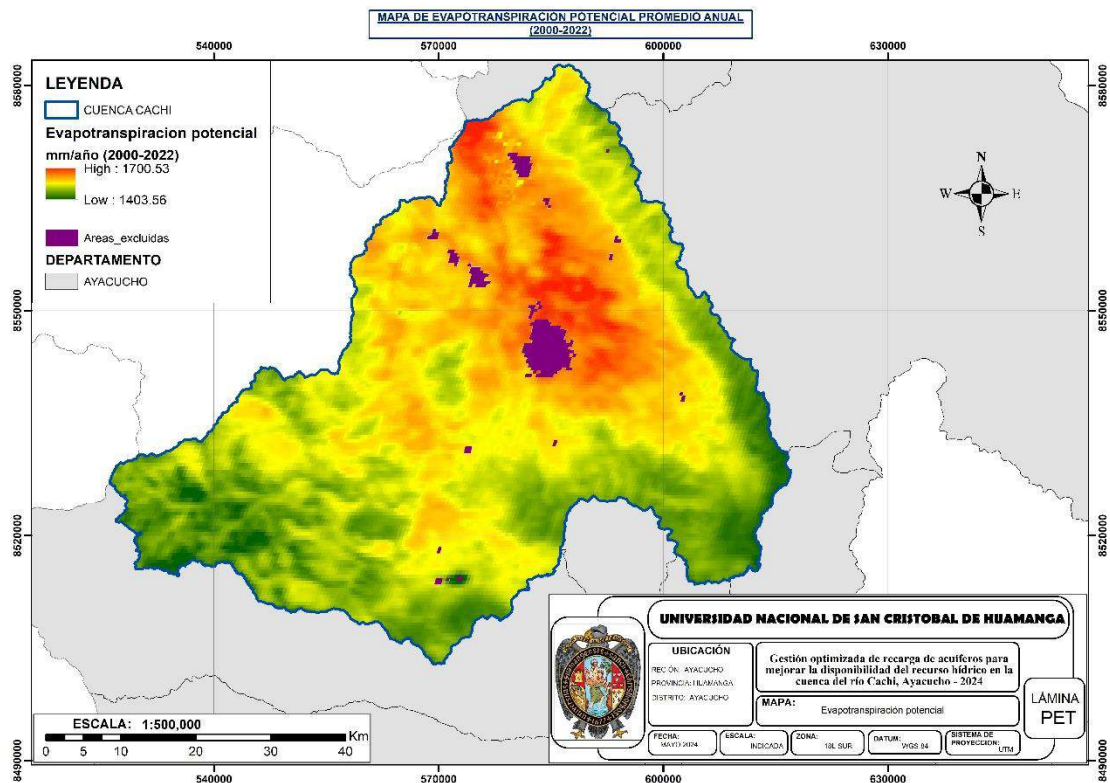
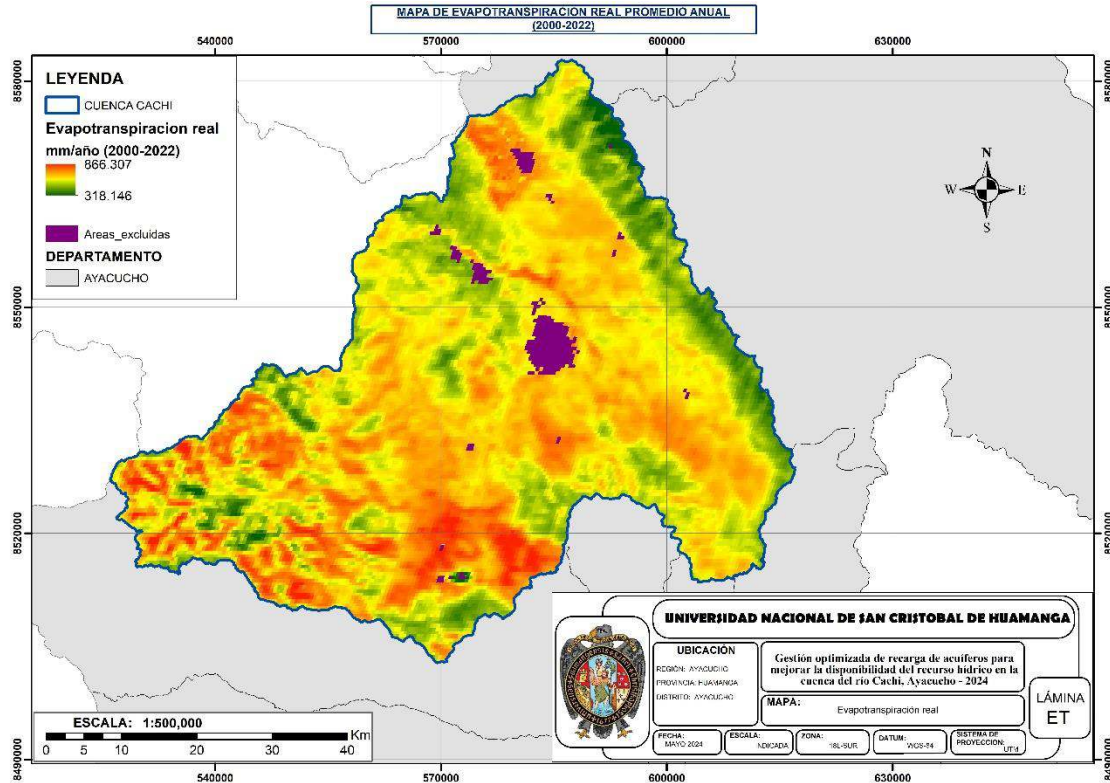
[https://docs.google.com/spreadsheets/d/1ZUOL1U-](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1ZUOL1U-Grkga50Pmv1fKcGtpFW_ZcK3X/edit?usp=sharing&oid=116834073161924147556&rtpof=true&sd=true)

[Grkga50Pmv1fKcGtpFW\\_ZcK3X/edit?usp=sharing&oid=116834073161924147556&rtpof=true&sd=true](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1ZUOL1U-Grkga50Pmv1fKcGtpFW_ZcK3X/edit?usp=sharing&oid=116834073161924147556&rtpof=true&sd=true)

**Anexo 2** Datos de monitoreos de calidad de agua en la cuenca Cachi.

[https://drive.google.com/drive/folders/1fyr0btM9CKKiibZMG6fu8YMLDvIx0TXz?usp=drive\\_1](https://drive.google.com/drive/folders/1fyr0btM9CKKiibZMG6fu8YMLDvIx0TXz?usp=drive_1)  
[ink](#)

**Anexo 3** Mapa de Evapotranspiración real y potencial media anual (2000-2022) obtenida a partir del sensor MODIS



**Anexo 4** Datos de estaciones hidrométricas en el ámbito de estudio.

**REGISTRO DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES (m3/seg)**

<b>ESTACION</b>	: PUENTE CHACCO	<b>REGION</b>	: AYACUCHO	<b>ALTITUD</b>	: 2,480 m.s.n.m
<b>RIO</b>	: CHACCO	<b>PROVINCIA</b>	: HUAMANGA	<b>LATITUD</b>	: 13°05'42" S
<b>CODIGO</b>	: 0131 - HIDROLOGICA	<b>DISTRITO</b>	: JESUS NAZARENO	<b>LONGITUD</b>	: 74°12'21" W
<b>CUENCA APORT.</b>	: 1,110.70 Km <sup>2</sup>	<b>CUENCA</b>	: RIO CHACCO	<b>REGISTRO</b>	: 1995-2003

<b>DIA</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>	<b>MED</b>
<b>1995</b>	9.900	30.100	29.100	10.400	3.100	1.670	1.420	1.320	1.300	0.798	1.469	1.582	<b>7.680</b>
<b>1996</b>	6.916	18.801	14.599	9.916	2.002	1.030	1.234	1.126	1.160	1.443	0.928	2.500	<b>5.138</b>
<b>1997</b>	13.788	12.501	20.393	2.558	1.971	1.795	1.944	2.436	2.905	2.461	3.898	3.927	<b>5.881</b>
<b>1998</b>	10.370	15.056	18.064	5.375	1.644	1.297	1.127	0.995	0.819	1.157	1.005	2.129	<b>4.920</b>
<b>1999</b>	6.564	22.496	26.764	7.648	2.570	1.612	1.468	1.091	1.195	1.213	1.847	2.567	<b>6.420</b>
<b>2000</b>	10.355	40.347	28.639	7.366	3.716	2.279	1.872	1.227	0.931	2.231	0.677	2.140	<b>8.482</b>
<b>2001</b>	6.043	4.762	8.747	8.323	2.383	0.926	0.899	0.475	0.384	1.980	1.800	2.400	<b>3.260</b>
<b>2002</b>	9.700	28.100	30.500	10.300	3.500	1.520	1.400	1.200	1.200	1.630	1.700	2.500	<b>7.771</b>
<b>2003</b>	14.956	89.569	93.186	31.576	6.223	2.005	1.420	1.330	1.500	1.640	1.810	2.500	<b>20.643</b>
<b>MED HIST</b>	<b>9.844</b>	<b>29.081</b>	<b>29.999</b>	<b>10.385</b>	<b>3.012</b>	<b>1.570</b>	<b>1.421</b>	<b>1.244</b>	<b>1.266</b>	<b>1.617</b>	<b>1.682</b>	<b>2.472</b>	<b>7.799</b>

\*\*\* FUENTE: EX PERC

\*\*\* RESPONSABLE: AYUM

\*\*\* SIN DATO O SIN REGISTRO (S/D)

**AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA**

**Análisis de Datos y Recursos Estadísticos del Agua - ANDREA**

<b>Estación</b>		<b>Apacheta</b>										
<b>Variable</b>		<b>Caudal Promedio Mensual (m<sup>3</sup>/s)</b>										
<b>Operador</b>		Estudio										
<b>WGS 84 Geográficas</b>		Latitud: -13.351017 / Longitud: -74.6473 / Altitud(msnm): 4162										
<b>Tipo</b>		Convencional / Hidrométrica										
<b>Ámbito Político</b>		Dpto: Huancavelica / Prov: Huaytara / Dist.: Pilpichaca										
<b>Ámbito Administrativo</b>		AAA: Mantaro / ALA: Ayacucho										
<b>Unidad Hidrográfica</b>		Cuenca Mantaro										
<b>Año</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
1994	4.95	7.19	7.29	3.75	1.42	0.69	0.51	0.41	0.45	0.44	0.91	0.83
1995	4.45	4.97	10.17	2	0.64	0.43	0.39	0.36	0.33	0.37	1.22	1.52
1996	5.63	8.45	5.71	5.88	1.22	0.69	0.49	0.47	0.45	0.38	0.47	1.69
1997	2.82	4.94	2.6	0.89	0.55	0.35	0.29	0.36	0.42	0.54	2.15	2.44
1998	5.96	4.39	3.05	3.1	0.75	0.46	0.37	0.37	0.36	0.54	1.17	1.66
1999	2.44	3.62	3.4	1.37	0.47	0.29	0.23	0.23	0.23	0.35	0.69	1.01
2000	5.47	8.6	7.35	2.19	1.13	0.68	0.53	0.52	0.41	1.22	0.46	1.17
2001	6.45	6.1	6.85	2.83	1.83	1.17	0.88	0.71	0.97	0.8	1.72	2.43
2002	2.62	3.88	3.64	1.47	0.5	0.31	0.24	0.25	0.24	0.37	0.74	1.08
2003	4.8	7.31	6.87	4.94	1.49	0.82	0.52	0.54	0.53	0.8	1.74	2.46
2004	4.23	6.27	5.89	2.38	0.81	0.49	0.4	0.4	0.39	0.6	1.2	1.75
2005	3.61	5.35	5.02	2.03	0.69	0.42	0.34	0.35	0.33	0.51	1.02	1.49
2006	4.11	4.82	3.14	2.01	1.25	0.67	0.4	0.5	0.5	1.01	1.35	1.49
2007	3.3	3.71	2.82	2.55	1.43	0.8	0.44	0.64	0.39	0.55	1.2	1.58
2008	3.91	5.41	3.96	3.2	1.17	0.55	0.35	0.55	0.94	0.98	1.13	1.55
2009	4.1	4.06	3.93	2.03	1.8	1.56	1.38	1.36	1.3	1.17	1.23	2.24
2010	5.43	5.72	3.29	1.18	2.11	0.97	0.48	1.82	0.44	0.5	1.51	1.11
2011	2.34	4.09	2.54	5.89	1.5	0.72	0.41	1.86	0.54	2.24	1.91	2.67
2012	2.69	1.72	1.95	3.72	1.42	0.78	1.87	1.82	0.59	1.84	0.88	1.38
2013	5.92	3.23	5.41	3.18	2.72	1.3	0.4	0.28	1.73	1.91	0.36	0.95
2014	3.6	4.02	3.01	3.13	1.2	0.43	0.36	0.49	0.98	1.08	1.7	0.7
2015	4.35	5.11	3.12	3.6	1.15	0.63	0.58	0.44	0.22	0.56	0.69	1.1
2016	1.86	5.38	2.59	2.02	1.1	0.53	0.12	0.2	0.29	0.52	0.84	1.71
2017	4.2	3.92	3.65	1.15	1.25	0.76	0.74	1	0.61	0.66	1.18	1.53

**AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA - ANA****Análisis de Datos y Recursos Estadísticos del Agua - ANDREA**

<b>Estación</b>	<b>Chicllarazo</b>											
<b>Variable</b>	<b>Caudal Promedio Mensual (m<sup>3</sup>/s)</b>											
<b>Operador</b>	Estudio											
<b>WGS 84 Geográficas</b>	Latitud: -13.449331 / Longitud: -74.466272 / Altitud(msnm): 3889											
<b>Tipo</b>	Convencional / Hidrométrica											
<b>Ámbito Político</b>	Dpto: Ayacucho / Prov: Huamanga / Dist.: Vinchos											
<b>Ámbito Administrativo</b>	AAA: Mantaro / ALA: Ayacucho											
<b>Unidad Hidrográfica</b>	Cuenca Mantaro											
<b>Año</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
1988	3.49	4.59	4.5	6.9	3.28	1.57	0.32	0.12	0.06	0.13	0.17	0.34
1989	3.32	4.59	5.47	3.85	0.8	0.55	0.27	0.3	0.2	0.33	0.46	0.22
1990	0.91	5.31	3.5	1.79	0.46	0.25	0.15	0.14	0.15	0.27	0.32	0.52
1991	2.38	5.48	3.36	2.09	0.78	0.44	0.13	0.1	0.15	0.22	0.33	0.25
1992	0.37	1.49	2.04	0.36	0.16	0.17	0.14	0.14	0.13	0.31	0.19	0.22
1993	2.37	3.94	6.44	2.67	1.17	0.53	0.61	0.2	0.19	0.67	2.95	6.01
1994	4.18	6.91	6.51	2.93	0.72	0.27	0.2	0.13	0.13	0.13	0.26	0.42
1995	2.67	2.81	6.97	1.8	0.35	0.19	0.17	0.13	0.15	0.15	0.31	0.88
1996	4.58	6.65	3.72	3.65	0.97	0.29	0.17	0.14	0.12	0.12	0.17	0.56
1997	2.25	5.71	3.24	0.73	0.32	0.21	0.17	0.27	0.35	0.36	0.84	2.13
1998	6.69	6.14	3.15	4.97	0.24	0.2	0.16	0.14	0.62	1.62	1.93	2.07
1999	2.08	9.19	7.06	4.75	1.27	1.47	0.21	0.14	0.15	0.54	0.23	0.88
2000	4.98	9.97	6.84	1.03	0.38	0.3	0.22	0.21	0.17	0.59	0.21	1.18
2001	5.12	3.1	3.67	1.15	0.8	0.29	0.22	0.15	0.2	0.37	0.7	1.44
2002	1.13	6.77	5.6	1.56	0.61	0.42	0.48	0.37	0.53	0.45	0.66	1.38
2003	7.71	10.16	10.88	2.53	0.66	0.34	0.38	0.24	0.16	0.25	0.42	1.23

**Anexo 5** Datos de licencias de agua vigentes otorgadas en la cuenca Cachi.

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1y-nFUGfLCO1VIKXX4N5wt51MRoLKUWLL/edit?usp=sharing&oid=116834073161924147556&rtpof=true&sd=true>



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**  
**Bach. VIKTOR GALILEO GIL SOSA**

**R.D. N° 274-2024-UNSCH-FCA-D**

En la ciudad de Ayacucho a los siete días del mes de octubre del año dos mil veinticuatro, siendo las dieciocho horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del Dr. Felipe Escobar Ramírez Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias; los miembros del jurado conformado por Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla, M.Sc. Eleazar Chuchón Angulo como asesor y el Ing. Vance Giorgio Fernández Huamán; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Gestión optimizada de recarga de acuíferos para mejorar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Cachi, Ayacucho - 2024**, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agrícola presentado por el Bachiller **VIKTOR GALILEO GIL SOSA**.

El señor Decano, previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invito a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberacion y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla	15	16	16	16
M.Sc. Eleazar Chuchón Angulo	18	15	17	17
Ing. Vance Giorgio Fernández Huamán	12	13	15	13
<b>PROMEDIO GENERAL</b>				<b>15</b>

Acto seguido se invita al sustentante y publico en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.

