

Historical evolution of the hydrogeological conceptualization and the use of Caplina aquifer on the northern edge of the Atacama Desert

Edwin Pino-Vargas ^{*,a} , Edilberto Guevara-Pérez ^b , César Avendaño-Jihuallanga ^a 

^aDepartamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú.

^bPrograma de Doctorado en Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina Lima, Perú.



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i3.45>

Abstract.- The Caplina aquifer is located on the border between Peru and Chile and corresponds to the head of the Atacama desert, one of the driest in the world. In this coastal region, groundwater supplies 100 % of agricultural demand. The aquifer has been exploiting for more than 100 years, at increasing rates of extraction, which has generated a water imbalance with the consequent process of contamination by marine water intrusion. This research seeks to identify the hydrogeological conceptualization of the system and its effect on the sustainable management of groundwater. This will allow establishing guidelines for the sustainable management of groundwater, proposing corrective measures of a structural and non-structural type; the first, aimed at artificially securing the water resources for recharging the aquifer; and the second, to establish a management plan and reorganization of extractions, to specify the volume of extraction and the structural measures to be adopted. Additionally, criteria for environmental education, awareness and dissemination, aimed at the conservation and preservation of the aquifer, must be incorporated.

Keywords: Caplina aquifer; hydrogeology; sustainable exploitation; saline intrusion.

Evolución histórica de la conceptualización hidrogeológica y del uso del acuífero Caplina ubicado en el borde norte del desierto de Atacama

Resumen.- El acuífero Caplina, se ubica en el límite entre Perú y Chile y corresponde a la cabecera del desierto de Atacama, uno de los más áridos del mundo. En esta región costera, el agua subterránea abastece el 100 % de demanda agrícola. El acuífero se viene explotando por más 100 años, a tasas de extracción cada vez mayores, lo que ha generado un desbalance hídrico con el consiguiente proceso de contaminación por intrusión marina. En esta investigación se busca identificar la conceptualización hidrogeológica del sistema y su efecto en el manejo sostenible del agua subterránea. Esto permitirá establecer lineamientos para el manejo sostenible del agua subterránea, planteando medidas de tipo estructural y no estructural; las primeras, orientadas a afianzar artificialmente los recursos hídricos de recarga al acuífero; y las segundas, a establecer un plan de gestión y reordenamiento de extracciones, para precisar el volumen de extracción y las medidas estructurales a adoptar. Adicionalmente se debe incorporar criterios de educación ambiental, sensibilización y divulgación, orientados a la conservación y preservación del acuífero.

Palabras clave: acuífero Caplina; hidrogeología; explotación sostenible; intrusión salina.

Recibido: 01 de noviembre, 2021.

Aceptado: 14 de diciembre, 2021.

1. Introducción

Uno de los principales problemas que confronta la sociedad es la escasez y calidad de los recursos hídricos superficiales y subterráneos [1]. En las regiones áridas el agua subterránea juega

un papel muy activo, tanto por la capacidad de interacción con los otros elementos del ambiente, como por la distribución espacial sistematizada del flujo; ambos con ocurrencia simultánea en todas las escalas de espacio y tiempo [2, 3, 4, 5].

En muchas regiones áridas el agua subterránea es la única fuente para cubrir los requerimientos de uso poblacional y agrícola; pero también para el sostenimiento de los ecosistemas terrestres nativos [6]. En este sentido, juega un papel indispensable la

* Autor para correspondencia:

Correo-e: epinov@unjbg.edu.pe (E. Pino-Vargas)

gestión de la recarga y del uso adecuado del recurso [7, 8].

En América del Sur, se ha incrementado en demasía la dependencia de los sistemas de abastecimiento, de las fuentes de agua subterránea; aunque es difícil de estimar los volúmenes de extracción desde los acuíferos debido a que la mayoría de pozos, tanto públicos como privados, no son monitoreados para control [9, 10, 11, 12].

En las últimas décadas los sistemas hídricos han experimentado grandes cambios: hay ríos que se han secado, humedales que han desaparecido y acuíferos que han sido explotados intensivamente durante años [12]. La mayor parte de ese problema se atribuye a las actividades antropomórficas, el que puede agravarse por la influencia del cambio climático, afectando en algunos casos con efectos retardados la cantidad y calidad de las aguas subterráneas, y en otros la intensidad y/o desfase de los eventos extremos. En todos los casos, las consecuencias impactan negativamente a los ecosistemas y a la sociedad [13].

El acuífero costero Caplina, ubicado en el extremo norte del desierto de Atacama, no ha sido ajeno al impacto de los fenómenos indicados, constituyendo la crisis de gobernabilidad y gobernanza en la gestión del uso del agua subterránea un elemento que ha contribuido al agotamiento de las reservas y deterioro de la calidad del agua, no solo por contaminación de fuentes superficiales sino por procesos de intrusión de agua marina [9, 10, 14, 15, 16, 17].

Entre las fuentes superficiales de contaminación se ha detectado contenido de arsénico, plomo y sodio en concentraciones por encima de los valores del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) permitido, fuentes relacionadas directamente con el medio geológico de la zona [15].

Para minimizar los efectos adversos provocados por la escasez y mala calidad del agua se requiere el uso de modelos óptimos y sostenibles de gestión del agua subterránea [18]. La modelación del acuífero proporciona ventajas significativas cuando se trata de evaluar el régimen del recurso hídrico y estimar el volumen para el uso sostenible. Es de gran ayuda en este propósito la utilización del análisis

geológico y geofísico, el cual permitirá establecer pautas de uso sostenible del agua subterránea [19].

Actualmente se percibe al agua subterránea como un agente geológico [2], concepto que solo ha evolucionado después de las décadas de 1960 y 1970 cuando la naturaleza del sistema del flujo de agua subterránea basal y sus propiedades, geometrías y factores de control se reconocieron y comprendieron.

Hasta hace poco, no se entendía bien la vulnerabilidad del agua subterránea al excesivo uso y la degradación de la calidad, tal vez porque es difícil estimar las variaciones de almacenamiento del agua subterránea estacional [20]. En este aspecto la hidrogeología del acuífero Caplina ha sufrido un proceso de evolución histórica en el período de más de 100 años de explotación del sistema acuífero y merece ser investigado. En este trabajo, se presentan los resultados del análisis de la evolución de la conceptualización hidrogeológica del acuífero Caplina en un período de más de un siglo de explotación en términos de cantidad y calidad; y de la evaluación de la situación actual de la contaminación por el proceso de intrusión de agua salada del mar. Los resultados deben coadyuvar al manejo sostenible del agua subterránea del acuífero en un marco de sostenibilidad ambiental.

2. Metodología

La investigación se fundamenta en una revisión de documentos sobre el acuífero costero Caplina en un período de más de un siglo de explotación. En este proceso se consultaron documentos y material oficial de dominio público de instituciones de carácter científico y tecnológico, para explicar el funcionamiento hidráulico del acuífero en base a la conceptualización geológica e hidrogeológica del sistema, niveles piezométricos, volúmenes de explotación y recarga y el balance hídrico. La información fue analizada y evaluada, estableciéndose la discusión y extrayendo conclusiones sobre la conceptualización de su funcionamiento hidrogeológico en los más de 100 años de explotación del sistema acuífero.

