

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela profesional de Ingeniería Geológica - Geotecnia

**“CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E IDENTIFICACIÓN DE
FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CALIDAD DEL AGUA
SUBTERRÁNEA EN ACUÍFEROS COSTEROS, CASO:
LA YARADA, TACNA, PERÚ”**

TESIS

PRESENTADA POR:

BACH. SAMUEL CECILIO CHUCUYA MAMANI

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO – GEOTÉCNICO

TACNA – PERÚ

2021

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS

**“CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E IDENTIFICACIÓN DE FACTORES
QUE INFLUYEN EN LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN ACUÍFEROS
COSTEROS, CASO: LA YARADA, TACNA, PERÚ”**

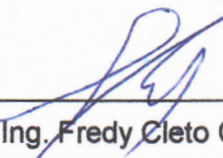
Tesis sustentado y aprobado el 21 de julio del 2022, con el siguiente jurado:

PRESIDENTE



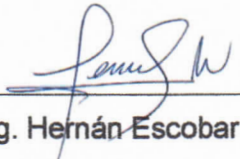
MSc. Ing. Conrado Gabino Bedoya Jaén

MIEMBRO-SECRETARIO



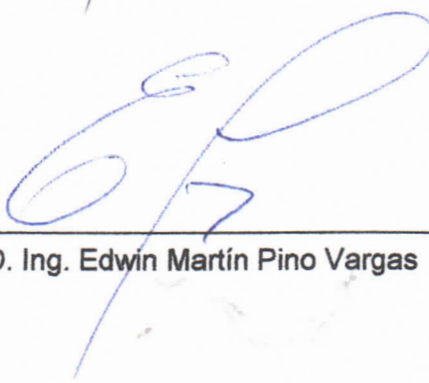
Mgr. Ing. Fredy Cleto Cabrera Olivera

MIEMBRO



Ing. Hernán Escobar Rivera

ASESOR DE TESIS



Ph.D. Ing. Edwin Martín Pino Vargas

DEDICATORIA

*A toda mi familia, en especial a mis queridos
padres Samuel y Nelly por el apoyo incondicional
y consejos brindados.*

*A mi novia y amigos que me alentaron a seguir a
adelante con su apoyo y buenos deseos.*

AGRADECIMIENTO

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

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

Agradezco al PhD. Edwin Pino Vargas por la confianza y darme la oportunidad integrar su equipo de investigación.

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

ÍNDICE

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I.....	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. ASPECTOS GENERALES	2
1.1.1. Ubicación	2
1.1.2. Clima y Vegetación.....	2
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.2.1. Problema principal	5
1.2.2. Problemas específicos	5
1.3. HIPÓTESIS	6
1.4. OBJETIVOS	6
1.4.1. Objetivo general.....	6
1.4.2. Objetivos específicos.....	6
1.5. JUSTIFICACIÓN	7

CAPITULO II.....	8
MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. ANTECEDENTES	8
2.2. MARCO GEOLÓGICO.....	8
2.2.1. Geología y estratigrafía	8
2.2.2. Geomorfología	11
2.2.3. Geología Estructural.....	12
2.3. HIDROLOGÍA.....	14
2.4. HIDROGEOLOGÍA.....	16
2.4.1. Geometría del reservorio.....	17
2.4.2. Litología	18
2.4.3. Unidades hidrogeológicas	18
2.4.4. Contaminación de acuíferos.....	19
2.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	21
2.5.1. Análisis bivariado.....	21
2.5.2. Análisis multivariante	22
2.6. ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO.....	24
2.7. HIDROGEOQUÍMICA	25
2.7.1. Procesos de interacción agua – roca.....	25
2.7.2. Grado de salinización	25
2.8. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	26

2.8.1. Estándares de calidad de agua para uso poblacional	26
2.8.2. Índice de calidad del agua para consumo humano	27
2.8.3. Calidad de agua para riego	28
CAPITULO III.....	29
METODOLOGÍA.....	29
3.1. RED DE MONITOREO Y MUESTREO	29
3.2. CALIDAD DE DATOS	30
3.2.1. Análisis de calidad de datos hidroquímicos	30
3.2.2. Preparación estadística	30
3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	30
3.3.1. Análisis Clúster	31
3.3.2. Análisis Factorial.....	31
3.4. CALIDAD DE AGUA	32
CAPITULO IV	33
RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	33
4.1. QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA	33
4.2. CORRELACIÓN DE VARIABLES FISICOQUÍMICOS.....	34
4.3. AGRUPACIÓN HIDROGEOQUÍMICA.....	36
4.3.1. Análisis de calidad de grupos.....	39
4.3.2. Valoraciones hidrogeoquímicas a partir de relaciones iónicas	40
4.4. ASOCIACIONES HIDROQUÍMICAS	42

4.5. PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS.....	51
4.6. CALIDAD DE AGUA PARA USO POTABLE.....	53
4.7. CALIDAD DE AGUA PARA FINES DE RIEGO.....	57
CAPITULO V	59
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
5.1. CONCLUSIONES.....	59
5.2. RECOMENDACIONES.....	61
BIBLIOGRAFIA	62
ANEXOS	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación del acuífero La Yarada.....	3
Figura 2 Evolución temporal del área irrigada en la superficie del acuífero La Yarada	4
Figura 3 Geología y geomorfología del acuífero La Yarada.....	14
Figura 4 Hidrología de la cuenca Caplina.....	16
Figura 5 Hidrogeología del sistema acuífero La Yarada.....	19
Figura 6 Método de análisis factorial exploratorio	23
Figura 7 Dendograma de análisis clúster	36
Figura 8 Distribución espacial de clústeres	37
Figura 9 Relaciones iónicas	41
Figura 10 Distribución espacial de factores utilizando iones principales y propiedades físicas	44
Figura 11 Distribución espacial de factores utilizando oligoelementos.....	47
Figura 12 Distribución espacial de factores utilizando iones principales, oligoelementos, propiedades físicas e isótopos estables	50
Figura 13 Procesos hidrogeoquímicos que rigen la química del agua en el acuífero La Yarada.....	51
Figura 14 Distribución espacial de la calidad de agua para consumo humano	56
Figura 15 Clasificación del agua con fines de riego	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Límites del acuífero La Yarada.....	2
Tabla 2 Estándares nacionales para consumo humano.....	27
Tabla 3 Resumen estadístico de parámetros fisicoquímicos del acuífero La Yarada	34
Tabla 4 Matriz de correlación de parámetros fisicoquímicos en el acuífero La Yarada	35
Tabla 5 Análisis de calidad de agua por clúster	40
Tabla 6 Factores utilizando iones principales y propiedades físicas	42
Tabla 7 Factores utilizando oligoelementos.....	45
Tabla 8 Distribución espacial de factores utilizando iones principales, oligoelementos, propiedades físicas e isotopos estables	48
Tabla 9 Pesos asignados para los parámetros de calidad.....	53
Tabla 10 Índice de calidad de agua WQI	54

RESUMEN

El acuífero costero La Yarada presenta contaminación antropogénica y geogénica que afectan negativamente la calidad de las aguas subterráneas para uso poblacional y agrícola. En tal escenario se aplicaron métodos estadísticos multivariantes en 20 parámetros fisicoquímicos e isotópicos de 53 pozos de bombeo de agua subterráneas en octubre del 2020, con el objetivo de caracterizar los procesos hidrogeoquímicos que dominan las aguas subterráneas del acuífero y los factores que los provocan, para optimizar la gestión eficaz del recurso hídrico, delimitando áreas afectadas por más de un proceso de salinización.

Las muestras se agruparon en tres conglomerados (C1, C2 y C3) aplicando análisis clúster. La distribución espacial de C2 y C3 (reclasificados en diagramas de stiff), evidenció facies hidrogeoquímicas asociadas a las direcciones de flujo y recarga regidas por los lineamientos estructurales, favoreciendo unas zonas más que otras, surgiendo distintas facies y procesos hidrogeoquímicos. El análisis factorial, se aplicó desde tres enfoques diferentes: 1) elementos principales, 2) oligoelementos y 3) parámetros fisicoquímicos e isotópicos; exponiendo 6 procesos hidrogeoquímicos distinguibles en el acuífero y factores que los provocan: i) Salinización - intrusión marina, ii) Lixiviación de fertilizantes y disolución de (Ca^{2+} , Mg^{2+}), iii) Mezcla de aguas residuales (NO_3^-), iv) Condiciones reductoras (Fe, Mn, Al), v) Aportes de (B, Sr), vi) Mezclas conservadoras y disolución (As, F). Se validó con los índices de calidad de agua (WQI) de acuerdo a los límites nacionales, delimitando 67 km² paralelos al litoral con calidad “malas” a “muy malas” para el consumo humano, e inadecuadas para el riego de acuerdo al diagrama de Wilcox, por lo que es imperioso un tratamiento previo en esta zona.

ABSTRACT

The La Yarada coastal aquifer presents anthropogenic and geogenic contamination that negatively affect the quality of groundwater for population and agricultural use. In such a scenario, multivariate statistical methods were applied to 20 physicochemical and isotopic parameters of 53 groundwater pumping wells in October 2020, with the aim of characterizing the hydrogeochemical processes that dominate the groundwater of the aquifer and the factors that cause them, to optimize the effective management of water resources, delimiting areas affected by more than one salinization process.

The samples were grouped into three conglomerates (C1, C2 and C3) applying cluster analysis. The spatial distribution of C2 and C3 (reclassified in stiff diagrams), showed hydrogeochemical facies associated with the directions of flow and recharge governed by the structural guidelines, favoring some areas more than others, giving rise to different facies and hydrogeochemical processes. The factorial analysis was applied from three different approaches: 1) main elements, 2) trace elements and 3) physicochemical and isotopic parameters; exposing 6 distinguishable hydrogeochemical processes in the aquifer and factors that cause them: i) Salinization - marine intrusion, ii) Fertilizer leaching and dissolution of (Ca^{2+} , Mg^{2+}), iii) Mixing of wastewater (NO_3^-), iv) Reducing conditions (Fe, Mn, Al), v) Contributions of (B, Sr), vi) Preservative mixtures and dissolution (As, F). It was validated with the water quality indices (WQI) according to national limits, delimiting 67 km² parallel to the coast with "bad" to "very bad" quality for human consumption, and unsuitable for irrigation according to the diagram of Wilcox, so prior treatment in this area is imperative.

