

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

**PROPUESTA DE MEDIDAS DE SOSTENIBILIDAD PARA UN  
ACUÍFERO SOBREEXPLOTADO CASO: ACUÍFERO  
CAPLINA, TACNA PERÚ - 2024**

**TESIS**

Presentada por:

**Bach. Patrick Richard Campos Zamata**

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO CIVIL**

**TACNA - PERÚ**

**2024**

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**


Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Civil


**“PROPUESTA DE MEDIDAS DE SOSTENIBILIDAD PARA UN  
ACUÍFERO SOBREEXPLOTADO CASO: ACUÍFERO CAPLINA, TACNA  
PERÚ -2024”**

Tesis sustentada y aprobada el día 30 de diciembre de 2024 estando  
integrado el Jurado Calificador por:


**PRESIDENTE**

:   
MSc. Ing. Edgar Chura Arocutipa


**SECRETARIO**

:   
Mgr. Ing. Julia Cleila Laura Quispe

**VOCAL**

:   
Ing. Diego Alexander Calderon Calisaya

**ASESOR DE TESIS**

:   
Ph.D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas

## CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Ph.D. Ing. EDWIN MARTIN PINO VARGAS en mi condición de ASESOR acreditado con Resolución de Facultad N°903-2024-FIG/UNJBG del 22 de noviembre del 2024, del Trabajo de Tesis titulado: "PROPUESTA DE MEDIDAS DE SOSTENIBILIDAD PARA UN ACUÍFERO SOBREEXLOTADO CASO: ACUÍFERO CAPLINA, TACNA PERÚ -2024" Presentado por el Bachiller Patrick Richard Campos Zamata. Para optar el título profesional de Ingeniero Civil.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual de la UNJBG; considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 6%. Por lo que CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis enunciada líneas arriba, la cual esta expedita para continuar con los tramites para optar el título profesional de Ingeniero Civil, según corresponda para su publicación en el Repositorio Institucional.

**Tacna, diciembre 2024.**



**FIRMA ASESOR**

Nombre y apellidos del asesor: Ph.D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas

DNI: 41607963



Huella dactilar



**FIRMA AUTOR**

Nombre y apellidos del autor: Patrick Richard Campos Zamata

DNI: 77580919



Huella dactilar

## **DEDICATORIA**

*Este trabajo está dedicado a mi familia, la cual siempre me ha brindado su apoyo y amor incondicional para poder culminar mis estudios.*

*A mis queridos amigos, Ronaldo y Jean Pool, gracias por estar siempre a mi lado en los momentos más difíciles, por escucharme con paciencia y ofrecerme su apoyo incondicional. Su amistad ha sido una fuente de fortaleza para mí.*

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco a Dios por otorgarme salud y un día más de vida para poder continuar como profesional en esta hermosa carrera que es la Ingeniería Civil. Agradezco a todos mis docentes que me enseñaron todo lo necesario para ser un excelente profesional y poder introducirme en el mundo laboral como un ingeniero capaz.*

*Al Dr. Edwin Pino, mi gratitud infinita por su guía y apoyo incondicional. Sus enseñanzas no solo iluminaron este trabajo, sino también mi camino como investigador. Gracias por creer en mí y motivarme a dar siempre lo mejor.*

*Esta tesis fue desarrollada en el marco de un proyecto de investigación financiado por regalías mineras ININ y VIIN de la UNJBG, a través del proyecto de investigación Estudio de procesos de recarga hidráulica y salinización en el acuífero Caplina, Tacna, Perú, para una Gestión Sostenible de las Aguas Subterráneas (10086-2022-UNJBG).*

## ÍNDICE GENERAL

PORTADA.....	i
HOJA DE JURADO .....	ii
CERTIFICADO DE SIMILITUD .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE GENERAL .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
RESUMEN .....	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES .....	3
1.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	3
1.1.1. Ubicación.....	3
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
1.2.1. Problema principal .....	5
1.2.2. Problemas específicos.....	5
1.3. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN .....	6
1.3.1. Objetivo principal.....	6
1.3.2. Objetivos específicos .....	6
1.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	7
1.5. JUSTIFICACIÓN .....	7

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	9
2.1. MARCO HIDROLÓGICO .....	9
2.1.1. Hidrología - hidrogeología.....	9
2.1.2. Instrumentos legales para la gestión de acuíferos.....	10
2.1.3. Economía en el uso del agua.....	11
2.2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....	12
2.3. MARCO CONCEPTUAL .....	14
2.3.1. Agua subterránea .....	14
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA .....	17
3.1. LEY DE RECURSOS HÍDRICOS DEL PERÚ.....	18
3.2. INSTRUMENTOS DE GESTIÓN .....	19
3.3. RESULTADOS DE LA EVIDENCIA CIENTÍFICA.....	21
3.4. USUARIOS EN CONFLICTO.....	29
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	31
4.1. SOBRE LOS INSTRUMENTOS DE GESTIÓN Y POLÍTICAS PÚBLICAS .....	31
4.2. SOBRE LOS RESULTADOS DE LA EVIDENCIA CIENTÍFICA .....	33
4.3. GESTIÓN, POLÍTICAS PÚBLICAS Y RESULTADOS CIENTÍFICOS .....	35
4.4. ASIGNACIÓN CONCERTADA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	38
CONCLUSIONES .....	41
RECOMENDACIONES.....	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área del proyecto.....	4
Figura 2. Clasificaciones de los acuíferos.....	16
Figura 3. Tendencia del balance hídrico del sistema acuífero Caplina periodo 1965- 2024.....	27
Figura 4. Propuesta metodológica de Asignación Concertada de Aguas Subterráneas.....	38



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Políticas y regulaciones de gestión de aguas residuales en el acuífero Caplina .....	20
Tabla 2. Artículos publicados por resultados de investigación del acuífero Caplina, periodo 2017 a 2023.....	22
Tabla 3. Balance hídrico del acuífero Caplina periodo 1965 a 2024 .....	28

## RESUMEN

La falta de eficacia en la implementación de las normativas relacionadas con el cierre del acuífero Caplina ha llevado a una sobreexplotación que, a su vez, ha desencadenado un deterioro progresivo en la calidad de las aguas subterráneas. Este deterioro se debe principalmente a los procesos de salinización, producto de la intrusión de agua marina. Ante esta problemática, resulta prioritario abordar las causas y los efectos asociados para proponer una solución integral. Esto implica establecer un enfoque colaborativo que involucre tanto a los usuarios del recurso como a las entidades gubernamentales, a fin de garantizar una gestión sostenible y prevenir mayores daños en la calidad del agua. La propuesta se basa en cinco pilares fundamentales que orientan su implementación.

Con base en un análisis de las causas y efectos relacionados, resulta urgente implementar una propuesta consensuada entre los usuarios del recurso y las entidades gubernamentales para la gestión integral de las aguas subterráneas, orientada a prevenir el deterioro de su calidad. Esta propuesta se fundamenta en cuatro aspectos principales: (1) evaluación del estado actual del acuífero, considerando el impacto de la sobreexplotación en la calidad del agua, (2) revisión y ajuste de las licencias para el uso del agua, (3) redistribución de los usos del recurso y sus beneficios, (4) validación y monitoreo del balance hídrico del acuífero y (5) el establecimiento de un sistema de monitoreo continuo que permita medir los impactos de las acciones implementadas. Se espera que esta propuesta, de carácter práctico y estructurado, contribuya a mitigar el inminente riesgo de colapso del sistema acuífero.

*Palabras Claves:* toma de decisiones multicriterio, sensores remotos, proceso de jerarquía analítica, agua subterránea.

## ABSTRACT

The lack of effectiveness in the application of regulations related to the closure of the Caplina aquifer has caused overexploitation which, in turn, has triggered a progressive deterioration in the quality of groundwater. This deterioration is mainly due to salinization processes, a product of the intrusion of seawater. Given this problem, it is a priority to address the associated causes and effects to propose a comprehensive solution. This involves establishing a collaborative approach that involves both resource users and government entities, in order to ensure sustainable management and avoid further damage to water quality. The proposal is based on five fundamental pillars that guide its implementation.

Based on an analysis of the related causes and effects, it is urgent to implement a consensual proposal between users of the resource and government entities for the comprehensive management of groundwater, aimed at preventing the deterioration of its quality. This proposal is based on four main aspects: (1) evaluation of the current state of the aquifer, considering the impact of overexploitation on water quality, (2) review and adjustment of water use licenses, (3) redistribution of uses of the resource and its benefits, (4) the validation and monitoring of the water balance of the aquifer, and (5) the establishment of a continuous monitoring system that allows measuring the impacts of the implemented actions. It is expected that this proposal, of a practical and structured nature, will contribute to mitigating the imminent risk of collapse of the aquifer system. Bibliographic review, which will help understand the social and environmental context.

*Keywords:* Multi-Criteria Decision-Making, Remote Sensing, Analytical Hierarchy Process, Groundwater.

## INTRODUCCIÓN

El aumento de demanda por población, economía y cambio climático sobreexplota los acuíferos (Vansteenberghe y Oliemans, 2002). Aunque se han aplicado políticas, muchas no logran la sostenibilidad de los recursos (Guilfoos et al., 2016). En los últimos 50 años, el incremento en la extracción de agua subterránea a nivel global ha generado significativas repercusiones sociales y económicas que persisten en la actualidad (Sarami-Foroushani et al., 2023).

La optimización del uso de aguas subterráneas busca maximizar los beneficios a largo plazo considerando los costos asociados a su extracción (Cerasoli y Porporato, 2023). La escasez de agua dulce es vista cada vez más como un riesgo global sistémico (Mekonnen y Hoekstra, 2016).

La actividad humana ha deteriorado recursos hídricos subterráneos transfronterizos, provocando problemas graves, como contaminación y salinización (Hamed et al., 2023). Por lo tanto, es importante el uso de tecnologías como la teledetección para lograr proponer una adecuada gestión de los recursos hídricos (Hamed et al., 2022). Las diferentes propuestas como recarga artificial y gestión controlada de aguas subterráneas es una opción efectiva para mitigar el agotamiento de los recursos hídricos y reducir su vulnerabilidad (Hamad et al., 2022).

Es urgente implementar medidas activas de asignación de agua para resolver el grave problema de la sobreexplotación de aguas subterráneas (Parakh y Chaudhuri, 2022; Guo et al., 2023). Además, es crucial adoptar medidas efectivas de asignación de agua para abordar la grave problemática de la sobreexplotación de acuíferos (Rouillard et al., 2022).

En Perú, la crisis en la gestión hídrica es cada vez más evidente, ya que el Estado no toma medidas efectivas para hacer cumplir la prohibición establecida en 1989 y ratificada en 1998, lo que ha intensificado la degradación del acuífero (Pino-Vargas, 2024).

El cambio climático exige herramientas y políticas proactivas para enfrentar los conflictos actuales y futuros (Robertson, 2021). En las zonas desérticas, el uso de aguas subterráneas es cada vez más frecuente para cubrir las crecientes demandas poblacionales y agrícolas (Razzaq et al., 2022 y Hargrove et al., 2023).

El acuífero Caplina en Perú sufre deterioro por bombeo excesivo y las políticas en 40 años no han frenado su degradación irreversible (Pino-Vargas et al., 2023a). La escasez de agua amenaza la seguridad alimentaria y, junto con su mala calidad, favorece enfermedades diarreicas y aumenta la desnutrición en el Perú (Burstein-Roda, 2018a). En regiones áridas transfronterizas con recursos hídricos escasos, la gestión se centra en el uso equitativo y razonable (Zheng y Spijkers, 2021).

# CAPÍTULO I

## ASPECTOS GENERALES

### 1.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

#### 1.1.1. *Ubicación*

La cuenca Caplina se localiza en el desierto de Atacama, al sur del Perú, dentro de la región de Tacna, cerca de la frontera con Chile. Su altitud varía desde el nivel del mar hasta los 5660 metros sobre el nivel del mar, abarcando una superficie aproximada de 4230 km<sup>2</sup>. Al oeste, limita con la cuenca Sama; mientras que al este, colinda con la cuenca Concordia, compartida entre Perú y Chile, y con la cuenca Lluta, ubicada en territorio chileno (figura 1).

#### 1.1.2. *Clima*

La cuenca Caplina presenta dos tipos de clima según su ubicación: un clima cálido-templado, desértico, con una amplitud térmica moderada en las zonas cercanas a la costa y un clima frío-húmedo en las partes altas de la cuenca (Condori et al., 2022; Peña et al., 2009, y Machaca et al., 2022). Además, según los estudios realizados por el SENAMHI, se indica que el clima predominante en la zona de estudio es árido.

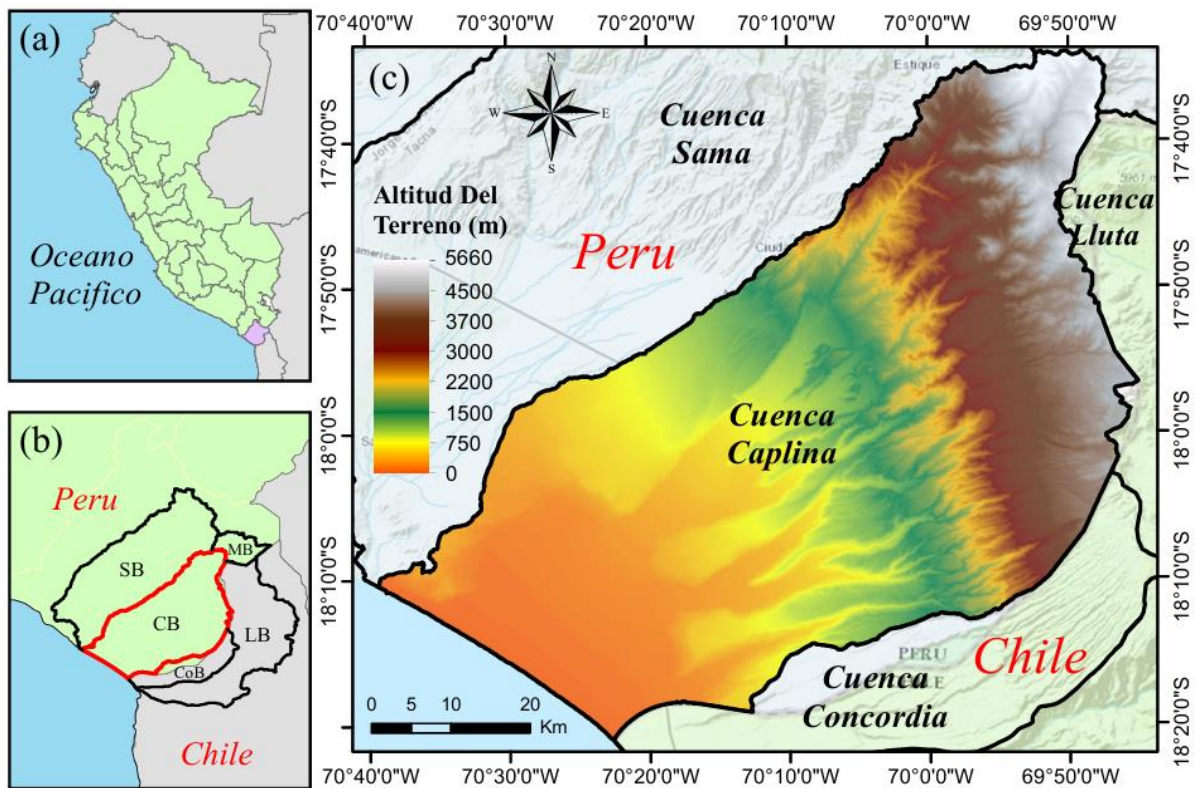
Los restos conservados de la actividad fluvial constituyen una prueba de las condiciones cambiantes de los límites, siendo este desierto un testigo mundial de la aridez (Houston, 2006, y Ritter et al., 2019).

La zona altoandina pertenece al sector centro-occidental del Altiplano, con una precipitación acumulada anual relativamente baja de 300 a 700 mm/año y una variabilidad temporal muy marcada, incluyendo periodos húmedos de diciembre a marzo y periodos muy secos

de abril a noviembre (Garreaud et al., 2003, y Garreaud et al., 2009, 2010). La zona costera tiene un clima desértico; la precipitación anual es escasa e incluso nula; el clima es templado desértico con amplitud térmica moderada y la temperatura máxima y mínima media anual (periodo 1950-2020) son de 23,6 °C y 12,7 °C, respectivamente (Garreaud et al., 2010; Pino y Pino, 2021; Pino Vargas y Ascencios, 2022; Pino-Vargas y Huayna, 2022; Pino-Vargas, Chávarri-Velarde, et al., 2022; Pino-Vargas et al., n. d.).

### Figura 1

*Ubicación del área del proyecto*



*Nota.* Ubicación y cuencas aledañas del área de estudio, Cuenca Caplina (mapa de altitudes).

## **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### ***1.2.1. Problema principal***

La cuenca Caplina, caracterizada por un clima seco y árido a hiperárido, enfrenta una creciente escasez de agua disponible para satisfacer las necesidades de la población de Tacna. Esta problemática, agravada por deficiencias en la gestión y administración de los recursos hídricos, destaca la importancia de implementar medidas de sostenibilidad para evitar un colapso del sistema. La limitada capacidad de las autoridades responsables para desarrollar proyectos que garanticen el acceso a agua subterránea ha derivado en la realización de perforaciones ilegales en la cuenca. En este contexto, se considera esencial llevar a cabo estudios orientados a la prospección de recursos hídricos. Por ello, la presente tesis adopta una metodología basada en una exhaustiva revisión bibliográfica, con el objetivo de analizar las condiciones desfavorables que afectan a la cuenca Caplina.

Según lo abordado nace la siguiente pregunta: ¿Cómo contribuirá la propuesta de medidas de sostenibilidad para el acuífero sobreexplotado de Caplina a prevenir el colapso del sistema?

### ***1.2.2. Problemas específicos***

La sobreexplotación del acuífero Caplina, resultado del uso intensivo y no regulado de sus recursos, así como la inadecuada gestión de los mismos, constituyen los factores centrales que ponen en peligro la sostenibilidad de este sistema hídrico. Esta problemática se ha agravado debido a la creciente demanda de agua por parte de la población, las actividades agrícolas y las perforaciones no autorizadas; lo que ha llevado al deterioro de la calidad y cantidad del recurso disponible. Además, la falta de planes efectivos de manejo y la limitada capacidad de las autoridades para supervisar y regular el uso del acuífero han intensificado el riesgo de colapso. En este contexto, surgen interrogantes fundamentales que buscan abordar y entender las causas



específicas de esta crisis, con el fin de proponer soluciones orientadas hacia la sostenibilidad y conservación del acuífero Caplina.

- ¿Cuál es el estado actual del acuífero Caplina-Tacna?
- ¿Cuán importantes son las medidas de sostenibilidad para mantener un acuífero sin sobreexplotación?
- ¿De qué manera se puede evitar una sobreexplotación en el acuífero Caplina?

### **1.3. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN**

#### ***1.3.1. Objetivo principal***

Proponer medidas de sostenibilidad para el acuífero sobreexplotado Caplina.

#### ***1.3.2. Objetivos específicos***

- Evidenciar que impactos tienen las políticas de gestión de aguas subterráneas en el acuífero Caplina.
- Desarrollar estrategias de concientización dirigidas a la población local sobre la importancia de la conservación del acuífero y el impacto de la sobreexplotación, incentivando prácticas responsables en el uso del agua.
- Demostrar que la evidencia científica puede contribuir a explicar la efectividad de las políticas públicas

#### **1.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

Las propuestas de estrategias de sostenibilidad enfocadas en una gestión eficiente y responsable del acuífero Caplina resultan fundamentales para prevenir su sobreexplotación. Estas acciones no solo contribuirán a mitigar el deterioro del recurso hídrico, sino que también garantizarán su conservación y disponibilidad para satisfacer las necesidades actuales y futuras de la población. Al priorizar un manejo integral que considere factores sociales, económicos y ambientales, se podrá asegurar la sostenibilidad del acuífero a largo plazo, promoviendo un equilibrio entre el uso del agua y la protección del ecosistema asociado.