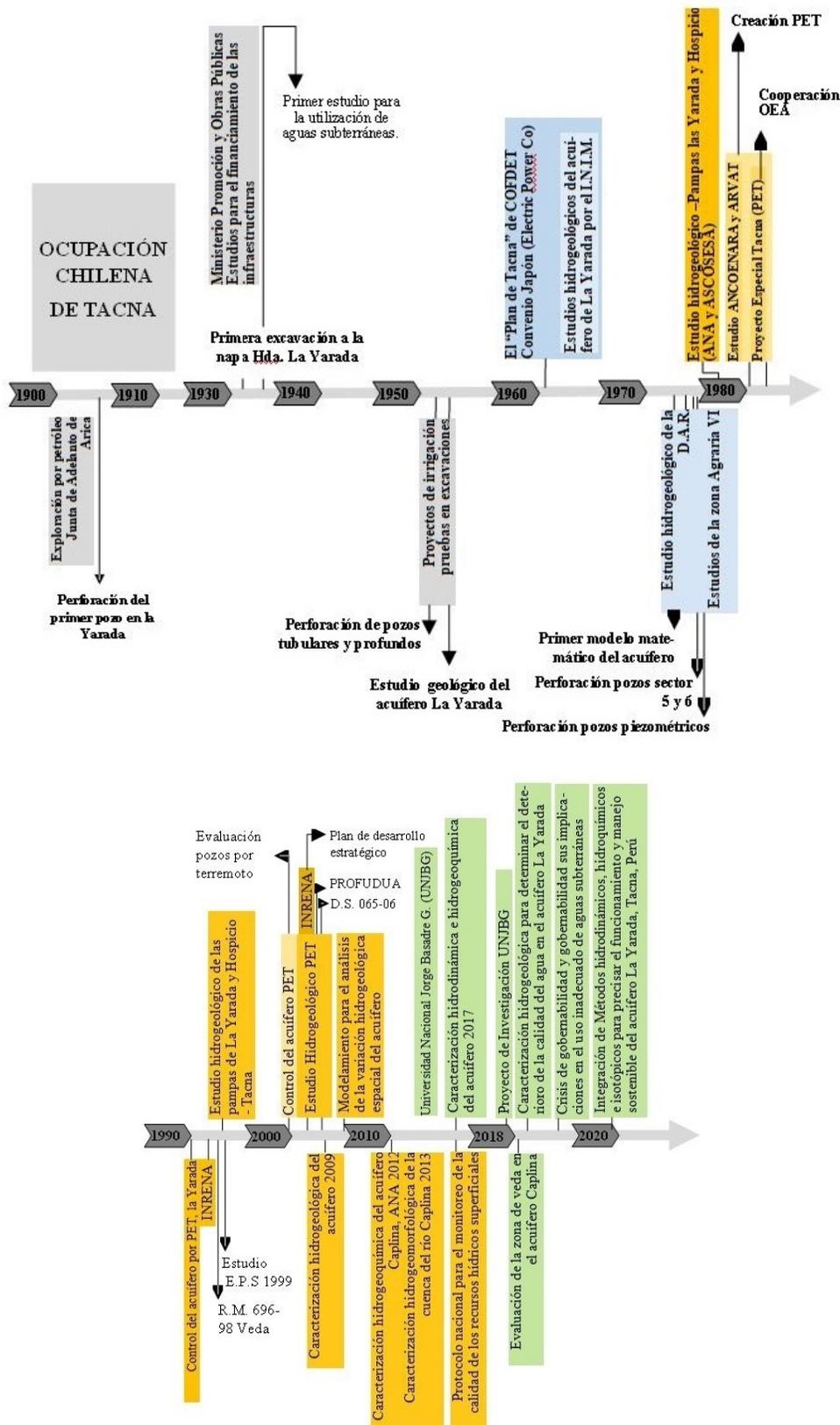


Figura 1: Línea de tiempo de la evolución de sucesos y estudios realizados para el sistema acuífero Caplina entre los años 1900 al 2020

Se estableció una línea de tiempo que permitió sistematizar la revisión cronológica de la evolución conceptual de la hidrogeología del sistema acuífero. La explotación del sistema acuífero se inicia en la década de 1910 y la explotación ha estado en régimen de equilibrio (recarga-extracciones) hasta la década de los años 1970. A partir de la década de 1980 el acuífero ha iniciado un período de desequilibrio [11]. Recién en el año 1996, el Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) lleva a cabo un estudio completo respecto a la conceptualización del sistema acuífero y fue posteriormente heredado a la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Sin duda, en períodos anteriores hubo algunos intentos de conceptualizar el sistema acuífero para describir su funcionamiento. En la Figura 1, se muestra la línea de tiempo sobre la evolución de sucesos y estudios realizados para el sistema acuífero Caplina, desde los inicios de su exploración-explotación hasta la actualidad. En esta línea de tiempo se incluyen reportes técnicos, artículos científicos entre otros documentos técnicos y legales.

3. Resultados

3.1. Descripción del acuífero Caplina

En la Figura 2 se presenta la ubicación del acuífero Caplina, se puede observar que el acuífero se ubica entre Perú y Chile, en el extremo norte del desierto Atacama, uno de los más secos del mundo. El acuífero Caplina, pertenece a la cuenca transfronteriza Caplina/Concordia, con una extensión total de 5,190 km², de la cual, el 85 % pertenece al Perú y el 15 % restante a Chile. La cuenca limita en su parte superior con la cuenca transfronteriza de Maure a unos 4500 ms.n.m.; por la parte inferior con el Océano Pacífico (sureste); con la cuenca adyacente de Sama (noroeste) en Perú y la cuenca de Lluta (sureste) en Chile [10]. Esta región es altamente deficitaria en recursos hídricos superficiales y se caracteriza por su ubicación en la cabecera del Desierto de Atacama. La escasa recarga proviene de la parte alta de la propia cuenca, por trasvases de agua entre cuencas a lo largo de la Cordillera de los Andes y, a través de depósitos de

agua subterránea acumulados en la parte baja de la cuenca [10, 11, 17].

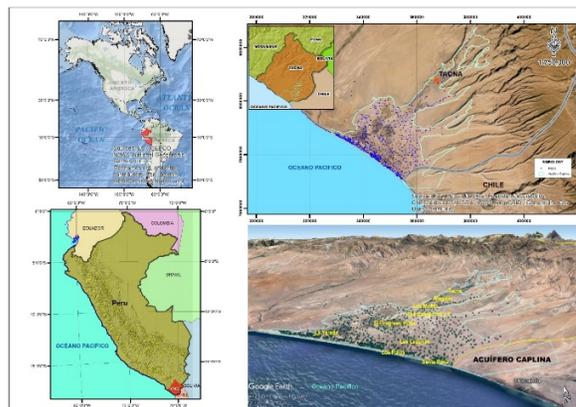


Figura 2: Mapa de ubicación del acuífero Caplina, localizado en la región sur de Perú

3.2. Evolución de la conceptualización hidrogeológica

A continuación, se analiza la información correspondiente a los períodos más importantes que han permitido conocer el funcionamiento del sistema acuífero, durante los cuales, la conceptualización del sistema se ha tornado de mucha importancia, debido a que se comenzó a notar descensos muy marcados del nivel freático. Se espera que continúe el agotamiento del acuífero con un descenso del nivel freático entre 5 y 8 m/año y un incremento del volumen de la intrusión de agua de mar de entre 1120 y 1175 hm³/año [9, 10, 14, 15, 16, 17].