INTRODUCCIÓN

La intrusión marina y salinización de aguas subterráneas son problemas comunes que afectan a muchas áreas costeras áridas y semiáridas como el acuífero La Yarada en la región de Tacna, debido a la falta de recurso hídrico superficial, los agricultores establecidos en las Pampas de La Yarada utilizan el agua subterránea como su única fuente. La sobreexplotación del acuífero por el aumento de actividad agrícola conlleva a que el nivel freático disminuya gradualmente, como consecuencia de esto la calidad del agua es afectada por la intrusión marina y por reducción de las recargas secundarias de buena calidad, limitándose a recibir recarga principal del río Caplina, que tiene actividad volcánica en la naciente de su cuenca (Pino y Coarita, 2018; Pino et al., 2018). Este deterioro de la calidad de agua afecta gravemente a la productividad agrícola, medio acuático y la salud humana (Milovanovic, 2007).

Las firmas hidroquímicas del agua subterránea son el resultado de procesos hidrogeoquímicos y la distribución espacio-temporal, el agua de lluvia que recarga el acuífero tiene escaso contenido iónico en la escorrentía superficial, pero en la zona saturada por interacción agua-roca adquiere sustancias químicas como especies disueltas (Pino et al., 2017), actividades antropogénicas y la interacción agua dulce – agua de mar existente en acuíferos costeros semiáridos, cambian la composición hidroquímica del agua subterránea (Pulido-Leboeuf, 2004; Agoubi et al., 2013; Bouderbala, 2015). Por tanto, definir claramente los procesos hidrogeoquímicos de un acuífero es una tarea desafiante, ya que se requiere un gran conjunto de datos y metodologías avanzadas. El análisis estadístico multivariado (análisis clúster y análisis factorial) junto al análisis de relaciones iónicas, representan herramientas sólidas para detectar y explicar los procesos hidrogeoquímicos que gobiernan la composición hidroquímica de las aguas subterráneas del acuífero (Locsey & Cox, 2003).

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. ASPECTOS GENERALES

1.1.1. Ubicación

El acuífero costero La Yarada emplazado en la cabecera del desierto de Atacama se localiza políticamente al sur del Perú, en la región Tacna, provincia de Tacna (Anexo 1 – Mapa 01), comprende la parte baja y media de la cuenca del río Caplina, posee un área de 750 Km² (Figura 1) y geográficamente está ubicado entre las coordenadas UTM (WGS 84) siguientes:

Tabla 1

Límites del acuífero La Yarada.

Este	Norte
328000 m	7968000 m
381696 m	8026212 m

Nota. Coordenadas UTM (WGS 84) de ubicación del acuífero La Yarada.

1.1.2. Clima y Vegetación

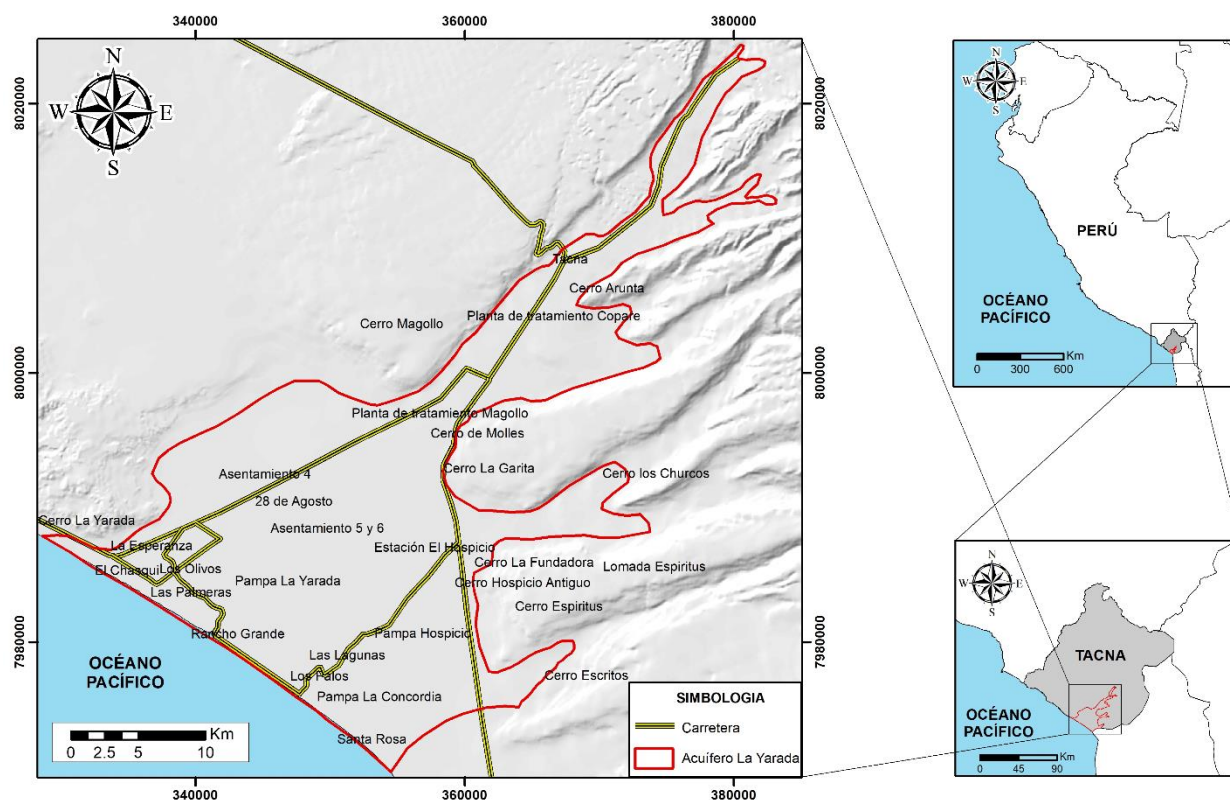
La región está dominada por un clima desértico, con cambios moderados de temperatura y escasas precipitaciones pluviales en forma de garúas producidos por densas neblinas que se elevan desde la costa hacia las pampas, la precipitación máxima registrada en las estaciones Palca y Toquepala durante los últimos 20 años ha alcanzado los 129 mm por año (Peña et al., 2009), experimenta escasez hídrica en comparación con el caudal promedio mensual de los ríos de la costa central y norte del país (Pino et al., 2019).

Debido a las escasas precipitaciones y la alta humedad relativa en el área con neblinas, se desarrolla vegetación temporal en las colinas costeras hasta casi 1000 m.s.n.m. Las tierras cultivadas en el acuífero La Yarada corresponden al Valle del Caplina, parcialmente irrigado por el río Caplina y la zona de Pampas de La Yarada y Hospicio con riego de aguas subterráneas

bombeadas propias del acuífero (Figura 2) (Anexo 1 – Mapa 02) (Pino et al., 2020). Los productos principales que se cultivan en Pampas de La Yarada y Hospicio son el olivo, maíz y alfalfa (Pino, 2019). El Bosque Municipal representa un extenso macizo forestal de 60 Ha, de origen artificial creado mediante el uso sostenible de aguas residuales tratadas en la planta de tratamiento Magollo, ubicada en la zona límite de Magollo y La Yarada, utilizada para el riego del cultivo por agricultores produciendo maíz chala, alfalfa y otros como ají pprika (Gonzales, 2016; Cauna, 2020)

Figura 1

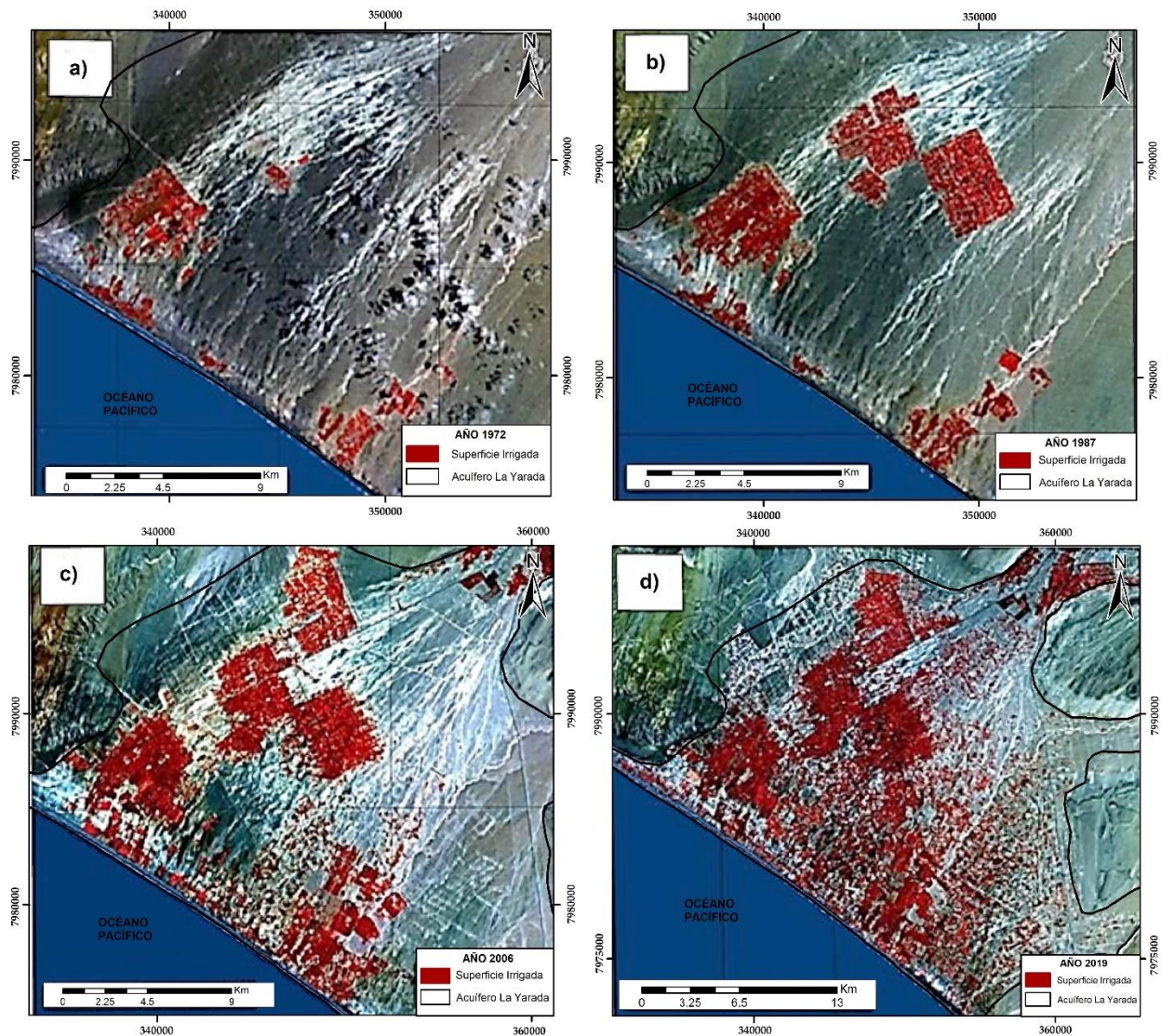
Ubicación del acuífero La Yarada.