Se plantea que la implementación de medidas de sostenibilidad en la gestión del acuífero Caplina, Tacna, Perú, contribuirá significativamente a la reducción de la sobreexplotación del recurso hídrico y la mejora de su calidad. Esto se fundamenta en la premisa de que el uso de técnicas de recarga artificial y la adopción de prácticas de agricultura sostenible pueden incrementar la disponibilidad de agua subterránea y mejorar la salud del ecosistema.

Según estudios previos, la recarga artificial puede aumentar la sostenibilidad de los acuíferos sobreexplotados (Stefan et al., 2020). Mientras que las prácticas agrícolas sostenibles han demostrado reducir la demanda de agua y aumentar la eficiencia en el uso del recurso (Wang et al., 2023).

#### **1.5. JUSTIFICACIÓN**

El agua subterránea es una de las fuentes clave para cubrir las necesidades de agua de distintos usuarios dentro de una cuenca. Sin embargo, en muchos casos, las tasas de extracción actuales superan la recarga natural, provocando la sobreexplotación de los acuíferos y la degradación de la calidad del agua. Como resultado, numerosos sistemas acuíferos en el mundo han implementado y ajustadas políticas para gestionar el uso de este recurso. Por lo tanto, la tarea

de proponer medidas de sostenibilidad para el Acuífero Caplina es de vital importancia para los tomadores de decisiones en recursos hídricos y el estado peruano.

Por otro lado, se han desarrollado, implementado y adaptado diversas políticas y regulaciones para asegurar una adecuada gestión de las aguas subterráneas, no obstante, muchas no han sido efectivas para lograr la sostenibilidad de acuíferos (Pino-Vargas et al., 2023a).

Se usaron datos de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  en aguas subterráneas y lluvias, junto con teledetección, mostrando que el océano Pacífico es una fuente importante de humedad (Gamboa et al., 2022). Además, en la cuenca del acuífero Caplina, se han realizado estudios técnicos y científicos sobre hidrodinámica, calidad del agua, sobreexplotación, disponibilidad de agua y cambio climático que demuestra problemas de deterioro en la calidad del agua (Chucuya et al., 2022; Pino et al., 2019; Pino V. et al., 2020; Pino-Vargas, et al., 2022; E. Pino-Vargas, et al., 2022; Pocco et al., 2023 y Vera et al., 2021).

Aunque existen investigaciones previas relacionadas con el acuífero Caplina, estas no abordan de manera detallada los efectos que las políticas y regulaciones tienen sobre la gestión de sus aguas subterráneas. En este sentido, el presente estudio se propone como objetivo principal evaluar el impacto de dichas políticas, analizando de manera crítica los instrumentos de gestión implementados, las normativas aplicadas y la evidencia científica disponible. A través de esta evaluación, se busca identificar los desequilibrios existentes en la administración de los recursos hídricos subterráneos, aportando conocimiento relevante que permita mejorar la planificación y sostenibilidad de este recurso.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. MARCO HIDROLÓGICO**

##### ***2.1.1. Hidrología - hidrogeología***

El acuífero Caplina se caracteriza por su ubicación costera, con una formación a base de cuaternarios aluviales, con fondo plano y francos escarpados (Vera et al., 2022a). El cono de eyección del río Caplina dio origen a la unidad fisiográfica que inicia su desarrollo en el barranco de Magollo y se ensancha progresivamente hasta llegar a la línea de playa, formando el propio delta (Chucuya et al., 2022, y Pino et al., 2020).

Desde el punto de vista hidrográfico, la cuenca Caplina se encuentra comprendida entre las localidades de Pachía y Tacna, se caracteriza por su configuración geomorfológica distintiva; posee una forma similar a un polígono rectangular, con un fondo relativamente plano que contrasta con sus flancos escarpados. Esta particularidad topográfica influye en la dinámica hídrica de la cuenca, así como en los procesos asociados a la recarga y explotación de sus recursos subterráneos, aspectos que resultan clave para su gestión y conservación. La salinización del acuífero se debe al deterioro de su calidad por intrusión marina y su agotamiento (Pino et al., 2020; Pino y Pino, 2021; Pino-Vargas y Ascencios-Templo, 2021, y Vera et al., 2021).

En la década de 1980, se inició el descenso del nivel freático debido a la sobreexplotación de las aguas subterráneas (Pino-Vargas y Ascencios-Templo, 2021). Se espera que el nivel de agua continúe descendiendo de 0,23 a 0,38 m/año, y se quintuple el proceso de salinización del acuífero por intrusión salina (Narvaez-Montoya et al., 2022). En esta región, el desarrollo económico y social se basa en el uso de aguas subterráneas fósiles (Viguiet et al., 2018, 2019).

La tasa de recarga por precipitaciones en la cuenca Caplina resulta muy escasa hace varias décadas (Pino et al., 2019); análogamente, debido al clima árido que somete una cuenca hidrográfica trae consigo un régimen lento de recarga (Vargas y Jaén, 2014), por lo que analizar y proponer medidas de sostenibilidad es fundamental para el desarrollo sostenible del agua.

El sistema del acuífero Caplina seguirá siendo insostenible durante los próximos 20 años, independientemente de los escenarios de explotación que se impongan y se sugiere que cualquier medida de mitigación requiera de la participación de los actores interesados (Narvaez-Montoya et al., 2022) .

Con base en informes elaborados por instituciones como el Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Minero (INIFM) en 1989, el Proyecto Especial Tacna (PET) adscrito al INADE, el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) en 2009 y la Autoridad Nacional del Agua (ANA) entre 2019 y 2022, se evidencia un alarmante deterioro en el balance hídrico del acuífero Caplina. Este declive se observa de manera progresiva desde 1965 hasta 2022, reflejando una creciente preocupación por la sostenibilidad del recurso.

### ***2.1.2. Instrumentos legales para la gestión de acuíferos***

Durante la década de los 80, se determinó que el balance hídrico subterráneo del acuífero Caplina presentaba un déficit, ya que la extracción de agua subterránea superaba significativamente su capacidad de recarga natural. Ante esta problemática, el Estado peruano implementó una serie de disposiciones legales con el objetivo de mitigar el impacto de la sobreexplotación y regular el uso de este recurso (ver tabla 1), orientadas a la conservación del acuífero. Sin embargo, la dación del D.S. N° 007-2015-MINAGRI en 2015, resulta inaplicable, ya que no se puede otorgar licencias de uso de agua para un sistema sobreexplotado, donde se ha

demostrado que el balance hídrico es negativo. Esto pone de manifiesto la limitada capacidad de respuesta del Estado peruano frente a los procesos de deterioro que afectan a los ecosistemas, evidenciando la necesidad de fortalecer las políticas y estrategias para su protección y gestión sostenible. En este caso, la emisión de este decreto supremo revela su fragilidad frente al cumplimiento de la RM. No. 0555-89-AG/DGAS y que fue ratificado por la R.M. N° 696-98-AG que declara veda del acuífero (Pino-Vargas et al., 2023b).

### ***2.1.3. Economía en el uso del agua***

La economía en el uso del agua en Tacna se ha convertido en un tema prioritario debido a la creciente escasez del recurso, especialmente en el acuífero Caplina. Las estrategias implementadas buscan optimizar el consumo en sectores clave como la agricultura, la industria y el uso doméstico, promoviendo prácticas sostenibles y tecnologías de eficiencia hídrica. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la regulación, la inversión en infraestructura y la concienciación ciudadana para garantizar una gestión equilibrada y sostenible del agua.

Las crecientes demandas de agua, los modelos tradicionales de gestión de datos no han sido satisfactorios (Chen et al., 2022). La masiva extracción de agua subterránea se debe al aumento de las demandas impulsadas por el rápido desarrollo económico (Du et al., 2022 y Zhang et al., 2021). El desarrollo económico está limitado por la disponibilidad de agua de buena calidad (Peng et al., 2022). La economía circular del agua busca optimizar su uso y reutilización para maximizar su valor (Dehonor Márquez et al., 2023; Qtaishat et al., 2022 y Salminen et al., 2022). Es esencial considerar que toda actividad económica puede contribuir a un uso más eficiente del agua, un recurso cuya gestión sostenible se vuelve crucial ante la creciente demanda actual (Chicaiza-Maya et al., 2024; Neme et al., 2021; Norouzi et al., 2023). Es fundamental garantizar la eficiencia en la

asignación del agua mediante un sistema integrado que contabilice tanto su cantidad como su calidad, optimizando así su uso sostenible (Jaramillo-Monroy et al., 2021, y Yuan et al., 2023).

A nivel global, los agricultores que utilizan aguas subterráneas pueden agruparse en tres categorías: quienes compran el recurso, quienes lo venden y aquellos que lo emplean de forma autónoma (Razzaq et al., 2022; Villegas, 2020). En el acuífero Caplina, aunque la Ley de Recursos Hídricos N° 29338 no lo establece, se presenta una situación similar con los agricultores que utilizan agua subterránea. A nivel nacional, el agua es considerada un bien cuasi público, con un mercado limitado para bienes privados. Es fundamental establecer un mercado internacional para el comercio virtual del agua, lo que permitiría una gestión más eficiente y una distribución más equitativa de este recurso vital (Pérez-Blanco et al., 2022).

Es crucial mantener una política de precios; sin embargo, esto genera resistencia política social (Pérez-Blanco et al., 2022; Tahamipour-Zarandi y Hosseini-Fakhr, 2022). La subvaloración del agua, al no reconocer su verdadero valor económico, social y ambiental, debe ser abordada urgentemente para evitar su uso ineficiente y sobreexplotación, promoviendo una gestión más sostenible y equitativa del recurso (Arreguín-Cortés et al., 2020; Foster y Chilton, 2020).

La gestión integral del agua incluye tanto indicadores físicos del recurso como aspectos socioeconómicos relacionados con su uso (Mahdavi et al., 2019). Una contabilidad hídrica adecuada facilita la gestión eficiente del agua, ayudando a reducir la vulnerabilidad económica y social asociada a su escasez (Ebrahimi Sarindizaj y Karamouz, 2022; Hamdy et al., 2003).

## **2.2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

En Sudamérica, el Sistema Acuífero Guaraní, compartido por Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, es una de las mayores reservas de agua dulce del mundo y cuenta con un tratado internacional para su gestión (Sindico et al., 2018). México y Estados Unidos tienen una relación

histórica en la gestión de sus aguas transfronterizas y sus acuíferos compartidos son clave para la seguridad hídrica en la frontera común (Hatch, 2017).

Un análisis crítico que combina enfoques de hidrogeología, geografía y ciencia política concluye que los conceptos de aguas subterráneas en la planificación y las leyes mexicanas entre 1948 y 2018 influyeron en los mecanismos de control y distribución del agua, beneficiando el desarrollo económico en varios países (Hatch, 2017; Hatch Kuri y Carrillo Rivera, 2022).

En el Perú, la región de Ica utiliza intensivamente el agua subterránea para la agroexportación, generando sobreexplotación del acuífero y disminución de niveles freáticos, lo que compromete la sostenibilidad del recurso hídrico (Muñoz, 2016).

La agricultura en La Yarada depende de acuíferos costeros afectados por intrusión marina. El cultivo principal, el olivo, destinado a exportación, ha intensificado la extracción de agua, causando desequilibrios importantes. Las políticas estatales han variado entre promover la agricultura industrial y priorizar geopolíticas según el enfoque de cada gobierno peruano (Pino, 2021).

La explotación histórica del acuífero costero Caplina, ubicado en el desierto de Atacama muestra un equilibrio entre recarga y extracción hasta la década 70 y un desequilibrio a partir de los 80. También se evalúa la gestión y se proponen soluciones futuras como barreras hidráulicas para conservar el acuífero (Pino, 2019).

El acuífero Caplina, en el desierto de Atacama, sufre contaminación por intrusión marina debido a la sobreexplotación de aguas subterráneas. Desde los años 80, el balance hídrico es negativo y la gestión estatal de los recursos hídricos ha sido insuficiente pese a las políticas implementadas (Pino-Vargas y Ascencios-Templo, 2021; Vera et al., 2021).



La crisis de gobernabilidad y gobernanza en el uso de las aguas subterráneas en el acuífero costero Caplina es un elemento que contribuye al agotamiento y deterioro de la calidad de las aguas subterráneas debido a los procesos de intrusión marina (Pino V., 2019; Pino V. et al., 2018).

Se han realizado estudios técnicos y científicos para evaluar la hidrodinámica, calidad, explotación y disponibilidad del agua entre otros aspectos (Chucuya et al., 2022; Pino-Vargas, Chávarri-Velarde, et al., 2022; Pino-Vargas et al., 2023a; Pino-Vargas, Taya-Acosta, et al., 2022; Vera et al., 2021, 2022a).

## **2.3. MARCO CONCEPTUAL**

### **2.3.1. Agua subterránea**

El agua subterránea es aquella que se encuentra debajo de la superficie terrestre, almacenada en zonas saturadas del subsuelo. Este recurso esencial forma parte del ciclo hidrológico y es clave para el suministro de agua en diversos ámbitos. La superficie superior de la zona saturada se llama nivel freático (Baird y Low, 2022) . El agua en la zona saturada debajo del nivel freático se conoce como agua subterránea (Baird y Low, 2022). El área saturada debajo del nivel freático se llama acuífero y los acuíferos resultan ser enormes depósitos de agua acumulada (Niazi et al., 2024). El agua subterránea se recarga de forma natural a través de la infiltración de la precipitación y el deshielo, que penetran el suelo y los acuíferos. Además, en el caso de acuíferos profundos, puede recargarse artificialmente mediante la inyección de agua a través de pozos.

Un acuífero es una formación geológica compuesta por capas subterráneas de roca o sedimentos capaces de almacenar y suministrar agua. Estas estructuras subterráneas contienen agua y permiten su flujo, pudiendo estar conformadas por materiales como arena, grava o rocas fracturadas, cuya capacidad para retener y transportar agua puede variar. Los acuíferos son fuentes

cruciales de agua dulce y desempeñan un papel vital en el apoyo a las actividades humanas, la agricultura y los ecosistemas (Kuang et al., 2024).

Los acuíferos dan lugar a tres tipos de clasificaciones (figura 2):

- **Acuífero libre:** Los acuíferos libres son aquellos que tienen como límite superior una superficie libre conocida como nivel freático y como límite inferior una capa confinante. Estos acuíferos se recargan directamente desde la superficie, a través de la infiltración del agua de lluvia o la percolación de cuerpos de agua superficiales (Vélez Otálvaro, 1999).
- **Acuífero confinado:** Los acuíferos confinados están rodeados tanto en su parte superior como inferior por capas impermeables o semipermeables, lo que mantiene el agua en su interior bajo presión. Debido a esta presión, que supera la presión atmosférica, el agua en un pozo que perfora el acuífero subirá por encima de la capa confinante superior (Vélez Otálvaro, 1999).
- **Acuífero semiconfinado:** Los acuíferos semiconfinados, al igual que los confinados, también están bajo presión. Sin embargo, se diferencian de estos por presentar una mayor permeabilidad en las capas que los rodean, lo que permite un flujo de agua más significativo (Vélez Otálvaro, 1999).

## Figura 2

### *Clasificaciones de los acuíferos*



*Nota. Adaptado de Aguas subterráneas (p. 1), por Raúl Castro, 2016, Santiago Editorial*

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

Se recopiló información histórica proveniente de estudios, informes, reportes técnicos y notas de prensa, entre otras fuentes, para analizar las interrelaciones entre los principales aspectos de la legislación peruana sobre recursos hídricos, las estrategias de gestión del agua y los avances científicos. Este trabajo se fundamenta en proyectos de investigación desarrollados en la región, adoptando un enfoque integrado que permite examinar las interacciones entre los diversos elementos y comprender su respuesta tanto interna como externa. El propósito principal fue evaluar la aplicación de la normativa en el contexto de los hallazgos respaldados por evidencia científica. Los resultados obtenidos a partir de estas interacciones permitirán determinar la sostenibilidad de los recursos hídricos subterráneos en función de los enfoques analizados.

Se cuenta con una recopilación organizada cronológicamente de información relacionada tanto con el acuífero Caplina como con las aguas subterráneas a nivel nacional en el Perú. Para el análisis, se empleó la hermenéutica jurídica como herramienta metodológica, lo que permitió interpretar y comparar la aplicación de la normativa hídrica en dos niveles: el ámbito nacional y la región de Tacna, donde se encuentra el área de estudio. Este enfoque se centró en la regulación específica de las aguas subterráneas y su relación con los instrumentos internacionales relevantes. Además, se contrastaron estas disposiciones legales con los hallazgos obtenidos a través de investigaciones científicas, incluidas las conclusiones de proyectos de investigación realizados en la región y la difusión de artículos académicos relacionados. Este análisis busca resaltar las interacciones entre la normativa y la evidencia científica para comprender mejor el marco regulatorio en el contexto de los recursos hídricos subterráneos.

### **3.1. LEY DE RECURSOS HÍDRICOS DEL PERÚ**

El 31 de marzo de 2009, se promulgó la Ley N° 29338, conocida como la Ley de Recursos Hídricos del Perú. Esta normativa consta de 125 artículos, 12 disposiciones complementarias finales, 2 disposiciones complementarias transitorias y una disposición derogatoria. Su principal propósito es establecer la regulación del uso y la gestión integral de los recursos hídricos del país. La ley abarca no solo las aguas superficiales, subterráneas y continentales, sino también los bienes relacionados con ellas. Además, incluye las aguas marítimas y atmosféricas en los casos que corresponda. Esta legislación delimita las responsabilidades tanto del Estado como de los particulares en la gestión del agua y los bienes asociados, promoviendo un enfoque integral en su administración.

La Ley N° 29338 se sustenta en 11 principios fundamentales que orientan su aplicación y reflejan su enfoque integral sobre los recursos hídricos. Estos principios son los siguientes: (1) la valoración y gestión integral del agua, (2) la prioridad en el acceso al agua para usos esenciales, (3) la promoción de la participación ciudadana y la cultura del agua, (4) la garantía de la seguridad hídrica, (5) el respeto por los derechos tradicionales de uso del agua de las comunidades campesinas y nativas, (6) la sostenibilidad en el manejo del recurso, (7) la descentralización de la gestión pública del agua bajo una autoridad única, (8) la adopción del principio precautorio para evitar daños al recurso, (9) la eficiencia en su uso y manejo, (10) la gestión integral y participativa basada en cuencas hidrográficas y (11) la tutela legal que asegura la protección del recurso y su uso adecuado. Estos principios están detallados y operativizados en los 125 artículos de la ley, así como en su reglamento, estableciendo un marco normativo coherente y estructurado para la gestión del agua en el país.

La última modificación significativa al reglamento de la Ley N.º 29338, Ley de Recursos Hídricos, se llevó a cabo mediante el Decreto Supremo N.º 009-2021-MIDAGRI, publicado el 25 de mayo de 2021. Esta reforma introdujo cambios orientados a mejorar la gestión descentralizada de los recursos hídricos, particularmente en el ámbito de los Consejos de Recursos Hídricos de Cuenca Interregional. Según lo establecido, la presidencia de estos consejos puede ser asumida de manera rotativa o permanente por alguno de los gobiernos regionales involucrados, con criterios y condiciones definidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) mediante resoluciones específicas. Estos ajustes buscan fortalecer la administración participativa e integrada del agua, en línea con los principios fundamentales de la ley.

### **3.2. INSTRUMENTOS DE GESTIÓN**

Durante la década de 1980, se determinó que el sistema acuífero Caplina presentaba un balance hídrico negativo, dado que la extracción superaba la recarga natural del agua. En respuesta, diversas instituciones, como el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), el Tribunal Constitucional (TC), el Gobierno Regional de Tacna (GORE), la Autoridad Nacional del Agua (ANA), entre otras, implementaron instrumentos legales destinados a la conservación del acuífero (tabla 1). Entre 1984 y 2010, se establecieron y ratificaron medidas orientadas a preservar las aguas subterráneas. Sin embargo, en 2015, el MINAGRI promulgó el Decreto Supremo N.º 007-2015-MINAGRI, que resultó contradictorio al permitir, de manera excepcional y única, la formalización o regularización de licencias de uso de agua en el acuífero Caplina, a pesar de que este había sido declarado como área cerrada. Este decreto entró en conflicto con la Ley de Recursos Hídricos, que establece que las licencias de uso solo pueden otorgarse cuando existe un excedente comprobado de agua en la zona correspondiente.