Años 1900-1930: Inicios de la explotación del acuífero

En este período se inicia la conceptualización de un sistema de agua subterránea con fines de riego agrícola. La perforación del primer pozo de exploración-explotación de agua subterráneas en el acuífero Caplina se inicia antes de 1910. Los primeros trabajos geológicos en la zona de estudio fueron realizados por Jaworski en 1916, advirtiéndose la presencia del Liásico en los alrededores de Palca [21]. Felsch en 1922, también realizó estudios geológicos en la misma zona; sin embargo, no existen registros de dicho trabajo en Perú [21].

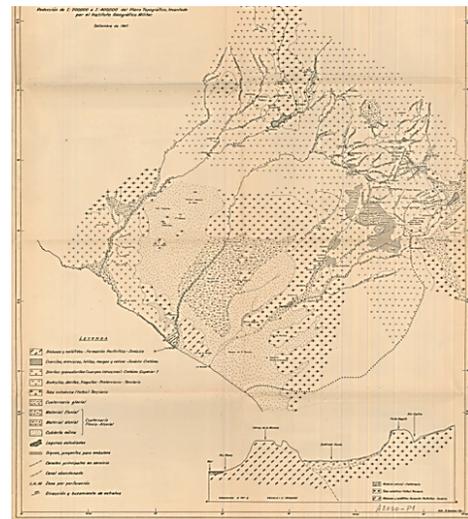
Décadas de los años 1930 y 1940

En el informe técnico de Conkling & Góngora [22] realizado para el Ministerio de Fomento, se reporta que en la cabecera de la cuenca Caplina hay grandes depósitos de aluviones que han sido erosionados por la acción eólica y pluvial; el basamento rocoso es definido por mantos pizarrosos, aflorando en el origen del valle. Dichos depósitos erosionados son transportados a las pampas por corrientes torrenciales. Según la composición litológica de las pampas costeras del valle, se observa que este material está conformado por finos, guijarros y materiales gruesos, indicando que se trata de un cono de deyección fluvial y no una deposición marina. Desde el punto de vista hidrogeológico estos materiales presentan características favorables para el flujo del agua como fuente de recarga del acuífero.

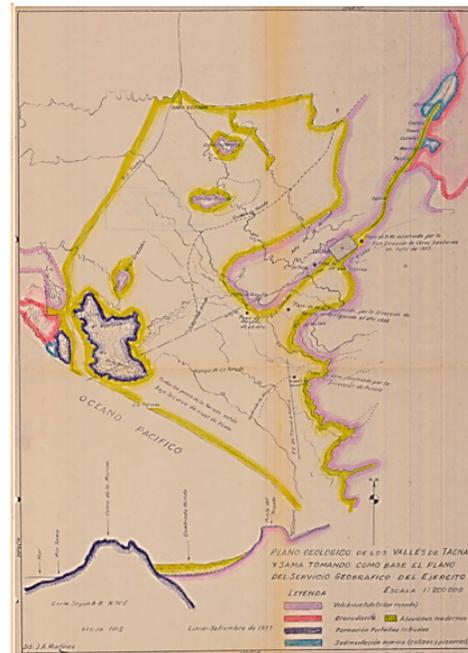
Período de la década de 1950

La parte alta de la cuenca se describe como conformada por calizas estratificadas del Mesozoico, con presencia de diques andesíticos con una edad de transición del Jurásico Superior al Cretácico Inferior [23]. También se ha detectado la presencia de granitos del Terciario, lutitas pizarrosas y calizas grises en la zona media de la cuenca, añadiendo la presencia de cuarcitas blancas sobre las cuales descansan las formaciones anteriormente mencionadas, como se muestra en la Figura 3 [24]. En los estudios de García del año 1957 se identifica como basamento impermeable del acuífero a las calizas, areniscas y pizarras visibles en la Cordillera, del Jurásico y Cretácico Inferior, con intrusiones posteriores de granodioritas del Pre-Terciario, que afloran en el valle desde el cerro San Francisco, como se observa en las Figuras 3a y 3b [25].

La roca cuaternaria de origen volcánico y sedimentario depositada a lo largo del valle de Tacna desde las nacientes del acuífero, están conformadas por material detrítico en forma de conglomerado semi-consolidados extendiéndose sobre los altiplanos y pampas bajas del valle [23]. Las rocas más notables a lo largo del valle de Tacna, son las rocas volcánicas, entre los cuales se encuentra la toba volcánica, que se observa en los



(a) Castro, 1957



(b) García, 1957

Figura 3: Conceptualización geológica

márgenes del río Caplina, extendiéndose hasta el Morro de Arica, reposando discordantemente sobre sedimentos calcáreos y lutitas (arcillas pizarrosas) del Jurásico; siendo las tobas de edad Terciaria las que se presentan en medio marino [24].

Década de los años 1960

La información de este período indica que, por causas tectónicas, en la margen izquierda del valle Caplina ha ocurrido una migración de las aguas tanto superficiales como subterráneas, que

discurren por formaciones de lutitas, areniscas y calizas de origen marino [21].

En un estudio geomorfológico de la región, realizado por Dollfus en 1962 con fines de aprovechamiento de los recursos de aguas subterráneas, se describe la Formación Moquegua como material de aporte sedimentario continental, intercalado con derrames de tufos volcánicos, que no se considera como un potencial acuífero debido a la litología [25]; sin embargo, las fracturas, las facies y el tectonismo, pueden facilitar los drenes de agua subterránea sobre esta formación. Según el servicio de la Carta Geológica Nacional, en el tramo medio del valle se presenta la Formación Huaylillas perteneciente al Mioceno, de origen volcánico y color rosado, conformado por una matriz con abundante cuarzo y minerales de biotita. Posiblemente esta formación constituye el basamento hidrogeológico de la localidad [26].

Décadas de los años 1970 y 1980

Todo incremento del bombeo en el acuífero se traduce a la vez en una disminución de la descarga del flujo subterráneo hacia el mar y un aumento del flujo subterráneo que ingresa a la cuenca del Río Caplina [27]. Esto indica que no se puede incrementar indefinidamente el bombeo porque la alimentación de la recarga proveniente de la cuenca del río Caplina es limitada; por otra parte, hay que evitar la salinización por intrusión marina en la parte baja. Se estima que un bombeo total del orden de los $3 \text{ m}^3/\text{s}$ en la zona de Pampa de La Yarada y Hospicio, distribuido en el reservorio subterráneo podría ser considerado como máximo para el acuífero en el estado actual del conocimiento. En la Figura 4, se muestran la configuración de las isolíneas de niveles freáticos del acuífero en el año 1973, las cuales se distribuyen en forma paralela a la línea de playa sin evidencias de abatimientos por debajo del nivel medio del mar.