Nota. Ubicación y vías terrestre del acuífero La Yarada.

Figura 2

Evolución temporal del área irrigada en la superficie del acuífero La Yarada



Nota. Evolución del área irrigada durante (a) 1972, (b) 1987, (c) 2006 y (d) 2019, se evidencia el aumento del área cultivada y el correspondiente incremento en el volumen explotado del acuífero, tomado de Pino et al. (2020).

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema principal

Los recursos de agua subterránea del acuífero costero La Yarada están frecuentemente expuestos a peligros que afectan su calidad. La intrusión de agua de mar causada por el descenso del nivel freático por sobreexplotación de las aguas subterráneas, la lixiviación de fertilizantes y filtración de agroquímicos por el desarrollo de actividades agroindustriales, las filtraciones de aguas residuales, las recargas provenientes del río Caplina que en su recorrido absorbe diferentes metales pesados, la disolución de minerales y tiempo de residencia del agua subterránea representan factores potenciales del deterioro de la calidad del agua subterránea. Debido a múltiples factores que incluyen actividades naturales y antropogénicas, hacen que la tarea de realizar una caracterización hidrogeoquímica para identificar factores que controlan la calidad del agua subterránea sea muy compleja.

Según lo planteando nace la interrogante: ¿Cómo impactan los factores antropogénicos y geogénicos en la hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea del acuífero La Yarada?

1.2.2. Problemas específicos

El acuífero de La Yarada tiene un modelo conceptual y línea base básico realizado por instituciones públicas y estudios de investigación, con resultados dispersos, aproximaciones generales y puntales de la calidad y clasificación, pero no se ha realizado una correlación de toda la información hidrogeoquímica e hidroquímica junto a estudios de isótopos estables de manera integral, debido a que la multiplicidad de fuentes de salinización, influencia de reacciones hidrogeoquímicas y mezclas de aguas subterráneas hacen esta tarea compleja, planteándose los siguientes problemas específicos:

- ¿Cómo poder correlacionar los múltiples parámetros físico-químicos del agua subterránea del acuífero La Yarada de manera integral y reducir al máximo la subjetividad de los resultados?

- ¿Cómo podemos determinar la evolución y los procesos hidrogeoquímicos presentes en el agua subterránea y factores que influyen en la calidad del acuífero La Yarada?
- ¿Cómo poder obtener una visualización de forma sencilla y completa de los datos y procesos hidrogeoquímicos del agua subterránea?

1.3. HIPÓTESIS

El agua subterránea sufre una evolución química causada por una variedad de factores como interacción agua-roca y efectos antropogénicos a lo largo de toda su trayectoria, por lo tanto, en el acuífero La Yarada se producen alteraciones en la concentración de los iones respecto a su composición química original y clasificándose en facies con firmas hidroquímicas e isotópicas características, esto puede diferir de una región a otra dentro del área de estudio.

La utilización de métodos estadísticos avanzados y gráficos de relaciones iónicas, nos permitirá una mejor comprensión de los procesos hidrogeoquímicos que dan firmas químicas al agua subterránea del acuífero La Yarada, validando factores de influencia con el fin contribuir a la gestión y desarrollo del recurso hídrico subterráneo de la región Tacna.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Hacer una caracterización hidrogeoquímica e identificar los factores que influyen en la composición, calidad y entender la variación espacial que dan firmas hidroquímicas al agua subterránea en el acuífero La Yarada.

1.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar hidrogeoquímicamente el acuífero La Yarada mediante un análisis estadístico avanzado e identificar firmas hidroquímicas e isotópicas del agua subterránea en el acuífero La Yarada.

- Determinar la influencia de los mecanismos de interacción agua-roca, mezclas de aguas dulces y salinas y efectos antropogénicos que controlan la composición y calidad del agua subterránea.
- Evaluar la idoneidad de la calidad del agua subterránea del acuífero La Yarada para uso potable y con fines de riego.
- Contribuir a la gestión y desarrollo del recurso hídrico subterráneo de la región Tacna mediante la comprensión de los procesos hidrogeoquímicos que acontecen en el acuífero La Yarada.

1.5. JUSTIFICACIÓN

En respuesta a una creciente demanda de agua subterránea y un mayor riesgo de contaminación, para una buena gestión y desarrollo del recurso hídrico, se necesita una mejor comprensión de los procesos hidrogeoquímicos que determinan su composición y calidad. Para una mejor comprensión se usa las técnicas multivariantes que permiten reducir al máximo la subjetividad, lo que permite medir el grado de asociación entre variables, comprender y validar procesos hidrogeoquímicos, obteniendo conclusiones en relación con la hidrogeología de la zona. La metodología propuesta en esta tesis tiene la ventaja de ser sencilla, económica y precisa, facilitando el procesamiento de mucha data y que será de beneficio para el entendimiento, utilización y gestión eficaz del acuífero La Yarada con todas sus complejidades, disminuyendo así los problemas de salinidad y contaminación.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

La ciudad de Tacna viene enfrentando un problema sanitario y ambiental preocupante, proveniente del débil manejo de estrategias para poder disminuir la carga de contaminación derivada de la producción de aguas servidas de la población, debido a que las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas que dispone la ciudad de Tacna, viene operando con una sobrecarga generando el no tratamiento adecuado y a consecuencia infiltración de Nitrógeno y Fósforo en el acuífero La Yarada (Cauna, 2020).

La intrusión marina y salinización de aguas subterráneas son problemas comunes que afectan a muchas áreas costeras áridas y semiáridas como el acuífero La Yarada en la región de Tacna, debido a la falta de recurso hídrico superficial, los agricultores establecidos en las Pampas de La Yarada utilizan el agua subterránea como su única fuente (Vera et al., 2021), actualmente el acuífero está sobreexplotado por el aumento de actividad agrícola, el nivel freático disminuye gradualmente, a causa de esto la potabilidad del agua considerada aceptable cambia a mediocre, por la intrusión marina y reducción de las recargas secundarias de buena calidad, limitándose a recibir recarga principal del río Caplina, que tiene actividad volcánica en la naciente de su cuenca (Pino y Coarita, 2018; Pino et al., 2018).

2.2. MARCO GEOLÓGICO

La geología y la geomorfología del lugar dan como resultado un complejo sistema hídrico subterráneo en la Cuenca del Caplina (Anexo 1 – Mapa 03 y 04).

2.2.1. Geología y estratigrafía

En el área de estudio afloran formaciones volcánicas y sedimentarias las cuales son:

- Formación Chocolate (Ji-ch)

Esta formación aflora en la Cordillera de la Costa, consiste de una intercalación de rocas volcánicas y sedimentarias ubicados en los cerros de La Yarada y lados adyacentes, tienen un carácter impermeable (Jaén y Ortiz, 1963; Acosta et al., 2012) . Desde los inicios del Cenozoico una gran cantidad de sedimentos se acumularon en la cuenca de antearco de la Cordillera de la Costa, los cuales reflejan ambientes fluviales, lacustres y parcialmente volcánicos (influencia piroclástica calcoalcalina) (Marocco et al., 1985).

- Formación Moquegua – Terciario Superior (Po-mo)

Descrito por primera vez por Adams (1906) y dividido por en Moquegua Inferior y Moquegua Superior (Steinmann, 1929), el primer miembro consiste en conglomerados y areniscas rojizas, de espesores entre 20 y 60 m; la formación Moquegua Superior de espesores 150 a 250 m, consisten de conglomerados de roca andesita, diorita, granodiorita y arenisca cuarzosa (Bustamante, 2017), incluyen en su parte superior algunas capas piroclásticas de espesores 1 a 2 m compuesto de tobas sugieren la finalización de la depositación fluvial y marcaría la antesala de la actividad volcánica del Arco Huaylillas (Alván et al., 2020). Aflora en los cerros Huahuapas y Chuschuco (Pachía) y en zonas proximales de la cuenca, cercanas a la fuente de aporte entre cerros Pirámide, Jachacollo, Colorado, Condorire, Piedras Anchas y en el fondo de las quebradas Viñani y Cauñani (Acosta et al., 2012) .

- Formación Huaylillas (Nm-hu)

Una gran superficie piroclástica con un espesor variable que va desde unas decenas de metros hasta aproximadamente 250 m, de amplia distribución en los flancos del acuífero (Wilson y García, 1962); se le ubica en los cerros Intiorko, Arunta, Magollo, Calana, Chastudal, Hospicio Antiguo; consiste de tobas rosáceas con abundantes fragmentos líticos y de pómez (Acosta et al., 2012) , en las planicies de La Yarada y los alrededores de Los Palos pueden ser encontradas a partir de 50 m de profundidad y pueden alcanzar espesores hasta 300 m con intercalaciones de depósitos clásticos (Alván et al., 2020) .

- Formación Millo (Np-mi)

También nombrada Formación Magollo, describen una serie de sedimentos de 45 m de espesor, su depositación inició hace 5 Ma (Flores y Sempere, 2002; Alván et al., 2020), consta de conglomerados soportados en areniscas de coloración gris oscura, cuyos clastos corresponden a andesitas, riolitas y dacitas de afinidad alcalina a calcoalcalina producto de la denudación del Grupo Barroso (Mamani et al., 2010). Se encuentra aflorando esencialmente en el fondo de las quebradas a manera de zonas amplias y planas que sirven como base a los ríos Caplina, Hospicio y Escritos (Acosta et al., 2012). El tamaño de sus clastos disminuye hacia el suroeste, aumentando también el espesor de los estratos, esta variación se observa en la mayoría de pozos exploratorios perforados en las pampas de La Yarada (Martínez Ríos et al., 1996).

- Depósitos aluviales (Qh-al)

Constituyen principalmente los horizontes permeables y explotables de agua subterránea, alcanzando espesores hasta de 446 m. Litológicamente están constituidos por conglomerados, arenas y arcillas que se intercalan irregularmente. En el área de estudio estos depósitos constituyen el cono de deyección del río Caplina y sus tributarios (Acosta et al., 2012).

- Depósitos de playa (Qh-pl)

Estos depósitos no tienen mayor incidencia en la hidrogeología del área, debido principalmente a su carácter marginal, y por constituir una franja de arenas y cantos muy angosta, la cual se encuentra distribuida a lo largo del litoral, y que está relacionada con escarpas litorales emergidas (Pino et al., 2019).

- Depósitos eólicos (Qh-e)

Acumulaciones de arena de origen eólico que se encuentran en las pampas de La Yarada y Hospicio, formando una delgada cubierta discontinua, que algunas veces constituye dunas y médanos (Pino et al., 2019).