  
.....  
**Ing. Orlando Fidel Sulca Castilla**  
**Presidente**

  
.....  
**M.Sc. Eleazar Chuchón Angulo**  
**Asesor**

  
.....  
**Ing. Vance Giorgio Fernández Huamán**  
**Jurado**

  
.....  
**Mtro. Rodolfo Alca Mendoza**  
**Secretario Docente**



UNSCH

FACULTAD DE CIENCIAS  
AGRARIAS

## CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe coordinador responsable de la valoración y verificación de originalidad de los trabajos de investigación y de tesis de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, designado mediante la RCF N° 005-2024-UNSCH-FCA-CF; hace constar que el trabajo de tesis titulado;

### **Gestión optimizada de recarga de acuíferos para mejorar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Cachi, Ayacucho - 2024**

Autor : Viktor Galileo Gil Sosa  
Asesor : Eleazar Chuchón Angulo

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de investigación, aprobado mediante RCU N° 039-2021-UNSCH-CU, y RCU N° 1530-2023-UNSCH-CU, emitiendo un resultado de **veintitres (23 %)** de índice de similitud, realizado con **depósito de trabajos estándar**.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

**Nota:** Se adjunta el resultado con Identificador de la entrega: 2495867661

Ayacucho, 24 de octubre de 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DE  
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA  
Facultad de Ciencias Agrarias  
Dr. Yuri Gálvez Gastelú  
Coordinador de Control de originalidad de  
trabajos de investigación

# Gestión optimizada de recarga de acuíferos para mejorar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Cachi, Ayacucho - 2024

## INFORME DE ORIGINALIDAD

23%

INDICE DE SIMILITUD

24%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://www.imta.gob.mx">www.imta.gob.mx</a> Fuente de Internet	6%
2	<a href="http://oa.upm.es">oa.upm.es</a> Fuente de Internet	3%
3	<a href="http://repositorio.uach.mx">repositorio.uach.mx</a> Fuente de Internet	2%
4	<a href="http://repositorio.untumbes.edu.pe">repositorio.untumbes.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="http://dspace.univ-tlemcen.dz">dspace.univ-tlemcen.dz</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="http://idoc.pub">idoc.pub</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="http://repositorio.lamolina.edu.pe">repositorio.lamolina.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
8	<a href="http://tesis.pucp.edu.pe">tesis.pucp.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%

9	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	1 %
10	<a href="http://www.senamhi.gob.pe">www.senamhi.gob.pe</a> Fuente de Internet	1 %
11	<a href="http://cooperacion.org.pe">cooperacion.org.pe</a> Fuente de Internet	1 %
12	<a href="http://docplayer.es">docplayer.es</a> Fuente de Internet	<1 %
13	<a href="http://repositorio.ugto.mx">repositorio.ugto.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
14	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1 %
15	<a href="http://agua.org.mx">agua.org.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
16	<a href="http://aquafondo.org.pe">aquafondo.org.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
17	<a href="http://repositorio.usm.cl">repositorio.usm.cl</a> Fuente de Internet	<1 %
18	<a href="http://www.cazalac.org">www.cazalac.org</a> Fuente de Internet	<1 %
19	<a href="http://geotecniafacil.com">geotecniafacil.com</a> Fuente de Internet	<1 %

20	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	<1 %
21	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
22	ciga.pucp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
23	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
24	www.scielo.org.pe Fuente de Internet	<1 %
25	geocatmin.ingemmet.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
26	repositorio.unab.cl Fuente de Internet	<1 %
27	sswm.info Fuente de Internet	<1 %
28	www.u-cursos.cl Fuente de Internet	<1 %
29	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
30	repositorio.inia.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
31	Submitted to CONACYT	

<1 %

32

[repositorio.uchile.cl](http://repositorio.uchile.cl)

Fuente de Internet

<1 %

33

[nanopdf.com](http://nanopdf.com)

Fuente de Internet

<1 %

34

[repositorio.unap.edu.pe](http://repositorio.unap.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

35

[docero.mx](http://docero.mx)

Fuente de Internet

<1 %

36

[repositorio.unc.edu.pe](http://repositorio.unc.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

37

[web.siaa.unam.mx](http://web.siaa.unam.mx)

Fuente de Internet

<1 %

38

Submitted to Universidad de Medellin

Trabajo del estudiante

<1 %

39

[sigrid.cenepred.gob.pe](http://sigrid.cenepred.gob.pe)

Fuente de Internet

<1 %

40

[bdigital.unal.edu.co](http://bdigital.unal.edu.co)

Fuente de Internet

<1 %

41

[www.bvsde.paho.org](http://www.bvsde.paho.org)

Fuente de Internet

<1 %

42

[repositorio.uancv.edu.pe](http://repositorio.uancv.edu.pe)

Fuente de Internet

<1 %

43	<a href="http://repositorio.unasam.edu.pe">repositorio.unasam.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
44	<a href="http://www.gob.mx">www.gob.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
45	<a href="http://livrosdeamor.com.br">livrosdeamor.com.br</a> Fuente de Internet	<1 %
46	<a href="http://bibliotecadigital.udea.edu.co">bibliotecadigital.udea.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
47	<a href="http://www.ismar10.net">www.ismar10.net</a> Fuente de Internet	<1 %
48	<a href="http://www.slideshare.net">www.slideshare.net</a> Fuente de Internet	<1 %
49	<a href="http://repositorio.ana.gob.pe">repositorio.ana.gob.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
50	<a href="http://atlasnacional.ign.es">atlasnacional.ign.es</a> Fuente de Internet	<1 %
51	<a href="http://libros.cidepro.org">libros.cidepro.org</a> Fuente de Internet	<1 %
52	<a href="http://pdfcookie.com">pdfcookie.com</a> Fuente de Internet	<1 %
53	<a href="http://www.repositorio.usac.edu.gt">www.repositorio.usac.edu.gt</a> Fuente de Internet	<1 %
54	<a href="http://1library.co">1library.co</a> Fuente de Internet	<1 %

55 [vdocuments.es](http://vdocuments.es) Fuente de Internet <1 %

---

56 [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net) Fuente de Internet <1 %

---

57 [prezi.com](http://prezi.com) Fuente de Internet <1 %

---

58 AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE  
SOCIEDAD ANONIMA CERRADA - AMBIDES  
S.A.C.. "EIA-SD del Proyecto Infraestructura  
de Disposición Final de Residuos Sólidos No  
Municipales Peligrosos y No Peligrosos -  
Relleno de Seguridad La Joya-IGA0017851",  
R.D. N° 00037-2022-SENACE-PE/DEIN, 2022  
Publicación <1 %

---

59 [es.slideshare.net](http://es.slideshare.net) Fuente de Internet <1 %

---

Excluir citas Activo

Excluir bibliografía Activo

Excluir coincidencias < 30 words

**Gestión optimizada de recarga de acuíferos para mejorar la disponibilidad del recurso  
hídrico en la cuenca del río Cachi, Ayacucho – 2024**

Viktor Galileo Gil Sosa<sup>1</sup> viktor.gil.21@unsch.edu.pe

MSc. Eleazar Chuchón Angulo<sup>2</sup> eleazar.chuchon@unsch.edu.pe

Área de investigación: Medio ambiente

Línea de investigación: Hidrología, hidráulica, saneamiento, energía y cambio climático.  
riego y drenaje

**RESUMEN**

El presente trabajo de investigación se realizó con el objetivo de identificar y mapear la idoneidad de las distintas metodologías del Manejo de la Recarga de Acuíferos (MAR, por las siglas en inglés de *Managed Aquifer Recharge*) posibles a implementarse en la cuenca Cachi, una cuenca de montaña. Clasificando las diversas tecnologías existentes en relación a su mejor adaptación que respondería a las necesidades, potencialidad y desafíos para la cuenca en estudio. Se evaluó la necesidad de MAR como disponibilidad hídrica actual y futura en su distribución espacio temporal para la cuenca y la calidad de agua; la recargabilidad intrínseca del acuífero subyacente, la disponibilidad de agua para la recarga y el atractivo económico que representaría la ejecución del mismo. Los distintos criterios indicadores que engloban las evaluaciones fueron, cobertura vegetal, textura del suelo, pendiente topográfica, la escorrentía acumulada anual, transporte de sedimentos, la formación geológica, distancia a fallas, geomorfología, uso actual del suelo, densidad poblacional y la proximidad a las fuentes de agua. Esto se realizó con la utilización de la teledetección, análisis geoespacial y análisis de decisión multicriterio (MCDA, por las siglas en inglés de *Multi-criteria decision analysis*), de comparación por pares; de todos los criterios seccionados para la implementación de las cinco tecnologías MAR evaluadas en esta investigación. Se obtuvo que en relación a su viabilidad resultan en el siguiente orden: captación de agua de lluvia, pozos, distribución, modificación del cauce de arroyos y ríos, filtración. En el mapeo de idoneidad resultan en relación a aéreas de calificación superiores a alta en el siguiente orden: pozos, distribución, filtración, captación de agua de lluvia y modificación del cauce de arroyos y ríos.

**Palabras clave:** Gestión optimizada de acuíferos (MAR), análisis de decisión multicriterio (MCDA), cuenca de montaña, disponibilidad hídrica, análisis geoespacial, teledetección.

## **ABSTRACT**

The present research work was carried out with the objective of identifying and mapping the suitability of different Managed Aquifer Recharge (MAR) methodologies that could be implemented in the Cachi basin, a mountain basin. Classifying the various existing technologies in relation to their best adaptation that would respond to the needs, potentiality and challenges for the basin under study. The need for MAR was evaluated as current and future water availability in its spatial and temporal distribution for the basin and water quality; the intrinsic rechargeability of the underlying aquifer, the availability of water for recharge and the economic attractiveness of its implementation. The different indicator criteria encompassing the evaluations were vegetation cover, soil texture, topographic slope, annual accumulated runoff, sediment transport, geological formation, distance to faults, geomorphology, current land use, population density and proximity to water sources. This was done with the use of remote sensing, geospatial analysis and multi-criteria decision analysis (MCDA), pairwise comparison of all the criteria sectioned for the implementation of the five MAR technologies evaluated in this research. It was obtained that in relation to their feasibility they are in the following order: rainwater harvesting, wells, distribution, stream and riverbed modification, filtration. In the suitability mapping, in relation to areas of qualification higher than high in the following order: wells, distribution, filtration, rainwater harvesting and modification of the course of streams and rivers.

Key words: managed aquifer recharge (MAR), multi-criteria decision analysis (MCDA), mountain watershed, water availability, geospatial analysis, remote sensing.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las precipitaciones que cubren la superficie terrestre, parte de las cuales se infiltra hasta alcanzar los acuíferos, mantienen los flujos de agua en temporada de estiaje mediante una descarga lenta. En la cuenca del río Cachi, en la región Ayacucho, la disponibilidad hídrica es heterogénea en cantidad y calidad, agravada por el cambio climático, generando incertidumbre en la predicción de la disponibilidad y reposición natural de los recursos hídricos locales (Pachauri et al., 2014; Vörösmarty et al., 2000). Esto coloca a los habitantes de países en desarrollo en riesgo de sufrir escasez de agua, ya que la creciente demanda se satisface con un suministro estancado o en disminución. Los posibles impactos del cambio climático podrían hacer que la calidad del agua subterránea no sea viable para el uso previsto ya sea doméstico, agrícola, recreativo o industrial. La Recarga Gestionada de Acuíferos o en inglés *managed aquifer recharge* (MAR), es la recarga intencionada de agua a acuíferos para su posterior recuperación o beneficios ambientales. Por definición, MAR es la recarga artificial (a diferencia de la natural) de acuíferos con exceso de agua para obtener beneficios ambientales o para su posterior recuperación (Marwaha et al., 2021; Ringleb et al., 2016). Los acuíferos subterráneos son excelentes para almacenar el exceso de agua durante los años húmedos y sirven como valiosas reservas de agua durante los años secos (Dillon et al., 2009). Las fuentes naturales de agua para recarga son en su mayoría aguas superficiales de ríos y lagos o escorrentías interceptadas. En el MAR también se han utilizado efluentes de aguas residuales tratadas y aguas pluviales (Stefan y Ansems, 2016). Entre los diferentes tipos de estrategias de gestión de aguas subterráneas, la recarga gestionada de acuíferos (MAR) es popular debido a su bajo costo de implementación, baja pérdida por evaporación en comparación con los reservorios superficiales y su capacidad para infiltrar grandes volúmenes de agua de diferentes fuentes, incluidas aguas de ríos o arroyos, zonas urbanas. y escorrentía agrícola, y aguas residuales municipales tratadas (Dillon et al., 2009, Dillon, 2005). MAR puede cerrar la brecha entre la disponibilidad de agua durante el invierno y el riego durante los meses de verano o usarse para construir un recurso hídrico estratégico solo para uso durante los años de sequía. Una colección de estudios de casos de MAR de la UNESCO identificó que MAR aumenta la seguridad del suministro de agua, mejora los ecosistemas y puede lograrse a menos de la mitad del costo de las alternativas convencionales (Murray et al., 2021). MAR también se utiliza para reducir inundaciones y daños por inundaciones, aumentar el confort urbano, el valor de la tierra, reducir la salinidad de los acuíferos, mejorar el suministro de agua y aumentar los caudales ambientales

en las cuencas originales (Dillon et al., 2009). Las técnicas MAR difieren entre sí en construcción, operación y costos. La recarga artificial de los acuíferos puede ser directa, mediante pozos de inyección, o indirecta (superficial o subsuperficial) mediante la infiltración a través de la superficie de la tierra y difusión en el suelo, lo que proporciona un tratamiento adicional del agua antes de llegar al acuífero. Los requisitos de calidad del agua residual son evidentemente mucho mayores en los métodos de recarga directos que en los métodos de recarga indirectos (CONAGUA, 2003; CONAGUA, 2019). Ejemplos de técnicas MAR son: el método de dispersión (Gale et al., 2002), el método de modificación en el canal (Sallwey J. et al., 2019), el método de recarga de pozos, recolección de agua de lluvia y escorrentía (Gale et al., 2002), y filtración de banco inducida (Dupont, 2018). A pesar del creciente interés en la implementación de MAR, seleccionar sitios y métodos de MAR basados en atributos y condiciones de ubicación ha sido un desafío (Casanova et al., 2016; Dillon, 2005).

Las técnicas MAR varían en construcción y costos, desde recarga directa mediante pozos hasta recarga indirecta mediante infiltración en el suelo. La teledetección, junto con Sistemas de Información Geográfica (SIG), facilita la gestión y análisis de datos espaciotemporales en áreas extensas (Russo et al., 2015). Los SIG demuestran ser herramientas eficaces en los análisis de idoneidad de MAR. Los datos satelitales proporcionan información útil sobre factores que influyen en el movimiento del agua subterránea a través de los acuíferos. La integración de SIG y Análisis de Decisión con Criterios Múltiples (MCDA) es esencial para evaluar la idoneidad del MAR.

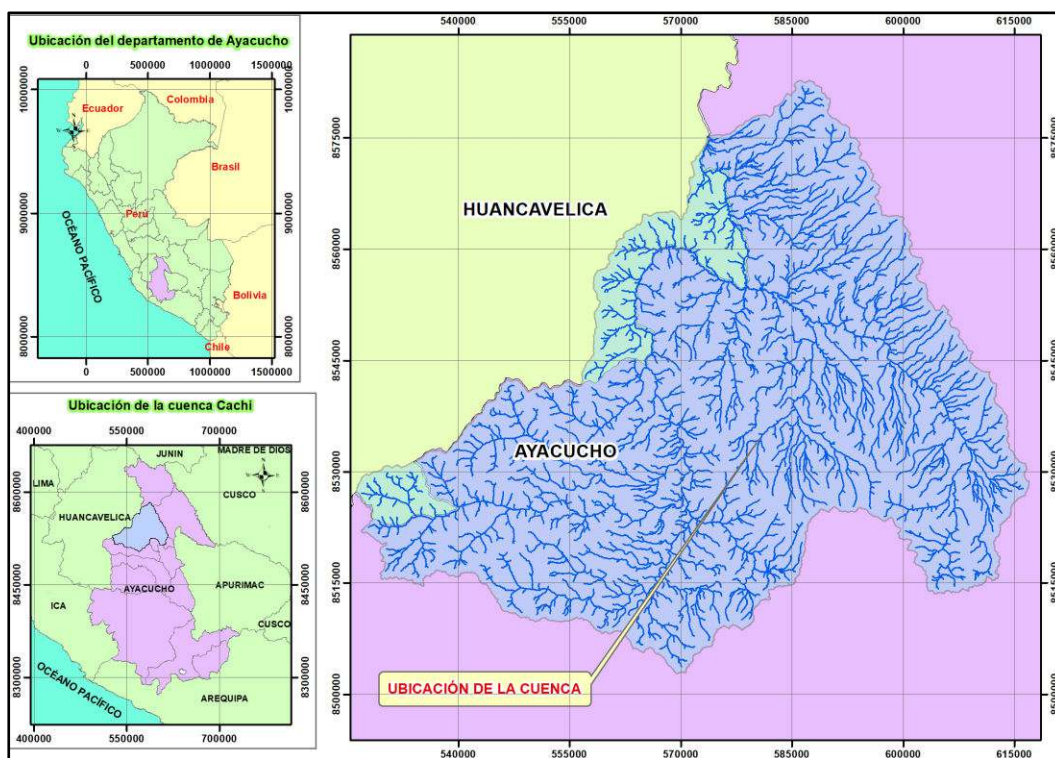
Este estudio investigó el potencial de la recarga artificial (MAR) con metodologías óptimas para manejar la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Cachi. Se seleccionaron diversas metodologías de recarga artificial y ubicaciones adecuadas según características físicas, hidrológicas, ecológicas y sociales de la cuenca, con la elaboración de un mapeo de idoneidad del MAR mediante SIG-MCDA.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Ubicación

El trabajo de investigación se realizó en la cuenca del río Cachi- Ayacucho. El área de estudio se encuentra ubicado en la región de Ayacucho y Huancavelica, geográficamente está comprendida en los paralelos  $12^{\circ}49'07''$  -  $13^{\circ}26'39''$  de Latitud Sur y los meridianos  $73^{\circ}55'12''$  -  $74^{\circ}45'34''$  de Longitud oeste, con altitudes de 2400 a 4465 msnm, con área de 3609.86 km<sup>2</sup>.

La cuenca hidrográfica y los indicadores de MAR evaluados, se rasterizaron en celdas de 25 m × 25 m. De esta manera, la cuenca Cachi quedó definida por un total de 5,793,600.00 celdas, cada una de las cuales se consideró un sitio potencial de MAR. Además, todos los datos se proyectaron al sistema de coordenadas WGS 1984 UTM Zona 18 S.



**Figura 1:** Ubicación y localización del trabajo de investigación.

### 2.2. Distribución de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Cachi y áreas más afectadas durante los periodos de estiaje.

#### 2.2.1. Balance oferta – demanda en la cuenca.

Así para realizar el balance oferta – demanda, actual sobre la cuenca, sin considerarse la variación de almacenamiento ( $\Delta S$ ) la ecuación del balance hídrico:

El balance oferta – demanda, queda expresado:

$$B_{ODi} = P_i - ET_i - D_i$$

Donde  $B_{ODi}$  es el balance en lámina de agua para la celda, exceptuando la variación del almacenamiento (mm/mes);  $P_i$  es la precipitación del mes en la celda (mm/mes);  $ET_i$  representa la evapotranspiración real en la celda (mm/mes) y  $D_i$  es la demanda hídrica para la celda (mm/mes)

#### **2.2.1.1. Precipitación en la cuenca:**

La precipitación se obtuvo a partir de 22 estaciones meteorológicas usadas alrededor y dentro de la cuenca.

- **Análisis y completación de datos:** utilización del programa de Hydraccess versión 7.01, en agrupación de estaciones similares y la generación del vector regional de las precipitaciones y la completación de datos dentro del periodo comprendido entre 1991 – 2018, en los respectivos meses de enero a diciembre para las distintas estaciones.
- **Extensión de datos:** La extensión de datos se realizó con la aplicación de HEC-4, tomando la agrupación de estaciones realizadas durante el proceso del análisis y completación de datos, el periodo de extensión de datos correspondió para el periodo de 2019 – 2022.
- **Generación de precipitación:** Superficie estimada mediante método de Kriging de la precipitación a partir de las estaciones alrededor y dentro de la cuenca dispersados con valores mensuales y anuales.