Hay referencias que indican que un sistema de fallas ha ocasionado la subsidencia de la región dando como resultado un basamento precuaternario, moderadamente deformado con una serie de bloques fallados [28]. Este basamento sirvió de lecho de depósitos cuaternarios, en el cual se ha diferenciado un acuífero libre constituido por

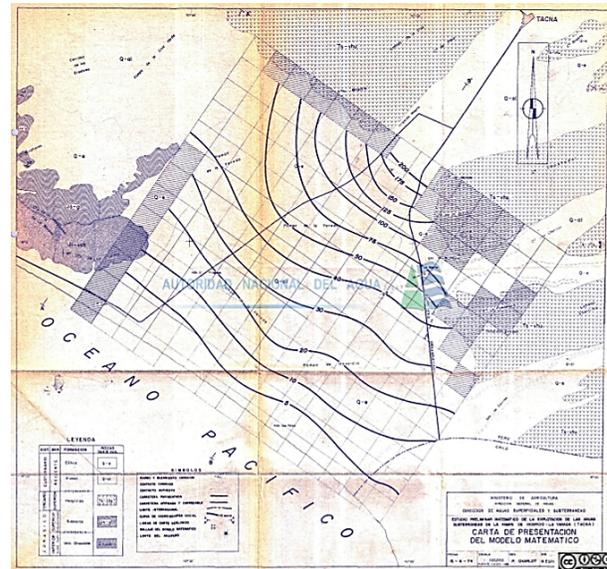
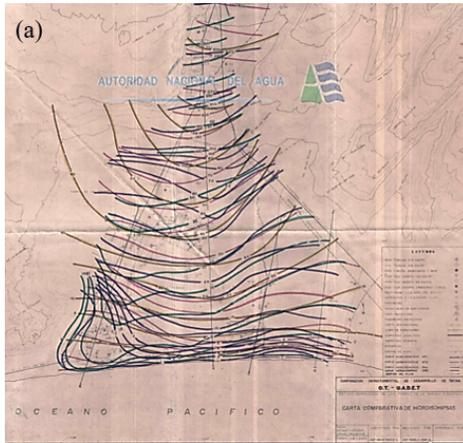


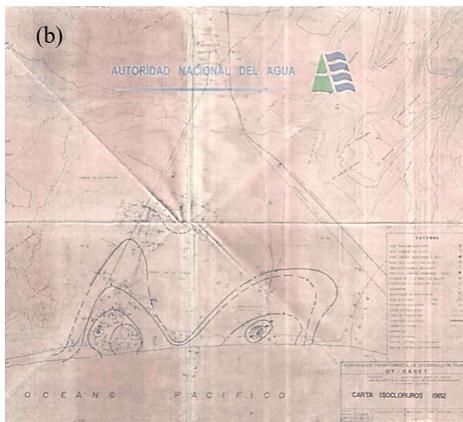
Figura 4: Isolíneas de niveles freáticos del acuífero Caplina en el año 1973

depósitos cuaternarios y un acuífero confinado o en carga constituido por arenas de la Formación Moquegua. Estas formaciones se consideran como el basamento de la cuenca en rocas de Jurásico Superior e Inferior de las Formaciones Guaneros y Chocolate [28]. La comparación entre los diferentes elementos del balance, da como resultado una variación de reservas positivas de $7,8 \text{ hm}^3/\text{año}$. No hay uniformidad en la secuencia estratigráfica debido a la frecuencia de fallas normales y bloques caídos [3]. En 1988, el organismo internacional de energía atómica, concluye que el acuífero de La Yarada está constituido por depósitos aluviales del Terciario y Cuaternario acumulados en una depresión tectónica (graben) delimitada por fallas subverticales. Según la evaluación del funcionamiento y comportamiento del acuífero mediante el procesamiento e interpretación de los datos obtenidos en los inventarios, controles hidrométricos, balance hídrico, aspectos socio-económicos y otros, se evidencia el rompimiento del equilibrio alimentación-explotación, originando una variación de reservas negativas, como se muestra en la Figura ?? y la distribución de isocloruros en el año 1982 en la Figura 5b [29].

Existen dos estratos acuíferos dispuestos en la siguiente forma; en los primeros 200 metros de la línea de playa, el primer acuífero, denominado



(a) Comparación de curvas de nivel freático hasta el año 1982 labelart28(3):ePino:fig05A



(b) Isocloruros en 1982

Figura 5: Conceptualización geológica

superior, es de mayor concentración salina que el inferior. Más allá de los 200 metros el fenómeno se invierte, como se observa en la Figura 6 [30]. En ambos casos los acuíferos se encuentran por sectores en forma lenticular. A partir de los 50 metros de profundidad, la calidad del agua tiende a ser de mayor salinidad; la intrusión marina tiende a ser paralela a la línea de playa encontrándose zonas de mayor intrusión en zonas de mayor permeabilidad y/o de mayor explotación acuífera.

Década de 1990

Sánchez [31], definió los límites horizontales y verticales del acuífero, así como la estratigrafía y las condiciones del borde del acuífero, llegándose a determinar que la geoforma más importante está constituida por el Valle del Caplina y su cono deyectivo; identificando dos acuíferos, uno libre

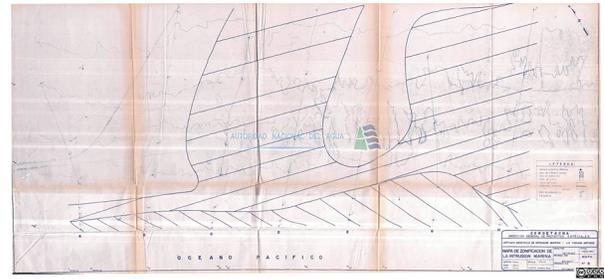


Figura 6: Zonificación de intrusión marina en el año 1984

o superficial y otro confinado o profundo.

El “estudio hidrogeológico de las pampas de La Yarada y Hospicio–Tacna”, sintetiza todos los aportes a la fecha respecto al conocimiento del funcionamiento del sistema acuífero [32]; el trabajo sistematiza los datos obtenidos por el Programa Nacional de Aguas Subterráneas y Tecnificación de Riego (PRONASTER) generados entre 1976 a 1988. Asimismo, se planteó como objetivo implementar un nuevo régimen de explotación del acuífero en los próximos años; a esa fecha ya se tenía información sobre los fuertes descensos del nivel freático y el proceso de salinización. Se concluye que la recarga del acuífero, dependerá del afianzamiento hídrico de la cuenca del río Caplina. La geoforma más importante está constituida por el valle del río Caplina y su cono deyectivo denominado Pampa de La Yarada.

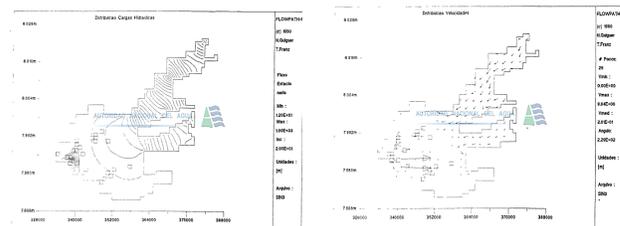


Figura 7: Cargas hidráulica y dirección de flujo-velocidad para el año 1996

Según los parámetros hidráulicos obtenidos, el acuífero explotado es mayormente superficial o libre, menos en el sector de La Yarada antigua o baja, donde ocurre cierto grado de confinamiento. La explotación del acuífero, que asciende a los 3,09 m³/s (97,3 hm³/año) ha ocasionado que se formen conos de depresión localizados en La

Yarada Antigua, Los Palos y la zona de Los Asentamientos, como se muestra en la Figura 7, siendo los más críticos los de La Yarada Antigua y Los Palos por su cercanía al mar. El descenso del nivel freático varía entre 0,01 y 1,16 m/año y el análisis hidroquímico muestra que las aguas están sometidas a procesos de intrusión marina.