Correlaciones estratigráficas hechas por Acosta et al. (2012), permiten proponer que el subsuelo de Tacna y La Yarada está conformado por rocas correspondientes a las formaciones Huayllilas y Moquegua Superior, además permite postular la existencia de fallas normales de alto ángulo que producen un desplazamiento vertical (de al menos 200 m) entre las secuencias estratigráficas aflorantes y aquellas presentes en el subsuelo de las planicies de La Yarada y Los Palos (Figura 3a), los cuales tienen influencia en la actual morfología (lomas elevadas y planicies extensas).

2.2.2. Geomorfología

En el área del acuífero La Yarada se identifican las siguientes unidades geomorfológicas desde un punto de vista morfoestructural (Figura 3b y 3c):

- Faja Litoral

Relieve llano que se extiende desde la línea de costa hasta los ~ 50 msnm, presenta un ancho de 3 km en las pampas de La Yarada, disminuyendo hacia el noroeste donde se desarrolla la cadena de montañas de la Cordillera de la Costa (Acosta et al., 2012).

- Cordillera de la Costa

Zona elevada al este del poblado Boca del Río, de anchos variables que modela el litoral de Tacna, el cordón de cerros que la conforma no sobrepasa los 760 msnm, estas elevaciones aparecen nuevamente en el morro de Arica (Acosta et al., 2012).

- Planicies Costaneras

Se presentan a manera de una faja alargada de dirección NO – SE, tiene un ancho promedio de 55 km y altitudes que varían entre 40 msnm en el sector los Palos en La Yarada y 1300 msnm por el sector Pachía, limita por el norte con la Cordillera Occidental

correspondiente al trazo de la falla Calientes, y por sur con la Cordillera de la Costa y con la Faja Litoral, presenta un relieve ondulado producto de la incisión de pequeñas e importantes quebradas sobre terrenos de edad Mioceno y depósitos detríticos de edad Plioceno – Cuaternario.

- Ladera oeste de la Cordillera Occidental

Consiste de una cadena de montañas divididas de las planicies costaneras por una serie de elevaciones que conforman el importante accidente geomorfológico producido por la actividad de la Falla Calientes, este dominio geomorfológico presenta pendientes moderadas a fuertes, cortadas por profundos valles en forma de “V”, producto de acción erosiva de precipitaciones.

- Superficie Huaylillas

La superficie Huaylillas ha sido conservada en gran parte hasta la actualidad, probablemente por la poca erosión registrada debido a escasas lluvias registradas, constituida por acumulación de ignimbritas y flujos piroclásticos de la formación Huaylillas.

- Valles y terrazas

Las quebradas tienen sus nacientes en la Cordillera Occidental creando incisiones profundas en forma de “V”, estos valles presentan laderas con pendientes fuerte, pero cerca al límite con las pampas costaneras, los valles se convierten en quebradas amplias y de suave pendiente.

2.2.3. Geología Estructural

Las direcciones de escurrimiento del flujo subterráneo en el área que involucra al acuífero de La Yarada, están regidas por los controles estructurales existentes y también es evidente que configuran la actual geomorfología de Tacna (Acosta et al., 2012) (Figura 3b).

- Sistema de Fallas NE – SO

Este sistema de fallas de dirección paralela a los números accidentes topográficos que conforman los valles y quebradas, se considera de gran importancia el lineamiento

Caplina que recorre a través del valle del mismo nombre, ya que el descenso del caudal de las aguas del río Caplina se debe en parte a que discurren por la falla y desembocan en la conexión subterránea con el acuífero de La Yarada (Peña et al., 2009). Estudios de geofísica realizados en las pampas de La Yarada y en la ciudad de Tacna ponen de manifiesto la existencia en el subsuelo de fallas o lineamientos importantes cuya tendencia está claramente definida hacia el NE-SO, interpretándose como fallas de tipo normal subverticales, que coincidentemente están en los cauces principales de las quebradas Caplina, Cauñani, Escritos, entre los principales (Martínez et al., 1996).

- Falla Punta Morena

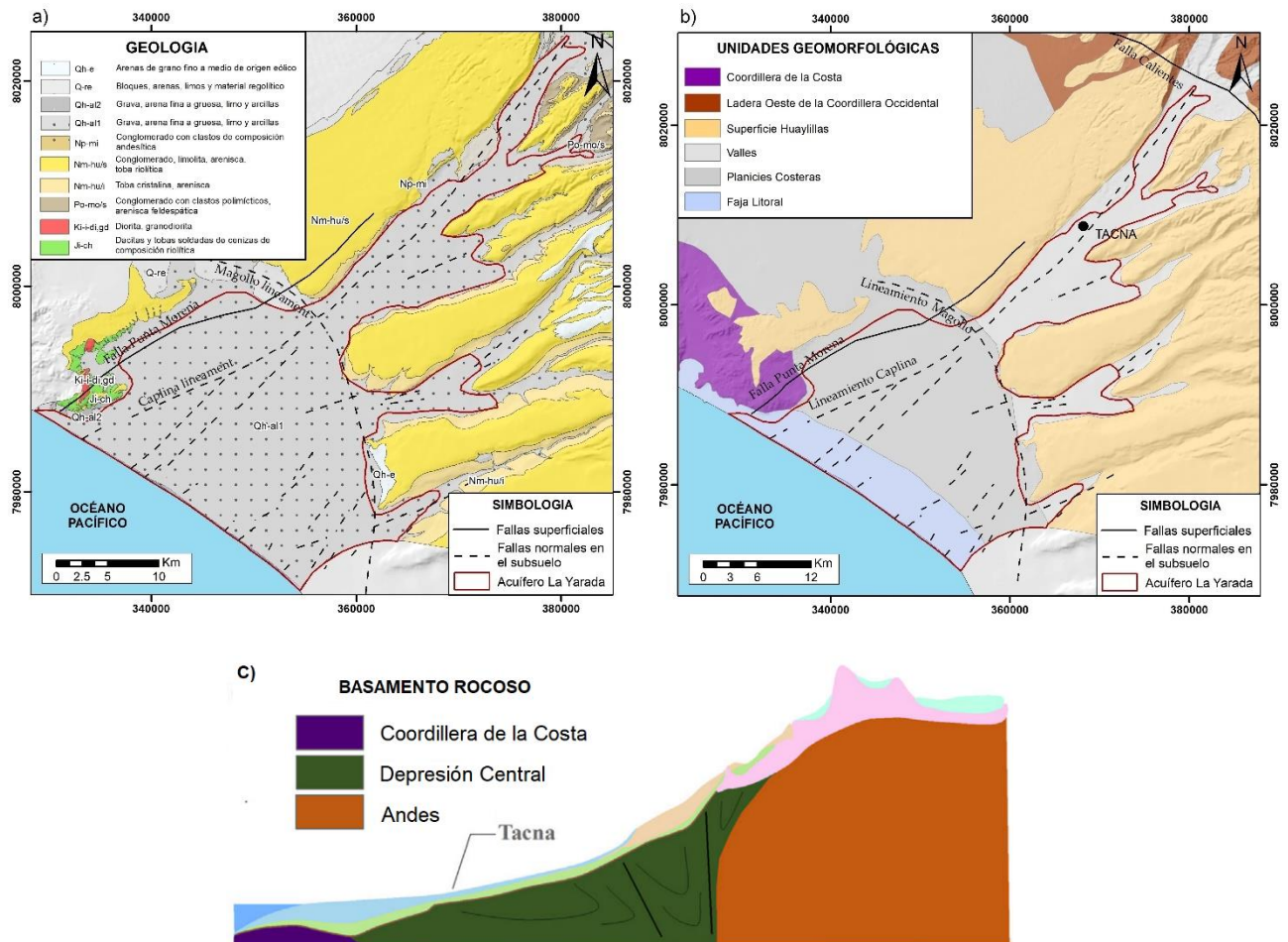
Falla de carácter local del tipo inversa con rumbo NO, ubicada en el extremo sur de la cordillera de la costa afecta a las rocas volcánicas de la formación Chocolate y formación Huaylillas, desde el punto de vista espacial se observa como exhuma la Cordillera de la Costa después de la depositación de la formación Moquegua superior (Acosta et al., 2012).

- Falla Calientes

La falla Calientes de tipo inverso y dirección NO-SE es el límite geomorfológico entre la Cordillera Occidental y las Planicies Costeras, corta transversalmente el lineamiento Caplina, y en la intersección de ambas estructuras se encuentran surgencias de aguas termales, evidenciando circulación de aguas en profundidad provenientes de la zona altoandina (Peña et al., 2009).

Figura 3

Geología y geomorfología del acuífero La Yarada



Nota. a) Geología superficial del acuífero La Yarada, b) Geomorfología del acuífero La Yarada, las unidades geomorfológicas fueron tomadas de Peña et al. (2009), c) Sección geomorfológica en el valle central, tomado de Narvaez-Montoya et al. (2021).

2.3. HIDROLOGÍA

La humedad relativa media anual en las pampas de La Yarada y en la ciudad de Tacna es de 75%, con máximas mensuales que alcanzan el 90% en los meses de invierno y una mínima mensual que llega a 55% en los meses de verano (PET, 2004). La precipitación máxima en las pampas de La Yarada y Hospicio apenas llegan a 2 mm en los meses de junio y julio, las temperaturas máximas llegan a 22,5 °C en el mes de febrero (Peña et al., 2009). La recarga del