**Tabla 1***Políticas y regulaciones de gestión de aguas residuales en el acuífero Caplina*

<b>Instrumento</b>	<b>Institución, Año, Escala de aplicación</b>	<b>Ámbitos</b>
Decreto Supremo N°080-84-AG	MINAGRI, 1984, Local	Las aguas subterráneas de las pampas de La Yarada fueron reservadas por dos años.
Decreto Supremo N°020-87-AG	MINAGRI, 1987, Local	Se prorroga por dos años más la reserva de aguas subterráneas en las pampas de La Yarada.
Resolución Ministerial N°0555-89-AG/DGAS	MINAGRI, 1989, Local	Se prohíbe la ejecución de obras destinadas a extraer aguas subterráneas en las pampas de La Yarada.
Resolución Ministerial N°696-98-AG	MINAGRI, 1998, Local	Se declara la prohibición de incrementar la explotación de aguas subterráneas en el acuífero.
Sentencia del Tribunal Constitucional N°1290-2002-AC/TC	TC, 2003, Local	Se pronuncio sobre la declaratoria de clausura y la no aplicación de la normativa para la regularización de las licencias de agua en la zona declarada de clausura.
Ordenanza Regional N°009-2024-CR/GOB.REG.TACNA	GORE, 2004, Local	Declaran de interés regional la intangibilidad y conservación de las aguas subterráneas y tierras baldías del estado Las Pampas desde La Yarada.
Decreto Supremo N°65-2006-AG	MINAGRI, 2006, Local	Se declara de necesidad pública e interés nacional de la conservación y preservación de los recursos hídricos del Valle de Caplina, extendiéndose la veda a todo el acuífero de Caplina.
Ley de Recursos Hídricos Ley N°29338	MINAGRI, 2009, Nacional	Regula el uso de gestión de los recursos hídricos e incluye las aguas superficiales, subterráneas y continentales y los bienes asociados a ellas y se extiende a las aguas marítimas y atmosféricas en lo aplicable.
Resolución de jefe N°327-2009-ANA	ANA, 2009, Local	Ratifican declaración de veda del acuífero del valle del río Caplina, que incluye el acuífero La Yarada; prohibición de ejecución de obras de explotación de aguas subterráneas.
Reglamento de la Ley N°29338	MINAGRI, 2010, Nacional	El reglamento tiene por objeto regular el uso y gestión de los recursos hídricos, así como la actuación del Estado y de los particulares en dicha gestión, todo ello mediante las disposiciones contenidas en la Ley de Recursos Hídricos, Ley N° 29338.
Resolución de Jefe N°201-2010-ANA	ANA, 2010, Local	Ratifica las medidas para la conservación y preservación de las aguas subterráneas, con base en el estudio "Modelación Numérica del acuífero La Yarada", que concluye que existe sobreexplotación

---

del acuífero y recomienda mantener la veda de la explotación del sistema.

---

Decreto Supremo N°007-2015-MINAGRI	MINAGRI, 2015, Nacional	Las zonas declaradas en "temporada de veda" mantienen su condición, procediéndose excepcionalmente y por una sola vez a formalizar o regularizar las licen de aprovechamiento de agua.
Decreto Supremo N°009-2021-MIDAGRI	MIDAGRI. 2021. Nacional	Modifica la composición y presidencia de los Consejos de Recursos Hídricos de la Cuenca, la presidencia de estos consejos puede ejercerse de manera rotativa o permanente por representante de los gobiernos regionales involucrados.

---

### **3.3. RESULTADOS DE LA EVIDENCIA CIENTÍFICA**

En los últimos años, se han llevado a cabo diversos proyectos de investigación en el área de estudio, orientados a profundizar en el conocimiento del funcionamiento hidrogeológico del sistema acuífero. Estos estudios también han abordado la identificación de los factores que desencadenan conflictos entre los usuarios del recurso hídrico y las causas subyacentes de procesos de contaminación, como la intrusión marina. Estos aspectos resultan clave para comprender las dinámicas del sistema y plantear soluciones sostenibles. La tabla 2 incluye un listado cronológico de publicaciones científicas relacionadas con el acuífero Caplina, que abarca el período de 2017 a 2024. Estas publicaciones fueron utilizadas como base para analizar y contrastar los resultados científicos con los enfoques planteados en las políticas públicas, promoviendo así una integración entre la ciencia y la gestión del recurso.



**Tabla 2**

*Artículos publicados por resultados de investigación del acuífero Caplina, periodo 2017 a 2024*

<b>Artículo</b>	<b>Diario, año</b>	<b>Referencia</b>
Recarga hidráulica y dinámica de elementos durante la salinización en un acuífero costero sobreexplotado de la zona más seca del mundo: el desierto de Atacama.	Ciencia del medio ambiente total, 2024	(González-Domínguez et al., 2024)
Una propuesta concertada basada en un escenario de colapso inminente para la gestión de aguas subterráneas en un acuífero sobreexplotado, el desierto de Atacama.	ARPHA Proceedings, 2024	(Pino-Vargas, 2024)
Machine Learning para clasificar el uso indiscriminado del suelo con fines agrícolas y su relación con el cambio climático, cabecera desierto Atacama.	La Biblioteca Electrónica Científica en Línea, 2023	(Maquera-Callo et al., 2023)
Impactos de las políticas de gestión de aguas subterráneas en el acuífero Caplina, desierto de Atacama	Agua , 2023	(Pino-Vargas et al., 2023)
Una técnica de toma de decisiones multicriterio utilizando sensores remotos para evaluar el potencial de las aguas subterráneas en la cuenca de la zona árida del desierto de Atacama.	Agua , 2023	(Pocco et al., 2023)
Análisis espaciotemporal de islas de calor urbanas en relación con el desarrollo urbano, en las proximidades del desierto de Atacama.	Clima , 2022	(Espinoza-Molina et al., 2022)
Sustentabilidad del cultivo del olivo bajo un enfoque climático en una región árida, cabecera del desierto de Atacama.	Ciencia y Tecnología Agropecuaria , 2022	(Pino Vargas y Ascencios, 2022)
Aprendizaje automático profundo para pronosticar la evapotranspiración potencial diaria en regiones áridas, caso desierto de Atacama.	Agricultura , 2022	(Pino-Vargas, Taya-Acosta, et al., 2022)
Metodología de ponderación morfométrica e hidrogeoquímica para clasificar la susceptibilidad a la meteorización química en las subcuencas del río Caplina, Tacna, Perú.	Tecnología y ciencias del agua , 2022	(Vera et al., 2022b)
Evolución espacial y temporal del cultivo del olivo debido al ataque de plagas, mediante teledetección y procesamiento de imágenes de satélite.	Ciencia Agropecuaria , 2022	(Pino Vargas y Huayna, 2022)
Caracterización hidrogeoquímica e identificación de factores que influyen en la	Int. J. Environ. Res. Salud Pública , 2022	(Chucuya et al., 2022)

calidad de las aguas subterráneas en acuíferos costeros, Caso: La Yarada, Tacna, Perú.		
Predicción de escenarios adversos para un sistema acuífero costero transfronterizo en el desierto de Atacama (Perú/Chile).	Ciencia del medio ambiente total , 2022	(Narvaez-Montoya et al., 2022)
Impactos del Cambio Climático y Variabilidad sobre la Precipitación y Caudales Máximos en la Quebrada del Diablo, Tacna, Perú.	Hidrología , 2022	(Pino-Vargas, Chávarri-Velarde, et al., 2022)
Evidencias del cambio climático en la región hiperárida de la costa sur del Perú, cabecera del desierto de Atacama.	Tecnología y Ciencias Del Agua , 2022	(Pino-Vargas et al., n.d.)
Un análisis costo beneficio de opciones de gestión estratégica y operativa para el manejo del agua en la zona hiperárida del sur del Perú.	Gestión del agua para la agricultura , 2022	(Tapsuwan et al., 2022)
La implementación de la veda como herramienta para controlar la degradación del acuífero costero La Yarada, Tacna, Perú.	Diálogo Andino , 2021	(Pino-Vargas y Ascencios-Templo, 2021)
Conflictos por el uso del agua en una región árida: Caso Tacna, Perú.	Diálogo Andino, 2021	(Pino V., 2021)
Hidrodinámica, hidroquímica y geoquímica de isótopos estables para evaluar el comportamiento temporal de la intrusión de agua de mar en el acuífero La Yarada en las cercanías del desierto de Atacama, Tacna, Perú.	Agua , 2021	(Vera et al., 2021)
Evolución histórica de la conceptualización y uso hidrogeológico del acuífero Caplina ubicado en el borde norte del desierto de Atacama.	Revista Ingeniería UC , 2021	(Pino-Vargas et al., 2021)
Sobreexplotación de aguas subterráneas y agroexportación en el acuífero costero Yarada, Tacna, Perú.	Agricultura Sociedad Y Desarrollo , 2021	(Pino, 2021)
Medidas de mitigación para el acuífero costero La Yarada, un sistema sobreexplotado en zonas áridas.	Ideas , 2020	(Pino V. et al., 2020)
Producción de recursos subterráneos en el desierto de Atacama: minería y extracción de agua en el distrito de Taltal, norte de Chile, en los siglos XIX y principios del XX.	Geografía política , 2020	(Mendez et al., 2020)
Factores que inciden en el agotamiento y contaminación por intrusión marina en el acuífero costero de La Yarada, Tacna, Perú.	Tecnología y ciencias del agua , 2019	(Pino et al., 2019)
El acuífero costero La Yarada, después de 100 años de explotación como medio de vida para	Ideas , 2019	(Pino V., 2019)

la agricultura en zonas áridas: Una revisión histórica.

Seguridad hídrica en el acuífero costero La Yarada: Retos actuales y futuros.	Ciencia Agroindustrial , 2019	(Pino-Vargas, 2019)
Disponibilidad futura de agua en ecosistemas de zonas áridas del sur de Perú y norte de Chile.	Ciencia Agroindustrial, 2019	(Pino-Vargas et al., 2019)
Estudio multidisciplinario para la evaluación de la geometría, límites y zonas preferenciales de recarga de un acuífero sobreexplotado en el desierto de Atacama (Pampa del Tamarugal, Norte de Chile).	Revista de Ciencias de la Tierra de Sudamérica , 2018	(Viguier et al., 2018)
Crisis de gobernanza y gobernabilidad y sus implicancias en el uso inadecuado de las aguas subterráneas, caso del acuífero costero de La Yarada, Tacna, Perú.	Ideas , 2018	(Vera et al., 2021)
Caracterización hidrogeológica para determinar el deterioro de la calidad del agua en el acuífero La Yarada Media.	Revista de Investigaciones Altoandinas, 2018	(Vera et al., 2021)
Efecto de las características ambientales y geológicas en la calidad del agua en la cuenca del río Caplina, Tacna, Perú.	Tecnología y Ciencias del Agua , 2017	(Pino et al., 2017)

Los resultados obtenidos y los hallazgos de los estudios mencionados en los artículos referenciados en la (tabla 2) pueden organizarse en tres categorías claramente diferenciadas. La primera categoría incluye investigaciones centradas en la caracterización de la variabilidad climática y los cambios asociados al clima en el área de estudio, ofreciendo un análisis detallado de estos fenómenos. La segunda categoría abarca trabajos que exploran el funcionamiento del sistema acuífero desde diversas perspectivas técnicas, como la hidrodinámica, la hidroquímica, la hidrogeoquímica y los estudios isotópicos, proporcionando una comprensión integral de su dinámica. Finalmente, la tercera categoría reúne estudios enfocados en la gestión del acuífero, con especial énfasis en aspectos relacionados con la gobernanza y la gobernabilidad, destacando la importancia de estrategias sostenibles y políticas adecuadas para su manejo.

Estudios recientes indican que la mala aplicación de la legislación vigente sobre el estado de veda en el acuífero caplina, ha generado un deterioro progresivo de la calidad de agua subterráneas debido a los procesos de salinización por intrusión marina (González-Domínguez et al., 202 y Pino-Vargas, 2024).

Por otro lado, se evidenciaron la variabilidad y el cambio climático. Situada al extremo norte del desierto de Atacama, la ciudad de Tacna, en Perú, se destaca como una de las ciudades más grandes en zonas áridas, con un crecimiento urbano sostenido. Esto resalta la importancia de analizar el comportamiento térmico de la superficie urbana y su vínculo con la disponibilidad de recursos hídricos, aspectos clave para un desarrollo sostenible en este entorno (Espinoza-Molina et al., 2022). Las proyecciones globales del cambio climático indican impactos negativos sobre los sistemas hidrológicos, y en muchas partes del mundo se esperan inundaciones y sequías (Pino-Vargas, Chávarri-Velarde, et al., 2022).

Asimismo, en los últimos años, en el norte de Chile y sur de Perú, se ha detectado evidencia de cambio climático en lugares donde nunca se había registrado precipitación, y ahora hay una acumulación de agua en la superficie (Azua-Bustos et al., 2018).

Además, otros estudios en los Andes tropicales, se han llevado a cabo experiencias recientes que combinan ciencia y política en niveles de gobierno nacional y supranacional. Estas experiencias han dado lugar a la creación de un marco destinado a apoyar científicamente la adaptación al cambio climático, estructurado en tres etapas clave: (1) la identificación y definición del problema; (2) el análisis científico del clima, junto con la evaluación de impactos, vulnerabilidades y riesgos; (3) la valoración de las opciones de adaptación y su posterior implementación. Este estudio destaca la relevancia de una colaboración estrecha entre actores científicos y no científicos para establecer un enfoque conjunto, definir sistemas socioambientales,

delimitar horizontes temporales y fomentar una integración más profunda entre las ciencias sociales y las ciencias físicas del clima y sus impactos (Huggel et al., 2015).

Las conclusiones científicas más destacadas para esta región indican que los recursos de agua subterránea han sido sometidos a una explotación excesiva. Durante el período previo a la década de 1970, la extracción de agua subterránea se mantuvo en un régimen de equilibrio, en el que las extracciones se compensaban con la recarga natural. Sin embargo, a partir de la década de 1980, este equilibrio se perdió, marcando el inicio de un uso insostenible de este recurso vital (Pino, 2019; Pino-Vargas et al., 2021). Además, la crisis en la gobernabilidad y gobernanza relacionada con el manejo del agua subterránea es un factor clave que acelera su agotamiento y el deterioro de su calidad. Este problema se ve agravado por fenómenos como la intrusión marina, que comprometen aún más la sostenibilidad de este recurso (Pino, 2021). El bombeo excesivo ha provocado en la actualidad serios problemas en la gestión del agua subterránea, incluyendo el abandono de pozos de agua salinizada (Chucuya et al., 2022; Pino et al., 2020).

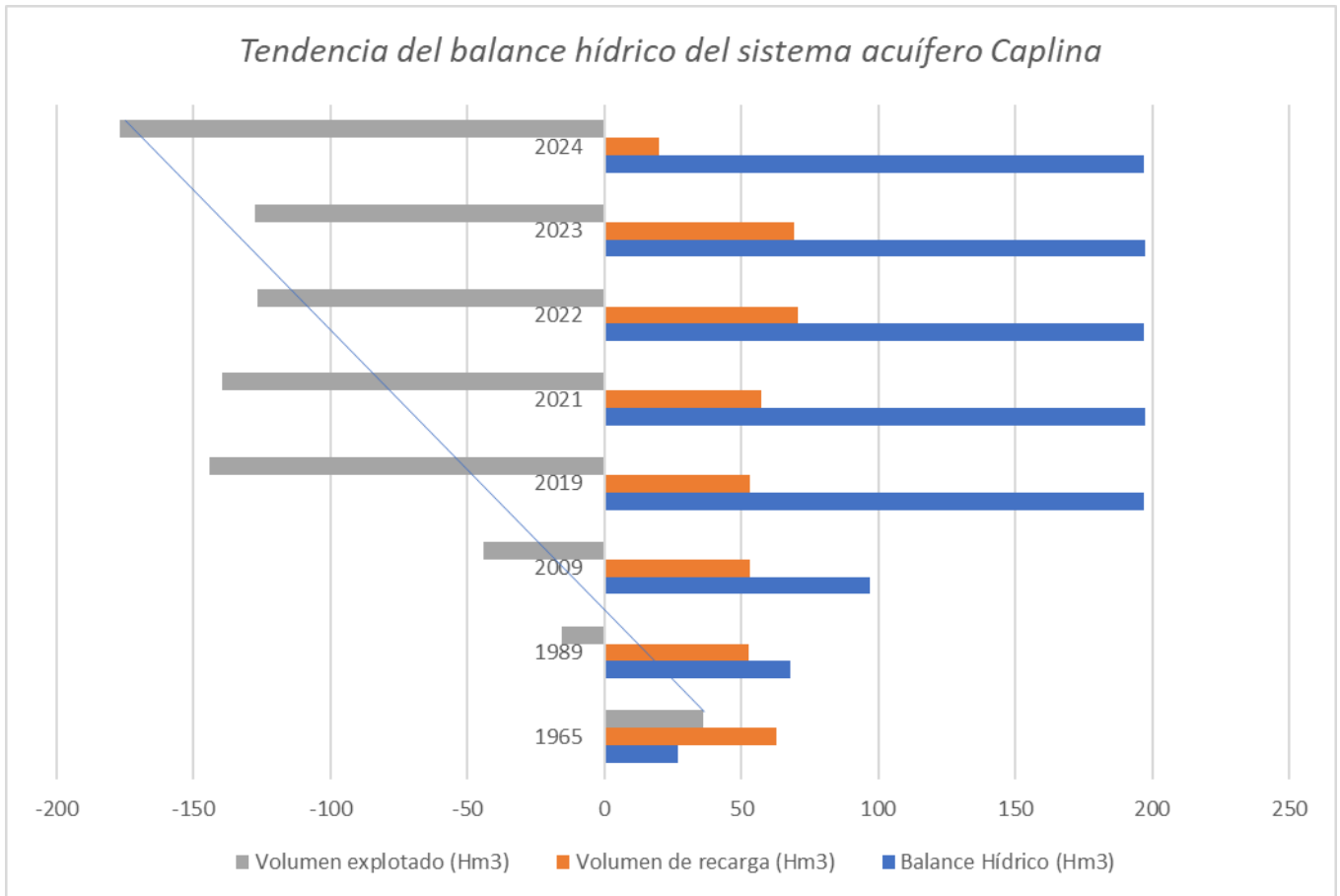
El sistema acuífero Caplina enfrenta un panorama de insostenibilidad proyectado para los próximos 20 años, sin importar los escenarios de explotación que se implementen. Ante esta situación, se destaca que cualquier estrategia de mitigación debe contar con la participación activa de los actores interesados, promoviendo un enfoque colaborativo para abordar este desafío (Narvaez-Montoya et al., 2022).

En la (figura 3), muestra la evolución del balance hídrico del acuífero Caplina, información generada por diversas instituciones para el periodo 1965 al 2022. En la tabla 3, se muestran los datos recolectados y las instituciones que los reportan: en 1965, el Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Minero (INIFM); en 1989, el Proyecto Especial Tacna (PET), adscrito

al Instituto Nacional de Desarrollo (INADE); en 2009, el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) y, en 2019 y 2022, la Autoridad Nacional del Agua (ANA)

**Figura 3**

*Tendencia del balance hídrico del sistema acuífero Caplina periodo 1965 a 2024*



*Nota.* La figura muestra la tendencia del balance hídrico del sistema acuífero Caplina.