Década del año 2000

El balance hídrico para el año 2003, revela un déficit de 43,37 hm³/año [33]. El reservorio subterráneo, está constituido por depósitos del Cuaternario de origen principalmente aluvial, lateralmente está limitado por los flancos erosionados de las formaciones Huaylillas, Moquegua, Chocolate y Guaneros; en profundidad está limitada por las formaciones Moquegua y Huaylillas; no se conoce con exactitud el límite en profundidad [34]. El sentido principal del flujo subterráneo es NE y SW, aproximadamente en el sentido del eje del Valle. La contaminación del agua subterránea en la cercanía del litoral se debe principalmente a la intrusión marina. En la zona de La Yarada Antigua, la intrusión llega hasta los 2,5 km, y en la zona de Los Palos la contaminación ocurre por el doble efecto provocado por la intrusión y la disolución de sales concentrada en los boratos carbonatados y otros, extendiéndose hasta los 3 km, en dirección continental. Según los estudios hidrogeológicos regionales, el relieve de la cuenca es consecuencia de la conjunción de diversos factores que acompañaron el levantamiento andino (clima dominante, deformación tectónica y vulcanismo a gran escala) [35]. El diagnóstico de las fuentes de agua subterránea en los lugares donde estas surgen a la superficie, realizado bajo un registro codificado de coordenadas y parámetros físicos, fisicoquímicos, hidráulicos e hidrogeológicos, ha permitido reconocer el tipo de grupos geológicos que predominan en la Cuenca, determinándose que existen tres familias de las cuales, la cálcica sulfatada, es dominante. El análisis hidroquímico de los datos y la interpretación de las formaciones geológicas, ha permitido determinar las características hidrogeológicas regionales de dichas formaciones y clasificarlas en acuíferos, acuitardos y acuiclados. En cuanto a la

vulnerabilidad, ésta se ha categorizado en extrema, alta, moderada, baja y nula, como se observa en la Figura 8.

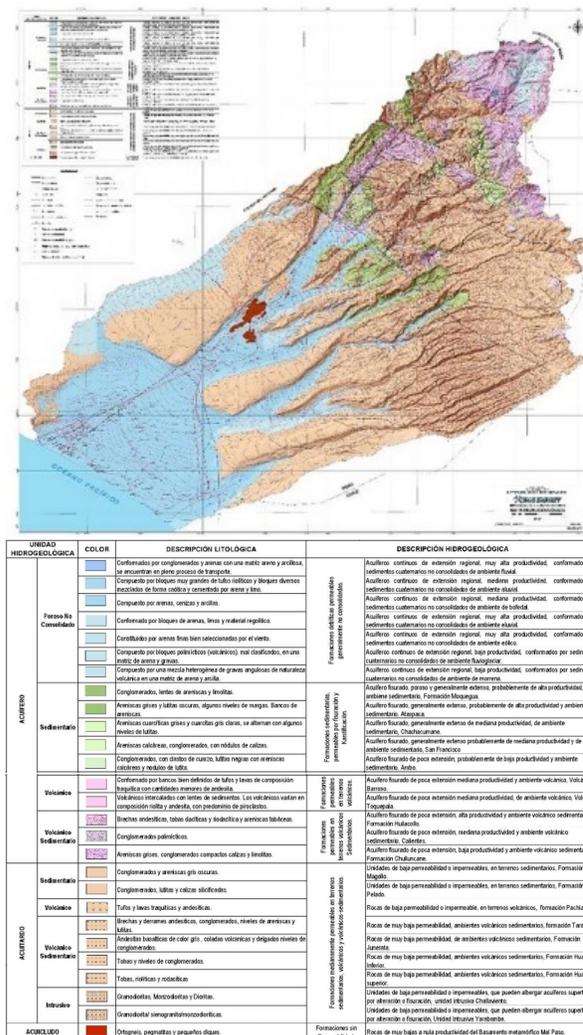
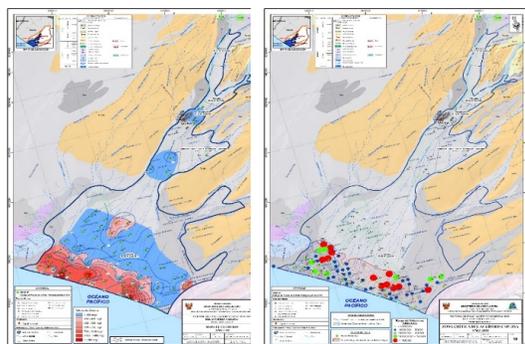


Figura 8: Mapa hidrogeológico del sistema acuífero de la Cuenca de Caplina [35]

Década del año 2010 hasta la actualidad

La Autoridad Nacional del Agua (ANA) concluye en que el acuífero se encuentra en desequilibrio debido a la escasa recarga y a la sobreexplotación del agua subterránea, evidenciado por el constante descenso del nivel de la napa freática que se viene produciendo en los últimos 8 años [36]. Este problema se agrava porque viene aunado a una degradación de la calidad del agua en varios sectores, en especial los cercanos al litoral, en los que se encuentran

altas concentraciones de sus principales parámetros hidrogeoquímicos. En la Figura 9, se muestra la distribución de isocloruros y las zonas críticas del acuífero Caplina en el año 2010.



(a) Mapa de isocloruros 2010

(b) Zonas críticas del acuífero Caplina 2010 [37]

Figura 9: Distribución de isocloruros y zonas críticas del acuífero

En la cuenca del río Caplina existen numerosas unidades hidrogeológicas con importantes recursos hídricos [37]. El análisis de datos hidroquímicos y la interpretación de las formaciones geológicas han permitido encontrar las características hidrogeológicas de las formaciones geológicas desde el punto de vista regional; para dicha caracterización se tiene las formaciones en tres grupos principales, acuíferos, acuitardos y acuicludos. En la Figura 10, se muestra el mapa de isohipsas, la recarga del acuífero proviene exclusivamente de la propia cuenca del río Caplina y las quebradas adyacentes; no existe recarga a nivel regional por interconexión de cuencas vecinas, y menos con el lago Titicaca. La recarga del acuífero se produce a través del lineamiento Caplina, según el análisis isotópico. El acuífero superficial no está totalmente separado del profundo; más bien, ambos se interconectan litológica y estructuralmente, como se verifica mediante las perforaciones realizadas.

A partir del año 2017, se inicia la publicación de trabajos científicos sobre la cuenca y el acuífero Caplina. Así, se identificaron las relaciones entre la geología, el clima y la hidrología, las que reflejan cambios en las concentraciones de los elementos en el agua durante las temporadas con niveles

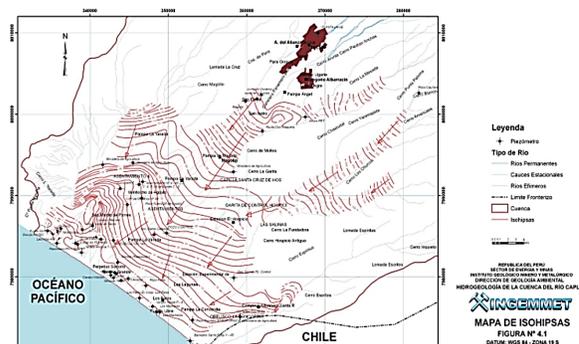


Figura 10: Mapa de isohipsas del sistema acuífero

bajos de agua versus aquellos con niveles altos y se identificaron las formaciones geológicas que afectan la calidad del agua de la cuenca [16].