#### **2.2.1.2. Evapotranspiración en la cuenca:**

La Evapotranspiración real (ET) para la cuenca se obtuvo a partir de datos recolectados y generados por el sensor MODIS entre el año 2000 a 2022, en resolución de celda en 500mx500m, la ET alojado en MOD16, el algoritmo ET se basa en la ecuación de Penman-Monteith. La resistencia superficial es una resistencia efectiva a la evaporación de la superficie terrestre y a la transpiración del dosel de las plantas. La evapotranspiración de 8 días (0,1 mm/8 días o 0,1 mm/5 días) es la suma de la ET durante estos períodos de 8 días, procesados en forma mensualizada y anual en la plataforma de Google Earth Engine, para la cuenca en estudio.

#### **2.2.1.3. Demanda actual en la cuenca:**

La demanda actual sobre la cuenca se obtuvo a partir de datos procesados a partir de las licencias de uso de agua otorgadas por el ANA Mantaro hasta la fecha de enero de 2024.

Realizando una tabulación y delimitación independiente para los aforos descritos en las licencias, se obtuvieron las respectivas áreas de influencia directa de cada licencia otorgada, como paso

subsecuente se realizó la sumatoria e intersección de las mismas y a la laminación de los volúmenes concedidos en cada licencia, teniéndose como resultados la demanda totalizada en la cuenca expresadas en mm/año y mm/mes.

**2.2.2. Disponibilidad hídrica viable en la cuenca incluido la variación de almacenamiento ( $\Delta S$ ):**

Al no contarse con datos de acuíferos como el volumen, transmisividad, potencia, etc. La misma que está relacionado directamente con la capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA), siendo esta función de la cobertura vegetal, textura del suelo, pendiente; los cuales recargan los acuíferos subyacentes, estos a su vez función de las formaciones geológicas que la originan.

De donde podemos generar un mapa entre máxima y mínima capacidad de recarga de almacenamiento, en función a la ponderación y asignación de puntajes para cada una de las variables (capas) descritas anteriormente.

Finalmente, la disponibilidad hídrica viable en la cuenca expresada como puntajes, resulta de la sumatoria del balance y la CRA.

$$B_i = B_{OD} + f(P_{ma}, CRA)$$

Donde  $B_{OD}$  es el puntaje al balance en lámina de agua para la celda, exceptuando la variación del almacenamiento;  $B_i$  es la disponibilidad hídrica viable expresada como puntaje;  $f(P_{ma}, CRA)$  es la capacidad de recarga del acuífero subyacente expresado como puntajes.

Así: El puntaje para  $B_{OD}$  se asignó linealmente con 100 para el valor mínimo y con 0 para el máximo, el resto de valores dentro de este intervalo (Tabla 1).

El valor de  $f(P_{ma}, CRA)$ , resulta de la suma de los puntajes multiplicados por los pesos asignados (ponderación) a cada una de las capas descritas (Cobertura vegetal, textura del suelo, pendiente topográfica, hidrogeología) en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Puntaje en relación a la disponibilidad hídrica de la oferta - demanda.

Clasificación	Disponibilidad Oferta-Demanda			Disponibilidad hídrica viable	
	Valor		Puntaje	Puntaje	
	Mensual	Anual		Mensual	Anual
Mínimo	-80.44	-965.33	100	200	200
Muy bajo	-51.88	-622.61	80	160	160
Bajo	-23.32	-279.89	60	120	120
Regular	5.24	62.83	40	80	80
Bueno	33.8	405.56	20	40	40
Muy bueno	62.36	748.28	0	0	0

## **2.3. Oportunidades y desafíos asociados con la implementación de técnicas de recarga artificial en la cuenca del río Cachi.**

### ***2.3.1. Disponibilidad del recurso hídrico***

De los datos obtenidos de la disponibilidad hídrica del balance de la oferta y demanda anual para la cuenca, reclasificamos el ráster según las puntuaciones asignadas, consecuentemente vectorizarlo y obtener las áreas correspondientes a cada clasificación, esto con el objeto para describir el estado actual del balance a nivel de área en la cuenca.

### ***2.3.2. Calidad de las fuentes de agua***

Basado en los datos de los últimos ocho monitoreos de calidad de los recursos hídricos en la Unidad Hidrográfica Mantaro, realizados por la ANA entre el 2019-III y el 2023-I bajo la categoría ECA-3, y de acuerdo con la investigación de Alam et al. (2021), se identificaron parámetros y contaminantes según su riesgo en la implementación de MAR. Estos parámetros se detectaron en diferentes monitoreos. Se mapearon los puntos correspondientes en la cuenca y se relacionaron con las áreas afectadas, teniendo en cuenta sus fuentes de agua y la clasificación utilizada para decidir el tratamiento.

### ***2.3.3. Uso actual de suelos y densidad poblacional***

En relación al uso actual de suelos Ministerio del Ambiente y la población de los centros poblados (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2017), en estos criterios las zonas urbanas quedan excluidas, las zonas más pobladas y de uso agropecuario resultarían en instalaciones más costosas en la implementación de MAR, principalmente asociado al costo de los terrenos, control y mitigación de los espacios por actividades que podrían contaminar las fuentes hídricas a recargar. El Kernel es usualmente una probabilidad simétrica de función de densidad (Baxter et al., 1997). La densidad de probabilidad Kernel, se ajustó para determinar la densidad poblacional con respecto al área circundante a cada centro poblado dentro de la cuenca, y así determinar la influencia de la población en relación a cada centro poblado y su entorno, donde se ajustó la influencia para cada centro poblado una banda de 2 kilómetros.

### ***2.3.4. Demanda futura del recurso hídrico***

El recurso hídrico en el tiempo experimentará una mayor demanda, así como a la contaminación; esto directamente relacionado con el aumento de la población y las actividades que en consecuencia suponen ello, para cubrir las necesidades de la población venidera.

La proyección de la demanda futura se basará en 20 años, como generalmente se estima la vida útil de una infraestructura.

#### **2.3.4.1. Para la demanda de consumo poblacional:**

Se tomó para la cuenca la tasa de crecimiento poblacional referente a la provincia de Huamanga al ser la que ocupa en mayor área en relación al total de la cuenca.

Esto se aplicó para todas las licencias de consumo poblacional, para usar la metodología de estimación de la demanda actual en la cuenca.

#### **2.3.4.2. Para la demanda del sector agrícola:**

Santana (2022) menciona que las áreas de cultivos empadronados en el sistema de riego Cachi, hasta el año 2020 y proyectados hasta el 2022 tienen un incremento anual del 4%; el cual se toma como valor promedio para la cuenca en general, al ser el sistema hidráulico que cubre la mayor parte de la cuenca Cachi y ser el más representativo para esta. Esto se aplicó para todas las licencias del sector agrícola en la cuenca.

En el cálculo de la demanda futura poblacional y agrícola, se usó el método aritmético, por ser el método que se ajusta para el ámbito, utilizando la expresión:

$$Df = Da \times (1 + r \times t/100)$$

Donde Df es la demanda futura, Da es la demanda actual; r es la tasa de crecimiento 2.5% y 4%, uso poblacional y agrícola respectivamente y t son los años (20).

#### **2.3.5. Información y data sobre los acuíferos existentes**

La información respecto a los acuíferos y su caracterización es nula o casi nula en la cuenca, esto contrastado a partir de los acuíferos inventariados por el ANA en el Perú. No se cuenta con estudios de la capacidad, la transmisividad, la potencia, la calidad, y tampoco existe perforaciones donde se mida el nivel piezométrico de los mismos.

Entonces para la evaluar la implementación de MAR, se apoya de otras variables que determinan la composición de los acuíferos, como son las fallas geológicas, formaciones geológicas, hidrogeología y geomorfología.

#### **2.3.6. Pendiente topográfica en la cuenca**

Al ser una cuenca de montaña, la pendiente resulta una variable y característica muy importante a considerar, para analizar la implementación de MAR, así las pendientes calculadas mediante la herramienta “Slope” en ArcGIS, aplicados para el DEM en GeoTIFF de la plataforma de

LandViewer, de resolución de celda de 25m. La clasificación de las pendientes correspondió a los usados para el método racional descritos por Ramírez (2003).

#### **2.3.6.1. Nivel de conocimiento y tecnología**

El Fondo Sierra Azul (entidad que formula, ejecuta y supervisa proyectos e inversiones de siembra y cosecha de agua para uso agrario a nivel nacional. Pertenece al MIDAGRI y cuyo objetivo es incrementar la seguridad hídrica agraria a través de la Siembra y Cosecha de Agua a nivel de cabecera de cuenca, garantizando la sostenibilidad de la oferta hídrica en las zonas altoandinas, y depende del viceministerio infraestructura agraria y riego.) (Sáenz, 2019), el cual cumple y realiza labores de MAR en los últimos 6 años, las estructuras implementadas solamente responden a la técnica de interceptar agua y la tecnología de captación de agua de lluvia. En el resto de las tecnologías existentes, su desarrollo y experiencia en la cuenca es inexistente.

#### **2.3.6.2. Objetivo del MAR**

Entre las distintas tecnologías existentes cada una ofrece y resulta en características del agua tras la recarga, principalmente las físico - químico de la misma. Así el objetivo del MAR es el determinante en la elección de la tecnología a implementar.

Para el Perú, así como la cuenca en estudio, los proyectos existentes de la tecnología MAR Captación de agua de lluvia, tienen por objetivo principal de mejorar el almacenamiento del recurso hídrico (recarga de acuíferos, beneficios ecológicos), mas no así su tratamiento (calidad del agua). En el portal de MAR brindado por el IGRAC, los objetivos de MAR registrados en el Perú corresponden a beneficios ecológicos (*Ecological benefits*), gestión física de acuíferos (*Physical aquifer management*) y otros beneficios (*other benefits*).

#### **2.3.6.3. Costo del agua recargada**

El costo del agua recarga, determina en gran parte el tipo de tecnología a implementar. Como en cualquier proyecto, la viabilidad de la instalación del MAR, responde a un análisis de costo - beneficio. Los costos en referencia usados corresponden a los descritos por (Ross, 2022).

Para determinar el costo de metro cúbico de agua recargada ejecutados por el programa de Fondo Sierra Azul (Tabla 2), se consideró la vida media de 35 años (González, 2005) de las cochas y sumados los S/. 50,000.00 del costo de mantenimiento posterior a la ejecución.

**Tabla 2:** Costo en soles por metro m<sup>3</sup> (año 2023) de agua recargada proyectos ejecutados por el Fondo Sierra Azul dentro del ámbito de influencia de la cuenca Cachi.

	Costo Soles	Área recarga (Ha)	Volumen de embalse (m <sup>3</sup> )	Área beneficiada (Ha)	Costo Soles/m <sup>3</sup>
Promedio	178,402.42	24.67	21,245.26	6.08	0.66

De la Tabla 2, el promedio de costo de agua recargada de los proyectos del Fondo Serra Azul es de S/. 0.66, y el costo del agua recargada calculado por (Ross, 2022) es de S/. 0.84 (0.24 USD - año 2016) proyectos MAR de características similares promedio en el mundo.

#### 2.3.6.4. Desempeño de las estructuras de recarga

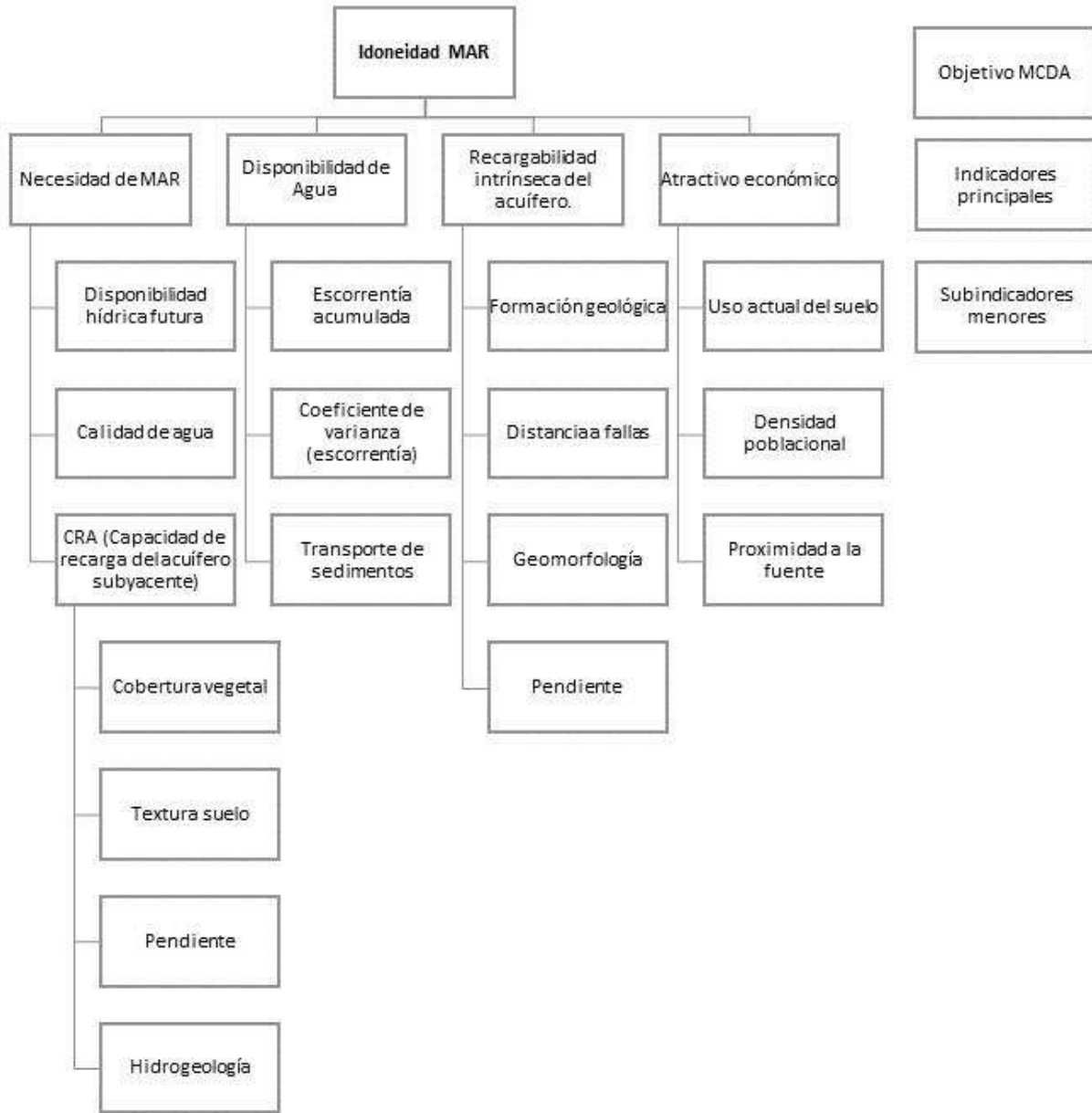
Entre las dos técnicas (infiltrar agua, interceptar agua), las 5 tecnologías de recarga existentes responden a diferentes escenarios. Como características del medio físico, de la fuente de agua a recargar y del objetivo del MAR donde (Alam et al., 2021), describe el desempeño de las técnicas MAR.

#### 2.4. Mapeo de idoneidad para los métodos de Recarga Gestionada de Acuíferos (MAR) en función de atributos y condiciones específicas en la cuenca del río Cachi.

Se realiza la selección efectiva de los sitios para MAR mediante análisis de decisiones multicriterio (MCDA).

La combinación lineal ponderada (WLC) y el proceso de jerarquía analítica (AHP) (Malczewski, 2006; Malczewski y Rinner, 2015) se utilizan comúnmente en MCDA geoespacial. El WLC es una suma ponderada aditiva y se utiliza con mayor frecuencia debido a su simplicidad. Similar al WLC, el AHP (Saaty, 1980) es un proceso WLC utilizado con frecuencia; pero puede incorporar múltiples niveles dentro de una jerarquía, lo que permite incluir indicadores mayores y subindicadores menores (Fuentes y Vervoort, 2020; Malczewski y Rinner, 2015). Proporciona un medio para dirigir la atención del tomador de decisiones hacia el establecimiento de una estructura adecuada que capture los componentes y subcomponentes importantes junto con sus interacciones. Por lo tanto, el AHP se utilizó en este estudio para mapear la idoneidad multidimensional del MAR para la cuenca utilizando los cuatro indicadores que contribuyen a ello (necesidad de MAR, disponibilidad de agua, recargabilidad intrínseca del acuífero y atractivo económico). Para cada indicador principal, se definieron varias ramas que representan subcriterios o indicadores menores (Figura 2). Los subindicadores complejos también podrían tener ramas de criterios subyacentes (Malczewski y Rinner, 2015).

El objetivo del AHP es la estimación del valor de idoneidad en el nivel más alto de la jerarquía, para cada sitio a lo largo de la cuenca. Esto requiere estimar ponderaciones para todos los componentes de la jerarquía y asignar puntuaciones a los todos indicadores de idoneidad en la base del proceso, estos datos se plasmarán en el mapa de idoneidad del MAR (Itani et al., 2022).



**Figura 2:** Estructura jerárquica para la idoneidad del sitio de recarga gestionada de acuíferos.

### 2.4.1. Asignación de peso.

Los métodos populares para la asignación de ponderaciones en MCDA geoespacial incluyen los métodos de clasificación y calificación, como la lógica booleana y difusa, el factor de influencia múltiple y los métodos de comparación por pares. Si bien los métodos de clasificación y

calificación se encuentran con mayor frecuencia en la literatura temprana, la comparación por pares es actualmente el método más comúnmente utilizado en MCDA geoespacial y es necesaria en AHP (Sallwey I. et al., 2018; Malczewski y Rinner, 2015; Malczewski, 2006; Saaty, 1980).

El método de asignación de ponderaciones es la comparación por pares y es actualmente el método más comúnmente utilizado en MCDA geoespacial y es necesaria en proceso de jerarquía analítica (AHP). El método determinará la matriz de comparación C para un número n de indicadores dentro de la misma categoría principal. La matriz es n por n (Tabla 3).