**Tabla 3***Balance hídrico del acuífero Caplina periodo 1965 a 2024*

Año	1965	1989	2009	2019	2021	2022	2023	2024
Volumen explotado (Hm3)	27	68	97	197.1	197.21	197.1	197.26	196.84
Volumen de recarga (Hm3)	63	52.5	53	53	57.46	70.6	69.5	19.84
Equilibrio (Hm3)	36	-15.5	-44	-144.1	-139.75	-126.5	-127.76	-177
Institución	INIFM	PET INADE	INGEMMET	ANA	ANA	ANA	ANA	(González-Domínguez et al., 2024)

Los hallazgos de estos estudios disminuyen significativamente la viabilidad de la sostenibilidad del sistema acuífero Caplina. La evidencia indica que los recursos hídricos, especialmente los subterráneos en esta área, están seriamente afectados por los efectos de la variabilidad climática y el cambio climático, lo que genera consecuencias desfavorables para su estabilidad futura. Las reservas del acuífero Caplina están deteriorándose significativamente y los estudios proyectan un colapso futuro del sistema. Este deterioro se manifestará principalmente a través de la salinización de los pozos utilizados para la extracción de aguas subterráneas, un fenómeno que pone en riesgo la calidad del recurso y su disponibilidad para usos agrícolas y domésticos. Esta situación refuerza la urgencia de implementar estrategias sostenibles para mitigar estos efectos y garantizar la estabilidad hídrica en la región.

Según lo presentado en la figura 3, la tendencia de la línea de balance hídrico del acuífero Caplina muestra un patrón geométrico hacia valores negativos. Este comportamiento evidencia un desequilibrio creciente entre la extracción y la recarga natural, lo que tiene implicaciones severamente negativas para alcanzar una gestión sostenible de las aguas subterráneas. Este déficit constante amenaza con agotar el recurso, agravando los problemas relacionados con su disponibilidad y calidad en la región.

Se ha determinado que el acuífero Caplina cuenta con una recarga anual de 19,84 Hm<sup>3</sup>, mientras que la extracción de agua subterránea alcanza los 197 Hm<sup>3</sup> al año, lo que genera un déficit hídrico anual de 177 Hm<sup>3</sup> (González-Domínguez et al., 2024).

### **3.4. USUARIOS EN CONFLICTO**

Ley de Recursos Hídricos del Perú clasifica el uso del agua en tres categorías: prioritario, poblacional y productivo. Dentro del uso productivo, las prioridades incluyen actividades como la agricultura, ganadería, acuicultura, energía, industria, minería, turismo y transporte. En la región, los principales conflictos de uso surgen entre agricultores y mineras, entidades estatales y comuneros altoandinos, y entre entidades estatales y usuarios de aguas subterráneas, siendo estas disputas las de mayor impacto.

El primer caso, entre agricultores y empresas mineras en la zona altoandina, los agricultores demandan una revisión de las licencias de uso de agua otorgadas a la minería formal. Este problema se agrava debido a la política del canon minero, que beneficia exclusivamente a los municipios donde están ubicadas las minas, sin considerar a aquellos donde se extrae el agua. Esto ha generado reclamos significativos, especialmente en la zona interandina de Candarave, ubicada en la parte alta de la cuenca del Locumba, donde los usuarios han expresado su descontento por esta desigualdad en la distribución de recursos.

En la zona altoandina, el conflicto principal surge entre las entidades gubernamentales encargadas de gestionar y transferir agua hacia la costa y los comuneros altoandinos. Estos últimos expresan su descontento debido a la percepción de que sus necesidades locales no son priorizadas frente a las demandas de zonas costeras, lo que genera tensiones por la distribución equitativa de los recursos hídricos en la región (Oré, 2018; Oré-Vélez y Geng-Montoya, 2015; Pino-Vargas y Ascencios-Templo, 2021). Esto representa un segundo caso donde el Estado peruano aprueba



proyectos hidráulicos para transferir agua superficial y subterránea desde las cuencas altoandinas, que conectan la vertiente del lago Titicaca con la del Pacífico. Sin embargo, los comuneros, en firme oposición, logran detener la ejecución de estas obras, incluso cuando estas cuentan con las autorizaciones necesarias.

El tercer caso se refiere al uso excesivo de las aguas subterráneas del acuífero Caplina, que enfrenta problemas críticos debido a su sobreexplotación. El bombeo intensivo ha generado desafíos significativos en su gestión, como el abandono de pozos afectados por la intrusión marina. Esto refleja una crisis de gobernanza y manejo inadecuado, que contribuye al agotamiento y deterioro de la calidad del agua subterránea en la zona, agravado por los procesos de intrusión marina en el acuífero (Pino et al., 2019; Pino, 2019; Pino et al., 2018; Pino Vargas y Ascencios, 2022; Pino-Vargas et al., 2023b; Pino-Vargas y Chávarri-Velarde, 2022).

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. SOBRE LOS INSTRUMENTOS DE GESTIÓN Y POLÍTICAS PÚBLICAS

En el Perú, aunque el marco regulatorio está definido, persiste la falta de voluntad política para crear las condiciones económicas necesarias y promover mecanismos de interacción intersectorial, así como la participación de actores estratégicos no gubernamentales, lo cual es fundamental para consolidar la gobernanza del agua (Burstein-Roda, 2018b). Implementar estas acciones ayudaría a definir directrices concretas para la gestión integral de cuencas hidrográficas (GIRH) en el territorio nacional. En particular, el sur del país, al estar en una zona extremadamente árida, presenta características singulares, donde el déficit hídrico se convierte en el factor central, dando lugar a conflictos sociales entre los usuarios del recurso hídrico. Esta problemática, en todos sus aspectos, trasciende y supera las normativas relacionadas con los regímenes de gestión y las restricciones sobre la disponibilidad de los recursos hídricos (Pino V. et al., 2018).

La región de Tacna enfrenta una marcada escasez de recursos hídricos, lo que impide satisfacer plenamente las necesidades de la población y las actividades agrícolas, entre otras. Esta brecha entre oferta y demanda hídrica se agrava con el paso del tiempo. Los recursos de agua superficial provenientes de los ríos Caplina, Sama y Locumba, ubicados en la vertiente del Pacífico, resultan insuficientes. Por su parte, las reservas subterráneas no logran abastecer la demanda actual de riego en La Yarada. Desde la década de 1980, la intensa explotación del acuífero Caplina, especialmente para uso agrícola, ha generado un agotamiento significativo de las aguas subterráneas y la consecuente intrusión de agua salada (Chucuya et al., 2022; Narvaez-Montoya et al., 2022; Pino, 2019; Pocco et al., 2023 y Vera et al., 2021).

En el caso de los conflictos entre agricultores y empresas mineras en la zona altoandina, la disputa por el acceso al agua es constante. Los agricultores demandan una reevaluación de las licencias de uso, argumentando que la Ley de Recursos Hídricos únicamente establece prioridades de utilización, otorgando a la agricultura un lugar preferente. Sin embargo, este problema supera los límites de la economía nacional, volviéndose altamente complejo. Además, la situación se complica debido a vacíos legales que dificultan la resolución efectiva de este tipo de disputas.

El enfrentamiento entre las entidades gubernamentales responsables de trasvasar agua hacia la costa y los comuneros de la zona altoandina tiene raíces históricas, remontándose a los primeros indicios del déficit hídrico en la ciudad y el valle de Tacna. La Ley de Recursos Hídricos y su reglamento no respaldan ni garantizan que las demandas de agua puedan ser atendidas mediante trasvases entre cuencas, lo que ha llevado a la paralización de obras por acciones judiciales. Esta situación ha generado un clima de incertidumbre que pone en riesgo la sostenibilidad de los recursos subterráneos en la región. A lo largo de la historia, conflictos por recursos naturales como oro, diamantes y petróleo han sido comunes; no obstante, el agua, que anteriormente no se percibía como un motivo de disputa, ha emergido como el "oro azul" de este siglo debido al impacto del cambio climático (Navarro et al., 2021).

El uso de las aguas subterráneas del acuífero Caplina se ve gravemente afectado por la extracción no autorizada realizada por ciertos usuarios, lo que provoca un marcado desequilibrio en el sistema y genera un caos generalizado. Estas extracciones exceden ampliamente la capacidad de recarga del acuífero, complicando aún más la situación. Las autoridades intentan imponer orden en estas prácticas; pero, enfrentan una complejidad creciente que incluye conflictos sociales, manifestados en agresiones verbales e incluso físicas contra los representantes estatales encargados de la gestión del agua. Es crucial establecer un marco regulatorio específico que reconozca las

particularidades de las aguas subterráneas, así como consolidar y fortalecer la institucionalidad en el ámbito del Derecho de Aguas (Pino et al., 2018).

En resumen, se identifican cuatro factores clave que explican la falta de efectividad de las políticas y regulaciones en el manejo sostenible del acuífero Caplina: (a) pese a las normativas existentes, los usuarios de riego continuaron extrayendo agua subterránea, incrementando estas actividades debido a la expansión agrícola y la perforación de nuevos pozos por parte de usuarios no registrados; (b) la ausencia de interés y voluntad política por parte de las autoridades regionales y nacionales para supervisar adecuadamente la implementación de dichas políticas; (c) la limitada capacidad de gestión de la autoridad competente para coordinar con los sectores involucrados, implementar estrategias, asegurar financiamiento y garantizar el cumplimiento de las normativas y (d) el desinterés de las autoridades en integrar a la academia como un aliado estratégico para abordar el problema del acuífero a través de investigaciones científicas.

#### **4.2. SOBRE LOS RESULTADOS DE LA EVIDENCIA CIENTÍFICA**

Desde una perspectiva científica, los resultados son preocupantes debido a que el balance hídrico del acuífero Caplina revela una marcada tendencia hacia valores negativos, lo que representa un obstáculo significativo para alcanzar una gestión sostenible de este recurso subterráneo. El bombeo excesivo ha provocado la salinización de los pozos debido a la intrusión marina, un problema originado por deficiencias en la gobernanza y la gobernabilidad. Como consecuencia, la calidad del agua subterránea del acuífero se ha deteriorado gravemente (Narvaez-Montoya et al., 2022; Pino et al., 2020; Pino-Vargas y Ascencios-Templo, 2021 y Vera et al., 2021).

Actualmente, se estima que el volumen de extracción es cinco veces el volumen de recarga (González-Domínguez et al., 2024 y Narvaez-Montoya et al., 2022). Como consecuencia, los resultados de las investigaciones muestran que el acuífero está atravesando por problemas de salinización debido a la sobreexplotación (Pino, 2021 y Vaux, 2011). Si la extracción continúa a este ritmo, el sistema acuífero mostrará una tendencia cada vez más negativa, lo que llevará a su colapso inminente, a menos que se implementen medidas correctivas adecuadas de manera urgente.

Las medidas correctivas para abordar los procesos de salinización del acuífero pueden clasificarse en dos tipos: las no estructurales, que incluyen acciones como la regulación y control del uso del agua, la promoción de prácticas agrícolas sostenibles y la implementación de políticas de conservación; y las estructurales, que comprenden intervenciones físicas como la construcción de barreras para evitar la intrusión salina, el desarrollo de sistemas de recarga artificial del acuífero y la instalación de tecnologías para desalinizar el agua (Pino et al., 2020). Las medidas no estructurales se enfocan en la creación de un plan de manejo integral y en el reordenamiento de las extracciones, aspectos cruciales, ya que, al no poder determinarse con exactitud el volumen de agua extraído, existe una fuerte resistencia por parte de los usuarios no formalizados a ser fiscalizados.

Las medidas estructurales se dividen en convencionales y no convencionales. Las convencionales incluyen el uso de embalses y el trasvase de agua entre cuencas. Por otro lado, las medidas no convencionales abarcan técnicas como la reutilización, el reciclaje y la desalinización del agua, las cuales ofrecen soluciones alternativas para mitigar el déficit hídrico.

El tercer grupo de medidas especiales o alternativas se centra en la gestión de la recarga de los acuíferos y en la aplicación de técnicas paliativas. Estas incluyen la reducción de la escorrentía

en bosques y áreas urbanas, la implementación de trampas para la escorrentía, el fomento del ahorro de agua, la instalación de redes de tuberías eficientes, y la disminución de la evaporación en embalses, entre otras. Entre las posibles medidas a implementar, la recarga artificial del acuífero, combinada con la construcción de barreras hidráulicas, es una opción viable. Además, se podrán utilizar volúmenes de agua trasvasada en el mediano y largo plazo para este propósito. También se sugiere integrar enfoques de educación ambiental, cultura del agua, concientización y difusión, con el objetivo de promover la conservación del acuífero. Es importante destacar que la inversión en tecnologías para el uso eficiente del agua y en medidas de conservación genera beneficios netos más favorables que la inversión en infraestructuras de abastecimiento hídrico (Tapsuwan et al., 2022).

#### **4.3. GESTIÓN, POLÍTICAS PÚBLICAS Y RESULTADOS CIENTÍFICOS**

Un análisis detallado de la crisis del agua revela que la mayoría de los problemas han sido provocados por políticas inadecuadas, mal gestionadas y tomadas de manera apresurada (Zeinali et al., 2021). En el caso del sistema acuífero de Caplina, se observa que la gobernanza de las aguas subterráneas carece de coherencia y alcance. Esta situación no mejorará a menos que los actores clave intervengan en las políticas y presten atención a la gobernanza local. Los problemas de gobernanza y gobernabilidad son los principales impulsores del deterioro de la calidad del agua, particularmente por la intrusión marina (Pino, 2021 y Pino et al., 2018).

Por lo tanto, es esencial la plena participación del gobierno, la sociedad civil y las diversas instituciones y organizaciones de usuarios, dentro de un espacio colaborativo donde se integren los resultados científicos y se alineen con los instrumentos de gestión, con el objetivo de asegurar el uso sostenible de las aguas subterráneas. La crisis global del agua se ha convertido en un

problema extremadamente grave, que cada día se intensifica más. Es probable que las futuras guerras se librarán por el acceso al agua (Zeinali et al., 2021).

Establecer sinergias entre los actores involucrados y basarse en resultados científicos permitirá evaluar y definir directrices claras para crear un programa de uso racional del agua en el acuífero Caplina. Este programa debería enfocarse en la recuperación gradual del acuífero mediante medidas de mitigación. Las acciones a implementar deben incluir la reducción de los volúmenes de extracción, la promoción de una cultura hídrica, y el aprovechamiento de fuentes externas para reemplazar el agua extraída o recargar artificialmente los acuíferos (Pino, 2021 y Pino et al., 2020).

A nivel global, se han identificado diversas medidas de mitigación que son favorables para la conservación de los sistemas acuíferos. Estas incluyen tanto acciones físicas como no físicas o de manejo, diseñadas para prevenir el colapso de los acuíferos y promover su recuperación y conservación a largo plazo. Las medidas físicas pueden involucrar la implementación de infraestructuras como barreras hidráulicas o sistemas de recarga artificial, mientras que las medidas de manejo pueden abarcar políticas de control de extracción, mejora de la eficiencia en el uso del agua y educación sobre la gestión sostenible de los recursos hídricos (Pino et al., 2020). Por lo tanto, es viable implementar tantas medidas no estructurales como estructurales. Las medidas no estructurales se enfocan en la creación de un plan de manejo y en la regulación de las extracciones de agua, mientras que las medidas estructurales incluyen el uso de embalses, el trasvase de agua entre cuencas, así como la reutilización, el reciclaje y la desalinización del agua de mar, que podrían ser utilizadas para la recarga artificial del acuífero.

Ante la crisis hídrica que afecta al sistema acuífero, resulta fundamental reforzar la capacidad institucional y técnica para una adecuada gobernanza de las aguas subterráneas, involucrando tanto a los organismos de cuenca como a las autoridades regionales y locales, además de fomentar la participación activa de los actores locales. Asimismo, es crucial intensificar la cooperación regional para establecer estrategias enfocadas en los acuíferos sobreexplotados. Esto implica optimizar la recopilación de datos para monitorear la calidad de los acuíferos, promover una comunicación efectiva, aumentar la concienciación pública y desarrollar capacidades y habilidades de gestión específicas para abordar esta problemática.

En el desierto de Atacama, ubicado en el norte de Chile y sur de Perú, el desarrollo económico y social depende en gran medida del uso de aguas subterráneas fósiles, con un incremento significativo en la extracción de agua subterránea en los últimos 30 años (Viguier et al., 2019). La región de Tacna enfrenta una escasez de recursos hídricos suficientes para satisfacer las necesidades de los diversos usuarios, quienes dependen principalmente de las aguas subterráneas del acuífero transfronterizo Caplina/Concordia (entre Perú y Chile) y de la transferencia de agua de la cuenca transfronteriza Maure, que involucra también a Bolivia. En este contexto, dada la situación del acuífero Caplina, se propone que el desarrollo y la gestión del agua en esta árida región deben considerar los intereses de los usuarios de los tres países para prevenir posibles conflictos internacionales por el agua. Además, se sugiere la creación de una comisión internacional conformada por Perú, Chile y Bolivia, cuyo objetivo sería buscar soluciones colaborativas a los problemas hídricos en el desierto de Atacama.

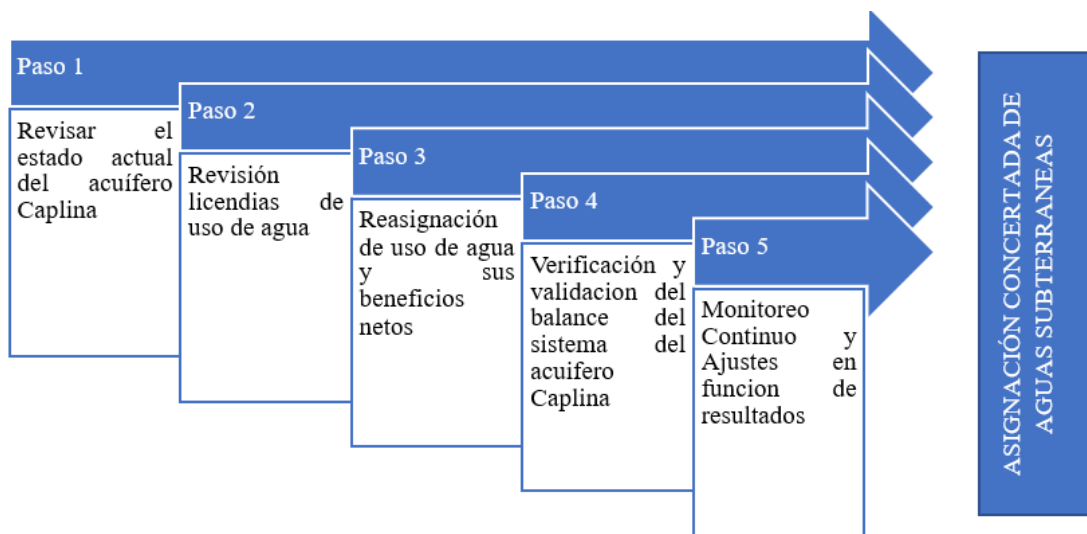


#### 4.4. ASIGNACIÓN CONCERTADA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Ante esta problemática, se sugiere implementar una asignación concertada de aguas subterráneas (ver figura 4), tomando en cuenta las condiciones actuales del sistema acuífero, que se encuentra sobreexplotado y enfrenta serios desafíos en términos de gobernanza y gobernabilidad. A continuación, se detalla cuatro pasos fundamentales que asegurarán un uso sostenible de las aguas subterráneas, a través de la colaboración activa y el consenso entre los actores involucrados.

**Figura 4**

*Propuesta metodológica de asignación concertada de aguas subterráneas*



*Nota.* Elaboración propia

Paso 1: Se lleva a cabo un análisis exhaustivo del estado actual del acuífero, lo que incluye la identificación de las áreas con mayor densidad de pozos de extracción, así como su proximidad a la línea de playa y otras características relevantes. Además, se evalúan las zonas que presentan contaminación por intrusión marina o por otras fuentes potenciales, como actividades industriales

o agrícolas. Este diagnóstico inicial permitirá comprender los principales factores que afectan al acuífero y servirá como base para la toma de decisiones orientadas a su gestión sostenible.

Paso 2: Se realiza una revisión detallada de las licencias de uso de agua, verificando que todos los pozos de extracción cuenten con la autorización correspondiente. Aquellos pozos que no dispongan de licencias deberán ser evaluados para determinar la viabilidad de su operación y establecer si es factible permitir su explotación de agua subterránea. Este paso resulta crucial, ya que implica la validación formal de los usuarios del recurso hídrico subterráneo y la asignación de volúmenes específicos de extracción, garantizando un uso equitativo y regulado acorde con la capacidad del acuífero.