La crisis de gobernanza y gobernabilidad en el uso de aguas subterráneas en el acuífero, es un elemento que contribuye al agotamiento y deterioro de la calidad de las aguas subterráneas, por procesos de intrusión marina [15]. El agua subterránea, con problemas de desbalance, en la zona costera permite cubrir las demandas poblacionales y el riego; al respecto se dieron dispositivos legales sobre vedas y, posteriormente se emite un decreto supremo, contradictorio a las vedas para la formalización de usuarios, generando un mayor conflicto entre los administradores del agua, usuarios formalizados y los que pretendían formalizarse [9].

El período en el que la explotación ha estado en régimen equilibrado (recarga-extracciones) fue hasta los años 1970 y en desequilibrado desde los 80 [11]. Asimismo, se ha identificado una zona crítica de degradación de la calidad de las aguas subterráneas en el acuífero, que comprende un área aproximada de 131 km² (60 km² por intrusión marina) con valores muy altos de sodio y cloro, lo que indica un incremento paulatino de este ion en respuesta a la mayor penetración de la cuña salina en áreas más cercanas a la costa y por otros factores en otras áreas [17]. También se han evaluado e identificado las medidas de mitigación más favorables para la conservación del sistema acuífero; se proponen acciones físicas y no físicas o de manejo, conducentes a la mitigación del colapso, logrando de ese modo la recuperación y

conservación del acuífero [12].

Se prevé que el agotamiento del acuífero continúe con un descenso anual del nivel de las aguas subterráneas entre 5 y 8 m y un aumento de la cuña de agua de mar entre 1120 y 1175 hm³/año, como se muestra en la Figura 11 [10].

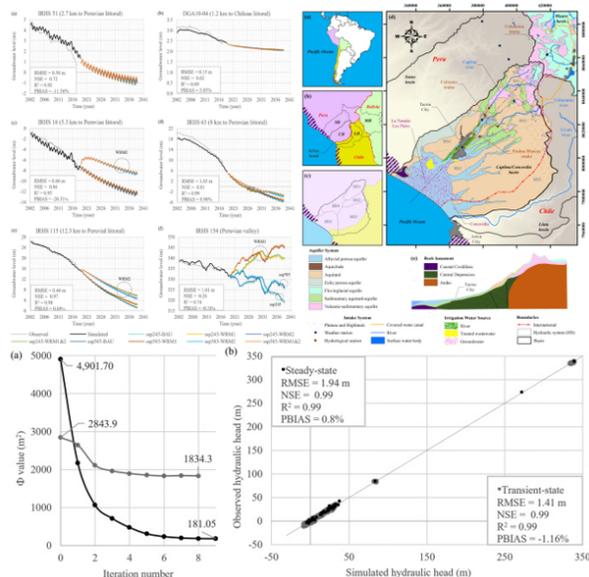


Figura 11: Resultados de modelo numérico del acuífero [10]

4. Discusión de resultados

En los últimos 100 años, el acuífero costero Caplina, ha pasado por dos etapas bien marcadas, la primera en explotación con régimen estable, bajo balance positivo hasta la década de 1970; y, la segunda en balance negativo desde la década de 1980. Esta situación requiere la implementación de políticas para un manejo sostenible. En la Tabla 1 y Figura 12, se muestran los balances hídricos reportados por diferentes instituciones. En 1965 el Instituto Nacional de Investigación y Fomento Minero (INIFM) encontró que el acuífero arroja un superávit anual de 36,0 hm³. Para el año 1989, el Proyecto Especial Tacna (PET), adscrito al Instituto Nacional de Desarrollo (INADE), reporta un balance negativo de -15,5 hm³. El año 2009, el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), concluye que el acuífero se encuentra en desbalance con un valor de -44,0 hm³

y el año 2019, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) reporta un desbalance también negativo de -144,09 hm³ [12]. Estos datos muestran el deterioro progresivo del acuífero al relacionar los descensos de nivel freático con un incremento de la concentración de cloruros en el agua extraída de los pozos de explotación en la parte baja del acuífero como resultado del proceso de intrusión de agua marina. La prospectiva es que en el futuro se produciría un aumento de la cuña de agua de mar entre 1120 y 1175 hm³/año [10]. En conclusión, la evaluación cuantitativa de los recursos hídricos subterráneos renovables, así como, de las interacciones del agua superficial y subterránea son prioritarias para implementar políticas de gestión adecuadas en diferentes escalas espaciales y temporales [38, 39, 40].

Tabla 1: Balance de agua en el acuífero período 1965, 1989, 2009 y 2019

Año	1965	1989	2009	2019
Volumen extraído (hm ³)	27,0	68,0	97,0	197,1
Volumen de recarga, (hm ³)	63,0	52,5	53,0	53,0
Balance, (hm ³)	36,0	-15,5	-44,0	-144,1
Fuente	INIFM	PET-INADE	INGEMMET	ANA

Los numerosos estudios realizados sobre el acuífero Caplina, específicamente geológicos, geofísicos, hidrológicos, geotécnicos, hidroquímicos, isotópicos, geoquímicos y otros, ejecutados por instituciones públicas y privadas, han permitido configurar modelos conceptuales, numéricos e hidrogeológicos. En cuanto a la conceptualización hidrogeológica, se han identificado dos acuíferos, uno libre o superficial y el otro, confinado o profundo [31]; se recomienda realizar más perforaciones a gran profundidad para precisar la geometría del acuífero estableciendo el basamento, el cual aún se desconoce con precisión.

El análisis de la evolución conceptual del funcionamiento hidrogeológico del acuífero basado en el balance hídrico, ha ido mostrando el cambio en el funcionamiento a lo largo del tiempo pasando de balance positivo a negativo; hecho que debe ser tomado en cuenta al establecer pautas para

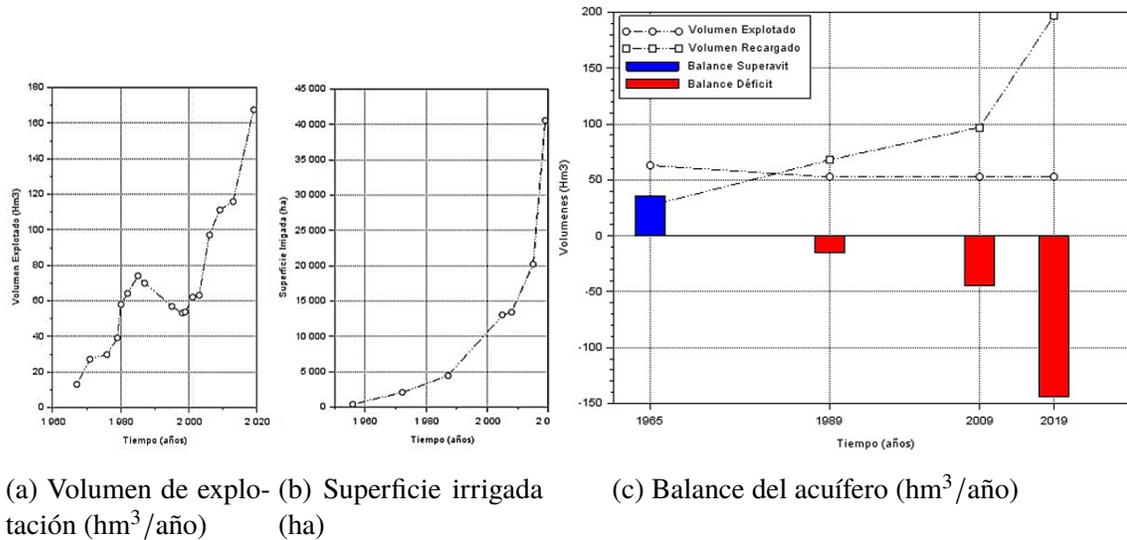


Figura 12: Evolución temporal del acuífero [12]

una gestión sostenible de la explotación del agua subterránea. De seguro que el incremento de la población y la consiguiente creciente demanda de alimentos ejercerán una fuerte presión sobre el agua subterránea en la zona, para cubrir los requerimientos de agua potable para la población y de riego para la agricultura [41]. La sostenibilidad del acuífero, no solo debe considerar aspectos hidrogeológicos sino también sociales, económicos y ambientales [42]. En este sentido, es muy importante tomar en cuenta la evaluación de las tendencias en el uso público y privado de las aguas subterráneas [43] y [44].