**Tabla 3:** Matriz AHP para comparación por pares y cálculo de ponderación para un conjunto de cuatro indicadores.

<b>Indicador</b>	<b>I<sub>1</sub></b>	<b>I<sub>2</sub></b>	<b>I<sub>3</sub></b>	<b>I<sub>4</sub></b>	<b>Peso</b>
I <sub>1</sub>	C <sub>11</sub> =1	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>14</sub>	<b>W<sub>1</sub></b>
I <sub>2</sub>	C <sub>12</sub> <sup>-1</sup>	C <sub>22</sub> =1	C <sub>23</sub>	C <sub>24</sub>	<b>W<sub>2</sub></b>
I <sub>3</sub>	C <sub>13</sub> <sup>-1</sup>	C <sub>23</sub> <sup>-1</sup>	C <sub>33</sub> =1	C <sub>34</sub>	<b>W<sub>3</sub></b>
I <sub>4</sub>	C <sub>14</sub> <sup>-1</sup>	C <sub>24</sub> <sup>-1</sup>	C <sub>34</sub> <sup>-1</sup>	C <sub>44</sub> =1	<b>W<sub>4</sub></b>

#### 2.4.2. Puntuación.

Se asignó una puntuación a cada indicador en base a la jerarquía presentada para cada pixel (Figura 2). Luego las puntuaciones individuales se utilizaron para calcular el valor final de idoneidad, los valores asignados oscilaron entre 0 y 100, asignando 100 al valor más adecuado y cero para el valor más desfavorable.

Tenga en cuenta que, dado que las puntuaciones asignadas a los subindicadores se definieron en una escala común (0 a 100), asumir ponderaciones iguales entre los indicadores indicaría la misma importancia de los elementos de la jerarquía; mientras que asignar un mayor peso a un indicador significa otorgar mayor importancia a ese factor (Hobbs y Meier, 2012).

#### 2.4.3. Indicadores MAR.

##### 2.4.3.1. Necesidad de MAR:

El índice de necesidad de MAR ( $I_{nm}$ ) para la cuenca expresará la variabilidad en la misma, debido a que existen zonas que son prioridad y se encuentran bajo una gran demanda del recurso hídrico, esto en función de la disponibilidad hídrica futura, la calidad de aguas y la capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA).

$$I_{nm} = aD + bG + cCRA$$

Donde a, b y c son factores de ponderación asignados a cada criterio (sin unidades); D, G y CRA son puntuaciones de criterios de disponibilidad hídrica futura, calidad de agua y capacidad de recarga del acuífero subyacente, respectivamente.

Además, CRA (capacidad de recarga del acuífero subyacente) queda definido como un subindicador.

$$CRA = dV + eT + fS + gH$$

Donde d, e, f y g son factores de ponderación asignados a cada criterio (sin unidades); V, T, S Y H son puntuaciones de cobertura vegetal, textura de suelo, pendiente e hidrogeología, respectivamente.

- **La disponibilidad hídrica futura (B<sub>if</sub>):** Se tomó lo calculado en el apartado 2.3.4.
- **La calidad del agua:** se tomó lo obtenido de la sección 2.3.2.

Para la cuenca de estudio la mayor área corresponde a una calidad baja y de implementación de MAR no recomendado en más de 50% de esta. La asignación de puntajes depende de cada tecnología MAR a usarse. Dado que los datos e información de calidad son limitados y deficientes, además de no ser objetivo principal de la recarga para la zona de estudio, el peso asignado se tomó como menor.

- **La capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA):** se calculó previamente en el apartado 2.2.2

#### 2.4.3.2. Disponibilidad de agua:

La disponibilidad de agua representa para la cuenca la cantidad de agua como escorrentía sin incluir el flujo base, disponible para MAR y el transporte de sedimentos asociados a este.

$$I_{wa} = jE + kC + lU$$

Donde  $I_{wa}$  es el índice de disponibilidad de agua calculado para cada celda de la cuadrícula (sin unidades). j, k y l son factores de ponderación asignados a cada criterio (sin unidades); E es la puntuación de la profundidad del agua disponible para recarga y se basa en la escorrentía acumulada anual promedio de 23 años (sin unidades), C es la puntuación que se basó en el coeficiente de varianza (CV) calculado con base en las escorrentías anuales acumuladas durante los mismos 23 años. U son puntuaciones de transporte de sedimentos hallados en la cuenca.

- **Escorrentía acumulada (Modelamiento hidrológico):**

Para el estudio se emplearon modelos hidrológicos agregados de escala anual, como el GR1A (Mouelhi et al., 2006) y el modelo de un parámetro de Fu (Zhang y Chiew, 2012), descartando el

modelo de Budyko (1958) debido a su mal ajuste en las cuencas regionalizadas. Solo se consideró la escorrentía viable para la implementación de MAR. El modelo seleccionado sigue las indicaciones del libro de (Del Águila, 2024), donde se destaca que el modelo GR2M muestra un buen ajuste, y Mouelhi et al. (2013) señala que el GR1A, un modelo anual, se adapta mejor incluso que modelos de mayor resolución como el GR2M o GR4J, agregando sus salidas a un paso temporal anual.

Se promediaron los caudales simulados de los modelos GR1A y Fu de un parámetro, los cuales fueron regionalizados mediante la regresión de parámetros a partir de las estaciones de aforo de Chacco, Chicllarazo y Apacheta, previamente calibradas. Posteriormente, los caudales simulados se distribuyeron espacialmente en la cuenca utilizando la herramienta de acumulación de flujo, ponderada por la inversa del índice de aridez (AI). Los cursos de agua generados fueron validados a través del algoritmo de acumulación de flujo, contrastándolos con los ríos inventariados por la ANA y el flujo acumulado general.

Para los indicadores de escorrentía acumulada, se asignó una puntuación de 100 al píxel con el mayor caudal anual promedio acumulado ( $106 \text{ m}^3$ ), aplicable a un sistema MAR, excepto para la metodología de captación de agua de lluvia, donde se fijó un límite de  $2 \times 10^5 \text{ m}^3$  basado en proyectos previos del Fondo Sierra Azul. La celda con menor escorrentía recibió un valor de cero. En cuanto al coeficiente de varianza (CV) de los caudales, se asignó una puntuación de 0 cuando el CV era 100 y una puntuación de 100 cuando el CV fue 0, aunque la variabilidad de este valor dentro de la cuenca fue bastante estrecha. Para el transporte de sedimentos (U), calculado mediante el método RUSLE, se puntuó con 0 al valor máximo y 100 al valor mínimo.

Los valores de E y C para los píxeles fuera de la red fluvial se asignaron a la celda más cercana en la red fluvial, estableciendo un límite de distancia para las tecnologías de modificación del cauce de arroyos y ríos y de filtración, con un margen de 300 metros según Talozzi et al. (2023). Este proceso se realizó utilizando la asignación euclidiana para transferir la profundidad de la escorrentía acumulada (promedio anual de 23 años) desde las celdas del río a otras celdas de la cuenca, en función de la distancia. Esta excepción no se aplicó a la tecnología de captación de agua de lluvia, donde las puntuaciones se realizaron para las celdas de acumulación de flujo, asumiendo que el agua permanece in situ. De manera similar, el CV para cada celda también se asignó utilizando la asignación euclidiana. Toda la asignación euclidiana se realizó con la herramienta Spatial Analyst en ArcGIS 10.8.2.

#### **2.4.3.3. Recargabilidad intrínseca del acuífero:**

La recargabilidad intrínseca del acuífero está asociada al medio físico por el que circulará el agua producto de MAR. La recargabilidad intrínseca, para la cuenca expresará la variabilidad en la misma, debido a la gran variabilidad asociada a este como respuesta a las variables descritas a continuación.

$$I_{rt} = m(FG) + n(DF) + o(GM) + pS$$

Donde  $I_{rt}$  es el índice de recargabilidad intrínseca del acuífero calculado para cada celda de la cuadrícula (sin unidades).  $m$ ,  $n$ ,  $o$  y  $p$  son factores de ponderación asignados a cada criterio (sin unidades);  $FG$  es la puntuación de cada formación geológica existente disponible y se basa en la capacidad posible de esta en permitir el almacenamiento y la circulación del agua subterránea sobre este,  $DF$  es la puntuación que se basó en proximidad de la instalación MAR respecto a las fallas geológicas, calculado con la distancia euclidiana en metros entre cada píxel y la falla más cercana.  $GM$  son puntuaciones asignadas a cada unidad geomórfica existente en la zona de estudio, en relación a su potencialidad para la presencia y recarga de aguas subterráneas.  $S$  es la pendiente con puntuaciones inversamente proporcional a la pendiente, así a mayor pendiente, mayor será la escorrentía y, por tanto, menor será la recarga de aguas subterráneas.

#### **2.4.3.4. Atractivo económico:**

El índice de atractivo económico ( $I_{ae}$ ) para la cuenca expresará el coste relativo de una posible instalación MAR, y es la suma de las puntuaciones y ponderaciones para los indicadores descritos.

$$I_{ae} = qUs + rDp + tPf$$

Donde  $q$ ,  $r$  y  $t$  son factores de ponderación asignados a cada criterio (sin unidades);  $Us$ ,  $Dp$  y  $Pf$  son puntuaciones de criterios de uso actual del suelo, densidad poblacional, y proximidad a la fuente, respectivamente. El indicador  $Us$ , contribuye al atractivo económico del MAR, ya que el costo del terreno representa de manera importante a los costos generales del proyecto de recarga. La  $Dp$ , expresa la influencia de la población en relación al área que ocupa, el coste de los terrenos, y el riesgo de la implementación de MAR, asociados al vandalismo y posibles fuentes de contaminación. La proximidad del sitio de recarga a la fuente  $Pf$  de agua se calculó con base en la distancia euclidiana. Los sitios alejados del río se ven así penalizados, dado el costo adicional necesario para trasladar el agua del río. Las distancias euclidianas calculadas se calificaron linealmente (Malczewski y Rinner, 2015) para garantizar que las puntuaciones asignadas oscilaran entre 0 y 100.

#### **2.4.4. Análisis de sensibilidad.**

En el análisis de idoneidad geoespacial, donde es difícil y costoso recopilar información sobre los errores asociados con la entrada, se puede utilizar el análisis de sensibilidad para identificar qué datos de entrada deben medirse con mayor precisión (y viceversa) para mejorar la calidad y la confiabilidad. de los resultados del análisis de idoneidad del sitio. El método de eliminación de mapas para la estimación de la sensibilidad (Lodwick et al., 1990) se utiliza con frecuencia en el análisis geoespacial (Itani et al., 2022, Shahab et al., 2019; Fenta et al., 2015). Según este método, se calcula un índice de variación de sensibilidad (VI) eliminando cada indicador que contribuye a la puntuación final de idoneidad del MAR.

$$VI = 100 * \frac{\left| \frac{S_c}{N} - \frac{S'_c}{N-1} \right|}{S_c}$$

Donde VI es el índice de variación de sensibilidad en porcentaje, Sc es la puntuación de idoneidad MAR real del MCDA primario utilizando los parámetros N, y Sc' es la puntuación de idoneidad ajustada con el uso de indicadores N-1 (Lodwick et al., 1990).

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

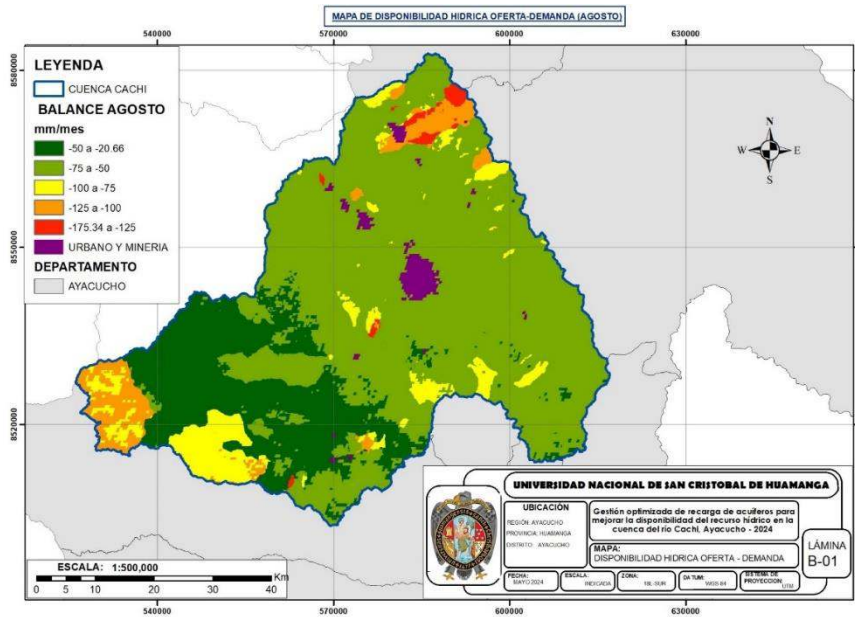
#### **3.1. Análisis de la disponibilidad hídrica espacial y temporal en la cuenca del río Cachi, considerando sus particularidades en cantidad y calidad, durante el año 2024**

##### **3.1.1. Distribución de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Cachi y áreas más afectadas durante los periodos de estiaje**

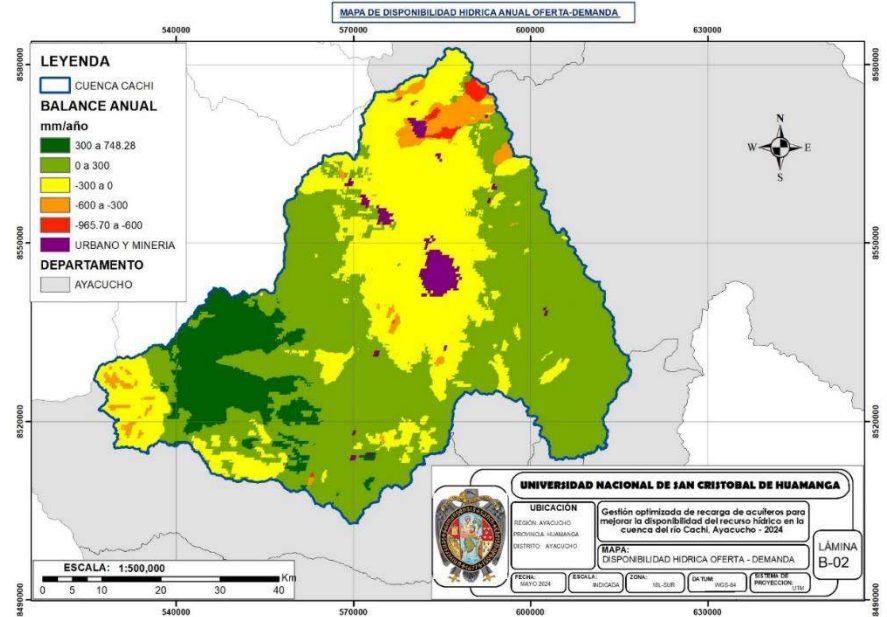
Luego de analizar la distribución de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Cachi, se obtuvo los siguientes resultados con las áreas más afectadas.

En la Figura 3 se muestra la disponibilidad hídrica para el mes de agosto y anual, tanto del resultado de la oferta-demanda y el viable el cual incluye la variación en el almacenamiento (

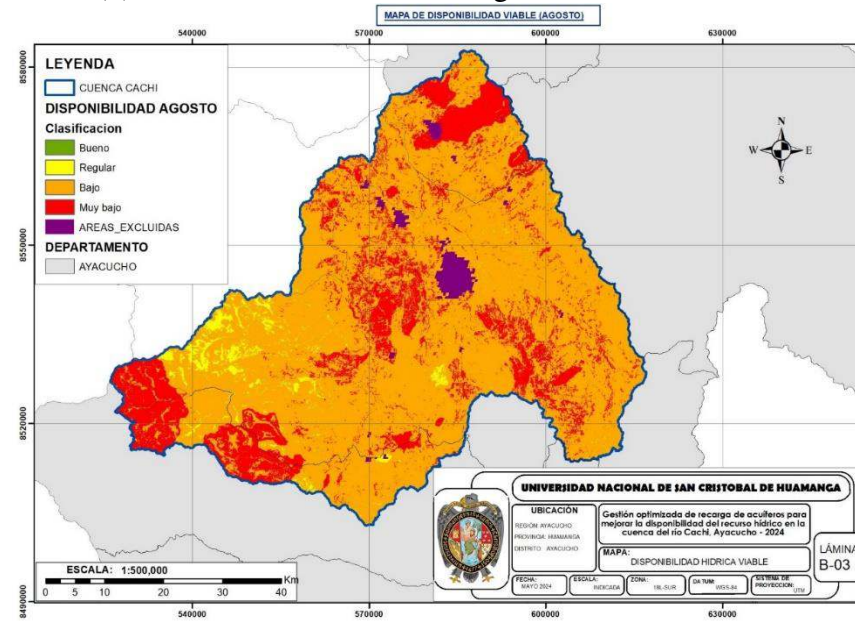
Donde la paleta de colores representa en relación a la disponibilidad hídrica: Verde oscuro (muy bueno), verde claro (bueno), amarillo (regular), naranja (bajo) y rojo (muy bajo).



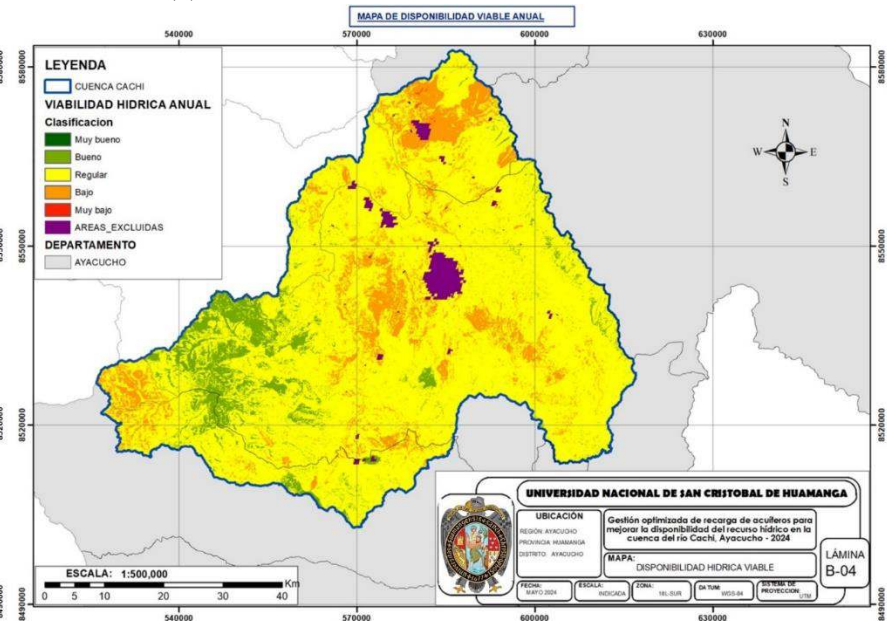
(b) Balance oferta - demanda agosto



(a) Balance oferta - demanda anual



(d) Balance viable agosto



(c) Balance viable anual

**Figura 3:** Distribución de disponibilidad hídrica del oferta -demanda y viable en la cuenca Cachi, para el mes de agosto y anual.