Paso 3: Se procede a la reasignación del uso del agua considerando tanto los beneficios netos como las necesidades de sostenibilidad del acuífero. Esto incluye una revisión detallada de los datos hidrogeológicos, los derechos iniciales de acceso al agua y los planes existentes para su uso. En esta etapa, es esencial promover alianzas y acuerdos entre los actores involucrados y los titulares de los derechos iniciales, buscando establecer una asignación del recurso que sea equitativa, sostenible, racional y eficiente. Este proceso colaborativo garantizará una distribución justa del agua, priorizando el equilibrio entre el desarrollo socioeconómico y la conservación del acuífero.

Paso 4: Se realiza un proceso de verificación y validación del balance hídrico del sistema acuífero, con el objetivo de reducir los conflictos entre los usuarios por el uso del agua. Para ello, se adopta la reasignación consensuada de los volúmenes de agua y de los beneficios derivados de su uso, promoviendo alianzas estratégicas entre los actores involucrados (Norouzi Khatiri et al., 2023). Este enfoque permite maximizar la eficiencia económica en el aprovechamiento del

recurso, partiendo de los derechos iniciales de uso del agua (DINAR, 2001). En esta etapa, es crucial contar con información precisa sobre las reservas renovables y no renovables del acuífero, ya que el nivel freático ha experimentado una disminución significativa debido a la sobreexplotación. Esto ha generado problemas como la intrusión marina, que a su vez deteriora la calidad del agua subterránea. Este análisis permitirá tomar decisiones informadas para equilibrar la extracción y garantizar la sostenibilidad del recurso a largo plazo.

Paso 5: Establecer un sistema de monitoreo continuo que permita medir los impactos de las acciones tomadas sobre el acuífero. Esto debe incluir la medición de los niveles de agua, la calidad del agua y la efectividad de las estrategias de conservación. Los resultados del monitoreo permitirán hacer ajustes necesarios en la gestión y planificación, garantizando que las acciones se adapten a los cambios y necesidades del acuífero.

## CONCLUSIONES

- La sobreexplotación del acuífero Caplina, atribuida a la ineficacia del Estado en la aplicación de la normativa vigente sobre la veda, ha provocado un progresivo deterioro en la calidad de las aguas subterráneas debido a la salinización ocasionada por la intrusión marina. Por ello, resulta crucial implementar una propuesta integral y consensuada que detenga este deterioro. Esta propuesta se fundamenta en cuatro puntos esenciales: (1) evaluar el estado actual del sistema acuífero en relación con el impacto de la sobreexplotación en la calidad del agua, (2) revisar las licencias de uso del recurso hídrico, (3) redistribuir el uso del agua y sus beneficios, (4) verificar y validar el balance del sistema acuífero y (5) establecer un sistema de monitoreo continuo que permita medir los impactos de las acciones implementadas, incluyendo niveles y calidad del agua, así como la efectividad de las estrategias de conservación. Aunque de estructura sencilla, la propuesta busca ser efectiva, instando a los actores involucrados a reflexionar sobre el colapso inminente que podría generar la continuidad del régimen de explotación actual.
- Desde el enfoque de las políticas públicas, continúan los problemas de gobernanza del agua, los cuales han originado importantes descensos en los niveles freáticos, lo que ha llevado a la intrusión de agua marina y a la salinización de los pozos cercanos a la costa. El Estado ha generado un conflicto entre los instrumentos de gestión: por un lado, están las vedas; por otro, un decreto supremo que regula la regularización de las licencias de uso de aguas subterráneas en un sistema desajustado.
- El desarrollo de estrategias de concientización dirigidas a la población local sobre la importancia de la conservación del acuífero y los efectos negativos de la sobreexplotación

es fundamental para asegurar la sostenibilidad del recurso hídrico en la región. A través de campañas educativas y programas de sensibilización, se puede promover un cambio de mentalidad hacia prácticas responsables en el uso del agua. Este enfoque permitirá no solo disminuir el impacto de la sobreexplotación en el acuífero, sino también empoderar a las comunidades locales para que se conviertan en agentes activos en la protección del agua subterránea. Al involucrar a la población en la gestión sostenible del acuífero, se contribuirá a mitigar los efectos de la intrusión marina, la salinización y la degradación de la calidad del agua, garantizando el bienestar de las futuras generaciones.

- Desde una perspectiva científica, la sostenibilidad de las aguas subterráneas en la cabecera del desierto de Atacama está gravemente amenazada. El régimen actual de explotación anticipa un incremento de la intrusión marina y un deterioro de la calidad del agua, lo que intensifica el desequilibrio existente. Los resultados respaldados por evidencia científica muestran las condiciones actuales y futuras de este sistema acuífero, destacando la insostenibilidad de las aguas subterráneas. Además, se evidencia que las políticas públicas no son suficientemente efectivas para revertir esta problemática, lo que ha ocasionado una degradación de la calidad del agua hasta un punto que podría ser irreversible.

## RECOMENDACIONES

- Fortalecer la colaboración entre autoridades, comunidades y expertos para asegurar la implementación efectiva de la propuesta integral. Además, es crucial reforzar el marco regulatorio, mejorar la supervisión de las licencias de agua y asegurar un monitoreo continuo con recursos adecuados, lo que permitirá evitar el colapso del acuífero Caplina y garantizar su sostenibilidad a largo plazo.
- Armonizar los instrumentos de gestión del agua, asegurando una coordinación efectiva entre las vedas y las políticas de regularización de licencias. Además, es crucial mejorar la gobernanza del agua para evitar la sobreexplotación y la salinización de los pozos cercanos a la costa.
- Implementar campañas educativas y programas de sensibilización para fomentar un cambio de mentalidad en la población local, promoviendo prácticas responsables en el uso del agua. Involucrar a las comunidades en la gestión sostenible del acuífero será clave para mitigar los impactos de la sobreexplotación y garantizar la conservación del recurso hídrico.
- Revisar y ajustar las políticas públicas relacionadas con la gestión de las aguas subterráneas, implementando medidas más efectivas para frenar la intrusión marina y la degradación de la calidad del agua. Es crucial adoptar enfoques integrales y basados en evidencia científica para garantizar la sostenibilidad a largo plazo del acuífero.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arreguín-Cortés, F. I., López-Pérez, M. y Cervantes-Jaimes, C. E. (2020). Los retos del agua en México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 11(2), 341–371. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-02-10>
- Azua-Bustos, A., Fairén, A. G., González-Silva, C., Ascaso, C., Carrizo, D., Fernández-Martínez, M. Á., Fernández-Sampedro, M., García-Descalzo, L., García-Villadangos, M., Martín-Redondo, M. P., Sánchez-García, L., Wierzchos, J. y Parro, V. (2018). Unprecedented rains decimate surface microbial communities in the hyperarid core of the Atacama Desert. *Scientific Reports*, 8(1), 16706. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35051-w>
- Baird, A. J. y Low, R. G. (2022). The water table: Its conceptual basis, its measurement and its usefulness as a hydrological variable. *Hydrological Processes*, 36(6). <https://doi.org/10.1002/hyp.14622>
- Burstein-Roda, T. (2018a). Reflexiones sobre la gestión de los recursos hídricos y la salud pública en el Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(2), 297. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3641>
- Burstein-Roda, T. (2018b). Reflexiones sobre la gestión de los recursos hídricos y la salud pública en el Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(2), 297. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3641>
- Cerasoli, S. y Porporato, A. (2023). California's groundwater overdraft: An environmental Ponzi scheme? *Journal of Hydrology*, 617, 129081. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2023.129081>
- Chen, S., Zhu, J. y Chen, S. (2022). Water Resource Accounting Modeling and Analysis Adapting to the Development of Market Economy under the Sustainable Development Strategy of Big Data. *Journal of Sensors*, 2022, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2022/4384870>

- Chicaiza-Maya, L. S., Ortega-Guerrero, P. A., Blanco Londoño, S. A. y Mañunga, T. (2024). Evaluación de los programas de uso eficiente y ahorro del agua en el Departamento de Nariño, Colombia. *Ingeniería y Competitividad*, 26(1). <https://doi.org/10.25100/iyc.v26i1.13140>
- Chucuya, S., Vera, A., Pino-Vargas, E., Steenken, A., Mahlknecht, J. y Montalván, I. (2022). Hydrogeochemical Characterization and Identification of Factors Influencing Groundwater Quality in Coastal Aquifers, Case: La Yarada, Tacna, Perú. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(5), 2815. <https://doi.org/10.3390/ijerph19052815>
- Condori Tintaya, F., Pino Vargas, E. y Tacora Villegas, P. (2022). Pérdida de suelos por erosión hídrica en laderas semiáridas de la subcuenca Cairani-Camilaca, Perú. *Idesia (Arica)*, 40(2), 7–15. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292022000200007>
- Dehonor Márquez, E., Rodríguez-Maya, N. E., López-Sandoval, E. y Garduño-Jaimes, I. Z. (2023). Economía circular del agua, relación con los ODS, barreras y prácticas para su transición. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 10(2). <https://doi.org/10.60158/rma.v10i2.384>
- DINAR, A. (2001). SCALE AND EQUITY IN WATER RESOURCE DEVELOPMENT: A NASH BARGAINING MODEL. *Natural Resource Modeling*, 14(4), 477–494. <https://doi.org/10.1111/j.1939-7445.2001.tb00070.x>
- Du, E., Tian, Y., Cai, X., Zheng, Y., Han, F., Li, X., Zhao, M., Yang, Y. y Zheng, C. (2022). Evaluating Distributed Policies for Conjunctive Surface Water-Groundwater Management in Large River Basins: Water Uses Versus Hydrological Impacts. *Water Resources Research*, 58(1). <https://doi.org/10.1029/2021WR031352>
- Ebrahimi Sarindizaj, E. y Karamouz, M. (2022). Dynamic Water Balance Accounting-Based Vulnerability Evaluation Considering Social Aspects. *Water Resources Management*, 36(2), 659–681. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-03046-4>



- Espinoza-Molina, J., Acosta-Caipa, K., Chambe-Vega, E., Huayna, G., Pino-Vargas, E. y Abad, J. (2022). Spatiotemporal Analysis of Urban Heat Islands in Relation to Urban Development, in the Vicinity of the Atacama Desert. *Climate*, 10(6), 87. <https://doi.org/10.3390/cli10060087>
- Foster, S. y Chilton, J. (2020). Sustainable Management of Groundwater. In *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.635>
- Gamboa, C., Godfrey, L., Urrutia, J., Herrera, C., Lu, X. y Jordan, T. (2022). Conditions of groundwater recharge in the hyperarid southern Atacama Desert. *Global and Planetary Change*, 217, 103931. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103931>
- Garreaud, R. D., Molina, A. y Farias, M. (2010). Andean uplift, ocean cooling and Atacama hyperaridity: A climate modeling perspective. *Earth and Planetary Science Letters*, 292(1–2), 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.01.017>
- Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R. y Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3–4), 180–195. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>
- Garreaud, R., Vuille, M. y Clement, A. C. (2003). The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 194(1–3), 5–22. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00269-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00269-4)
- González-Domínguez, J., Mora, A., Chucuya, S., Pino-Vargas, E., Torres-Martínez, J. A., Dueñas-Moreno, J., Ramos-Fernández, L., Kumar, M. y Mahlknecht, J. (2024). Hydraulic recharge and element dynamics during salinization in an overexploited coastal aquifer of the world's driest zone: Atacama Desert. *Science of The Total Environment*, 954, 176204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176204>

- Guilfoos, T., Khanna, N. y Peterson, J. M. (2016). Efficiency of Viable Groundwater Management Policies. *Land Economics*, 92(4), 618–640. <https://doi.org/10.3368/le.92.4.618>
- Guo, H., Sun, Q., Wu, Z., Lu, C. y Qin, Z. (2023). Study on Suitable Rice Planting Scale Based on Balance of Groundwater Recharge and Discharge in Sanjiang Plain. *Water*, 15(3), 547. <https://doi.org/10.3390/w15030547>
- Hamad, A., Abdeslam, I., Fehdi, Ch., Badreddine, S., Mokadem, N., Legrioui, R., Djebassi, T., Rahal, O., Hadji, R. y Hamed, Y. (2022). Vulnerability characterization for multi-carbonate aquifer systems in semiarid climate, case of Algerian–Tunisian transboundary basin. *International Journal of Energy and Water Resources*, 6(1), 67–80. <https://doi.org/10.1007/s42108-021-00142-4>
- Hamdy, A., Ragab, R. y Scarascia-Mugnozza, E. (2003). Coping with water scarcity: water saving and increasing water productivity. *Irrigation and Drainage*, 52(1), 3–20. <https://doi.org/10.1002/ird.73>
- Hamed, Y., Hadji, R., Ncibi, K., Hamad, A., Ben Sâad, A., Melki, A., Khelifi, F., Mokadem, N. y Mustafa, E. (2022). Modelling of potential groundwater artificial recharge in the transboundary Algero-Tunisian Basin (Tebessa-Gafsa): The application of stable isotopes and hydroinformatics tools \*. *Irrigation and Drainage*, 71(1), 137–156. <https://doi.org/10.1002/ird.2647>
- Hamed, Y., Houda, B., Ahmed, M., Hadji, R. y Ncibi, K. (2023). North Western Sahara aquifer system hydrothermal and petroleum reservoirs dynamics: a comprehensive overview. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(4), 247. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11324-1>
- Hargrove, W. L., Heyman, J. M., Mayer, A., Mirchi, A., Granados-Olivas, A., Ganjegunte, G., Gutzler, D., Pennington, D. D., Ward, F. A., Chavira, L. G., Sheng, Z., Kumar, S., Villanueva-Rosales, N. y Walker, W. S. (2023). The future of water in a desert river basin facing climate change and competing demands: A holistic approach to water sustainability in arid and semi-arid regions. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 46, 101336. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101336>

- Hatch Kuri, G. (2017). *Groundwater and Interdependent Sovereignty: The Case of the Transborder Aquifer Systems in the Paso Del Norte Binational Region*. 12(2), 113–145.
- Hatch Kuri, G. y Carrillo Rivera, J. J. (2022). conceptos científicos y sus implicaciones políticas en la gestión de las aguas transfronterizas México-Estados Unidos: ¿Acuífero transfronterizo o aguas subterráneas transfronterizas? *Agua y Territorio / Water and Landscape*, 21. <https://doi.org/10.17561/at.21.5738>
- Houston, J. (2006). Variability of precipitation in the Atacama Desert: its causes and hydrological impact. *International Journal of Climatology*, 26(15), 2181–2198. <https://doi.org/10.1002/joc.1359>
- Huggel, C., Scheel, M., Albrecht, F., Andres, N., Calanca, P., Jurt, C., Khabarov, N., Mira-Salama, D., Rohrer, M., Salzmann, N., Silva, Y., Silvestre, E., Vicuña, L. y Zappa, M. (2015). A framework for the science contribution in climate adaptation: Experiences from science-policy processes in the Andes. *Environmental Science & Policy*, 47, 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.11.007>
- Jaramillo Monroy, F., Wehncke, E. V., Flores Armillas, V. H., Pohle Morales, O. M. y López-Medellín, X. (2021). Enfoque regional de manejo integrado del agua en la microcuenca El Pantano, Morelos, México. *Economía Sociedad y Territorio*, 21(65), 275–304. <https://doi.org/10.22136/est20211625>
- Kuang, X., Liu, J., Scanlon, B. R., Jiao, J. J., Jasechko, S., Lancia, M., Biskaborn, B. K., Wada, Y., Li, H., Zeng, Z., Guo, Z., Yao, Y., Gleeson, T., Nicot, J.-P., Luo, X., Zou, Y. y Zheng, C. (2024). The changing nature of groundwater in the global water cycle. *Science*, 383(6686). <https://doi.org/10.1126/science.adf0630>
- Machaca-Pillaca, R., Pino-Vargas, E., Ramos-Fernández, L., Quille-Mamani, J. y Torres-Rua, A. (2022). Estimación de la evapotranspiración con fines de riego en tiempo real de un olivar a partir de imágenes de un drone en zonas áridas, caso La Yarada, Tacna, Perú. *Idesia (Arica)*, 40(2), 55–65. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292022000200055>

- Mahdavi, T., Bagheri, A. y Hosseini, S. A. (2019). Applying the System of Environmental and Economic Accounts for Water (SEEA-Water) for integrated assessment of water security in an aquifer scale - Case study: Azarshahr aquifer, Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100261. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100261>
- Maquera-Callo, E., Pino-Vargas, E., Choque, G., Huayna, G., Fernández-Cutire, O. y Ramos-Fernández, L. (2023). Machine Learning para clasificar el uso indiscriminado del suelo con fines agrícolas y su relación con el cambio climático, cabecera Desierto Atacama. *Idesia (Arica)*, 41(4), 101–113. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292023000400101>
- Mekonnen, M. M. y Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>
- Mendez, M., Prieto, M. y Godoy, M. (2020). Production of subterranean resources in the Atacama Desert: 19th and early 20th century mining/water extraction in The Taltal district, northern Chile. *Political Geography*, 81, 102194. <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2020.102194>
- Muñoz, I. (2016). Agro-exportación y sobreexplotación del acuífero de Ica en Perú. *Anthropologica*, 34(37), 115–138. <https://doi.org/10.18800/anthropologica.201602.005>
- Narvaez-Montoya, C., Torres-Martínez, J. A., Pino-Vargas, E., Cabrera-Olivera, F., Loge, F. J. y Mahlkecht, J. (2022). Predicting adverse scenarios for a transboundary coastal aquifer system in the Atacama Desert (Perú/Chile). *Science of The Total Environment*, 806, 150386. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150386>
- Navarro, N., Abad, M., Bonnail, E. e Izquierdo, T. (2021). The Arid Coastal Wetlands of Northern Chile: Towards an Integrated Management of Highly Threatened Systems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(9), 948. <https://doi.org/10.3390/jmse9090948>

- Neme Castillo, O., Valderrama Santibáñez, A. L. y Chiatchoua, C. (2021). Factores determinantes del consumo productivo de agua y sus efectos en la actividad económica de México. *Economía Sociedad y Territorio*, 21(66), 505–537. <https://doi.org/10.22136/est20211659>
- Niazi, H., Wild, T. B., Turner, S. W. D., Graham, N. T., Hejazi, M., Msangi, S., Kim, S., Lamontagne, J. R. y Zhao, M. (2024). Global peak water limit of future groundwater withdrawals. *Nature Sustainability*, 7(4), 413–422. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01306-w>
- Norouzi Khatiri, K., Nematollahi, B., Hafeziyeh, S., Niksokhan, M. H., Nikoo, M. R. y Al-Rawas, G. (2023). Groundwater Management and Allocation Models: A Review. *Water*, 15(2), 253. <https://doi.org/10.3390/w15020253>
- Oré, M. T. (2018). Los conflictos por el agua entre gobiernos regionales : retos para la formación de los Consejos de Recursos Hídricos. In *Agua en disputa : Ica y Huancavelica, entre el entrapamiento y el diálogo* (pp. 203–252). Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://doi.org/10.18800/978-612-317-362-3.007>
- Oré-Vélez, M. T. y Geng-Montoya, D. A. (2015). Políticas públicas del agua en el Perú: Vicisitudes para la creación del consejo de recursos hídricos de la cuenca Ica-Huancavelica. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 12(3), 409–445. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-54722015000300007&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722015000300007&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Parakh, D. y Chaudhuri, S. (2022). Groundwater Regulation Bills in Haryana – A Call for Groundwater Conservation and Management for Sustainable Irrigation Supply Services – Opportunities and Challenges. *Ecology, Environment and Conservation*, 147–164. <https://doi.org/10.53550/EEC.2022.V28I01.020>