El agua subterránea es la principal fuente de agua para el sistema de riego La Yarada; a medida que ha continuado la rápida ampliación de las áreas de riego en las últimas décadas, el nivel del agua subterránea ha ido disminuyendo continuamente y representando una amenaza para la sostenibilidad de la agricultura. Para evitar que el nivel de agua subterránea disminuya a escala regional, la tasa de extracción debe reducirse en una proporción que evite un balance hídrico negativo [45]. El análisis de sensibilidad de los resultados indica que un programa de monitoreo es económico, combinando perspectivas económicas y científicas, dado que podría proporcionar un trasfondo económico concreto para la sostenibilidad de la utilización del agua subterránea [46, 47].

5. Conclusiones

Los resultados de los estudios realizados sobre el acuífero Caplina evidencian que el estado de sobreexplotación del acuífero viene ocurriendo desde la década de 1980, lo que se refleja en un balance negativo. Por eso, se requiere la implementación de medidas que garanticen la sostenibilidad para la agricultura en la irrigación La Yarada, la que depende en un 100 % del agua subterránea, y evitar el colapso del sistema por salinización resultante de la intrusión de agua marina. La evolución en la conceptualización hidrogeológica del acuífero Caplina, permite establecer lineamientos para el manejo sostenible del agua subterránea; por lo que, se plantea medidas correctoras de orden estructural y no estructural; las primeras orientadas a afianzar artificialmente los recursos hídricos de recarga al acuífero y las segundas a establecer un plan de gestión y reordenamiento de extracciones, para precisar el volumen de extracción y las medidas estructurales que se deben adoptar. Además, se deben incorporar criterios de educación ambiental, sensibilización y divulgación, aplicados a la conservación y preservación del acuífero.

6. Referencias

[1] A. Tiwari, E. Suozzi, C. Silva, d. Maio, and M. Zanetti, “Role of Integrated Approaches in Water

- Resources Management: Antofagasta Region, Chile,” *Sustainability*, vol. 13, no. 3, p. 1297, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13031297>
- [2] J. Tóth, “Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations,” *Hydrogeologic*, vol. 7, no. 1, pp. 1–14, 1999. <https://doi.org/10.1007/s100400050176>
- [3] E. Wallick, “Chemical evolution of groundwater in a drainage basin of Holocene age, east-central Alberta, Canada,” *Hydrological Journal*, vol. 54, no. 1–3, pp. 245–283, 1981. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(81\)90163-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(81)90163-3)
- [4] E. Macari and L. Hoyos, “Effect of Degree of Weathering on Dynamic Properties of Residual Soils,” *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 122, no. 12, pp. 988–997, 1996. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:12\(988\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:12(988))
- [5] W. Back, “Hydrochemical facies and ground-water flow patterns in northern part of Atlantic Coastal Plain,” U.S. Government Printing Office, Delaware, Maryland, New Jersey, Pennsylvania, Virginia, Report 498, 1966.
- [6] F. Huang, Y. Zhang, D. Zhang, and X. Chen, “Environmental Groundwater Depth for Groundwater-Dependent Terrestrial Ecosystems in Arid/Semiarid Regions: A Review,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 5, p. 763, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijerph16050763>
- [7] L. Maurice, R. Taylor, C. Tindimugaya, A. MacDonald, P. Johnson, and A. Kaponda, “Characteristics of high-intensity groundwater abstractions from weathered crystalline bedrock aquifers in East Africa,” *Hydrogeology Journal*, vol. 27, no. 2, pp. 459–474, 1966. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1836-9>
- [8] R. Taylor, M. Todd, L. Kongola, L. Maurice, E. Nahozya, and E. Sanga, “Evidence of the dependence of groundwater resources on extreme rainfall in East Africa,” *Nature Climate Change*, vol. 3, no. 4, p. 3748, 2013. <https://doi.org/10.1038/nclimate1731>
- [9] E. Pino, “Conflicts over the use of water in an arid region: case of Tacna, Perú,” *Diálogo Andino*, vol. 65, no. 15, pp. 406–415, 2021. <https://doi.org/10.4067/S0719-26812021000200405>
- [10] C. Narvaez-Montoya, J. Torres-Martínez, E. Pino-Vargas, F. Cabrera-Olivera, F. Loge, and J. Mählknecht, “Predicting adverse scenarios for a transboundary coastal aquifer system in the Atacama Desert (Peru/Chile),” *Science of The Total Environment*, vol. 806, no. 1, p. 150442, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150386>
- [11] E. Pino, “El acuífero costero La Yarada, después de 100 años de explotación como sustento de una agricultura en zonas áridas: una revisión histórica,” *Idesia*, vol. 37, no. 3, pp. 39–45, 2019. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019000300039>
- [12] E. Pino, L. Ramos, J. Mejía, E. Chávarri, y D. Ascencios, “Medidas de mitigación para el acuífero costero La Yarada, un sistema sobreexplotado en zonas áridas,” *Idesia*, vol. 38, no. 3, pp. 21–31, 2020. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292020000300021>
- [13] A. Hera-Portillo, J. López-Gutiérrez, P. Zorrilla-Miras, B. Mayor, and E. López-Gunn, “The Ecosystem Resilience Concept Applied to Hydrogeological Systems: A General Approach,” *Water*, vol. 12, no. 6, p. 1824, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12061824>
- [14] E. Rottler, T. Francke, G. Bürger, and A. Bronstert, “Long-term changes in central European river discharge for 1869–2016: Impact of changing snow covers, reservoir constructions and an intensified hydrological cycle,” *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 24, no. 4, pp. 1721–1740, 2020. <https://doi.org/10.5194/hess-24-1721-2020>
- [15] E. Pino, E. Chávarri, and L. Ramos, “Governability and governance crisis its implications in the inadequate use of groundwater, case coastal aquifer of La Yarada, Tacna, Perú,” *Idesia*, vol. 36, no. 3, pp. 77–85, 2018. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292020000300021>
- [16] E. Pino, P. Tacora, A. Steenken, L. Alfaro, A. Valle, y E. Chavarri, “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*, vol. 8, no. 6, pp. 77–99, 2017. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-06>
- [17] E. Pino, L. Ramos, O. Avalos, P. Tacora, E. Chavarri, y O. Angulo, “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*, vol. 10, no. 5, pp. 177–213, 2019. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-06>
- [18] J. Roumasset and C. Wada, “Optimal and Sustainable Groundwater Extraction,” *Sustainability*, vol. 2, no. 8, pp. 2676–2688, 2010.
- [19] P. Carrión-Mero, X. Quiñonez-Barzola, F. Morante-Carballo, F. Montalván, G. Herrera-Franco, and J. Plaza-Úbeda, “Geometric Model of a Coastal Aquifer to Promote the Sustainable Use of Water Manglaralto, Ecuador,” *Water*, vol. 13, no. 7, p. 923, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13070923>
- [20] P. Döll, H. Hoffmann-Dobrev, F. Portmann, S. Siebert, A. Eicker, and M. Rodell, “Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations,” *Journal of Geodynamics*, vol. 59–60, pp. 143–156, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2011.05.001>
- [21] J. Wilson y W. García, “Geología de los cuadrángulos de Pachía y Palca,” Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET, Tech. Rep. 36-v y 36-x, 1962.
- [22] H. Conkling y E. Góngora, *Explotación de aguas subterráneas en la costa del Perú*. Librería e imprenta Gil, S.A, 1939.
- [23] G. Petersen y A. Alberca, *Sobre las condiciones de agua del subsuelo en el valle de Tacna*. Empresa Petrolera