Para el mes más crítico en la cuenca (Figura 3 a), en la cual nos presenta los resultados de las áreas críticas inferiores a -100 mm/mes, vemos que los mínimos en la cuenca se corresponden a la zona baja de la cuenca del valle del distrito de Huanta y las captaciones de la represa de Cuchoquesera, exceptuándose las zonas urbanizadas y minería.

Anualmente el balance hídrico (Figura 3 b) muestra la disponibilidad hídrica anual del balance en la cuenca, en la cual se muestra los resultados de las áreas críticas inferiores a 0 mm/año, vemos que los mínimos en la cuenca se corresponde a la zona baja de la cuenca equivalente en gran parte a la zona climática C(o,i) B'2 H3 (templado y semiseco) , incluidas las áreas de las captaciones de la represa Cuchoquesera.

Para la disponibilidad hídrica viable para el mes de agosto (Figura 3 c), la cual incluye la capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA), en la cual nos presenta los resultados de las áreas críticas puntuadas como muy baja, vemos que los mínimos en la cuenca se corresponden a la zona suroeste de la cuenca (captaciones de la represa Cuchoquesera), incluyéndose la mayoría de la superficie del distrito de Huanta.

Anualmente la disponibilidad hídrica viable (Figura 3 d) la que incluye la capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA), en la cual vemos que los mínimos en la cuenca corresponden a la zona norte de la cuenca, incluidas las áreas de las captaciones de la represa Cuchoquesera.

**Tabla 4:** Disponibilidad hídrica anual (oferta – demanda) y área en la cuenca.

Clasificación	Disponibilidad hídrica mes agosto (Oferta - demanda)		Disponibilidad hídrica anual (Oferta - Demanda)		Disponibilidad hídrica viable anual		Disponibilidad Hídrica Viable (agosto)	
	Umbral (mm)	% Área	Umbral (mm)	Umbral (puntaje)	% Área	% Área	Umbral (puntaje)	% Área
Muy bajo	-175 a -125	0.8%	-966 a -600	200 a 160	20.1%	0.6%	200-160	0.0%
Bajo	-125 a -100	5.0%	-600 a -300	160 a 120	75.6%	2.9%	160-120	11.1%
Regular	-100 a -75	7.5%	-300 a 0	120 a 80	2.4%	31.9%	120-80	79.9%
Bueno	-75 a -50	63.7%	0 a 300	80 a 40	0.0%	52.7%	80-40	7.1%
Muy bueno	-50 a -21	21.1%	300 a -748	40 a 0	-	10.0%	40-0	0.0%
Excluidas (urbano y minería)	-	1.9%	-	-	1.9%	1.9%	-	1.9%

En la anterior Tabla 4 se puede apreciar que el 100% de la cuenca, en agosto, presenta un déficit hídrico en el balance entre oferta y demanda, especialmente considerando la tendencia actual de crecimiento demográfico y expansión de la frontera agrícola. Además, más del 10% de la cuenca muestra una disponibilidad de agua que varía entre regular y muy baja, de acuerdo con los resultados del balance de oferta y demanda, sin tener en cuenta la capacidad de recarga del acuífero subyacente.

La Tabla 4 indica que anualmente más del 30% de la cuenca está en déficit hídrico, también basado en los resultados del balance de oferta y demanda, sin considerar la capacidad de recarga del acuífero. Asimismo, en agosto, se observa que más del 90% de la cuenca presenta una disponibilidad de agua clasificada entre baja y muy baja, lo que corresponde a los resultados de disponibilidad viable que incluyen la capacidad de recarga del acuífero subyacente. Finalmente, la Tabla 4 revela que, anualmente, más del 10% de la cuenca tiene una disponibilidad de agua que varía de baja a muy baja, considerando la capacidad de recarga del acuífero.

### **3.2. Identificación y evaluación de las metodologías de recarga artificial de acuíferos, analizando su viabilidad técnica, económica y ambiental en la selección de ubicaciones óptimas de recarga artificial, basándose en análisis de datos de geología, hidrogeología, clima, teledetección y uso del suelo, en la cuenca Cachi durante el año 2024.**

#### **3.2.1. Oportunidades y desafíos asociados con la implementación de técnicas de recarga artificial en la cuenca del río Cachi**

En resumen, la Tabla 5 muestra las características descritas evaluadas para la implementación de MAR, donde se evalúa su estado en la cuenca, la representación de la cuenca y la tecnología óptima según la característica analizada.

**Tabla 5:** Oportunidades y desafíos asociados con la implementación de MAR en la cuenca Cachi.

Ítem	Característica	Análisis	Información en la cuenca	Representación en la cuenca	Tecnología MAR recomendada				
1	Disponibilidad del recurso hídrico	Un 62.82% de la cuenca dispone anualmente al menos agua por encima de 1 mm de lluvia acumulada, como posible fuente MAR. Esto representa más de la mitad del área en estudio.	O	oportunidad	LI	C	P	D	F
2	Calidad de las fuentes de agua	La calidad de aguas en la cuenca no cuenta con data suficiente, para realizar una estimación precisa, pero en general la zona suroeste de la cuenca el cual representa más del 50 % del área, presenta contaminantes los cuales no son depurados mediante ninguna tecnología MAR, seguido por más de una tercera parte que no requiere tratamiento alguno (35.87%).	D	desafío	LI	P	C	D	F
3	Densidad poblacional y uso actual de suelos	El uso actual de suelos en la cuenca muestra con más de un 60% (arbustal, herbazal, tierras desnudas) de su área, con condiciones prioritarias para implementar MAR, y hasta un 25 % a evaluar (áreas agrícolas). La densidad poblacional para la cuenca, es inferior a 10 Hab/Km <sup>2</sup> , para más del 50% de la cuenca, el cual facilita la implementación de tecnologías MAR	O	oportunidad	D	LI	C	P	F
4	Demanda futura del recurso hídrico	La demanda futura en la cuenca muestra una variabilidad grande, lo que amerita enfocarse en zonas en específico dentro de la misma, a pesar de que menos del 15% de la cuenca se encuentra con una demanda superior a lo regular.	R	desafío	P	D	LI	C	F
5	Información y data sobre los acuíferos existentes	Los datos sobre los acuíferos en la cuenca son inexistentes, por lo que se usaron otras variables geológicas (Fallas geológicas, Formaciones geológicas, Hidrogeología y geomorfología), obtenidos desde la plataforma de GEOCATMIN, que determinan la existencia y características de los acuíferos subyacentes.	NE	desafío	LI	P	C	D	F

6	Pendiente topográfica	Las pendientes presentes en la cuenca, superan el 65 % de su área como zonas de pendiente alta. La variable de la pendiente es un factor determinante en la mayoría de las tecnologías MAR.	O	desafío	P	F	L1	C	D
7	Nivel de conocimiento y tecnología	La experiencia y conocimientos de las tecnologías MAR, para el Perú en general, es deficiente, excepto por el Fondo Sierra Azul, basado en la tecnología de captación de agua de lluvia, y otros dos casos de tecnologías (Pozos y distribución), ambos en la costa, registrados en la plataforma del IGRAC	D	desafío	L1	D	C	F	P
8	Objetivo del MAR	Para el Perú, así como la cuenca en estudio, los proyectos existentes (Fondo Sierra Azul), tienen por objetivo de mejorar el almacenamiento del recurso hídrico (recarga de acuíferos, beneficios ecológicos), mas no así su tratamiento (calidad del agua). Basados en este hecho, la elección de la tecnología MAR, se ve simplificada.	R	oportunidad	C	P	L1	D	F
9	Costo del agua recargada	El costo de agua recargada depende en gran medida de la metodología usada, siendo que en nuestro medio se espera inversiones de costo menor e impacto mayor. Así de la Tabla 2 la relación costo beneficio para las tecnologías de pozos, distribución y filtración es de 1.8, 3.8, 7.2 respectivamente	D	desafío	F	D	L1	C	P
10	Desempeño de las estructuras de recarga	Las diferentes tecnologías ofrecen y adaptan el MAR, para diversos escenarios y necesidades, los mismos que existen en la cuenca Cachi, descritos anteriormente. Aunque solo se tiene experiencia en una de las cinco tecnologías existentes, captación de agua de lluvia.	D	oportunidad					

Donde las distintas simbologías descritas representan lo siguiente:

**Tabla 6:** Simbología de evaluación de las oportunidades y desafíos asociados a la implementación de MAR.

Información en la Cuenca		Tecnología MAR	
O	Óptima	1	Distribución (D)
R	Regular	2	Pozos (P)
D	Deficiente	3	Modificación del cauce de arroyos y ríos (C)
NE	No hay evidencia	4	Filtración (F)
		5	Captación de agua de lluvia (Ll)

Finalmente, en la cuenca según la importancia de cada característica evaluada para la implementación de MAR, se obtiene la siguiente Tabla 7:

**Tabla 7:** Puntuación obtenida para cada metodología en orden de importancia para la cuenca

Tecnología MAR	#Veces / importancia					Suma total
	Peso					
	5	4	3	2	1	
Distribución (D)	1	3	0	4	1	26
Pozos (P)	2	3	1	1	2	29
Modificación del cauce de arroyos y ríos (C)	1	1	4	3	0	27
Filtración (F)	1	1	0	1	6	17
Captación de agua de lluvia (Ll)	4	1	4	0	0	36

**Tabla 8:** Clasificación de viabilidad de las tecnologías MAR para la cuenca Cachi

Cod	Clasificación de la tecnología MAR según viabilidad en la cuenca Cachi	Viabilidad
Ll	Captación de agua de lluvia	Muy alta
P	Pozos	Alta
D	Distribución	Regular
C	Modificación del cauce de arroyos y ríos	Baja
F	Filtración	Muy baja

En la Tabla 8 obtenida para la viabilidad de las tecnologías MAR para la cuenca se observa que la captación de agua de lluvia que se viene aplicando actualmente en la cuenca, responde a una viabilidad muy alta, seguida de pozos y distribución, las cuales aún no se tiene registro de su implementación en la cuenca Cachi, y las últimas para modificación del cauce de arroyos y ríos, filtración.

**3.3. Mapeo de la idoneidad, identificando y evaluando las diferentes metodologías de recarga de acuíferos en la cuenca Cachi, considerando factores físicos, hidrológicos, ecológicos y sociales.**

**3.3.1. Distribución de puntuaciones y pesos.**

**Tabla 9:** Puntuaciones y umbrales.

Indicadores	Subindicadores	Criterio-Subyacente	Atributos	Puntuación								
				LI	P	D	C	F				
Necesidad de MAR	Disponibilidad hídrica futura		Caudal libre sin uso expresado en lámina de agua para la celda (mm/año)	0 para caudal máximo; 100 para caudal mínimo; interpolación lineal para valores dentro del intervalo								
			Regular	100	10	100	55					
	Calidad de agua			Buena	100	100	100	100				
				Baja	55	10	10	10				
				Tierras desnudas			100					
				Ríos y quebradas			95					
				Áreas agrícolas			90					
				Herbazal			85					
				Plantación forestal			80					
				Glaciar			75					
				Arbustal			70					
				Cobertura vegetal			Bosque denso bajo (bosque seco)			65		
							Lago, laguna			60		
							Bofedal			55		
							Bosque denso bajo (chachacomo)			50		
							Bosque denso bajo (queñua)			45		
							Bosque denso bajo (relictos)			40		
							Minería			Excluir		
							Uso urbano			Excluir		
				Textura suelo			Franco arcilloso limoso			100		
Franco arcilloso			85									
Limo			70									
Marga			55									

Indicadores	Subindicadores	Criterio-Subyacente	Atributos	Puntuación						
				LI	P	D	C	F		
Disponibilidad de agua	Escorrentía acumulada	Pendiente	Pronunciada >50%			100				
			Alta 50%-20%			80				
			Media 20%-8%			60				
			Suave 8%-1%			40				
			Despreciable <1%			20				
		Hidrogeología	Acuitardo Intrusivo					100		
			Acuitardo volcánico					85		
			Sedimentario							
			Acuífero Fisurado					70		
			Volcánico							
	Escorrentía acumulada	Coeficiente de varianza (escorrentía)	de escurrimiento acumulado	Acuífero					55	
				Fisurado						40
				Sedimentario						
				Acuífero						40
				Fisurado kárstico						
Transporte de sedimentos	de	acumulada	Acuífero poroso					25		
			No consolidado						25	
			Alta							
Formación geológica			Profundidad de escorrentía acumulada					0 para profundidad mínima; 100 para profundidad máxima que admite un sistema MAR; interpolación lineal para valores dentro del intervalo		
			Coeficiente de variación (CV) del escurrimiento acumulado					0 para un CV de 100 o más, 100 para CV de 0, interpolación lineal para valores dentro del intervalo		
Formación geológica			Pérdida de suelo promedio anual acumulada					0 para la erosión máxima; 100 para la erosión mínima; interpolación lineal para valores dentro del intervalo		
			Alta $10 < k < 10^2$					100		

Indicadores	Subindicadores	Criterio-Subyacente	Atributos	Puntuación					
				LI	P	D	C	F	
Recargabilidad intrínseca del acuífero	(permeabilidad - m/día)		Medja $1 < k < 10$			83			
			Baja a media $10^{-1} < k < 1$			67			
			Baja $10^{-2} < k < 10^{-1}$			50			
			Muy baja $10^{-4} < k < 10^{-2}$			33			
			Impermeable $10^{-8} < k < 10^{-4}$			17			
		Distancia a fallas		Distancia			0 para distancia máxima, 100 para distancia mínima, interpolación lineal para valores dentro del intervalo		
		Geomorfología (Calificación a la infiltración)		Muy rápida			100		
	Rápida					85			
	Moderadamente rápida					70			
	Moderada					55			
	Moderadamente lenta					40			
		Pendiente		Lenta			25		
	Muy lenta					10			
	Despreciable <1%					100			
	Suave 8%-1%					80			
Media 20%-8%					60				
			Alta 50%-20%			40			
			Pronunciada >50%			20			
			Tierras desnudas			100			
			Herbazal			86			
			Arbustal			72			
Atractivo económico	Uso actual del suelo		Bofedal			72			
			Bosque denso bajo (chachacomo)			58			
			Bosque denso bajo (queñua)			58			
			Bosque denso bajo (relictos)			58			

Indicadores	Subindicadores	Criterio-Subyacente	Atributos	Puntuación				
				LI	P	D	C	F
			Bosque denso bajo (Bosque seco)			44		
			Plantación forestal			30		
			Áreas agrícolas			16		
			Glaciar			Excluir		
			Lago, laguna			Excluir		
			Minería			Excluir		
			Ríos y quebradas			Excluir		
			Uso urbano			Excluir		
			Muy baja			100		
			Baja			75		
			Regular			50		
			Alta			25		
			Muy alta			Excluir		
						0 para distancia máxima, 100 para distancia mínima, interpolación lineal para valores dentro del intervalo		
	Densidad poblacional							
	Proximidad a la fuente		Distancia					

La Tabla 8 resume la distribución de las puntuaciones obtenidas utilizando las funciones lineales, donde una puntuación de 100 indica la idoneidad más alta y 0 la idoneidad más baja en relación con el área de estudio, además de otros subindicadores puntuados conforme a revisión bibliográfica y criterios de investigaciones anteriores para las cinco metodologías evaluadas en el estudio: distribución (D), pozos (P), modificación del cauce de arroyos y ríos (C), filtración (F), captación de agua de lluvia (LI). Todos los sub indicadores y criterios fueron puntuados con el mismo puntaje para todas las metodologías MAR, excepto en el indicador de calidad de agua, en el cual los puntajes respondieron a los requerimientos de la calidad del agua para la implementación de las distintas metodologías MAR. También en la disponibilidad de agua se ajustó los puntajes, donde se acumularon los flujos en los ríos reconocidos por el ANA y se puntuaron con 100 para el máximo volumen que admite un sistema MAR ( $10^6 \text{ m}^3$ ) y 0 para el mínimo calculado, esta puntuación fue diferente para la metodología de captación de agua de lluvia, en la que se excluyeron los ríos y la puntuación se realizó para toda la cuenca donde la acumulación de flujo

mayor igual a  $2 \times 10^5 \text{ m}^3$  (capacidad máxima de captación de agua de lluvia – proyectos del Fondo Sierra Azul) se puntuó con 100 y 0 para el mínimo calculado en la cuenca.

El peso asignado a cada indicador se justifica en función de la relevancia de sus características. Los cuatro índices evaluados (necesidad de MAR, disponibilidad de agua, recargabilidad intrínseca del acuífero y atractivo económico) recibieron un peso uniforme para todas las metodologías, bajo el supuesto de que todos tienen la misma importancia. La disponibilidad hídrica futura en un sistema MAR, basada en cada metodología, se ponderó según su capacidad para mitigar problemas una vez implementada. La calidad del agua fue evaluada con base en la capacidad de cada sistema MAR para tratar ciertos parámetros químicos presentes en el agua de recarga, mientras que la capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA) obtuvo una mayor ponderación en los sistemas donde la superficie es clave para la implementación de MAR.

Los subindicadores relacionados con la capacidad de recarga del acuífero subyacente mantuvieron pesos homogéneos para los criterios de cobertura vegetal, textura del suelo, pendiente e hidrogeología, ya que forman parte de la recarga natural de la cuenca. La escorrentía acumulada, al ser un indicador clave, recibió el mayor peso posible en todas las metodologías, en contraste con el coeficiente de variación (CV), que, por ser menos variable, recibió menor ponderación. El transporte de sedimentos se ponderó más en las metodologías susceptibles a colmatación. Los indicadores de formación geológica y geomorfología obtuvieron un peso mayor, mientras que la proximidad a fallas solo fue relevante en las metodologías de pozos y distribución. La pendiente fue clave para las metodologías MAR de superficie. El uso actual del suelo y la densidad poblacional recibieron menor peso en aquellas metodologías que requieren menos espacio o están limitadas a áreas sin uso. Por otro lado, la proximidad a fuentes de agua recibió mayor peso en metodologías donde el costo y la implementación están más condicionados por esta variable.