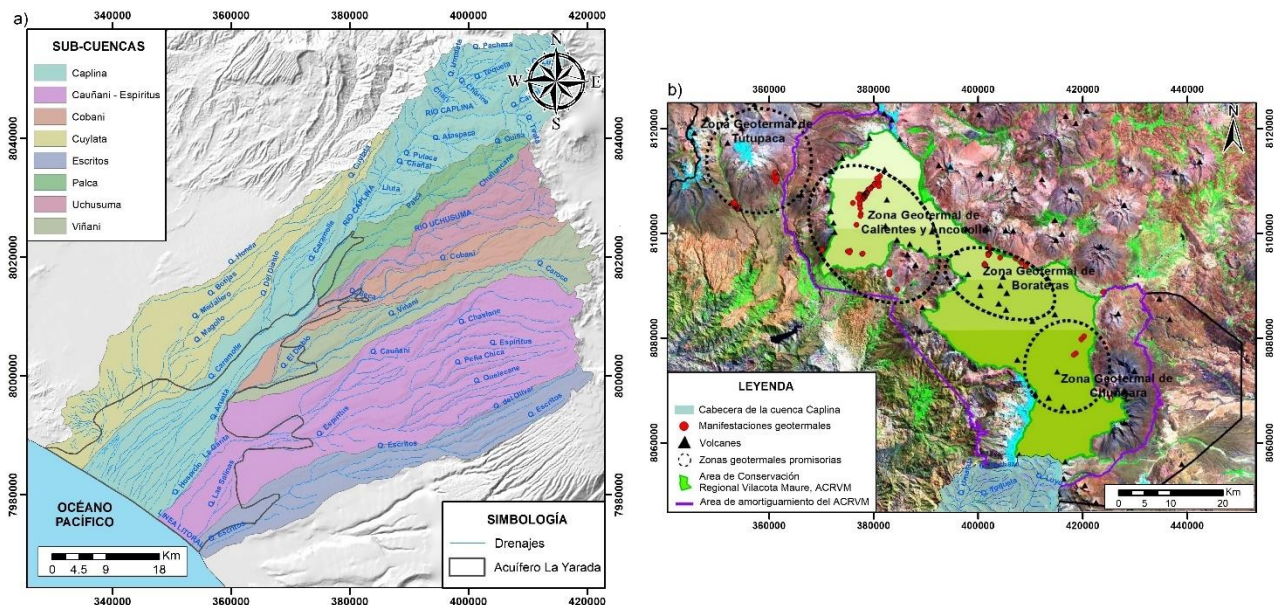
acuífero consiste principalmente de las subcuencas Caplina y Uchusuma, que presentan actividad volcánica en sus nacientes, a diferencia de las subcuencas Palca, Cuyлата, Cabañi, Viñani, Cauñani, Espíritus y Escritos, las cuales no presentan dicha actividad en sus nacientes (Anexo 1 – Mapa 05), siendo aguas de mejor calidad (Pino y Coarita, 2018) (Figura 4a). La cabecera de la cuenca Caplina, pertenece a la zona geotermal del eje volcánico del sur (Vargas y Cruz, 2010), la cual presenta hidrotermalismo propio de los campos geotermales de Borateras y Chungara (Paucarani) (Figura 4b), presentan un similar proceso hidrotermal producido por volcanes de la cordillera del Barroso (Vargas et al., 2012; Cruz et al., 2020), lo cual origina contaminación geogénica en el agua superficial que discurre por el río Caplina con boro, arsénico y otros elementos químicos. El río Caplina, tiene un régimen torrencial y muy irregular, es tomado por la bocatoma Calientes que captura el agua de la subcuenca y es llevado a través de un canal a la ciudad de Tacna (Narvaez-Montoya et al., 2021). En la cuenca Uchusuma, la alimentación de su flujo proviene principalmente del río Uchusuma, que es un canal creado por las obras civiles, cuyo origen combina agua superficial y agua subterránea, mediante transferencia desde la cuenca de Maure. El flujo intercuenca cruza el territorio chileno desde la bocatoma Uchusuma hasta su entrega y distribución final en los reservorios de Cerro Blanco (Narvaez-Montoya et al., 2021). Debido al uso humano y la infiltración, los ríos desaparecen en el valle principal del abanico aluvial.

Otra fuente de recarga son aportes generados por infiltración de riego y el riego con aguas residuales en sectores Copare, Arunta y Magollo (Zenteno et al., 2018).

Investigaciones isotópicas hechas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), señalan que no existe interconexión hidráulica con acuíferos del Altiplano Andino, se descarta una posible alimentación del río Lluta, el cual posee alta concentración de sulfato, también queda descartada una alimentación de los ríos Locumba y Sama, aguas que tiene un alto contenido de sólidos disueltos (Rojas, 2008).

Figura 4

Hidrología de la cuenca Caplina.



Nota. a) Subcuencas hidrológicas de la cuenca Caplina, b) Campos geotermiales de Borateras y Chungara (Paucarani) en la cabecera de la cuenca Caplina, tomado de Cruz (2016).

2.4. HIDROGEOLOGÍA

La hidrogeología regional indica que las direcciones de escurrimiento del flujo subterráneo en el acuífero de La Yarada están regidas por los controles estructurales actuales, relacionadas al sistema de fallas NO-SE Incapuquio, como es la Falla Calientes, se considera de gran importancia el lineamiento Caplina que recorre a través del valle del mismo nombre, en este caso se confirma que el descenso del caudal de las aguas del río Caplina se debe en parte a que discurren por este lineamiento y desemboca en la conexión subterránea con el acuífero de La Yarada (Acosta et al., 2012).

2.4.1. Geometría del reservorio

- Formas y límites

El acuífero La Yarada entre Pachía y Tacna, tiene forma de un polígono rectangular de fondo plano y flancos escarpados y abruptos. En el cono deyectivo que inicia en la garganta de Magollo, se ensancha progresivamente hacia abajo en forma de delta hasta alcanzar la línea de playa. El límite vertical estimado por resultados de prospección geofísica realizado hasta los 1000 metros de profundidad, permite determinar la morfología del techo del basamento impermeable (uno rocoso y otro arcilloso) (Zenteno et al., 2018).

- Dimensiones

El acuífero es de dimensiones variables, en el sector Magollo y Michulla su ancho varía entre 2 y 6 km, incrementándose notablemente entre los sectores del Chasqui, Yarada Baja – Las Palmeras, Rancho Grande, Los Palos, Pueblo Libre y Santa Rosa donde fluctúan entre 30 y 32 km, mientras que en el sector Hospicio y cerca a cerros de La Yarada varía entre 25 y 30 km, por otro lado en las quebradas Uchusuma, Viñani, La Garita, Las Salinas y Escritos forman estrechos de forma alargada y dimensiones variables (Zenteno et al., 2018).

2.4.2. Litología

La litología del acuífero está constituida principalmente por rellenos aluviales de edad cuaternaria, litológicamente conformado por gravas, arenas finas a gruesas, cantos que varían de redondeados a subredondeados; limos y arcillas, todos de carácter típicamente fluvial; hacia sectores noroeste y sureste, los sedimentos provienen principalmente de las formaciones Huaylillas y Moquegua (Zenteno et al., 2018).

2.4.3. Unidades hidrogeológicas

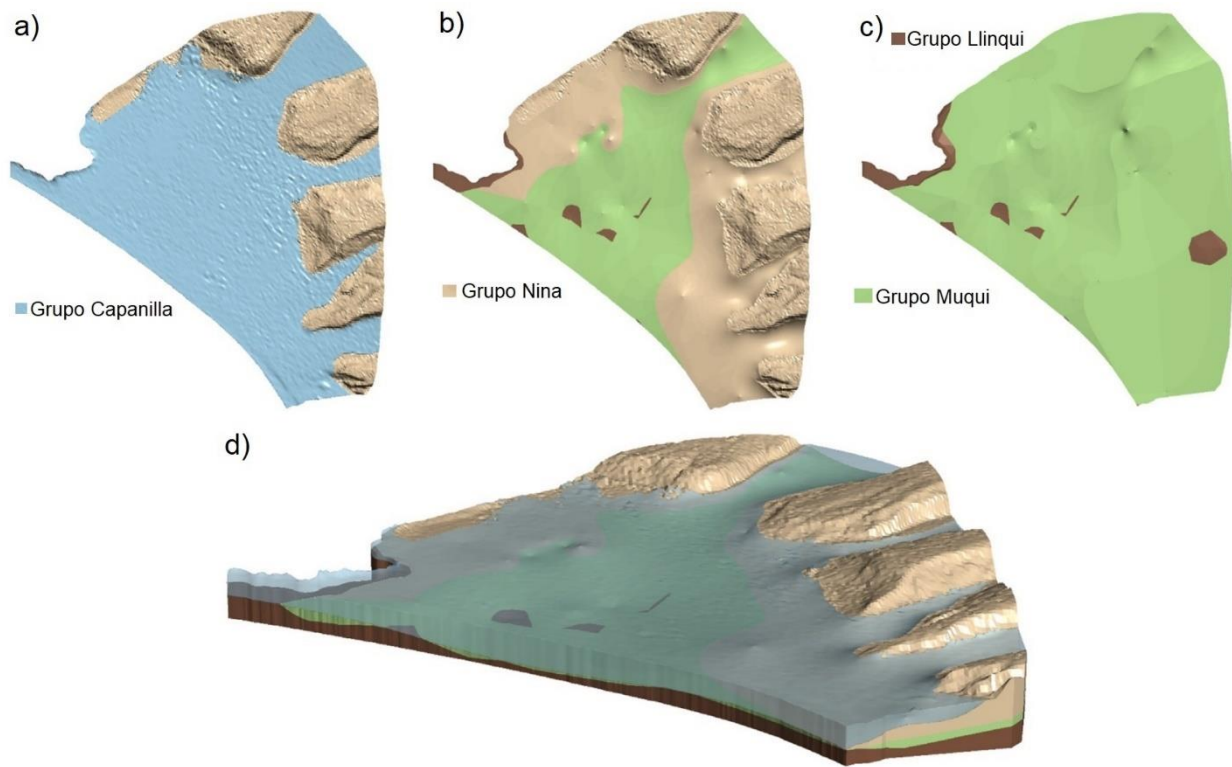
Los perfiles litológicos del acuífero son complejos, debido a que existen una alternancia de muchos materiales, gravas gruesas y finas, arena gruesas y finas, limo, arcillas compactadas y caliche. Desde el punto de vista hidrogeológico, se presentan materiales grueso permeable, material fino permeable, material mezclado menos permeable y material impermeable (Rojas, 2008). Según Narvaez-Montoya et al. (2021) en el área se consideran cuatro unidades hidrogeológicas:

- (i) Grupo Capallina (acuífero), compuesto por material aluvial, fluvial, litoral y material residual del Plioceno – Cuaternario, que constituye la formación más productiva de agua subterránea del sistema acuífero, en el que se encuentran casi todos los pozos de extracción (Figura 5a);
- (ii) Grupo Nina (acuitardo), compuesto por una parte superior de una secuencia sedimentaria del Plioceno-Mioceno de areniscas, limolitas y conglomerados de la formación Millo y una parte inferior de una secuencia volcánica del Mioceno, principalmente tobas riolíticas y riodacíticas de la formación Huaylillas (Figura 5b);
- (iii) Grupo Muqui (acuífero) compuesto por una secuencia sedimentaria fluvial del Oligoceno de conglomerados, areniscas y limolitas pertenecientes a la formación Moquegua, tiene una productividad desconocida y se combina libremente con el abanico aluvial de los valles de la depresión central a la planicie costera (Figura 5c);
- (iv) Grupo Llinqui, (acuicludo)

compuesto por una secuencia de materiales arcillosos impermeables del Eoceno y más antiguos (formaciones indefinidas) (Figura 5c). (pp 8)

Figura 5

Hidrogeología del sistema acuífero La Yarada



Nota. Unidades hidrogeológicas del sistema acuífero a) Grupo Capanilla, (b) Grupo Nina, (c) Grupo Muqui y Grupo Llinqui y (d) Vista 3D del sistema acuífero, tomado de Narvaez-Montoya et al. (2021).