- Fiscal, 1954.
- [24] L. Castro, *Estudios hidrogeológicos en el Departamento de Tacna*. Ministerio de Fomento y Obras Públicas, Instituto Nacional de Investigación y Fomento Mineros, 1957.
- [25] E. Zenteno, C. Rojas, M. Castañeda, C. Tueros, J. Chunga, y R. Rubio, “Evaluación de la zona de veda en el acuífero Caplina,” in *Dirección de Calidad y Evaluación de Recursos Hídricos (DCERH) - Publicaciones*. Autoridad Nacional del Agua. Dirección de Calidad y Evaluación de Recursos Hídricos, 2019.
- [26] Corporación de Fomento y Desarrollo Económico del Departamento de Tacna (COFDET), “Estudio hidrológico preliminar de los acuíferos de las Pampas de Hospicio y La Yarada,” in *Colección INRENA*. Electric Power Development, 1967.
- [27] Ministerio de Agricultura. Dirección de Aguas Superficiales y Subterráneas, “Modelo matemático preliminar de la pampa de La Yarada y Hospicio (Tacna),” in *Colección INRENA*. MINAG, 1973.
- [28] Aguas Subterráneas Consultoría y Servicios S. A. y Organismo Regional de Desarrollo Tacna Moquegua, “Estudio hidrogeológico - Pampas de la Yarada y Hospicio (Tacna),” in *Colección INRENA*. ORDETAM, 1980.
- [29] Corporación Departamental del Desarrollo de Tacna (CORDETACNA), “Control del acuífero: funcionamiento y comportamiento del acuífero La Yarada 1972 - 1982,” in *Colección INRENA*. CORDETACNA, 1983.
- [30] Corporación Departamental del Desarrollo de Tacna (CORDETACNA), “Investigación geofísica por servicio para determinar: Intrusión marina en La Yarada antigua, áreas favorables para explotación aguas subterráneas, curso inferior valle de Sama,” in *Colección INRENA*. CORDETACNA, 1984.
- [31] W. Sánchez, “Simulación del acuífero de la Yarada: Estudio hidrogeológico del acuífero de las Pampas de La Yarada - Hospicio,” in *Colección INRENA*. INRENA, 1996.
- [32] Instituto Nacional de Recursos Naturales. Dirección General de Estudios y Proyectos, “Estudio hidrogeológico de las pampas de La Yarada y Hospicio - Tacna,” in *Colección INRENA*. INRENA, 1996.
- [33] Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA), “Estudio Hidrogeológico Valle del Caplina,” in *Colección INRENA*. INRENA, 2003.
- [34] Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA), “Estudio hidrogeológico La Yarada zona litoral: sectores Palmeras - Rancho Grande - Los Palos - Santa Rosa,” in *Colección INRENA*. INRENA, 2005.
- [35] F. Peña, G. Cotrina, y H. Acosta, “Hidrogeología de la cuenca del río Caplina - Región Tacna,” INGEMMET, Tech. Rep., 2009.
- [36] Autoridad Nacional del Agua. Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos, “Estudio de la Caracterización Hidrogeoquímica del Acuífero Caplina,” in *Dirección de Planificación y Desarrollo de los Recursos Hídricos (DPDRH) - Publicaciones*. Autoridad Nacional del Agua, 2010.
- [37] Autoridad Nacional del Agua. Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos, “Estudio de evaluación de la intrusión salina en el acuífero Caplina. Lima,” in *Dirección de Planificación y Desarrollo de los Recursos Hídricos (DPDRH) - Publicaciones*. Autoridad Nacional del Agua, 2010.
- [38] F. Alcalá, D. Pulido-Velazquez, and L. Ribeiro, “Impacts of climate on renewable groundwater resources and/or stream-aquifer interactions,” *Water*, vol. 12, no. 12, pp. 1–3, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12123480>
- [39] D. Pulido-Velazquez, J. Romero, A. Collados-Lara, F. Alcalá, F. Fernández-Chacón, and L. Baena-Ruiz, “Using the turnover time index to identify potential strategic groundwater resources to manage droughts within continental Spain,” *Water*, vol. 12, no. 11, p. 3281, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12113281>
- [40] R. Mediavilla, J. Santisteban, I. López-Cilla, L. De Frutos, and A. De la Hera-Portillo, “Climate-dependent groundwater discharge on semi-arid Inland Ephemeral Wetlands: Lessons from holocene sediments of lagunas reales in Central Spain,” *Water*, vol. 12, no. 7, p. 1911, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12071911>
- [41] S. Kumar, M. Kumar, V. Chandola, V. Kumar, R. Saini, and N. Pant, “Groundwater Quality Issues and Challenges for Drinking and Irrigation Uses in Central Ganga Basin Dominated with Rice-Wheat Cropping System,” *Water*, vol. 13, no. 17, p. 2344, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13172344>
- [42] J. Senent-Aparicio, J. Pérez-Sánchez, J. García-Aróstegui, A. Bielsa-Artero, and J. Domingo-Pinillos, “Evaluating Groundwater Management Sustainability under Limited Data Availability in Semiarid Zones,” *Water*, vol. 7, no. 8, pp. 4305–4322, 2015. <https://doi.org/10.3390/w7084305>
- [43] I. Juwana, N. Muttill, and B. Perera, “Indicator-based water sustainability assessment - A review,” *Science of The Total Environment*, vol. 438, no. 1, pp. 357–371, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.093>
- [44] L. Mays, “Groundwater Resources Sustainability: Past, Present, and Future,” *Water Resources Manage*, vol. 27, no. 13, pp. 4409–4424, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0436-7>
- [45] Y. Su, F. Yang, Y. Chen, P. Zhang, and X. Zhang, “Optimization of Groundwater Exploitation in an Irrigation Area in the Arid Upper Peacock River, NW China: Implications for Sustainable Agriculture and Ecology,” *Sustainability*, vol. 13, no. 16, p. 8903, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13168903>
- [46] Z. Liu, P. Liu, E. Massoud, T. Farr, P. Lundgren, and J. Famiglietti, “Monitoring Groundwater Change in California’s Central Valley Using Sentinel-1 and GRACE

- Observations,” *Geosciences*,, vol. 9, no. 10, p. 436, 2019. <https://doi.org/10.3390/geosciences9100436>
- [47] S. Kim and G. Kim, “Are Groundwater Monitoring Networks Economical? Cost-Benefit Analysis on the Long-Term Groundwater Supply Project of South Korea,” *Water*, vol. 11, no. 4, p. 753, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11040753>