**Tabla 10:** Matriz de comparación por pares para evaluar la importancia relativa y los pesos.

Indicadores principales de MAR (Número de comparaciones = 4, CR = 0%)

	Necesidad MAR	Disponibilidad de agua	Recargabilidad del acuífero	intrínseca	Atractivo económico	Peso (%)
Necesidad MAR	1	1	1		1	25
Disponibilidad de agua	1	1	1		1	25
Recargabilidad intrínseca del acuífero	1	1	1		1	25
Atractivo económico	1	1	1		1	25

Subindicadores de necesidad de MAR (Número de comparaciones = 3, CR = 0%)

	Disponibilidad hídrica futura					Calidad de agua					CRA (Capacidad de recarga del acuífero subyacente)					Peso (%)				
	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F
Disponibilidad hídrica futura	1	1	1	1	1	4.5	1	2	2	1	1	1	1	1	1	45	33	40	40	33
Calidad de agua	0.22	1	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	0.22	1	0.5	0.5	1	10	33	20	20	33
CRA (Capacidad de recarga del acuífero subyacente)	1	1	1	1	1	4.5	1	2	2	1	1	1	1	1	1	45	33	40	40	33

Subindicadores de disponibilidad de agua (Número de comparaciones = 3, CR = 0%)

	Escorrentía acumulada					Coeficiente de varianza					Transporte de sedimentos					Peso (%)				
	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F
Escorrentía acumulada	1	1	1	1	1	2.5	2	3	3	4	1.67	1	1.7	1.7	7	50	40	50	50	70
Coeficiente de varianza	0.4	0.5	0.4	0.4	0.29	1	1	1	1	1	0.67	0.5	0.7	0.7	2	20	20	20	20	20
Transporte de sedimentos	0.6	1	0.6	0.6	0.14	1.5	2	2	2	1	1	1	1	1	1	30	40	30	30	10

Subindicadores de recargabilidad intrínseca del acuífero (Número de comparaciones = 4, CR = 0%)

	Formación geológica					Distancia a fallas					Geomorfología					Pendiente					Peso (%)				
	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F
Formación geológica	1	1	1	1	1	3	2	2	3	4	1	1	1	0.8	1	1	3.5	0.71	1.5	4	30	35	25	30	40
Distancia a fallas	0.3	0.57	0.6	0.3	0.25	1	1	1	1	1	0.3	0.6	0.6	0.3	0.25	0.3	2	0.43	0.5	1	10	20	15	10	10
Geomorfología	1	1	1	1.3	1	3	2	2	4	4	1	1	1	1	1	1	3.5	0.71	2	4	30	35	25	40	40
Pendiente	1	0.29	1.4	0.7	0.25	3	1	2	2	1	1	0.3	1.4	0.5	0.25	1	1	1	1	1	30	10	35	20	10

Subindicadores de atractivo económico (Número de comparaciones = 3, CR = 0%)

	Uso actual del suelo					Densidad poblacional					Proximidad a la fuente					Peso (%)									
	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F					
<b>Uso actual del suelo</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4.5	0.4	1	0.2	0.13	45	20	33	15	10					
<b>Densidad poblacional</b>	1	1.5	1	1	1	1	1	1	1	1	4.5	0.6	1	0.2	0.13	45	30	33	15	10					
<b>Proximidad a la fuente</b>	0.22	2.5	1	4.7	8	0.22	2	1	5	8	1	1	1	1	1	10	50	33	70	80					
Criterio subyacente de MAR (Número de comparaciones = 4, CR = 0%)																									
	Cobertura vegetal					Textura de suelo					Pendiente					Hidrogeología					Peso (%)				
<b>Cobertura vegetal</b>	1					1					1					1					25.0				
<b>Textura de suelo</b>	1					1					1					1					25.0				
<b>Pendiente</b>	1					1					1					1					25.0				
<b>Hidrogeología</b>	1					1					1					1					25.0				

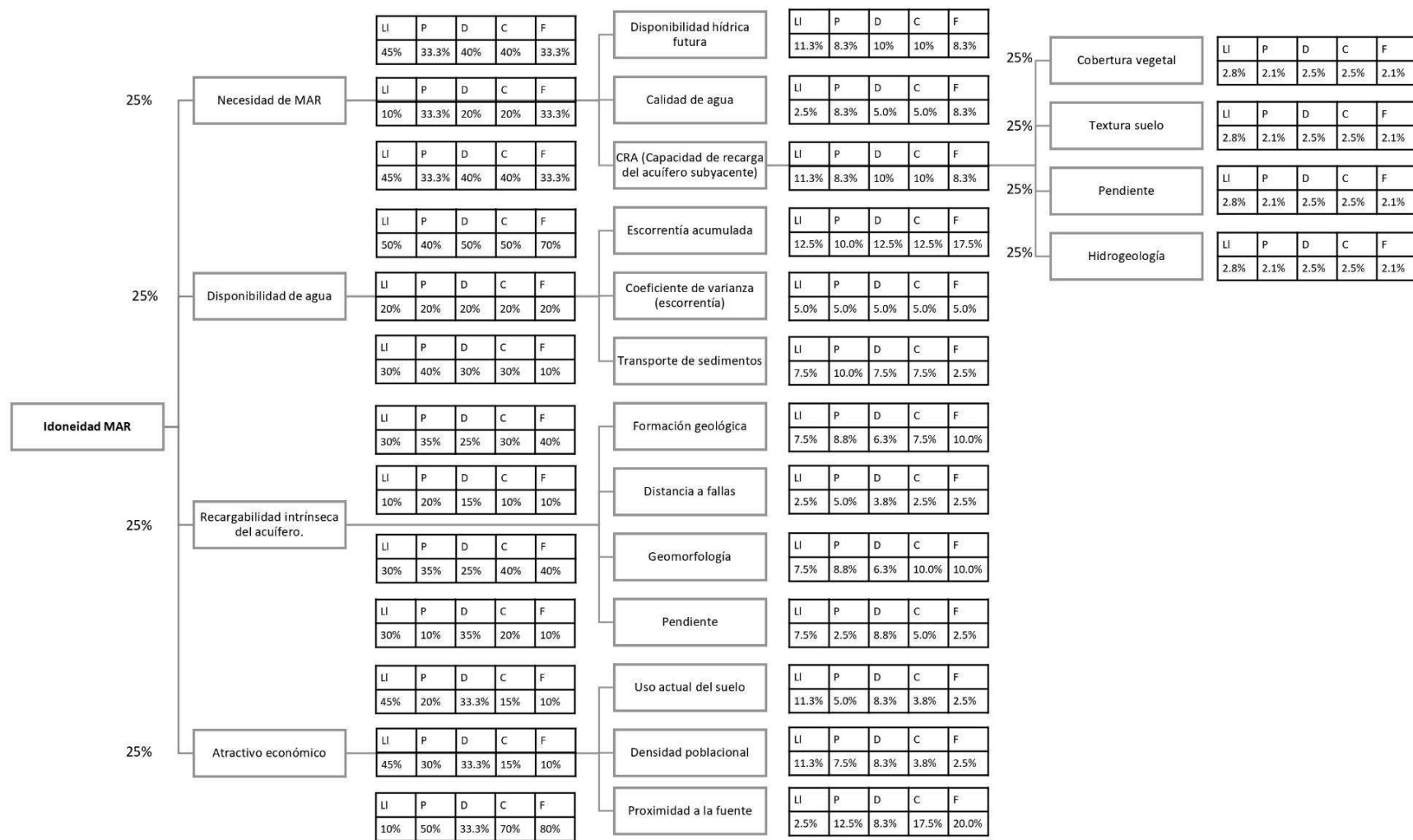


Figura 4: Distribuciones de peso general.

La comparación por pares de los subindicadores (Tabla 10) generó la distribución de peso final entre los indicadores (Fig. 4). Los pesos asignados para cada subindicador responden a las características y de la metodología MAR y el objetivo de la mismas. En adición a estudios de idoneidad MAR anteriores, la inclusión de la necesidad de la implementación de MAR como indicador principal en el mapeo de idoneidad prioriza áreas con estrés alto y mayor demanda del recurso hídrico.

### **3.3.2. Disponibilidad de agua**

#### **3.3.2.1. Escorrentía acumulada (Modelamiento hidrológico)**

El modelamiento hidrológico anual calculado para los modelos de Budyko, GR1A y Fu 1-parámetro, usaron como datos de entrada la evapotranspiración potencial anual generadas por el sensor MODIS, información obtenida alojada en MOD16 de resolución de celda de 500mx500m de evapotranspiración potencial. La precipitación media mensual y anual es obtenida por interpolación de Kriging de las 22 estaciones meteorológicas usadas en el estudio. Para la calibración se usaron los caudales observados del río Chacco, Chicllarazo y Apacheta; sin embargo, en la etapa de validación, el modelo de Budyko mostró una bondad de ajuste mala para todos los criterios de rendimiento. Los modelos GR1A y Fu 1-parámetro se calibraron independientemente para las tres cuencas con datos de aforo, excepto el modelo Budyko, el cual solo se ejecutó en función a sus variables correspondientes.

- **Regionalización de los modelos - Regresión secuencial:**

La regionalización se realizó para los modelos de Fu 1-parámetro y GR1A, los cuales presentaron criterios de rendimiento porcentaje de BIAS y NSE respectivamente como aceptables. Por el contrario, se descartó el modelo de Budyko por no presentar un adecuado ajuste.

Para el caso del estudio se calculó y usó la media entre ambos modelos para distribuirlos en la cuenca y generar la escorrentía mediante la herramienta acumulación de flujo de ArcGIS.

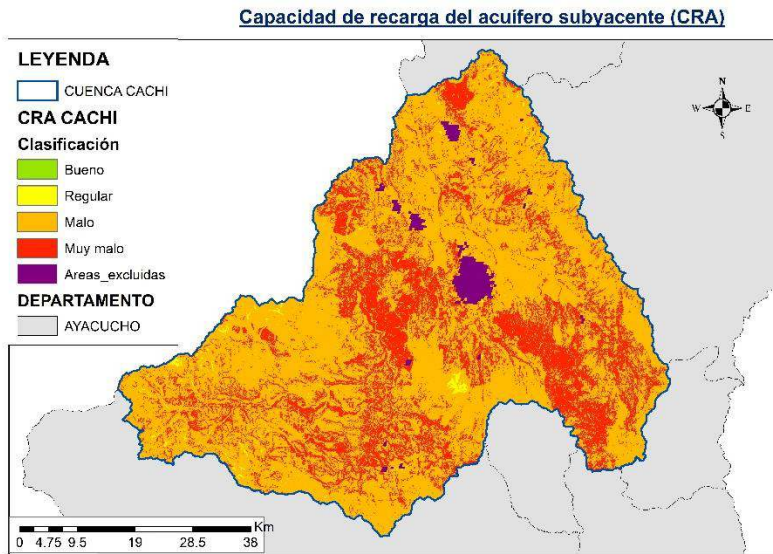
#### **3.3.3. Análisis de idoneidad del sitio MAR.**

El índice general de idoneidad para cinco tecnologías analizadas y mapeadas para la cuenca se generó ejecutando una superposición ponderada de los cuatro mapas ráster generados para cada uno de los índices (necesidad MAR, disponibilidad hídrica, recargabilidad intrínseca del acuífero y atractivo económico), utilizando las ponderaciones determinadas por AHP. Luego, la idoneidad final se dividió en cinco categorías de idoneidad MAR que incluían: muy bajo ( $I < 20$ ), bajo ( $20 < I < 40$ ), regular ( $40 < I < 60$ ), alto ( $60 < I < 80$ ), y muy alto ( $80 < I < 100$ ).

### 3.3.3.1. Análisis de Necesidad de MAR.

- **CRA (Capacidad de recarga del acuífero subyacente):**

La capacidad de recarga del acuífero subyacente (Figura 5) se puntuó en relación a la necesidad de una intervención por parte de una MAR, para mejorar la recarga en zonas que naturalmente tienen un bajo potencial de recarga. Así las zonas con mayor puntuación se relacionan a mayor necesidad MAR y menor capacidad de recarga del acuífero subyacente. En esta capa se asignó el mismo peso de ponderación para las cinco tecnologías MAR.



**Figura 5:** Capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA) en la cuenca Cachi

No se encontró (Tabla 11) zonas de muy buena capacidad de recarga del acuífero subyacente, y las zonas de calificación buena son despreciables, solo menos del 1% de la cuenca tiene una calificación regular y resto de la cuenca es mala y muy mala en relación a la capacidad de recarga del acuífero subyacente.

**Tabla 11:** Clasificación de la capacidad de recarga del acuífero subyacente en la cuenca Cachi.

Capacidad de recarga del acuífero subyacente (CRA)	Necesidad MAR	Puntaje	Porcentaje
Bueno	Bajo	40-20	0.00%
Regular	Regular	60-40	0.68%
Malo	Necesario	80-60	70.75%
Muy malo	Muy necesario	100-80	26.75%
Excluidas (Urbano y minería)	-	-	1.91%

- Necesidad de MAR en general:

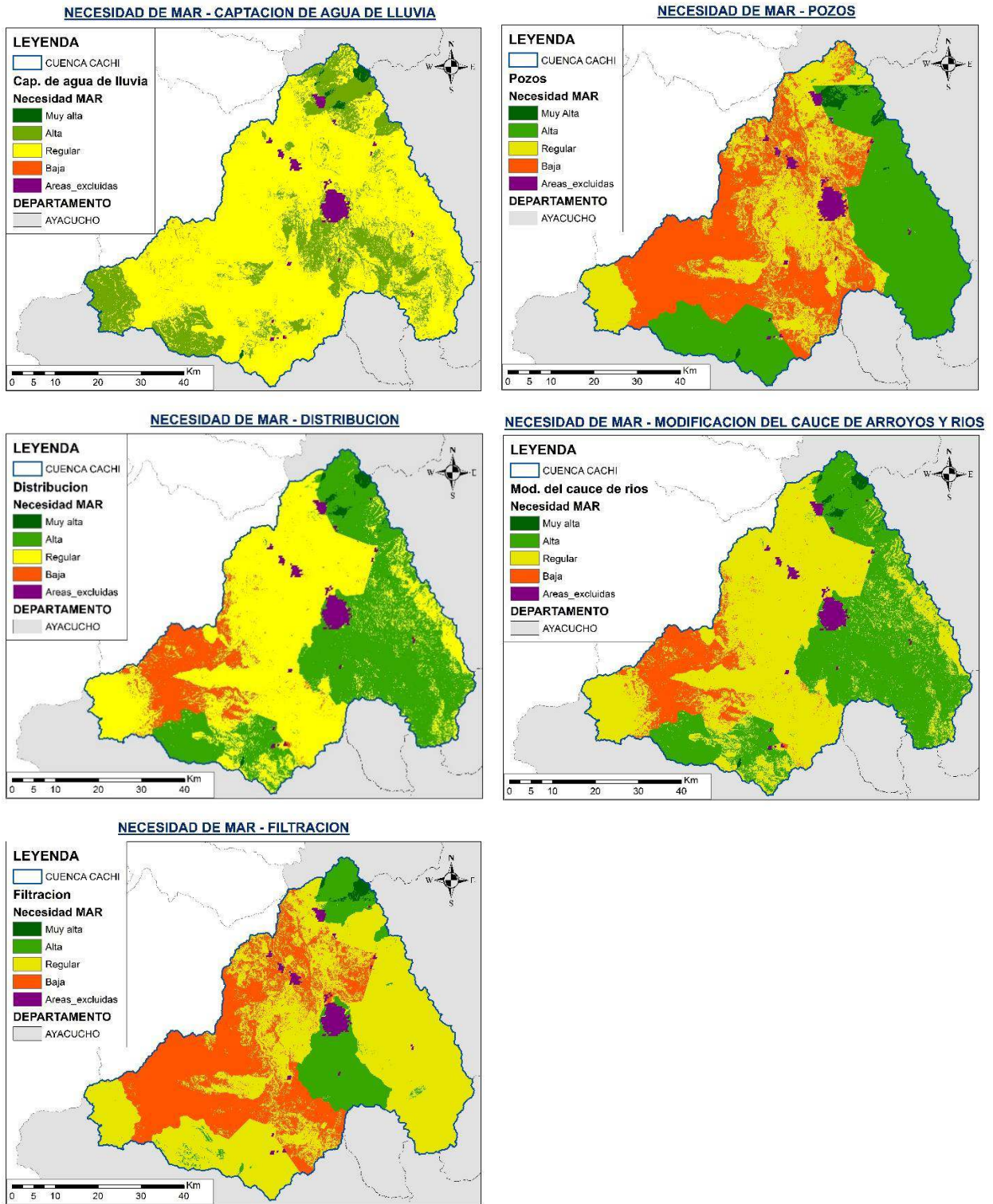


Figura 6: Necesidad MAR.