- Peña Laureano, F., Cotrina Chávez, G. J. y Acosta Pereira, H. (2009). Hidrogeología de la cuenca del río Caplina - Región Tacna - [Boletín H 1]. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/368>
- Peng, H., Yang, W., Nadine Ferrer, A. S., Xiong, S., Li, X., Niu, G. y Lu, T. (2022). Hydrochemical characteristics and health risk assessment of groundwater in karst areas of southwest China: A case study of Bama, Guangxi. *Journal of Cleaner Production*, 341, 130872. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130872>
- Pérez-Blanco, C. D., Parrado, R., Essenfelder, A. H., Bodoque, J., Gil-García, L., Gutiérrez-Martín, C., Ladera, J. y Standardi, G. (2022). Assessing farmers' adaptation responses to water conservation policies through modular recursive hydro-micro-macro-economic modeling. *Journal of Cleaner Production*, 360, 132208. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132208>
- Pino, E. (2021). Sobreexplotación del agua subterránea y la agroexportación en el acuífero costero de la Yarada, Tacna, Perú. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 18(2), 247–258. <https://doi.org/10.22231/asyd.v18i2.969>
- Pino, E., Ramos, L., Avalos, O., Tacora, P., Chávarri, E., Angulo, O., Ascencios, D. y Mejía, J. (2019). Factores que inciden en el agotamiento y la contaminación por intrusión marina en el acuífero costero de La Yarada, Tacna, Perú. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 10(5), 177–213. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-05-07>
- Pino, E., Tacora, P., Steenken, A., Alfaro, L., Valle, A., Chávarri, E., Ascencios, D. y Mejía, J. (2017). Efecto de las características ambientales y geológicas sobre la calidad del agua en la cuenca del río Caplina, Tacna, Perú. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 08(6), 77–99. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-06>

- Pino V., E. (2019). El acuífero costero La Yarada, después de 100 años de explotación como sustento de una agricultura en zonas áridas: una revisión histórica. *Idesia (Arica)*, 37(3), 39–45. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019000300039>
- Pino V., E. (2021). CONFLICTOS POR EL USO DEL AGUA EN UNA REGIÓN ÁRIDA: CASO TACNA, PERÚ. *Diálogo Andino*, 65, 405–415. <https://doi.org/10.4067/S0719-26812021000200405>
- Pino V., E., Chávarri V., E. y Ramos F., L. (2018). Crisis de gobernanza y gobernabilidad y sus implicancias en el uso inadecuado del agua subterránea, caso acuífero costero de La Yarada, Tacna, Perú. *Idesia (Arica)*, ahead, 0–0. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018005001301>
- Pino V., E., Ramos F., L., Mejía M., J., Chávarri V., E. y Ascencios T., D. (2020). Medidas de mitigación para el acuífero costero La Yarada, un sistema sobreexplotado en zonas áridas. *Idesia (Arica)*, 38(3), 21–31. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292020000300021>
- Pino Vargas, E. M. y Ascencios, D. R. (2022). Sostenibilidad del cultivo de olivo bajo un enfoque climatológico en una región árida, cabecera del desierto de Atacama. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(3). [https://doi.org/10.21930/rcta.vol23\\_num3\\_art:2652](https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num3_art:2652)
- Pino Vargas, E. M. y Huayna, G. (2022). Spatial and temporal evolution of olive cultivation due to pest attack, using remote sensing and satellite image processing. *Scientia Agropecuaria*, 13(2), 149–157. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.013>
- Pino-Vargas, E. (2019). Water security in the la Yarada coastal aquifer: current and future challenges. *Agroindustrial Science*, 9(2), 219–225. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2019.02.16>
- Pino-Vargas, E. y Ascencios-Templo, D. (2021). La implementación de veda como una herramienta para controlar la degradación del acuífero costero la Yarada, Tacna, Perú. *Diálogo Andino*, 66, 489–496. <https://doi.org/10.4067/S0719-26812021000300489>

- Pino-Vargas, E. y Chávarri-Velarde, E. (2022). Evidencias de cambio climático en la región hiperárida de la costa sur de Perú, cabecera del desierto de Atacama. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13(1), 333–376. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-01-08>
- Pino-Vargas, E., Chávarri-Velarde, E., Ingol-Blanco, E., Mejía, F., Cruz, A. y Vera, A. (2022). Impacts of Climate Change and Variability on Precipitation and Maximum Flows in Devil’s Creek, Tacna, Perú. *Hydrology*, 9(1), 10. <https://doi.org/10.3390/hydrology9010010>
- Pino-Vargas, E. (2022). Evidencias de cambio climático en la región hiperárida de la costa sur de Perú, cabecera del desierto de Atacama. *Revistatyca.Org.Mx*. <https://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/2540>
- Pino-Vargas, E., Espinoza-Molina, J., Chávarri-Velarde, E., Quille-Mamani, J. y Ingol-Blanco, E. (2023a). Impacts of Groundwater Management Policies in the Caplina Aquifer, Atacama Desert. *Water*, 15(14), 2610. <https://doi.org/10.3390/w15142610>
- Pino-Vargas, E., Espinoza-Molina, J., Chávarri-Velarde, E., Quille-Mamani, J. y Ingol-Blanco, E. (2023b). Impacts of Groundwater Management Policies in the Caplina Aquifer, Atacama Desert. *Water*, 15(14), 2610. <https://doi.org/10.3390/w15142610>
- Pino-Vargas, E., Guevara-Pérez, E. y Avendaño-Jihuallanga, C. (2021). Evolución histórica de la conceptualización hidrogeológica y del uso del acuífero Caplina ubicado en el borde norte del desierto de Atacama. *Revista Ingeniería UC*, 28(3), 378–391. <https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i3.45>
- Pino-Vargas, E. M. (2024). *A Concerted Proposal Based on an Imminent Collapse Scenario for Groundwater Management in an Overexploited Aquifer, Atacama Desert*. 1–9. <https://doi.org/10.3897/ap.7.e0001>



- Pino-Vargas, E., Montalvan-Díaz, I. y Avendaño-Jihuallanga, C. (2019). Future water availability in dryland ecosystems in southern Peru and northern Chile. *Agroindustrial Science*, 9(2), 173–178. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2019.02.10>
- Pino-Vargas, E., Taya-Acosta, E., Ingol-Blanco, E. y Torres-Rúa, A. (2022). Deep Machine Learning for Forecasting Daily Potential Evapotranspiration in Arid Regions, Case: Atacama Desert Header. *Agriculture*, 12(12), 1971. <https://doi.org/10.3390/agriculture12121971>
- Pocco, V., Chucuya, S., Huayna, G., Ingol-Blanco, E. y Pino-Vargas, E. (2023). A Multi-Criteria Decision-Making Technique Using Remote Sensors to Evaluate the Potential of Groundwater in the Arid Zone Basin of the Atacama Desert. *Water*, 15(7), 1344. <https://doi.org/10.3390/w15071344>
- Qtaishat, Y., Hofman, J. y Adeyeye, K. (2022). Circular Water Economy in the EU: Findings from Demonstrator Projects. *Clean Technologies*, 4(3), 865–892. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4030054>
- Razzaq, A., Xiao, M., Zhou, Y., Liu, H., Abbas, A., Liang, W. y Naseer, M. A. ur R. (2022). Impact of Participation in Groundwater Market on Farmland, Income, and Water Access: Evidence from Pakistan. *Water*, 14(12), 1832. <https://doi.org/10.3390/w14121832>
- Ritter, B., Wennrich, V., Medialdea, A., Brill, D., King, G., Schneiderwind, S., Niemann, K., Fernández-Galego, E., Diederich, J., Rolf, C., Bao, R., Melles, M. y Dunai, T. J. (2019). “Climatic fluctuations in the hyperarid core of the Atacama Desert during the past 215 ka.” *Scientific Reports*, 9(1), 5270. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41743-8>
- Robertson, J. (2021). The Common Pool Resource Heatmap: A Tool to Drive Changes in Water Law and Governance. *Water*, 13(21), 3110. <https://doi.org/10.3390/w13213110>

- Rouillard, J., Neverre, N. y Rinaudo, J. D. (2022). Initiating collective action for the management of deep confined aquifer systems: application of a participatory scenario approach in France. *Hydrogeology Journal*, 30(1), 21–36. <https://doi.org/10.1007/S10040-021-02420-1/METRICS>
- Salminen, J., Määttä, K., Haimi, H., Maidell, M., Karjalainen, A., Noro, K., Koskiaho, J., Tikkanen, S. y Pohjola, J. (2022). Water-smart circular economy – Conceptualisation, transitional policy instruments and stakeholder perception. *Journal of Cleaner Production*, 334, 130065. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130065>
- Sarami-Foroushani, T., Balali, H., Movahedi, R., Kurban, A., Värnik, R., Stamenkovska, I. J. y Azadi, H. (2023). Importance of good groundwater governance in economic development: The case of western Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 21, 100892. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100892>
- Sindico, F., Hirata, R. y Manganelli, A. (2018). The Guarani Aquifer System: From a Beacon of hope to a question mark in the governance of transboundary aquifers. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 20, 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.04.008>
- Stefan, C., Glass, J., Sallwey, J., Junghanns, R., Fichtner, T. y Barquero, F. (2020). Managed aquifer recharge (MAR): from global perspective to local planning. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 176, 78–83. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25500>
- Tahamipour Zarandi, M. y Hosseini Fakhr, F. (2022). Comparison of groundwater costs calculated with different methods and the effect of electricity subsidy liberalization. *Groundwater for Sustainable Development*, 18, 100804. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100804>
- Tapsuwan, S., Peña-Arancibia, J. L., Lazarow, N., Albisetti, M., Zheng, H., Rojas, R., Torres-Alferez, V., Chiew, F. H. S., Hopkins, R. y Penton, D. J. (2022). A benefit cost analysis of strategic and operational

- management options for water management in hyper-arid southern Peru. *Agricultural Water Management*, 265, 107518. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107518>
- Vansteenberghe, F. y Oliemans, W. (2002). A review of policies in groundwater management in Pakistan 1950-2000. *Water Policy*, 4(4), 323-344. [https://doi.org/10.1016/S1366-7017\(02\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S1366-7017(02)00006-5)
- Vargas, P. y Jaén, B. (2014). Propuesta de implementación de una barrera hidráulica piloto para la recuperación del acuífero de la Yarada-Tacna. *App.Ingemmet.Gob.PeP Vargas, B Jaénapp.Ingemmet.Gob.Pe*. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG17-192.pdf>
- Vaux, H. (2011). Groundwater under stress: the importance of management. *Environmental Earth Sciences*, 62(1), 19-23. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0490-x>
- Vélez Otálvaro, M. V. (1999). *Hidráulica de aguas subterráneas*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8387>
- Vera, A., Pino-Vargas, E., Verma, M. P., Chucuya, S., Chávarri, E., Canales, M., Torres-Martínez, J. A., Mora, A. y Mahlkecht, J. (2021). Hydrodynamics, Hydrochemistry, and Stable Isotope Geochemistry to Assess Temporal Behavior of Seawater Intrusion in the La Yarada Aquifer in the Vicinity of Atacama Desert, Tacna, Perú. *Water*, 13(22), 3161. <https://doi.org/10.3390/w13223161>
- Vera, A., Verma, M. P., Pino-Vargas, E. y Huayna, G. (2022a). Metodología de ponderación morfométrica e hidrogeoquímica para clasificar la susceptibilidad a la meteorización química en las subcuencas del río Caplina, Tacna, Perú. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13(4), 276-340. <https://doi.org/10.24850/jtyca-2022-04-06>
- Vera, A., Verma, M. P., Pino-Vargas, E. y Huayna, G. (2022b). Metodología de ponderación morfométrica e hidrogeoquímica para clasificar la susceptibilidad a la meteorización química en las subcuencas del río Caplina, Tacna, Perú. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 13(4), 276-340. <https://doi.org/10.24850/jtyca-2022-04-06>

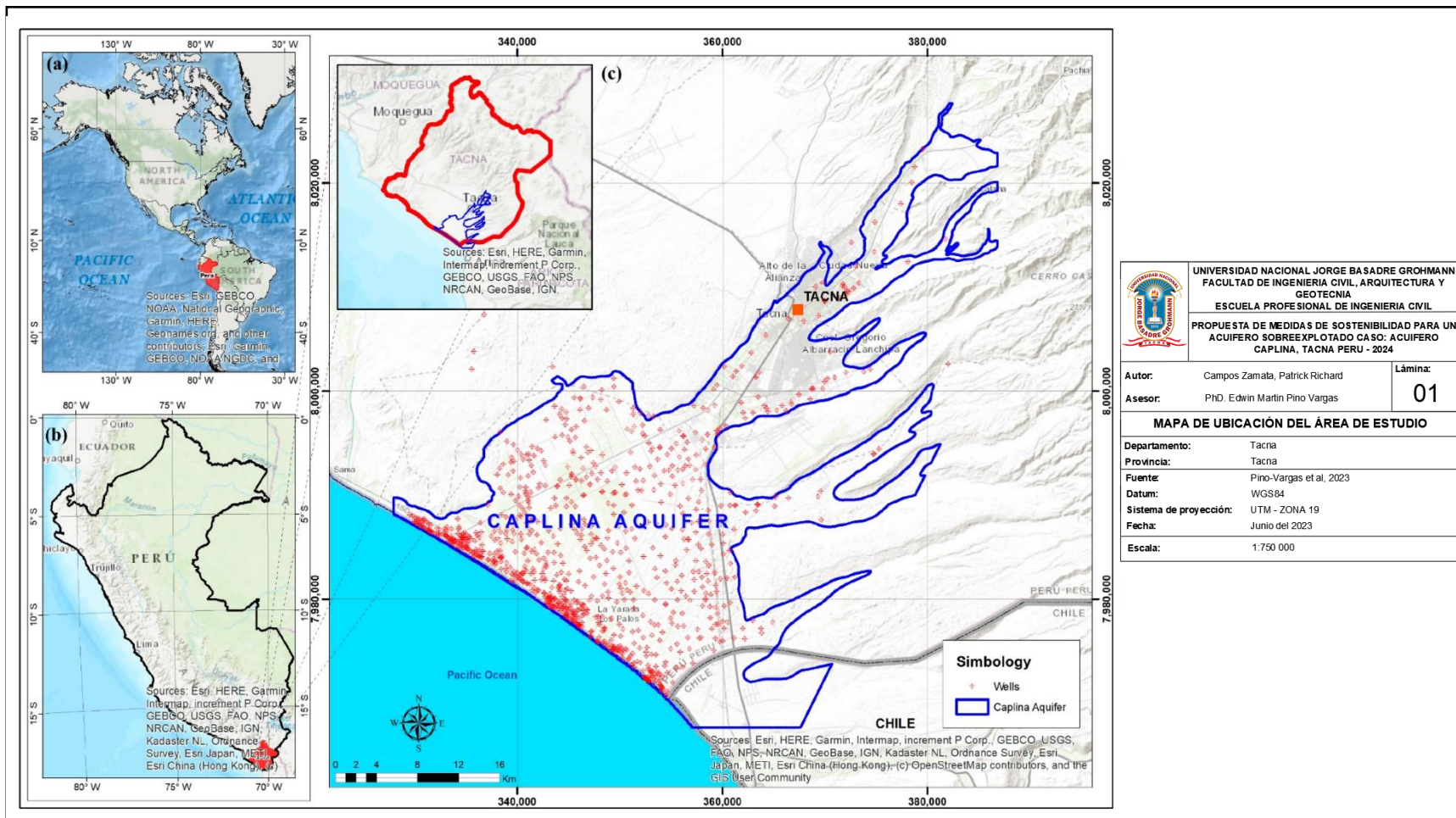
- Viguier, B., Jourde, H., Leonardi, V., Daniele, L., Batiot-Guilhe, C., Favreau, G. y De Montety, V. (2019). Water table variations in the hyperarid Atacama Desert: Role of the increasing groundwater extraction in the pampa del tamarugal (Northern Chile). *Journal of Arid Environments*, 168, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.05.007>
- Viguier, B., Jourde, H., Yáñez, G., Lira, E. S., Leonardi, V., Moya, C. E., García-Pérez, T., Maringue, J. y Lictevoud, E. (2018). Multidisciplinary study for the assessment of the geometry, boundaries and preferential recharge zones of an overexploited aquifer in the Atacama Desert (Pampa del Tamarugal, Northern Chile). *Journal of South American Earth Sciences*, 86, 366–383. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.05.018>
- Villegas Vega, P. (2020). El rol de las organizaciones de usuarios de agua en el aprovechamiento sostenible de aguas subterráneas en Perú. *IUS ET VERITAS*, 61, 128–144. <https://doi.org/10.18800/iusetveritas.202002.008>
- Wang, S., Xiong, J., Yang, B., Yang, X., Du, T., Steenhuis, T. S., Siddique, K. H. M. y Kang, S. (2023). Diversified crop rotations reduce groundwater use and enhance system resilience. *Agricultural Water Management*, 276, 108067. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108067>
- Yuan, L., Ding, L., He, W., Kong, Y., Ramsey, T. S., Degefu, D. M. y Wu, X. (2023). Compilation of Water Resource Balance Sheets under Unified Accounting of Water Quantity and Quality, a Case Study of Hubei Province. *Water*, 15(7), 1383. <https://doi.org/10.3390/w15071383>
- Zeinali, M., Bozorg-Haddad, O. y Azamathulla, H. M. (2021). Water policy and governance. In *Economical, Political, and Social Issues in Water Resources* (pp. 129–153). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90567-1.00005-X>

Zhang, L., Li, P. y He, X. (2021). Interactions between surface water and groundwater in selected tributaries of the Wei River (China) revealed by hydrochemistry and stable isotopes. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 1–21. <https://doi.org/10.1080/10807039.2021.2016054>

Zheng, C. y Spijkers, O. (2021). Priority of Uses in International Water Law. *Sustainability*, 13(3), 1567. <https://doi.org/10.3390/su13031567>

# ***ANEXOS***

***ANEXO 1***  
**MAPA DE UBICACIÓN DEL ÁREA  
DE ESTUDIO**

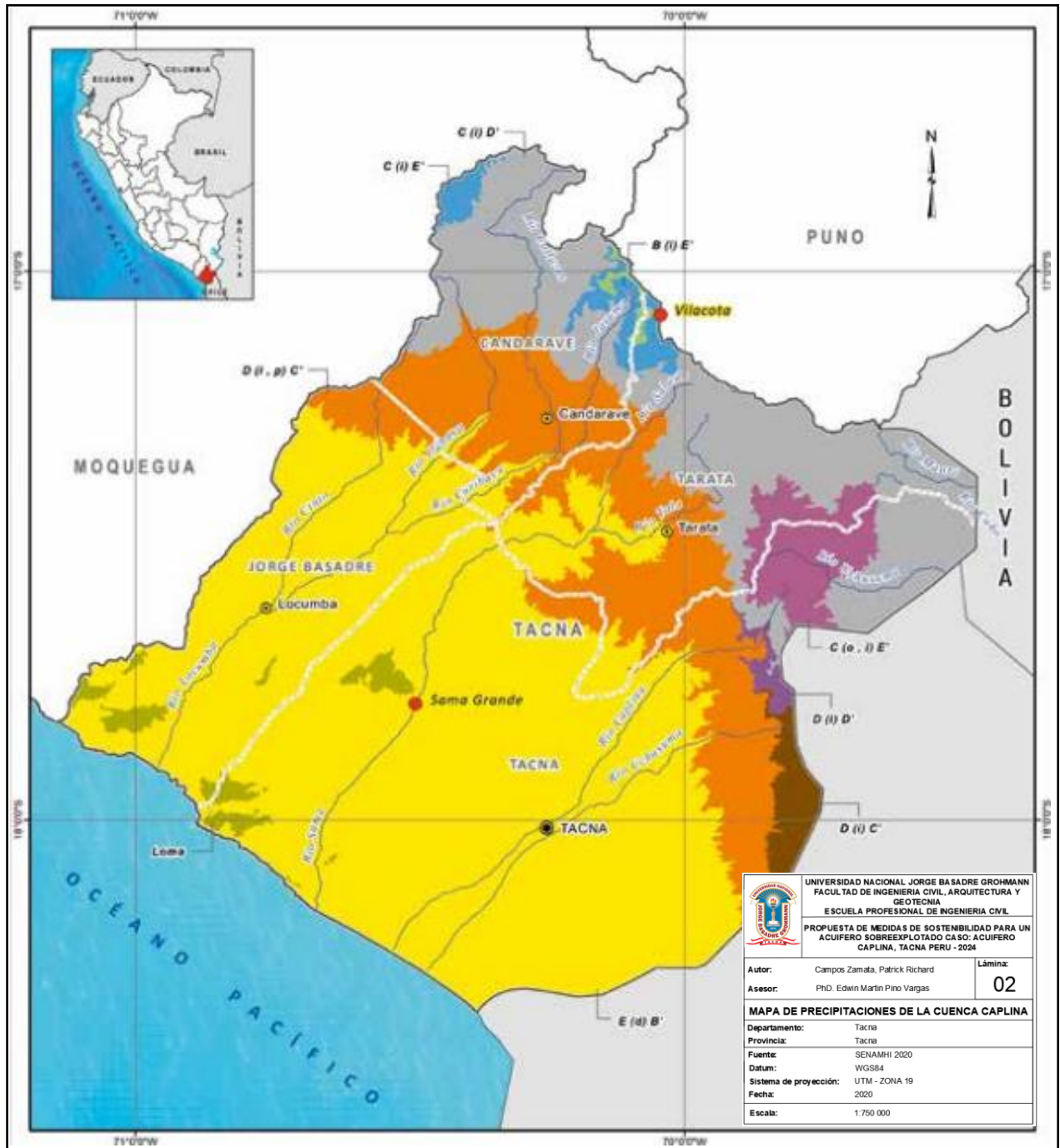


	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN</b> FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL	
	<b>PROPUESTA DE MEDIDAS DE SOSTENIBILIDAD PARA UN ACUIFERO SOBREEXPLOTADO CASO: ACUIFERO CAPLINA, TACNA PERU - 2024</b>	
Autor:	Campos Zamata, Patrick Richard	Lámina:
Asesor:	PhD. Edwin Martin Pino Vargas	<b>01</b>
<b>MAPA DE UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO</b>		
Departamento:	Tacna	
Provincia:	Tacna	
Fuente:	Pino-Vargas et al, 2023	
Datum:	WGS84	
Sistema de proyección:	UTM - ZONA 19	
Fecha:	Junio del 2023	
Escala:	1:750 000	