2.4.4. Contaminación de acuíferos

La necesidad de consumo humano, industrial o agrícola genera un problema que debe resolver el uso y disponibilidad final de este elemento, las aguas subterráneas se consideran recursos de mayor pureza, sin embargo, están expuestos a peligros de contaminación. En la región de Tacna, las precipitaciones son escasas e irregulares pero el clima es apto para la agricultura, por lo tanto conocer los peligros de contaminación es fundamental (Peña et al., 2009).

- Contaminación por labores agrícolas

Debido al uso de abonos que se descomponen aumentan las sales de la tierra, ocasionando que el pH y el contenido de bicarbonatos disminuya, los abonos artificiales a base de nitrato, fosfatos y potasa pueden producir contaminación principalmente por dilución; el yeso añadido para corregir el contenido de aguas bicarbonatadas alcalinas también puede contribuir al incremento del contenido de sulfatos, sales y la dureza; el uso de pesticidas que al tener contacto con el agua de riego se infiltra, sumándose el quemado de plantas que contribuyen a la salinización del suelo (Peña et al., 2009).

- Contaminación por vertido de aguas residuales

La existencia de piscinas de disposición final de aguas servidas de la ciudad de Tacna, se usan para regar los cultivos de la irrigación Copare, los parques y los jardines de la ciudad. El Bosque Municipal que es un extenso macizo forestal de 60 Ha, que fue creado mediante el uso sostenible de aguas residuales tratadas en la planta de tratamiento Magollo, ubicada en la zona límite de Magollo y La Yarada (Gonzales, 2016; Cauna, 2020). Esta actividad tiene alto porcentaje de contaminación del acuífero poroso no consolidado (Peña et al., 2009).

- Intrusión marina

La intrusión marina y salinización de aguas subterráneas son problemas comunes que afectan a muchas áreas costeras áridas y semiáridas como el acuífero La Yarada, la sobreexplotación conlleva a que el nivel freático disminuya gradualmente y como consecuencia la calidad del agua es afectada por la intrusión marina (Pino & Coarita, 2018; Pino et al., 2018). Estudios hidroquímicos realizados en el 2002 y 2010 en los sectores Palmeras y los Palos ubicados cerca al litoral, muestran elevadas concentraciones de cloruros, delatando el comienzo o establecimiento de un estado

de intrusión marina y que los sectores Olivos, La Esperanza, Las Palmeras, Rancho Grande se encuentran en una creciente salinización (ANA, 2010).

- Aspectos geológicos

Depósitos de yeso y sal intercalados en forma de lentes ocasionales, formados por una pequeña comunicación con el océano que fue interrumpida debido a algún fenómeno epirogénico, efectuándose evaporación y consiguiente precipitación de sulfato. La sal se presenta como cementante de materiales arenosos, se encuentran principalmente en parte baja del cerro Fundadora y cerro Escritos (Jaén y Ortiz, 1963). Los perfiles litológicos del acuífero son complejos, debido a que existen una alternancia de muchos materiales, gravas gruesas y finas, arena gruesas y finas, limo, arcillas compactadas y caliche encontrados en perforaciones realizadas (PET, 2007).

2.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

2.5.1. Análisis bivariado

El análisis bivariado produce asociaciones por pares a partir de un conjunto de variables y las muestra como una matriz (Salomon, 2013), usado para medir la fuerza y la dirección de la asociación entre dos variables. Para hacer un mejor análisis bivariado existen métodos como el coeficiente de correlación de Pearson, es conocido como el mejor método para medir la asociación entre variables de interés porque se basa en el método de covarianza, proporciona información sobre la magnitud de la asociación o correlación, así como la dirección de la relación, sus valores oscilan entre -1 y +1, en el primer caso la relación es perfecta negativa y en el segundo perfecta positiva y cuando el valor es 0 significa que simplemente no están relacionados (Hernández et al., 2018) .

2.5.2. Análisis multivariante

Su objetivo principal es transformar una gran cantidad de observaciones en un número menor de puntuaciones compuestas que reflejen la mayor cantidad de la información contenida en los datos originales.

- Análisis Cluster

El análisis clúster de variables es un procedimiento exploratorio que puede sugerir procedimientos de reducción de la dimensión, a través de la construcción de una matriz de distancias o similitudes entre variables y aplicar a esta matriz un algoritmo jerárquico de clasificación (Peña, 2002). Para la formación de grupos o conglomerados homogéneos mediante el análisis clúster se pueden seguir dos tipos básicos de procedimientos: jerárquicos y no jerárquicos. Los procedimientos jerárquicos, que consisten en la construcción de una estructura en forma de árbol o dendrograma, son los más populares y rápidos (Hair et al., 1999). Existen distintos algoritmos o métodos para desarrollar dichos conglomerados, como el encadenamiento simple, promedio, centroide, completo, mediana, McQuitty o el método de Ward, los cuáles difieren en cómo se calcula la distancia entre los conglomerados. Un caso especial es el método de Ward usado para el caso de calcularse a partir de distancias de datos cuantitativos; este método es una alternativa que reduce la presencia de individuos atípicos (Ward, 1963).

- Análisis Factorial

Según (Cuadras, 2014), el Análisis Factorial es una técnica estadística de reducción de datos usada para explicar correlaciones entre variables observadas en términos de un número de variables no observadas llamadas factores. El análisis factorial exploratorio (Figura 6) es usado para descubrir la estructura interna de un número relativamente grande de variables. En el Análisis Factorial se detecta la existencia de unos “factores comunes” $f_i, i = 1, \dots, m$, tales que las variables observables de la población $X_i, i = 1, \dots, p$ se expresan en la ecuación 1 así:

$$\begin{aligned}
X_1 &= \lambda_{11} f_1 + \cdots + \lambda_{1m} f_m + u_1 \\
X_2 &= \lambda_{21} f_1 + \cdots + \lambda_{2m} f_m + u_2 \\
&\vdots \\
X_p &= \lambda_{p1} f_1 + \cdots + \lambda_{pm} f_m + u_p
\end{aligned}
\tag{1}$$

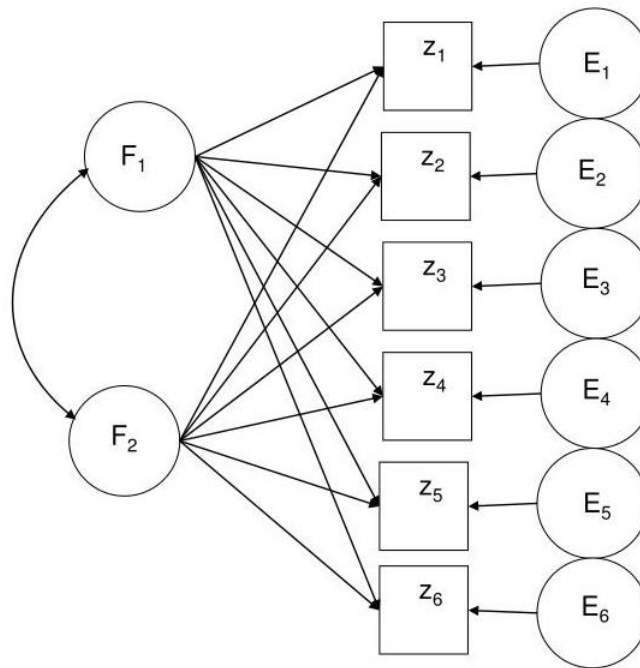
$$\begin{aligned}
X_1 &= \lambda_{11} f_1 + \cdots + \lambda_{1m} f_m + u_1 \\
X_2 &= \lambda_{21} f_1 + \cdots + \lambda_{2m} f_m + u_2 \\
&\vdots \\
X_p &= \lambda_{p1} f_1 + \cdots + \lambda_{pm} f_m + u_p
\end{aligned}$$

Donde:

$m < p$, los factores comunes $f_1, \dots, f_m$ son no observables y los u_i son “factores únicos” aleatorios ligados a cada X_i , que recogen el error de observación de cada X_i , y otros factores específicos ligados a cada variable X_i , al margen de las otras variables.

Figura 6

Método de análisis factorial exploratorio.



Nota. Esta técnica permite explorar con mayor precisión dimensiones subyacentes o variables latentes observadas, tomado de Brown (2015).

Según García et al. (2000) se puede emplear diversos métodos para extraer los factores comunes en un modelo, que intentan determinar el número mínimo de factores comunes capaces de reproducir la varianza observada en la matriz de correlaciones inicial. Se dispone de muchos métodos para extraer los factores iniciales de la matriz de correlación, el más utilizado es el de “Componentes Principales”. que busca el factor que explique la mayor cantidad de la varianza en la matriz de correlación, los factores así extraídos no se correlacionan entre ellos, por esta razón se dice que estos factores son ortogonales. Con frecuencia es difícil interpretar los factores iniciales, por tanto, la extracción inicial se rota con la finalidad de lograr una solución que facilite la interpretación. Los métodos de rotación ortogonales (mantienen la independencia entre los factores rotados: (varimax, quartimax y equamax), el método de rotación varimax es actualmente, uno de los métodos más utilizados.

2.6. ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO

El modelado geoestadístico es una rama de las técnicas estadísticas aplicadas que se ocupan de la detección, modelado y estimación de patrones espaciales de los parámetros del agua subterránea (Rossi et al., 1992). Kriging es una de las técnicas de estimación insesgado más común y robusta, considera tanto la distancia como el grado de variación entre valores de puntos de datos conocidos al estimar los desconocidos, la aplicación de Kriging Ordinario (OK) con los modelos de semivariograma (exponencial, gaussiano y esférico) y los parámetros de modelo relevantes (pepita, umbral y rango) ayudan a construir mapas de predicción temáticos visualmente precisos (Goovaerts, 1997).

La ecuación 2 general utilizada para calcular una distribución espacial para interpoladores OK, se forma como un promedio ponderado de los datos muestreados.

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(S_i) \quad (2)$$

Donde:

$Z(S_i)$ = El valor medio de la i -ésima ubicación.

Λ_i = Un peso desconocido para el valor medido en la i -ésima ubicación.

S_0 = La ubicación de la predicción.

N = El número de valores medidos.

2.7. HIDROGEOQUÍMICA

El agua subterránea puede ser clasificada en diferentes tipos de agua según su porcentaje relativo de sus componentes químicos. Los diferentes tipos de agua reflejan los factores naturales y antropogénicos y los procesos hidrogeoquímicos que influyen en la química del agua subterránea.

2.7.1. Procesos de interacción agua – roca

La interacción agua – roca es uno de los principales proveedores naturales de los componentes químicos del agua subterránea (Tóth, 1999). La química del agua subterránea puede exponerse a modificar y ocultar su composición original mediante una diversidad de procesos de interacción agua – roca como procesos de intercambio iónico y de disolución de minerales solubles (Monjerezi, 2012).