### 3.3.3.2. Idoneidad MAR al análisis de Disponibilidad de agua.

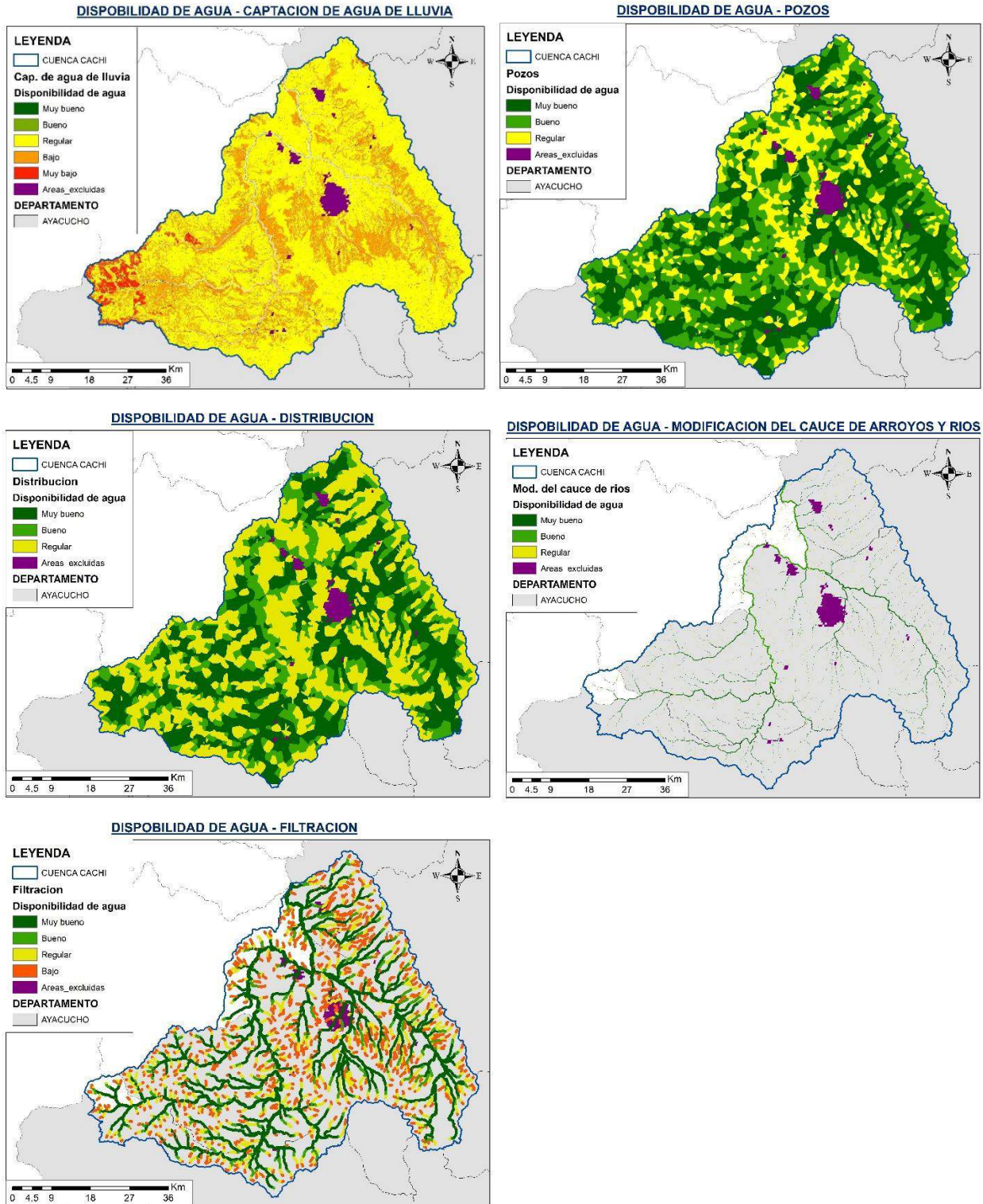
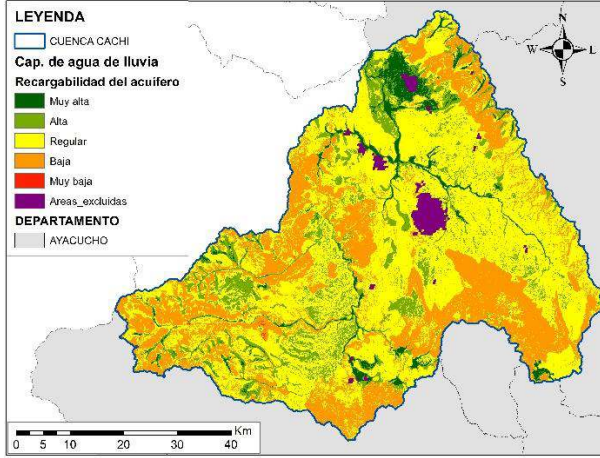


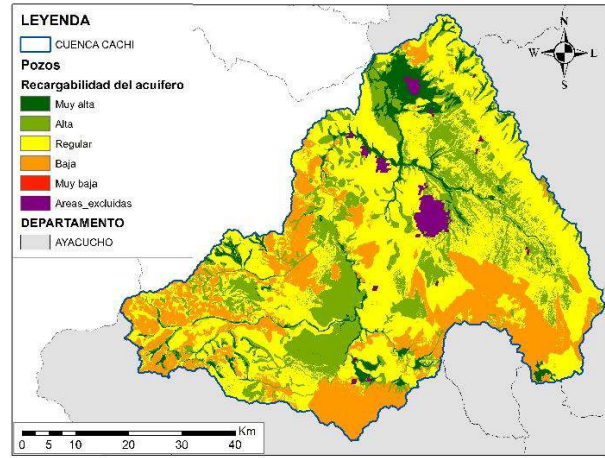
Figura 7: Disponibilidad de agua.

### 3.3.3.3. Idoneidad MAR a la recargabilidad intrínseca del acuífero.

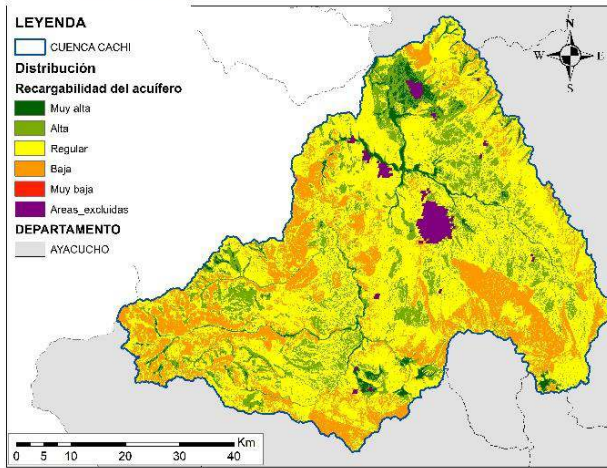
RECARGABILIDAD INTRÍNSECA DEL ACUÍFERO - CAPTACION DE AGUA DE LLUVIA



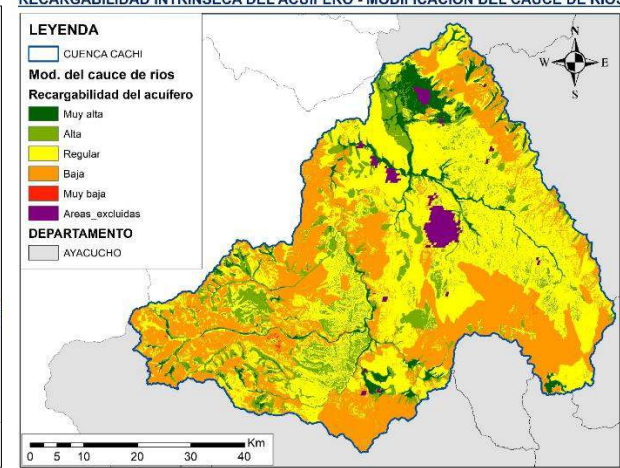
RECARGABILIDAD INTRÍNSECA DEL ACUÍFERO - POZOS



RECARGABILIDAD INTRÍNSECA DEL ACUÍFERO - DISTRIBUCION



RECARGABILIDAD INTRÍNSECA DEL ACUÍFERO - MODIFICACION DEL CAUCE DE RIOS



RECARGABILIDAD INTRÍNSECA DEL ACUÍFERO - FILTRACIÓN

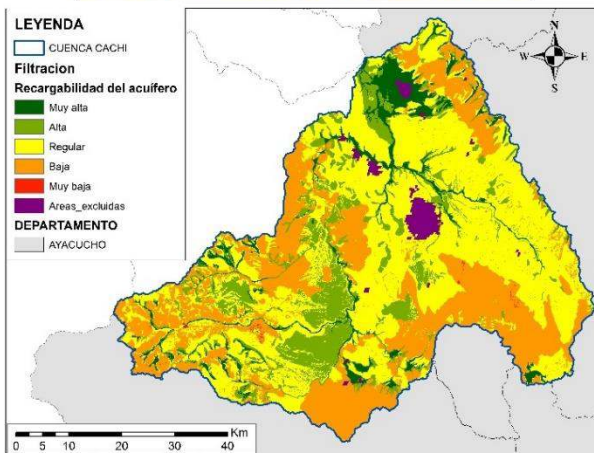


Figura 8: Recargabilidad intrínseca del acuífero.

### 3.3.3.4. Idoneidad MAR al índice del atractivo económico

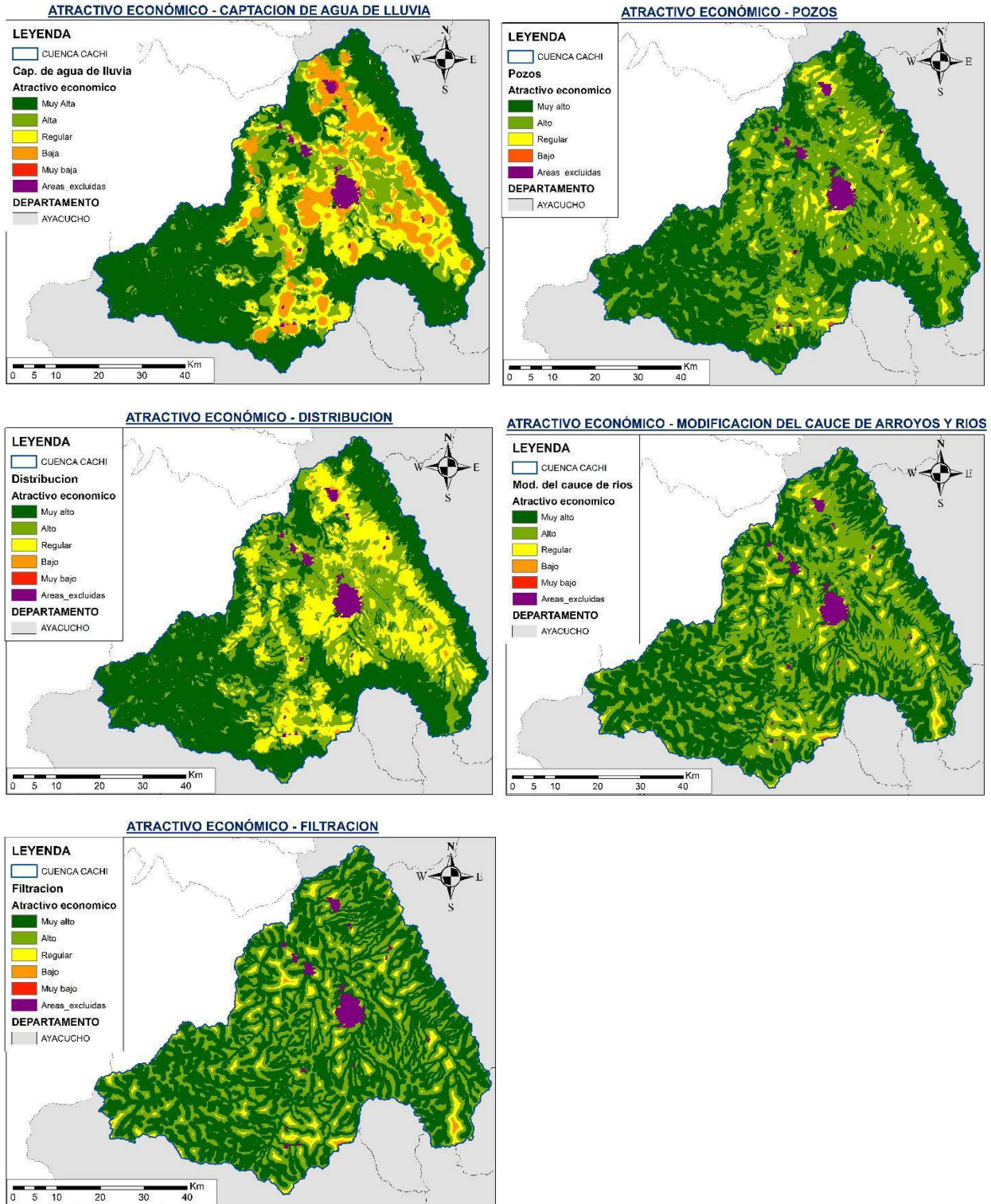


Figura 9: Atractivo económico.

### 3.3.3.5. Idoneidad general del sitio MAR.

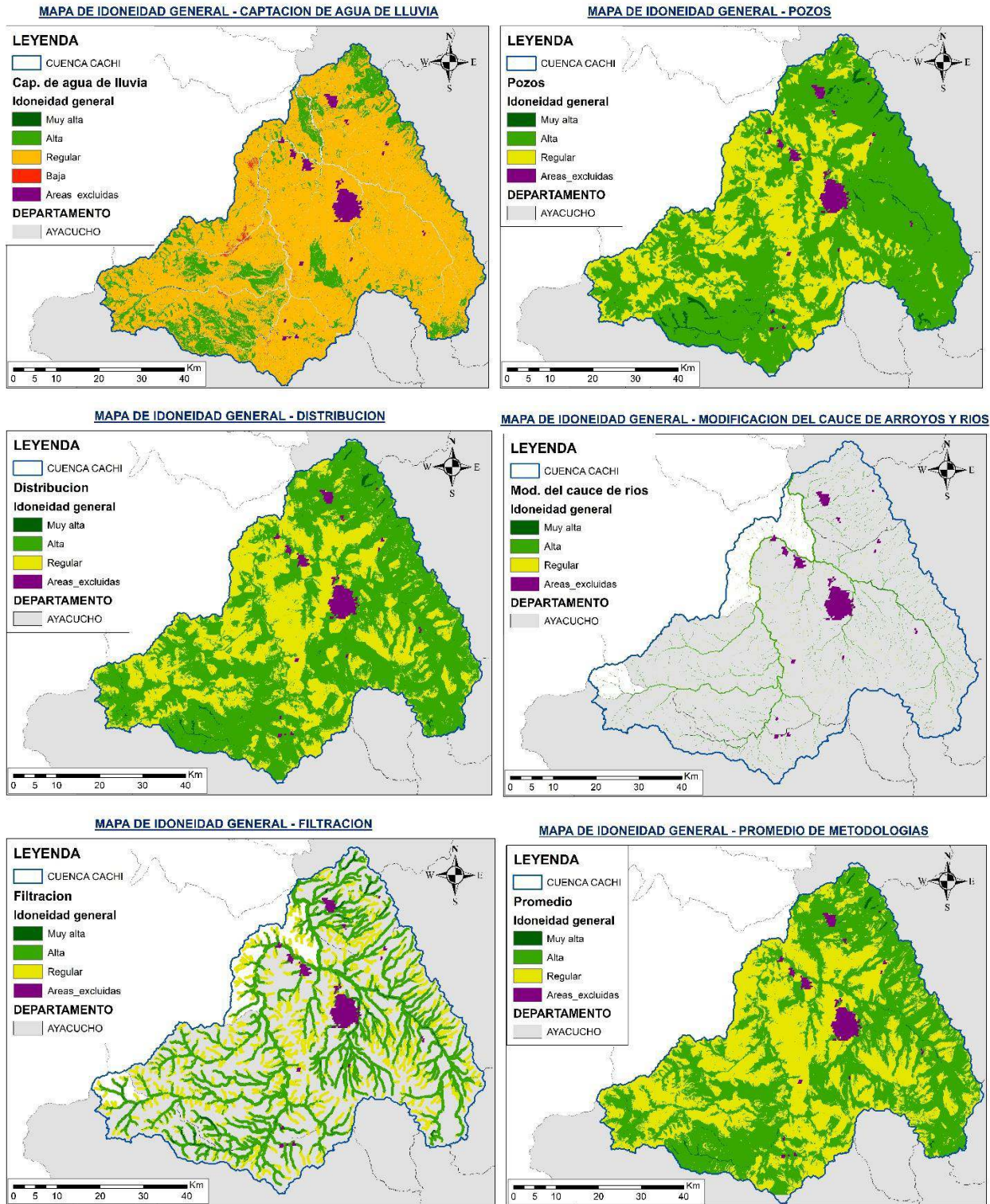


Figura 10: Idoneidad general.

**Tabla 12:** Clasificación de la cuenca Cachi en función de la aptitud para MAR.

Clasificación	Puntaje	Necesidad MAR	Disponibilidad de agua	Recargabilidad intrínseca del acuífero	Atractivo económico	Idoneidad general de MAR
<b>Porcentaje según idoneidad</b>						
<b>Captación de agua de lluvia</b>						
Muy bajo	0-20	0.00%	2.15%	0.03%	0.05%	0.00%
Bajo	40-20	0.15%	22.73%	29.86%	11.11%	0.34%
Regular	60-40	75.84%	67.73%	51.08%	17.82%	78.13%
Alta	80-60	21.66%	0.71%	13.44%	18.24%	15.51%
Muy alta	100-80	0.52%	0.69%	3.76%	50.94%	0.02%
Excluidas	-	1.91%	6.00%	1.91%	1.91%	6.00%
<b>Pozos</b>						
Muy bajo	0-20	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Bajo	40-20	34.72%	0.00%	22.76%	0.07%	0.00%
Regular	60-40	27.84%	24.74%	47.81%	5.60%	30.39%
Alta	80-60	34.68%	36.79%	22.02%	42.48%	66.42%
Muy alta	100-80	0.94%	36.57%	5.57%	50.02%	1.12%
Excluidas	-	1.91%	1.91%	1.91%	1.91%	1.91%
<b>Distribución</b>						
Muy bajo	0-20	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Bajo	40-20	9.59%	0.00%	22.04%	0.33%	0.00%
Regular	60-40	51.17%	42.45%	55.95%	19.69%	36.20%
Alta	80-60	36.76%	20.59%	17.35%	29.08%	61.33%
Muy alta	100-80	0.66%	35.06%	2.82%	49.07%	0.39%
Excluidas	-	1.91%	1.91%	1.91%	1.91%	1.91%
<b>Modificación del cauce de arroyos y ríos</b>						
Muy bajo	0-20	0.00%	0.00%	0.07%	0.01%	0.00%
Bajo	40-20	9.59%	0.00%	35.20%	0.16%	0.00%
Regular	60-40	51.17%	0.51%	44.69%	4.44%	0.21%
Alta	80-60	36.76%	0.96%	13.46%	43.48%	2.77%
Muy alta	100-80	0.66%	1.76%	4.75%	50.08%	0.25%
Excluidas	-	1.91%	96.76%	1.91%	1.91%	96.76%
<b>Filtración</b>						
Muy bajo	0-20	0.00%	0.00%	0.11%	0.01%	0.00%
Bajo	40-20	30.99%	12.80%	30.73%	0.28%	0.00%
Regular	60-40	55.39%	8.65%	46.60%	4.50%	16.54%
Alta	80-60	11.23%	3.92%	15.08%	35.36%	26.04%
Muy alta	100-80	0.57%	18.07%	5.65%	58.01%	0.84%
Excluidas	-	1.91%	56.56%	1.91%	1.91%	56.56%
<b>Promedio de metodologías</b>						
Muy bajo						0.00%
Bajo						0.00%
Regular						45.60%
Alta						52.15%
Muy alta						0.33%
Excluidas						1.91%

La necesidad de implementar MAR (Figura 6) para las distintas tecnologías varía entre niveles regulares y altos en más del 50% de las áreas analizadas. La tecnología con menor necesidad de MAR es la de pozos, mientras que la captación de agua de lluvia presenta la mayor necesidad, con un 62.52% y 97.51% de áreas evaluadas como regulares y buenas, respectivamente.

El índice de disponibilidad de agua (Figura 7) muestra que, en general, más del 50% de la cuenca tiene disponibilidad de agua entre regular y muy buena para la mayoría de las tecnologías. Sin embargo, las tecnologías de modificación de cauces y filtración se limitan a zonas específicas, sin cubrir más del 50% de la cuenca. Las tecnologías de pozos y distribución muestran un alto potencial en términos de disponibilidad hídrica.

El índice de recargabilidad intrínseca de la cuenca (Figura 8) refleja que la zona norte tiene una clasificación alta o muy alta de recargabilidad del acuífero para todas las tecnologías, especialmente para captación de agua de lluvia, pozos y distribución, con porcentajes de 17.19%, 27.60% y 20.17%, respectivamente. La tecnología de modificación de cauces es la que tiene menor aplicabilidad, con solo un 35.27% del área clasificada como baja o muy baja en cuanto a recargabilidad.