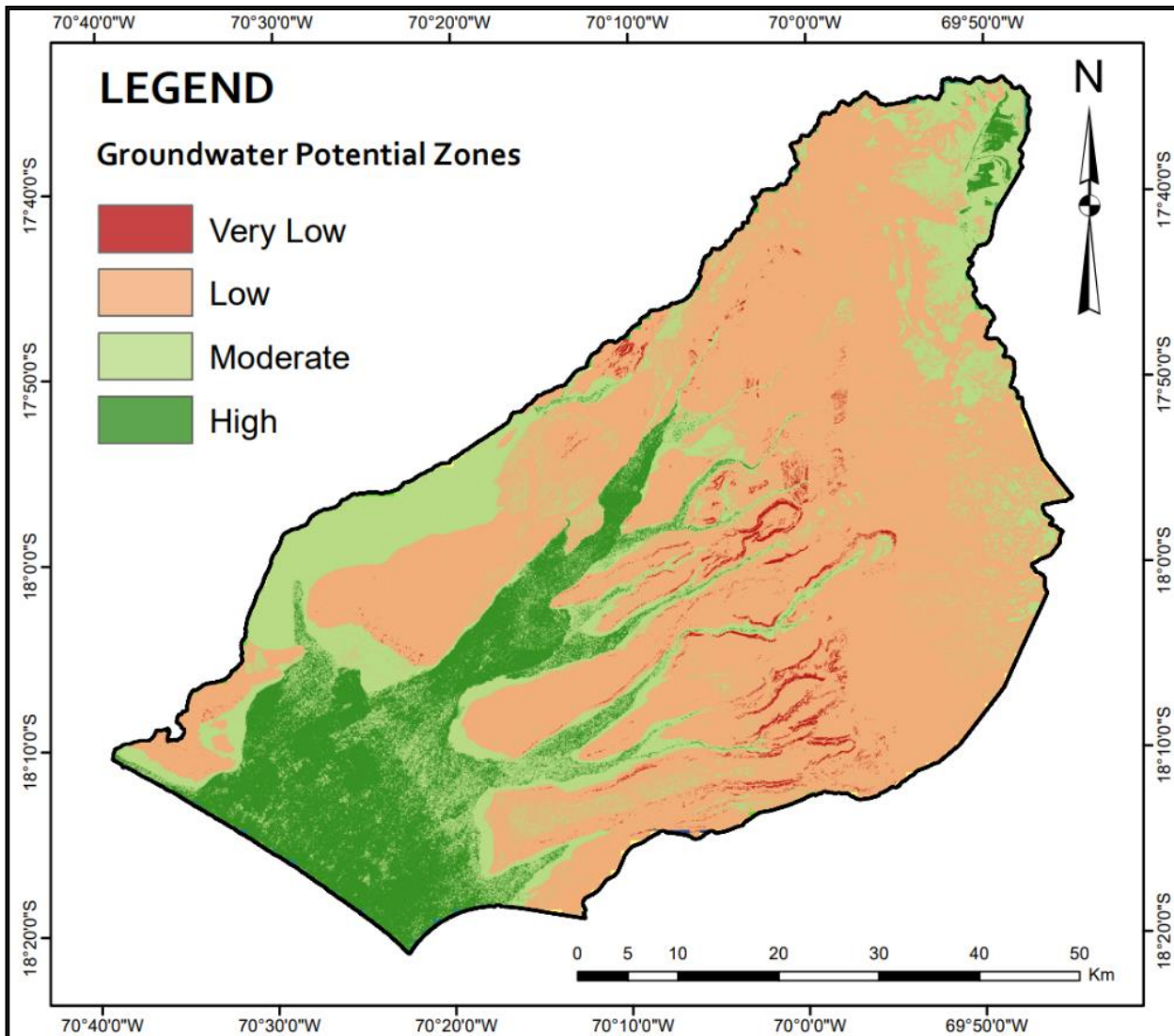


## ***ANEXO 2***

### **MAPA DE PRECIPITACIONES DE LA CUENCA CAPLINA, SENAMHI**



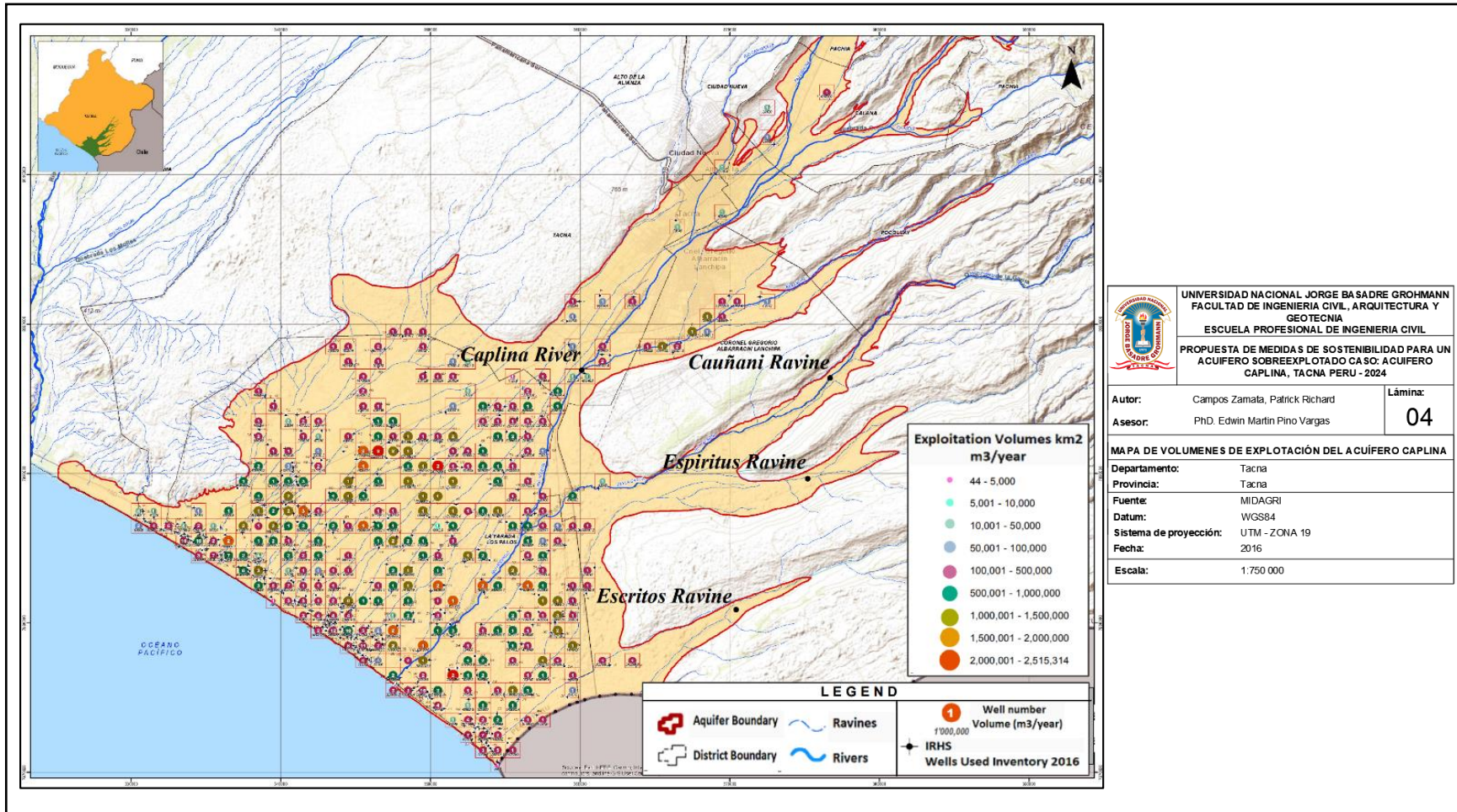
***ANEXO 3***  
**MAPA DE ZONAS POTENCIALES  
DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**



	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA</b> <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL</b>	
	<b>PROPUESTA DE MEDIDAS DE SOSTENIBILIDAD PARA UN ACUIFERO SOBREEXPLOTADO CA SO: ACUIFERO CAPLINA, TACNA PERU - 2024</b>	
<b>Autor:</b>	Campos Zamata, Patrick Richard	<b>Lámina:</b>
<b>Asesor:</b>	PhD. Edwin Martin Pino Vargas	<b>03</b>
<b>MAPA DE ZONAS POTENCIALES DE AGUA SUBTERRANEA</b>		
<b>Departamento:</b>	Tacna	
<b>Provincia:</b>	Tacna	
<b>Fuente:</b>	Pocco et al., 2023	
<b>Datum:</b>	WGS84	
<b>Sistema de proyección:</b>	UTM - ZONA 19	
<b>Fecha:</b>	Marzo 2023	
<b>Escala:</b>	1:750 000	

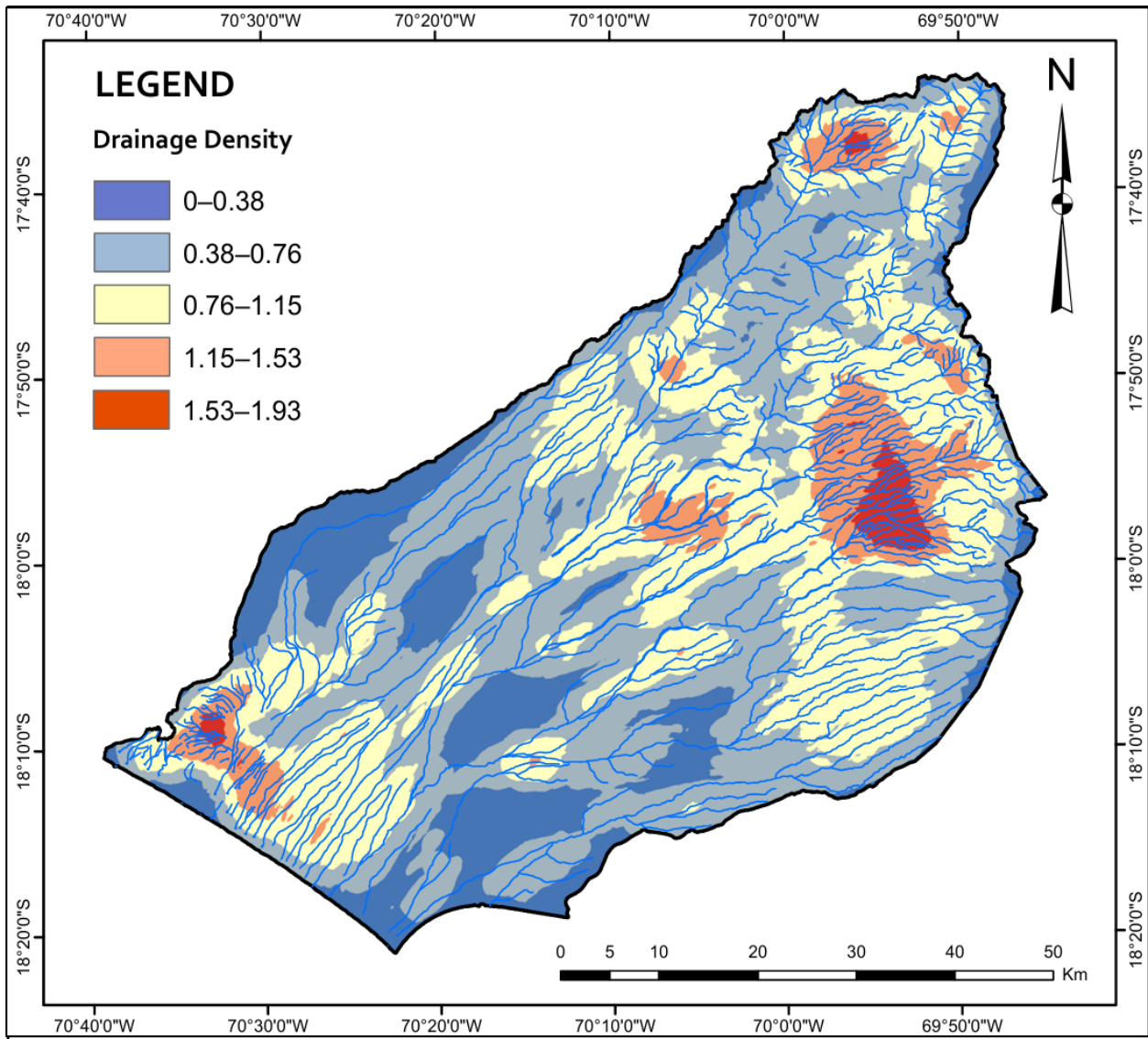
***ANEXO 4***  
**MAPA DE VOLÚMENES DE  
EXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO  
CAPLINA**





	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL	
	PROPUESTA DE MEDIDAS DE SOSTENIBILIDAD PARA UN ACUIFERO SOBREEXPLOTADO CA SO: ACUIFERO CAPLINA, TACNA PERU - 2024	
Autor:	Campos Zamata, Patrick Richard	Lámina:
Asesor:	PhD. Edwin Martín Pino Vargas	<b>04</b>
<b>MAPA DE VOLUMENES DE EXPLOTACIÓN DEL ACUIFERO CAPLINA</b>		
Departamento:	Tacna	
Provincia:	Tacna	
Fuente:	MIDAGRI	
Datum:	WGS84	
Sistema de proyección:	UTM - ZONA 19	
Fecha:	2016	
Escala:	1:750 000	

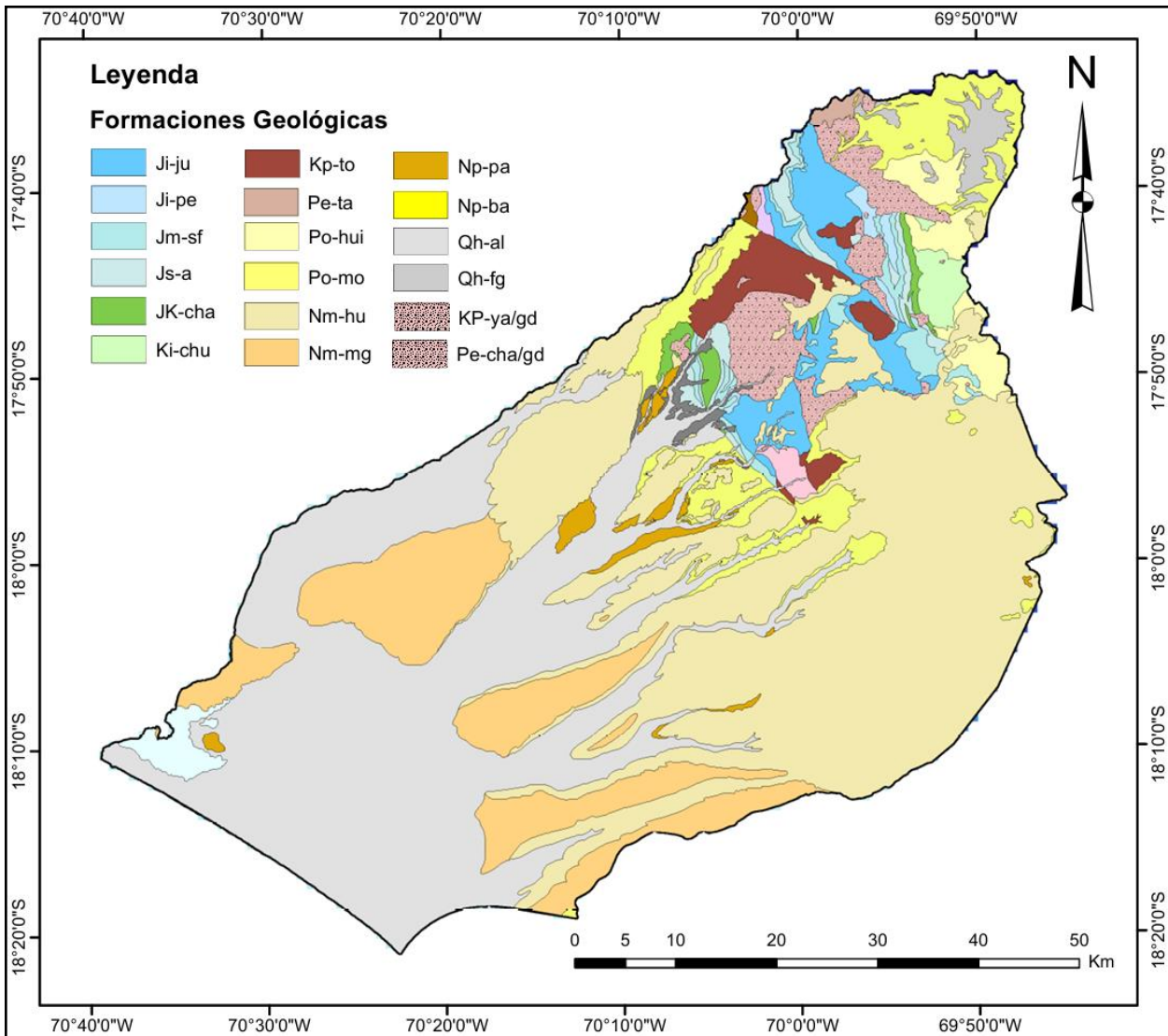
***ANEXO 5***  
**MAPA DE DENSIDAD DE  
DRENAJE**



	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN</b> FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL	
	<b>PROPUESTA DE MEDIDAS DE SOSTENIBILIDAD PARA UN ACUIFERO SOBREEXPLOTADO CASO: ACUIFERO CAPLINA, TACNA PERU - 2024</b>	
<b>Autor:</b>	Campos Zamata, Patrick Richard	<b>Lámina:</b>
<b>Asesor:</b>	PhD. Edwin Martin Pino Vargas	<b>05</b>
<b>MAPA DE DENSIDAD DE DRENAJE</b>		
<b>Departamento:</b>	Tacna	
<b>Provincia:</b>	Tacna	
<b>Fuente:</b>	(Pooco et al., 2023)	
<b>Datum:</b>	WGS84	
<b>Sistema de proyección:</b>	UTM - ZONA 19	
<b>Fecha:</b>	Marzo 2023	
<b>Escala:</b>	1:750 000	