2.7.2. Grado de salinización

El inverso de la razón de Simpson clasifica la influencia salina en seis clases (agua dulce, levemente salino, moderadamente salino, nocivamente salino, altamente salino y severamente salino). La relación $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^- > 2$ indica recarga de agua dulce, mientras que una relación menor que la unidad indica grados más altos de salinización (Chaudhuri & Ale, 2014).

2.8. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

2.8.1. Estándares de calidad de agua para uso poblacional

Para evaluar la calidad de agua para consumo humano, el gobierno peruano aprobó estándares nacionales de calidad. Los límites permisibles de los parámetros de calidad para el agua potable (Tabla 2) emplean valores establecidos por el “Reglamento de calidad del Agua para consumo humano”, aprobado mediante Decreto Supremo N° 031-2010-SA (MINSA, 2011).

Tabla 2*Estándares nacionales para consumo humano*

Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
pH	Unidad de pH	6,5 – 8,5
EC	uS/cm	1500
TDS	mg/L	1000
Cl ⁻	mg/L	250
SO ₄ ²⁻	mg/L	250
NO ₃ ⁻	mg/L	50
Ca ²⁺	mg/L	200
Mg ²⁺	mg/L	150
Na ⁺	mg/L	200
B	mg/L	1,5
Mn	mg/L	0,4
Fe	mg/L	0,3
As	mg/L	0,01
F	mg/L	1,0
Al	mg/L	0,2

Nota. Límites para cada parámetro, tomado de MINSA (2011).

2.8.2. Índice de calidad del agua para consumo humano

La calidad del agua potable se puede evaluar mediante el método del índice de calidad del agua (WQI) (Horton, 1965). El WQI proporciona la calidad general del agua al combinar los efectos de los parámetros individuales de la calidad del agua en comparación con los límites estándar prescritos. El cálculo de WQI consta de cuatro pasos. En el primer paso, se asigna un peso a cada uno de los parámetros de calidad del agua en función de sus efectos relativos sobre la calidad del agua. El segundo paso implica el cálculo del peso relativo de cada parámetro como la relación entre el peso asignado y el peso total (ecuación 3). En el tercer paso, se calcula una escala de calificación de calidad para cada parámetro en cada muestra de agua, esto se hace

dividiendo la concentración de los parámetros de calidad del agua con sus límites prescritos y multiplicando por 100 (ecuación 4). En el paso final, el peso relativo calculado y la escala de calificación de calidad se multiplican para encontrar el subíndice de calidad del agua (ecuación 5), y la suma de todos los subíndices de calidad del agua para cada parámetro de calidad del agua da el WQI de la muestra de agua (ecuación 6).

$$W_i = w_i / \sum_{i=1}^n w_i \quad (3)$$

$$q_i = \left(\frac{C_i}{S_i} \right) \times 100 \quad (4)$$

$$SI_i = W_i \times q_i \quad (5)$$

$$WQI = \sum_{i=1}^n SI_i \quad (6)$$

Dónde: (i) representa el parámetro de calidad del agua, W_i para el peso relativo, w_i para el peso asignado, n para el número de parámetros, q_i para la escala de calificación de la calidad, C_i para la concentración medida, S_i para el límite de consumo prescrito y SI_i para la calidad del agua por debajo de índice. Para el cálculo de WQI, se utiliza las concentraciones de los parámetros de calidad del agua en mg/L.

2.8.3. Calidad de agua para riego

Para evaluar la calidad de agua con fines de riego, se usa el diagrama de Wilcox (Wilcox, 1955), el cual utiliza porcentaje de sodio ($Na\%$) obtenido mediante la ecuación 7, clasificando el agua en diferentes categorías (excelente, buena, admisible, mediocre e inadecuado).

$$Na \% = \frac{(Na^+ + K^+)}{(Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+})} \times 100 \quad (7)$$

CAPITULO III

METODOLOGÍA

La metodología empleada para el logro de los objetivos contempla la recopilación de información estudios geológicos, geomorfológicos, hidrológicos e hidrogeológicos para efectuar el análisis de correlación con la hidroquímica obtenida a partir del muestreo de agua en pozos subterráneos ubicados en el acuífero La Yarada realizado por el Proyecto de Investigación con fondos de canon “Integración de Métodos Hidrodinámicos, Hidroquímicos e isotópicos” (PIMHHI), con esto se tendrá una mejor comprensión de los procesos hidrogeoquímicos que determinan su composición y calidad.

3.1. RED DE MONITOREO Y MUESTREO

La red de monitoreo hidroquímico e isotópico realizado por el Proyecto PIMHHI, distribuida en el acuífero de La Yarada en octubre de 2020, estuvo compuesta por 53 muestras recolectadas a nivel de salida de los pozos de bombeo los cuales se recogieron en botellas de polietileno de alta densidad (Anexo 4).

Los parámetros de conductividad eléctrica (CE) y pH se midieron in situ. El análisis de cationes y metales totales (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , B, Mn, Fe, As, Sr, Al) se llevó a cabo mediante espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) siguiendo la norma ISO 17 294-2 método. Los aniones (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , F^-) se analizaron por cromatografía iónica utilizando el método EPA 300.0. El bicarbonato (HCO_3^-) se determinó por el método de ensayo ácido-base. Los isótopos $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las muestras de agua se midieron con el analizador ABB-LGR modelo 912-0008 con una precisión analítica de $\pm 0,1$ y $\pm 1,0\%$, respectivamente.

3.2. CALIDAD DE DATOS

3.2.1. Análisis de calidad de datos hidroquímicos

Para el control de calidad y precisión analítica, se recalcularon las concentraciones de cationes totales y aniones totales de cada muestra de (mg/L) a (mEq/L), el error de equilibrio iónico se calculó mediante la Ecuación (8), considerando aquellas muestras que dentro del límite aceptable de $\pm 10\%$ (Domenico y Schwartz, 1997).

$$Error (\%) = \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones} \times 100 \quad (8)$$

3.2.2. Preparación estadística

Se realizó la prueba de Anderson-Darling para identificar aquellos parámetros que siguen una distribución gaussiana normal. La normalización de datos se realizó para parámetros que no tienen una distribución normal, un requisito previo para el análisis estadístico multivariado, para aumentar la confianza en los resultados y las interpretaciones (Davis, 1986; Güler et al., 2002; Wang et al., 2015). Para los elementos principales junto con los elementos traza, se aplicó la transformación de los datos del logaritmo natural. Sin embargo, para los isótopos, se aplicó logaritmo normal de tres parámetros, ideal para números negativos. Para garantizar la normalización se volvió a aplicar la prueba de Anderson-Darling. Luego se estandarizó los datos, de modo que cada variable tuviera el mismo peso en el análisis, este proceso de estandarización ensambla los datos como valores sin unidades para evitar los efectos de las dimensiones de valor (Güler et al., 2002; Machiwal & Jha, 2015). Todos los cálculos y análisis estadísticos se realizaron utilizando el lenguaje de programación Python y sus distintos paquetes integrados (Anexo 2).

3.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se inició con el análisis univariado que permite describir el grado de dispersión relativa de la concentración de iones. Después análisis bivariado mediante análisis de correlación de

Pearson, produciendo asociaciones por pares a partir del conjunto de variables fisicoquímicas, midiendo la fuerza y dirección de la asociación obteniendo una matriz de correlación.

3.3.1. Análisis Clúster

Para el análisis multivariado se aplicó primero análisis clúster a los parámetros físicos (ph, EC y TDS), iones principales (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) y oligoelementos (B, Mn, Fe, As, Sr, F y Al), utilizando el método Ward con la distancia euclidiana, obteniendo un dendograma que muestra el agrupamiento de los pozos según su similitud. Obtenido los clústeres, se representó su distribución espacial, junto a diversas gráficas de facies y relaciones iónicas (diagrama de stiff, diagrama comparativo de oligoelementos, diagrama de Chadha y grados de salinización por inverso de Simpson), identificando las diferencias y similitudes en cada grupo. Estos gráficos son de mayor ayuda cuando se aplican a datos previamente agrupados (Hiscock & Bense, 2014).

3.3.2. Análisis Factorial

Se aplicó el análisis factorial, usando el criterio de Kaiser (Kaiser, 1958) en tres enfoques diferentes de análisis: (i) elementos principales (FP), (ii) elementos traza (FO), (iii) parámetros fisicoquímicos e isotópicos (FT), para mejores resultados se realizó la rotación varimax para reducir variables con menor aporte, la cual distinguirá las variables fisicoquímicas en función de su grado de covariación, reduciendo la gran cantidad de variables a un número menor en factores, los cuales son representados por parámetros con su respectiva carga factorial, pudiendo ser “fuertes” $> \pm 0,75$, “moderados” para $\pm 0,75 - 0,5$ y débiles para $\pm 0,5 - 0,3$ (Kazakis et al. 2017; Huang et al., 2018), estos indican el grado de contribución de las variables en sus factores (Dalton & Upchurch, 1978), y también puntuaciones de factores indicando la intensidad de la influencia de cada factor en la ubicación de cada muestra (Dalton & Upchurch, 1978). Estas puntuaciones de factores fueron interpoladas usando Kriging Ordinario (OK), puesto que es la técnica geoestadística de estimador insesgado más común y robusta, siendo recomendada en estudios hidrogeológicos por su simplicidad y precisión (Redwan & Moneim, 2016; Machiwal et

al., 2018; Masoud et al., 2018), para la aplicación de esta técnica se utilizó el software ArcGis, con los mejores modelos de semivariograma (exponencial, gaussiano y esférico), ayudando a construir mapas de predicción precisos.

3.4. CALIDAD DE AGUA

La calidad de agua para uso potable se evaluará mediante el método de índice de calidad del agua (WQI) (Horton, 1965), que combina los efectos de los parámetros en comparación con los límites de estándar prescritos por el Ministerio de Salud del Perú (MINSA, 2011), obtenido los índices, se representó su distribución espacial y clasificó en excelente, buena, mala, muy mala e inadecuada (Sahu & Sikdar, 2007).