En cuanto al índice de atractivo económico (Figura 9), la filtración se destaca con un 58.01% de áreas con muy alto atractivo, sobre todo cerca de fuentes de agua. La captación de agua de lluvia también presenta un alto atractivo económico en las zonas altas de la cuenca (50.94%), mientras que los pozos y la distribución muestran un 50.02% y 49.07%, respectivamente.

La idoneidad general de MAR (Figura 10) muestra que cada tecnología tiene áreas específicas donde su implementación es más adecuada. La captación de agua de lluvia se ajusta mejor en un 15% de la cuenca, especialmente en las zonas altas. La tecnología de pozos es la que tiene mayor aplicabilidad, con un 67.54% del área considerada entre alta y muy alta idoneidad, seguida de la distribución con un 61.72%. La modificación de cauces es la menos favorable, con solo un 3.02% de la cuenca clasificada como muy alta o alta. La tecnología de filtración cubre un 26.87% del área.

Al comparar la viabilidad de las tecnologías, el orden es: LI > P > D > C > F, pero los resultados del mapeo sugieren el siguiente orden: P > D > F > LI > C. En promedio, las metodologías MAR cubren el 52.49% del área de la cuenca con una calificación alta o muy alta, con las zonas cercanas a las fuentes de agua y las áreas altoandinas mostrando el mayor potencial para la implementación de MAR.

### **3.3.3.6. Análisis de sensibilidad.**

En la Tabla 13 se muestra los puntajes del índice de variación, donde cada tecnología MAR, es sensible a ciertos subindicadores. En general los resultados del índice de variación VI, demostró que ningún subindicador causó una gran variación en los puntajes de idoneidad general, al eliminarse; lo que indica que el método propuesto resulta equilibrado en la distribución de peso para los subindicadores.

La captación de agua de lluvia es mayormente sensible a la densidad poblacional seguido del uso actual de suelos. La tecnología de pozos, se mostró más sensible a la distancia a la fuente seguido por el transporte de sedimentos. En la distribución se mostró que la escorrentía acumulada es la más sensible seguida del transporte de sedimentos. La modificación del cauce de arroyos y ríos; y la filtración son más sensibles a la distancia a la fuente de agua y para el indicador de la escorrentía acumula; esto debido a que ambas tecnologías se restringen a cierta distancia de las fuentes de agua.

Así se observa que es de crucial importancia en general desarrollar un buen modelamiento hidrológico para generar las escorrentías, así como el transporte de sedimentos, seguido de un adecuado criterio de asignación de umbrales para la densidad poblacional y un rango máximo de distancia a las fuentes de agua; este último asociado con el costo para el MAR y las características que requieren las mismas.

**Tabla 13:** Análisis de sensibilidad de eliminación junto con la distribución de peso original.

Indicador eliminado	Índice de variación VI (%)														
	Media					Desviación estándar					Distribución del peso (%)				
	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F	LI	P	D	C	F
Disponibilidad hídrica	0.11	0.16	0.12	0.14	0.16	0.10	0.07	0.08	0.07	0.07	11.30	8.30	10.00	10.00	8.30
Calidad de agua	0.18	0.35	0.24	0.24	0.23	0.07	0.05	0.13	0.16	0.14	2.50	8.30	5.00	5.00	8.30
Cobertura vegetal	0.13	0.23	0.19	0.22	0.23	0.05	0.03	0.19	0.03	0.04	2.80	2.10	2.50	2.50	2.10
Textura de suelo	0.15	0.25	0.21	0.23	0.24	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	2.80	2.10	2.50	2.50	2.10
Pendiente	0.03	0.25	0.21	0.26	0.25	0.07	0.04	0.05	0.06	0.05	2.80	2.10	2.50	2.50	2.10
Hidrogeología	0.16	0.25	0.22	0.24	0.25	0.05	0.03	0.04	0.03	0.25	2.80	2.10	2.50	2.50	2.10
Escorrentía acumulada	0.39	0.34	0.44	0.57	0.66	0.06	0.19	0.30	0.25	0.49	12.5	10.0	12.5	12.5	17.5
Coefficiente de varianza	0.06	0.04	0.04	0.06	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Transporte de sedimentos	0.35	0.61	0.38	0.26	0.16	0.10	0.14	0.38	0.12	0.06	7.50	10.00	7.50	7.50	2.50
Formación geológica	0.15	0.16	0.12	0.15	0.23	0.11	0.12	0.08	0.15	0.16	7.50	8.80	6.30	7.50	10.0
Distancia a fallas	0.17	0.08	0.10	0.22	0.20	0.06	0.07	0.08	0.04	0.05	2.50	5.00	3.80	2.50	2.50
Geomorfología	0.23	0.23	0.22	0.33	0.26	0.11	0.12	0.13	0.16	0.13	7.50	8.80	6.30	10.00	10.0
Pendiente	0.12	0.30	0.12	0.17	0.30	0.09	0.05	0.10	0.09	0.05	7.50	2.50	8.80	5.00	2.50
Uso actual del suelo	0.47	0.15	0.28	0.26	0.28	0.26	0.13	0.10	0.11	0.09	11.30	5.00	8.30	3.80	2.50
Densidad poblacional	0.77	0.27	0.35	0.13	0.19	0.22	0.14	0.17	0.07	0.06	11.30	7.50	8.30	3.80	2.50
Proximidad a la fuente	0.16	0.67	0.32	1.22	1.59	0.05	0.18	0.12	0.17	0.28	2.50	12.50	8.30	17.50	20.00

El enfoque propuesto en la investigación agrega la necesidad de MAR como indicador, calculados superficialmente con datos de las licencias de agua actualmente otorgadas por el ANA en la cuenca Cachi, para el mapeo de idoneidad, esto como respuesta al estrés al que está sometido la cuenca en el uso del recurso hídrico, esto debido a que en la cuenca no se cuenta con pozos, y en consecuencia con datos de acuíferos para determinar el estrés y estado de los mismos. El modelamiento hidrológico y el transporte de sedimentos que representan en gran medida la disponibilidad para implementación de las distintas tecnologías, quedando demostrado por el análisis de sensibilidad, donde los caudales fueron producto de modelos anuales con uso de datos obtenidos mediante teledetección y estaciones meteorológicas e hidrométricas en el ámbito de la cuenca. El índice de la recargabilidad intrínseca de los acuíferos al no contarse con datos de estos, queda como función de los indicadores puntuados y peso asignados con trabajos precedentes y bibliografía revisada, así es el índice que mayor incertidumbre representa actualmente en la cuenca. El índice de atractivo económico, considera la densidad poblacional y el uso actual de suelos, como parte en relación a los costos de los terrenos; además de mostrar mayor sensibilidad para la mayoría de las tecnologías el indicador de proximidad a las fuentes de agua. Exceptuando el factor social, del cual no se cuenta con datos.

El análisis geoespacial mediante SIG, permite un mapeo de idoneidad para las cinco tecnologías de MAR, y permite ajustar los pesos de cada indicador a criterio de los desafíos y oportunidades asociadas a cada tecnología MAR en relación con el área de estudio, estos tomados por parte de los tomadores de decisiones en priorizar zonas de la cuenca más idóneas para implementar las distintas tecnologías.

## CONCLUSIONES

1. Se analizó la disponibilidad hídrica espacial y temporal en la cuenca del río Cachi, mostrando su particularidad en la cantidad y la calidad de la misma. Siendo la disponibilidad hídrica en la cuenca Cachi en el mes de agosto el mínimo y con déficit hídrico anual un 35.37 % del área de la cuenca, donde las áreas afectadas corresponden al suroeste de la cuenca (zona de influencia de las captaciones de la represa Cuchoquesera) y el centro (zonas agrícolas); la calidad del agua en la cuenca implica que solo un 35.82% del área cumple los niveles de concentración del ECA (Estándar de calidad ambiental) categoría 3(uso agropecuario).
2. Se identificó y evaluó las metodologías de recarga artificial de acuíferos, analizados la viabilidad técnica, económica y ambiental en la selección de la ubicación óptimas de implementación; mediante el uso de los datos disponibles de las variables meteorológicas, geología, ambiente y teledetección para la cuenca del río Cachi. Así se identificó en relación a su viabilidad de muy alta a muy baja, el orden de las metodologías MAR para la cuenca Cachi: captación de agua de lluvia (1°), pozos (2°), distribución (3°), modificación del cauce de arroyos y ríos (4°), filtración (5°).
3. Se mapeó la idoneidad, identificados y evaluados las distintas metodologías de recarga de acuíferos para la cuenca del río Cachi, considerados los indicadores físicos, hidrológicos, ecológicos y sociales. Mostrándose en el mapeo para las distintas metodologías en relación a las áreas de calificación superiores a alta el siguiente orden: pozos (67.54%), distribución (61.72%), filtración (26.87%), captación de agua de lluvia (15.53%) y modificación del cauce de arroyos y ríos (3.02%).

En promedio las metodologías MAR, cubren más del 50% del área de la cuenca con una calificación entre muy alta y alta, para su implementación; entonces la cuenca Cachi en general posee un buen potencial para la aplicación de tecnologías MAR, como medio paliativo para mejorar la disponibilidad hídrica espacio temporal en calidad y cantidad.

Concluyéndose que la metodología con mayor viabilidad técnica es la captación de lluvia, seguido por la tecnología de pozos, que cubre una mayor área en idoneidad para su implementación.

## **RECOMENDACIONES**

De acuerdo a los resultados obtenidos y con los objetivos propuestos en el trabajo de investigación se realizan las siguientes recomendaciones:

1. Se recomienda ampliar los puntos de monitoreo de calidad de agua, para mejorar la precisión del indicador y ajustar mejor su peso para las metodologías más sensibles a este.
2. Generar información y data, identificando acuíferos para las zonas más estresadas de la cuenca, y mejorar la asignación de puntajes y pesos al índice de recargabilidad intrínseca del acuífero.
3. Se recomienda revisar y examinar más modelos hidrológicos para mejorar el indicador de escorrentía como disponibilidad de agua, el cual resultó ser uno de los parámetros más sensibles para la mayoría de las metodologías MAR.
4. Se sugiere validar los mapas, para los proyectos de la metodología de Captación de agua de lluvia del Fondo Sierra Azul ya ejecutados, analizando y extrapolando la viabilidad para otras metodologías MAR.
5. Se recomienda a los tomadores de decisiones priorizar aquellas áreas más estresadas en relación a la disponibilidad hídrica, la implementación y la evaluación de las distintas metodologías MAR.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alam, S., Borthakur, A., Ravi, S., Gebremichael, M., & Mohanty, S. (2021). *Managed aquifer recharge implementation criteria to achieve water sustainability*.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144992>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2014). *Política y estrategia Nacional de los Recursos Hídricos*. Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2015-07708.  
[https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/default\\_images/politica\\_y\\_estrategia\\_nacional\\_de\\_recursos\\_hidricos\\_ana.pdf](https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/default_images/politica_y_estrategia_nacional_de_recursos_hidricos_ana.pdf).
- Baxter, M., Beardah, C., & Wright, R. (1997). "Some Archaeological Applications of Kernel Density Estimates". *Journal of Archaeological Science*.
- Budyko, M. (1958). *The Heat Balance of the Earth's Surface*. US Department of Commerce, Washington.
- Casanova, J., Pettenati, M., & Devau, N. (2016). *Managed Aquifer Recharge: An Overview of Issues and Options*. In: Jakeman, A.J., Barreteau, O., Hunt, R.J., Rinaudo, J.D., Ross, A. (eds) *Integrated Groundwater Management*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_16)
- CONAGUA. (2003). *Norma oficial mexicana NOM-014-CONAGUA-2003. Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada*. México D.F. (México): Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).  
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/94219/NOM-014-CONAGUA-2003.pdf>.
- CONAGUA. (2019). *Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Procesos avanzados con fines de reúso. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS), libro 35*. México D.F. (México): Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro35.pdf>.
- Del Águila, S. (2024). *Modelamiento hidrológico de cuencas andinas*. Fondo Editorial de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.  
<https://oficinas.unsch.edu.pe/vri/index.php/libros-unsch/>.
- Dillon, P. (2005). *Future management of aquifer recharge*. *Hydrogeol. J.*
- Dillon, P., Pavelic, P., Page, D., Beringen, H., & Ward, J. (2009). *Managed Aquifer Recharge: An Introduction. Waterlines Report Series No 13*. Canberra.

- Dupont, F. (2018). *Managed Aquifer Recharge (MAR), suitability maps and standardized suitability index, the case study of the Occitanie region (South France)*. International Groundwater Resources Assessment Centre, Wageningen University and Research.
- Fenta, A., Kifle, A., Gebreyohannes, T., & Hailu, G. (2015). *Spatial analysis of groundwater potential using remote sensing and GIS-based multi-criteria evaluation in Raya Valley, northern Ethiopia*. *Hydrogeology Journal*, 23 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1198-x>
- Fu, B. (1981). *On the calculation of the evaporation from land surface*. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*.
- Fuentes, I., & Vervoort, R. (2020). *Site suitability and water availability for a managed aquifer recharge project in the Namoi basin, Australia*. *J. Hydrol. (Amst.): Reg. Stud.*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100657>
- Gale, I. (2005). *Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas*. UNESCO IHP, Paris, France.
- Gale, I., Neumann, I., Calow, R., & Moench, M. (2002). *The Effectiveness of Artificial Recharge of Groundwater: a Review*. British Geological Survey Commissioned Report, CR/02/108N.
- González, R. (2005). *Vida Útil Ponderada de Edificaciones*. [Tesis de maestría, San Jose: Universidad Estatal a Distancia de Costa Rica].
- Hengl, T. (2018). *Soil texture classes (USDA system) for 6 soil depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m*. OpenAIRE. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.2525817>
- Hobbs, B., & Meier, P. (2012). *Energy Decisions and the Environment: A Guide to the Use of Multicriteria Methods, International Series in Operations Research & Management Science*. Springer Science & Business Media.
- IGRAC - International Groundwater Resources Assessment Center. (2019). *Recarga Artificial de Aguas Subterráneas en el Mundo*. <https://ggis.un-igrac.org/view/marportal/>
- INEI, Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). *Censos Nacionales 2017*. [https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1539/libro.pdf](https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1539/libro.pdf).
- INGEMMET. (2024). *Geological, mining and energy information for Peru and the world*. <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>

- Itani, N., Harik, G., Alameddine, I., & El-Fadel, M. (2022). *Managed aquifer recharge in karstic systems: Site suitability mapping by coupling multi- multicriteria decision analysis with remote sensing and hydrologic modeling*. *Journal of Environmental Management*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116162>.
- Lodwick, W., Monson, W., & Svoboda, L. (1990). *Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical informations systems: suitability analysis*. En t. *J. Geogr. inf. Ciencia*. <https://doi.org/10.1080/02693799008941556>
- Malczewski , J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science, Advances in Geographic Information Science*. Springer-Verlag , Berlín Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4>
- Malczewski, J. (2006). *GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature*. En t. *J. Geogr. inf. Ciencia*. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>
- Marwaha, N., Kourakos, G., Levintal, E., & Dahlke, H. (2021). *Identifying agricultural managed aquifer recharge locations to benefit drinking water supply in rural communities*. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2020WR028811>
- Mouelhi, S., Madani, K., & Lebdi, F. (2013). *A Structural Overview through GR(s) Models Characteristics for Better Yearly Runoff Simulation*. *Open Journal of Modern Hydrology*. <https://doi.org/10.4236/ojmh.2013.34022>
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006). *Linking stream flow to rainfall at the annual time step: The Manabe bucket model revisited*. *Journal of Hydrology*.
- Murray, R., van der Merwe, B., & van Rensburg, P. (2021). *Managing Aquifer Recharge: A Showcase for Resilience and Sustainability*. Zheng, Y., Ross, A., Villhoth, K., Eds.; UNESCO: Paris, France. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379962.locale=es>.
- Pachauri, R., Meyer, L., Hallegatte, S., Bank, W., Hegerl, G., Brinkman, S., . . . Van Boxmeer., N. (2014). *Climate change 2014: synthesis report*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Ramírez, M. (2003). *Hidrología Aplicada*. Universidad de Los Andes.
- Ringleb, J., Sallwey, J., & Stefan, C. (2016). *Assessment of managed aquifer recharge through modeling—a review*. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.3390/w8120579>

- Ross, A. (2022). *Benefits and Costs of Managed Aquifer Recharge: Further Evidence*. Fenner School of Environment and Society, Australian National University, Canberra 0200, Australia. <https://doi.org/10.3390/w14203257>
- Russo, S., Sillmann, J., & Fischer, E. (2015). *Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades*. *Environ. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124003>
- Saaty, T. (1980). *The analytic hierarchy process mcgraw hill, New York*. *Agric. Econ. Rev.*, 70.
- Sáenz, M. (2019). *Unidad Ejecutora FONDO SIERRA AZUL Proyectos de Inversión de Optimización de Siembra y Cosecha de Agua*. <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/rediagro/2019/minagri-alcance/Cajamarca/servicios-sierra-azul.pdf>
- Sallwey, I., Bonilla, J., Vásquez, F., Junghanns, R., & Stefan, C. (2018). *Suitability maps for managed aquifer recharge: a review of multi-criteria decision analysis studies*. *Environ. Rev.*, 27 (2018). <https://doi.org/10.1139/er-2018-0069>
- Sallwey, J., Bonilla, J., Stefan, C., & Schlick, R. (2019). *Suitability Mapping for Managed Aquifer Recharge: Development of Web-Tools*. *Water* 11(11):2254. <https://doi.org/10.3390/w11112254>
- Shahab, A., Shihua, Q., Rad, S., Keita, S., Khan, M., & Adnan, S. (2019). *Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC method in the irrigated and coastal region of Sindh province, Pakistan*. *Nord. Hydrol*, 50 (2019). <https://doi.org/10.2166/nh.2018.001>
- Stefan, C., & Ansems, N. (2016). *Web-GIS of global inventory of managed aquifer recharge applications*. in: *Proceedings of 9th International Symposium on Managed Aquifer Recharge (ISMAR9)*. Presented at the ISMAR9, June 20-24, 2016, Mexico City, Mexico.
- Talozzi, S., Alharahsheh, T., & Hamdan, I. (2023). *Selecting suitable sites for groundwater recharge in Jordan using the spreading techniques via the integration of multi-criteria decision analysis and geographic information system tools*. *Groundw. Sustain. Dev.* <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100948>
- Zhang, Y., & Chiew, F. (2012). *Estimation of mean annual runoff across southeast Australia by incorporating vegetation types into Budyko framework*. *Australian Journal of Water Resources*. <https://doi.org/10.7158/13241583.2012.11465394>