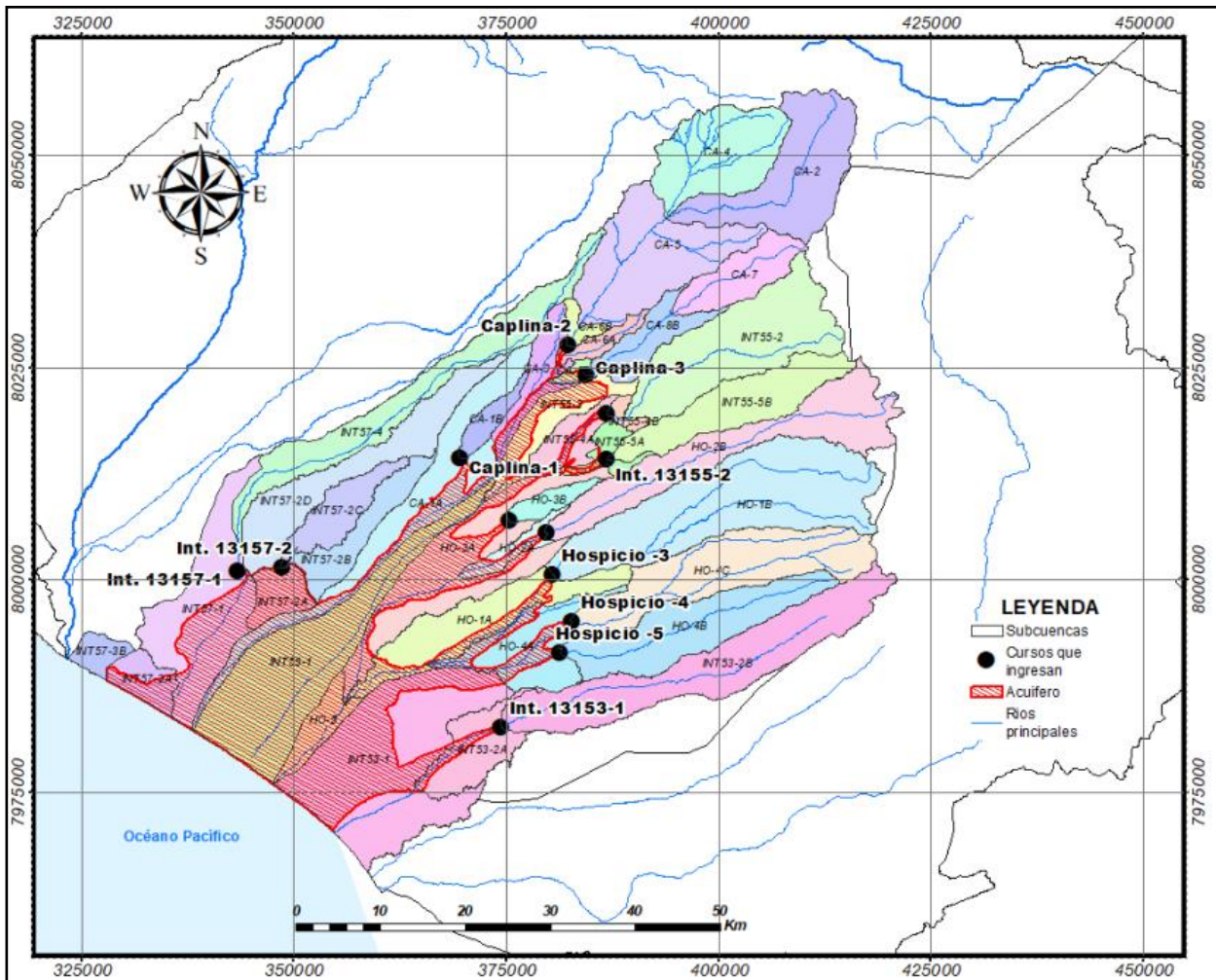


***ANEXO 6***  
**MAPA GEOLOGÍCO**



	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN</b> FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL	
	<b>PROPUESTA DE MEDIDAS DE SOSTENIBILIDAD PARA UN ACUIFERO SOBREEXPLOTADO CASO: ACUIFERO CAPLINA, TACNA PERU - 2024</b>	
<b>Autor:</b>	Campos Zamata, Patrick Richard	<b>Lámina:</b>
<b>Asesor:</b>	PhD. Edwin Martín Pino Vargas	<b>06</b>
<b>MAPA GEOLOGICO</b>		
<b>Departamento:</b>	Tacna	
<b>Provincia:</b>	Tacna	
<b>Fuente:</b>	(Pocco et al., 2023)	
<b>Datum:</b>	WGS84	
<b>Sistema de proyección:</b>	UTM - ZONA 19	
<b>Fecha:</b>	Marzo 2023	
<b>Escala:</b>	1:750 000	

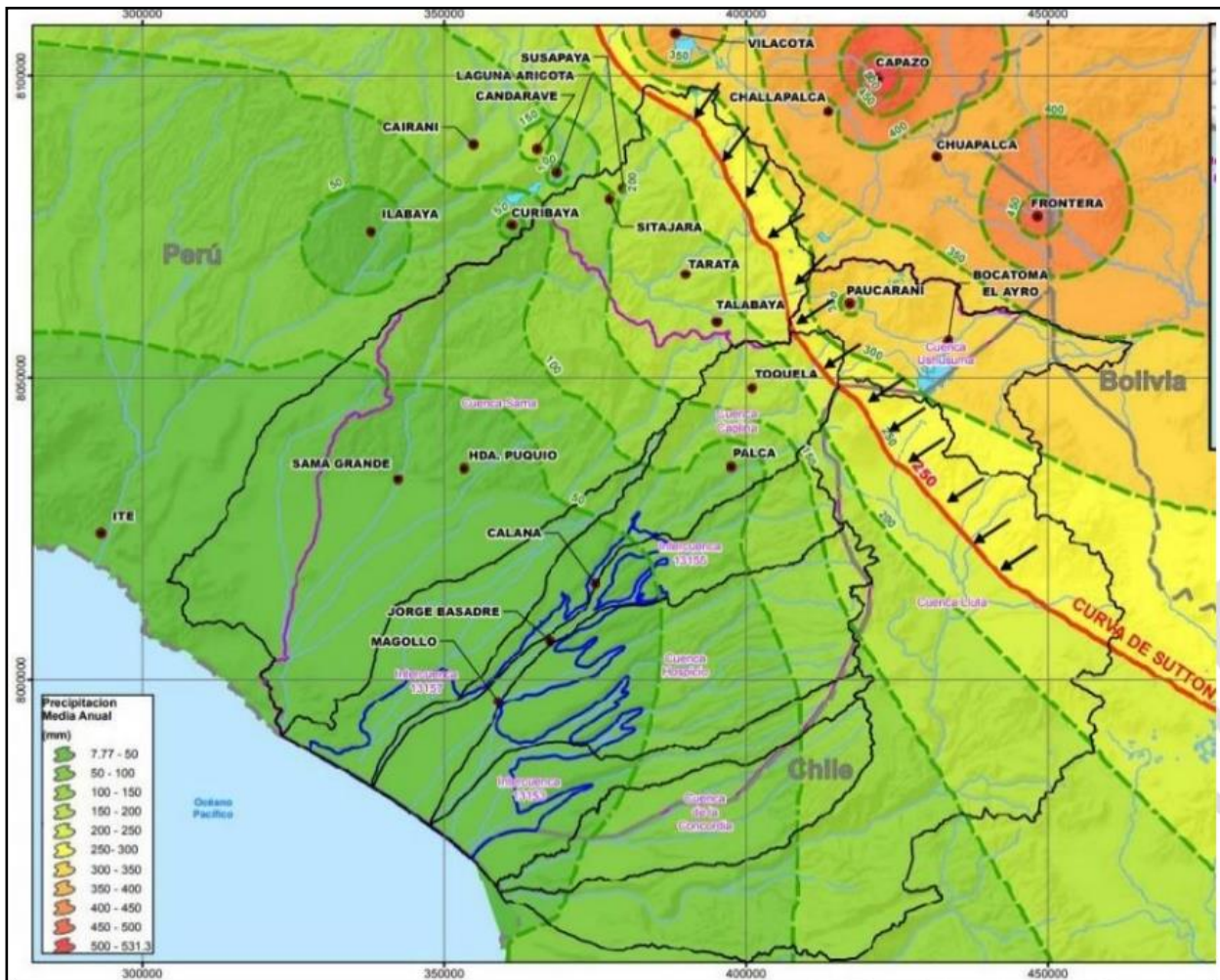
***ANEXO 7***  
**PUNTOS DE ENTRADA DE  
CURSOS DE AGUA AL ACUÍFERO**



	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN</b> <b>FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA</b> <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL</b>	
	<b>PROPUESTA DE MEDIDAS DE SOSTENIBILIDAD PARA UN ACUIFERO SOBREEXPLOTADO CASO: ACUIFERO CAPLINA, TACNA PERU - 2024</b>	
<b>Autor:</b> Campos Zamata, Patrick Richard	<b>Lámina:</b>	<b>07</b>
<b>Asesor:</b> Ph.D. Edwin Martín Pino Vargas		
<b>PUNTOS DE ENTRADA DE CURSOS DE AGUA AL ACUIFERO</b>		
<b>Departamento:</b> Tacna		
<b>Provincia:</b> Tacna		
<b>Fuente:</b> ANA		
<b>Datum:</b> WGS84		
<b>Sistema de proyección:</b> UTM - ZONA 19		
<b>Fecha:</b> Marzo 2013		
<b>Escala:</b> 1:750 000		

***ANEXO 8***

**POTENCIALES ZONAS DE  
RECARGA POR LLUVIA DEL  
ACUÍFERO CAPLINA**



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN  
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y  
 GEOTECNIA  
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

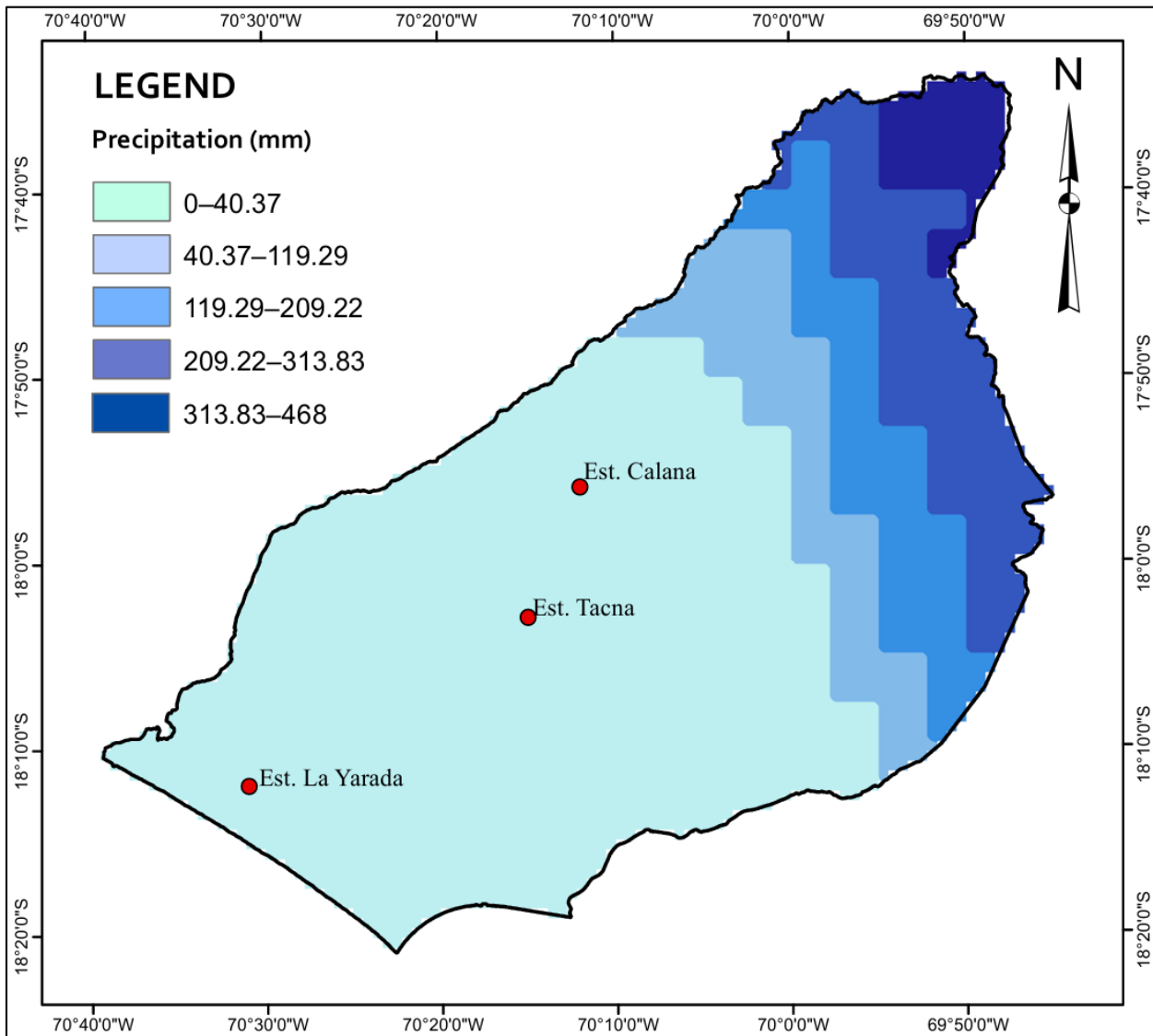
PROPUESTA DE MEDIDAS DE SOSTENIBILIDAD PARA UN  
 ACUIFERO SOBREENPLOTAO CASO: ACUIFERO  
 CAPLINA, TACNA PERU - 2024

<b>Autor:</b>	Campos Zamata, Patrick Richard	<b>Lámina:</b>	08
<b>Asesor:</b>	Ph.D. Edwin Martín Pino Vargas		

<b>POTENCIALES ZONAS DE RECARGA POR LLUVIA DEL ACUIFERO CAPLINA</b>	
<b>Departamento:</b>	Tacna
<b>Provincia:</b>	Tacna
<b>Fuente:</b>	ANA
<b>Datum:</b>	WGS84
<b>Sistema de proyección:</b>	UTM - ZONA 19
<b>Fecha:</b>	Marzo 2013
<b>Escala:</b>	1:750 000



***ANEXO 9***  
**PRECIPITACIÓN ACUMULADA**  
**TERRACLIMATE**



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y  
GEOTECNIA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

PROPUESTA DE MEDIDAS DE SOSTENIBILIDAD PARA UN  
ACUIFERO SOBREEXPLOTADO CASO: ACUIFERO  
CAPLINA, TACNA PERU - 2024

Autor: Campos Zamata, Patrick Richard

Asesor: Ph.D. Edwin Martin Pino Vargas

Lámina:

09

**MAPA DE PRECIPITACIÓN ACUMULADA, TERRACLIMATE**

Departamento: Tacna

Provincia: Tacna

Fuente: (Pocco et al., 2023)

Datum: WGS84

Sistema de proyección: UTM - ZONA 19

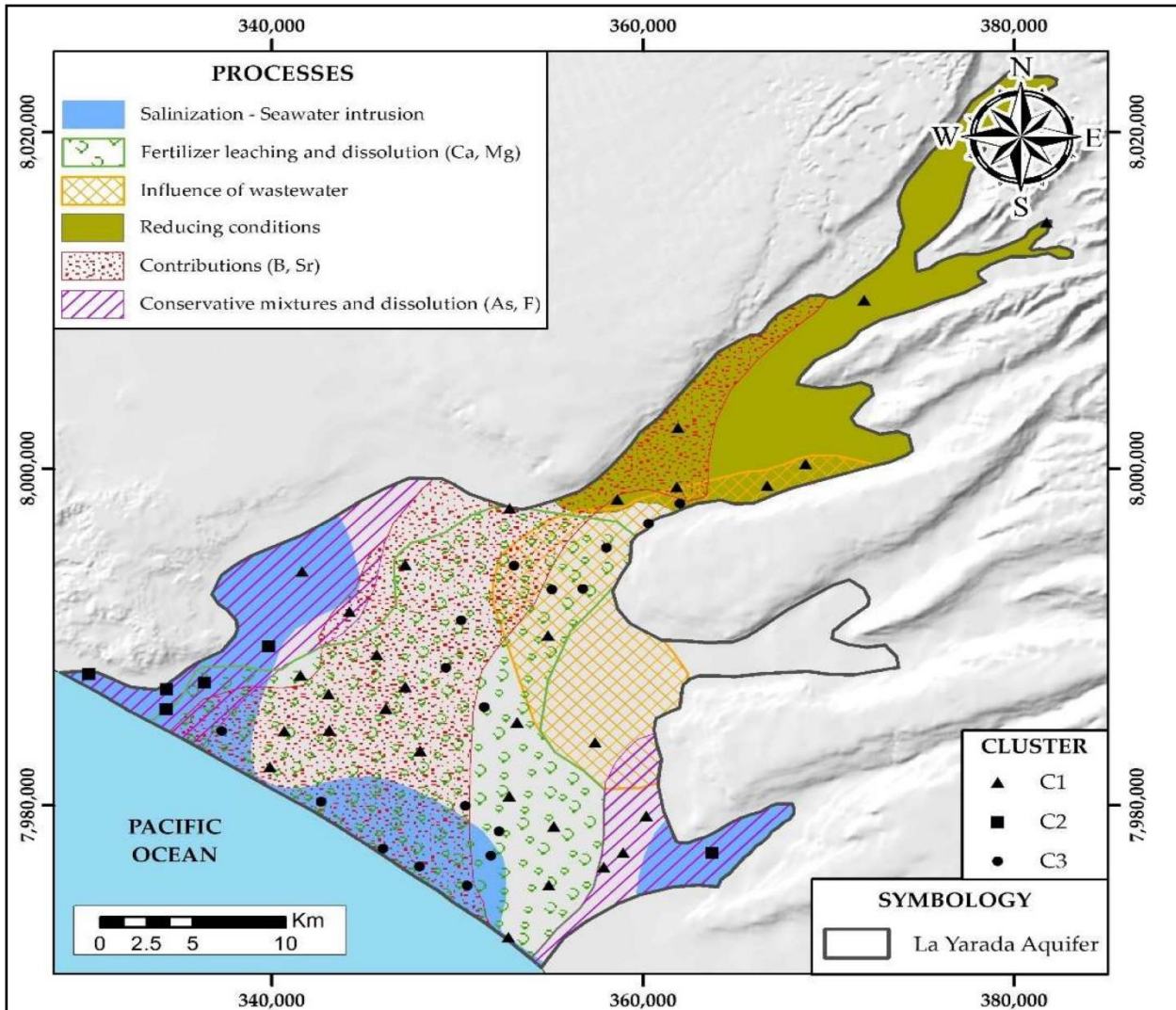
Fecha: Marzo 2023


Escala: 1:750 000



# ***ANEXO 10***

## **MAPA DE PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS QUE GOBIERNAN LA QUÍMICA DEL AGUA EN EL ACUÍFERO CAPLINA**



	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL	
	PROPUESTA DE MEDIDAS DE SOSTENIBILIDAD PARA UN ACUIFERO SOBREEXPLOTADO CASO: ACUIFERO CAPLINA, TACNA PERU - 2024	
Autor:	Campos Zamata, Patrick Richard	Lámina:
Asesor:	PhD. Edwin Martin Pino Vargas	10
MAPA DE PROCESOS GEOQUIMICOS QUE GOBIERNAN LA QUIMICA DEL AGUA EN EL ACUIFERO CAPLINA		
Departamento:	Tacna	
Provincia:	Tacna	
Fuente:	(Chucuya et al., 2022)	
Datum:	WGS84	
Sistema de proyección:	UTM - ZONA 19	
Fecha:	Febrero 2022	
Escala:	1:750 000	