Para evaluar la calidad de agua con fines de riego, se usó el diagrama de Wilcox (Wilcox, 1955), el cual utiliza porcentaje de sodio (Na%), clasificando el agua en diferentes categorías (excelente, buena, admisible, mediocre e inadecuado). Este gráfico se aplicó con los datos previamente agrupados por el análisis clúster, identificando las diferencias y similitudes de estos.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Realizando un análisis univariado se obtuvo un resumen estadístico, considerando 20 variables constituidas por EC (conductividad eléctrica), TDS (total de sólidos disueltos), pH, elementos principales (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+), elementos traza (B, Mn, Fe, As, Sr, F y Al) e isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) de 53 pozos de agua subterránea pertenecientes al acuífero La Yarada (Tabla 3). Casi todas las variables (excepto el pH) presentan valores de asimetría muy superiores a 0, revelando que éstas no se distribuyen normalmente en el área. El agua subterránea es aproximadamente neutra a levemente alcalina con un pH promedio de 7,6 y un rango de 7,0 a 8,3. Según estándares de calidad de agua para consumo humano del Ministerio de Salud del Perú (MINSA), los valores están dentro del límite permitido. La importancia de tener caracterizado el pH es porque determina qué minerales se disolverán, precipitarán o permanecerán en el sistema de aguas subterráneas. Entre los elementos con mayor cantidad de pozos que sobrepasan los límites de calidad para consumo humano, se encuentra el B con 77 % que exceden el estándar, el SO_4^{2-} (83%), EC (51%), TDS (49%) y Cl^- (32%), los cuales en concentraciones elevadas producen daño a la salud. Las concentraciones de elementos como Ca^{2+} (25%), Na^+ (19%), As (11%), Fe (11%), Mg^{2+} (4%) y Al (2%) también sobrepasan los estándares, pero en menor cantidad de pozos dentro del área. Las concentraciones de los elementos NO_3^- , Mn, y F no sobrepasan los estándares de calidad para el consumo humano. No se encuentran límites permisibles a los elementos HCO_3^- , K^+ y Sr, puesto rara vez se encuentra en niveles que podrían representar preocupación para seres humanos y por ende instituciones nacionales e internacionales consideran no necesario establecer límites.

Tabla 3*Resumen estadístico de parámetros fisicoquímicos del acuífero La Yarada*

Esta.	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	pH	EC	TDS	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	HCO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	B	Mn	Fe	As	Sr	F	Al
mín.	-96	-14	7	653	425	70	43	0,00	46	12,10	0,92	52	3	0,34	0,00	0,00	0,00	0,05	0,08	0,01
med.	-87	-12	8	2057	1368	366	392	3,96	86	184	35	165	15	2,04	0,01	0,6	0,01	0,81	0,2	0,04
max.	-31	-5	8	8290	5918	2266	969	24	170	900	209	871	44	4,3	0,3	21	0,1	4,3	0,6	1,03
rang.	65	9	1	7637	5493	2196	926	24	124	888	208	819	41	3,97	0,3	21	0,1	4,3	0,5	1,02
asim.	3,3	2,9	0,02	2,5	2,6	2,7	1,1	2,2	1,3	2,5	3,1	2,6	1,5	0,5	5,4	6,9	2,8	2,6	2,4	6,7
%>MNSA	-	-	0	51	49	32	83	0	-	25	4	19	-	77	0	11	11	-	0	2

Nota. Todas las unidades en mg/L, excepto EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$), $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ (‰), pH y asimetría (sin unidades).

4.2. CORRELACIÓN DE VARIABLES FISICOQUÍMICOS

Llevando a cabo el análisis bivariado mediante el coeficiente de Pearson entre los 20 parámetros, se obtuvo una matriz de correlación (Tabla 4). Las variables Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , B, Sr, SO_4^{2-} y NO_3^- están considerablemente correlacionados con TDS y EC positivamente, lo cual significaría que estos elementos contribuyen con la salinidad del agua subterránea. La relación alta negativa entre los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} y SO_4^{2-} con el pH, sugiere que la lixiviación del SO_4^{2-} de fertilizantes y la disolución de minerales carbonatados eleva los niveles de salinidad, disminuyendo el pH. La relación moderada positiva de los isótopos y el pH con el As y F, sugieren condiciones ideales para la disolución y movilidad de estos oligoelementos.

Tabla 4

Matriz de correlación de parámetros fisicoquímicos en el acuífero La Yarada

	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	pH	EC	TDS	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	HCO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	B	Mn	Fe	As	Sr	F	Al
$\delta^2\text{H}$	1,0	0,8	0,3	0,2	0,2	0,3	-0,4	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	0,4	0,2	-0,2	0,1	0,1	0,4	-0,1	0,5	0,1
$\delta^{18}\text{O}$	0,8	1,0	0,2	0,1	0,1	0,4	-0,4	0,1	0,0	-0,2	-0,3	0,4	0,1	-0,4	0,2	0,2	0,3	-0,2	0,5	0,1
pH	0,3	0,2	1,0	-0,6	-0,6	-0,5	-0,5	-0,5	-0,3	-0,8	-0,7	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1	-0,1	0,5	-0,7	0,6	-0,1
EC	0,2	0,1	-0,6	1,0	1,0	0,9	0,6	0,5	0,2	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,1	0,1	-0,2	0,9	0,0	0,1
TDS	0,2	0,1	-0,6	1,0	1,0	0,9	0,6	0,5	0,2	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,1	0,1	-0,2	0,9	0,0	0,1
Cl^-	0,3	0,4	-0,5	0,9	0,9	1,0	0,3	0,6	0,2	0,6	0,6	0,8	0,5	0,3	0,1	0,0	-0,1	0,7	0,0	0,1
SO_4^{2-}	-0,4	-0,4	-0,5	0,6	0,6	0,3	1,0	0,2	0,2	0,7	0,8	0,4	0,6	0,9	0,1	0,0	-0,5	0,8	-0,2	0,0
NO_3^-	-0,1	0,1	-0,5	0,5	0,5	0,6	0,2	1,0	0,7	0,5	0,4	0,3	0,3	0,0	-0,2	-0,3	0,1	0,5	-0,2	-0,3
HCO_3^-	-0,1	0,0	-0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,7	1,0	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	-0,2	-0,4	0,1	0,2	-0,2	-0,3
Ca^{2+}	-0,2	-0,2	-0,8	0,8	0,8	0,6	0,7	0,5	0,3	1,0	1,0	0,4	0,5	0,6	0,0	-0,1	-0,5	1,0	-0,5	0,0
Mg^{2+}	-0,3	-0,3	-0,7	0,8	0,8	0,6	0,8	0,4	0,1	1,0	1,0	0,4	0,6	0,7	0,0	0,0	-0,5	1,0	-0,4	0,1
Na^+	0,4	0,4	-0,1	0,8	0,8	0,8	0,4	0,3	0,1	0,4	0,4	1,0	0,7	0,5	0,2	0,1	0,0	0,5	0,4	0,1
K^+	0,2	0,1	-0,2	0,7	0,7	0,5	0,6	0,3	0,0	0,5	0,6	0,7	1,0	0,6	0,0	-0,1	-0,2	0,6	0,1	0,0
B	-0,2	-0,4	-0,3	0,6	0,6	0,3	0,9	0,0	0,0	0,6	0,7	0,5	0,6	1,0	0,1	0,0	-0,4	0,7	0,0	0,0
Mn	0,1	0,2	-0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	-0,2	-0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	1,0	0,8	-0,2	0,1	0,0	0,7
Fe	0,1	0,2	-0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	-0,3	-0,4	-0,1	0,0	0,1	-0,1	0,0	0,8	1,0	-0,1	0,0	0,1	0,7
As	0,4	0,3	0,5	-0,2	-0,2	-0,1	-0,5	0,1	0,1	-0,5	-0,5	0,0	-0,2	-0,4	-0,2	-0,1	1,0	-0,4	0,5	-0,3
Sr	-0,1	-0,2	-0,7	0,9	0,9	0,7	0,8	0,5	0,2	1,0	1,0	0,5	0,6	0,7	0,1	0,0	-0,4	1,0	-0,3	0,0
F	0,5	0,5	0,6	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,2	-0,2	-0,5	-0,4	0,4	0,1	0,0	0,0	0,1	0,5	-0,3	1,0	0,0
Al	0,1	0,1	-0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	-0,3	-0,3	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,7	0,7	-0,3	0,0	0,0	1,0

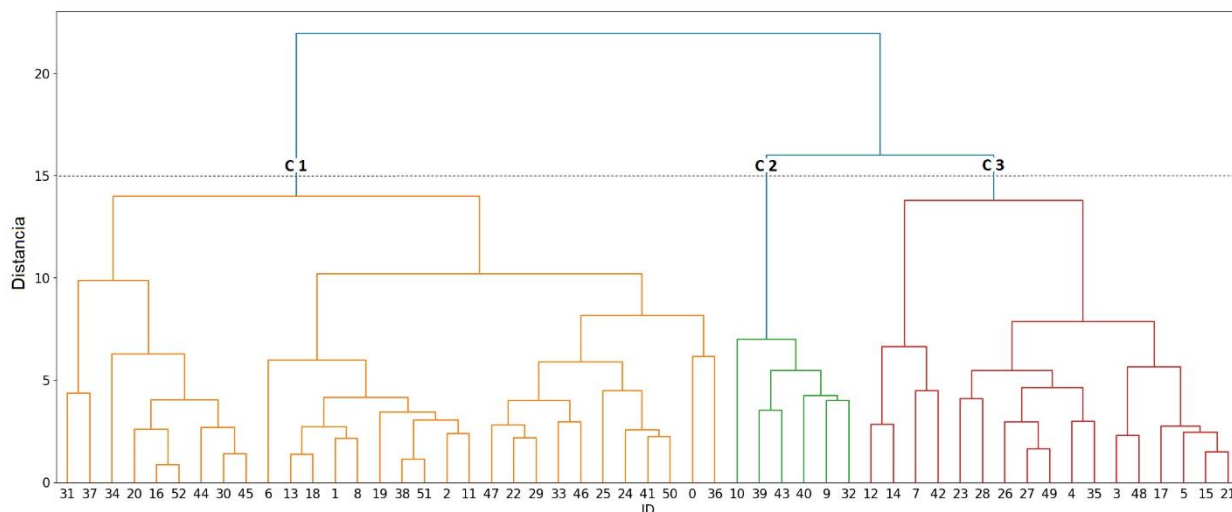
Nota. Coeficientes de correlación de Pearson.

4.3. AGRUPACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

Las muestras agua subterránea de 53 pozos tomados en el acuífero La Yarada fueron agrupados según su similitud mediante el análisis clúster. En la Figura 7, se muestran los resultados en el dendograma (diagrama de árbol). Se dividieron en tres ramas (grupos) con una distancia de enlace de 15, cada grupo representa una facie que refleja el efecto de un proceso hidrogeoquímico o una combinación de procesos en las muestras pertenecientes al grupo. Las muestras del grupo C2 y C3 tienen una menor distancia de enlace, por tanto, son grupos con menor disimilitud, pero respecto al grupo C1, ambos tienen una alta distancia de enlace, revelando que difieren mucho más. Estas amplias variaciones de distancia de enlace entre los grupos reflejan una amplia variación en los procesos hidrogeoquímicos en el área de estudios.

Figura 7

Dendograma de análisis clúster.

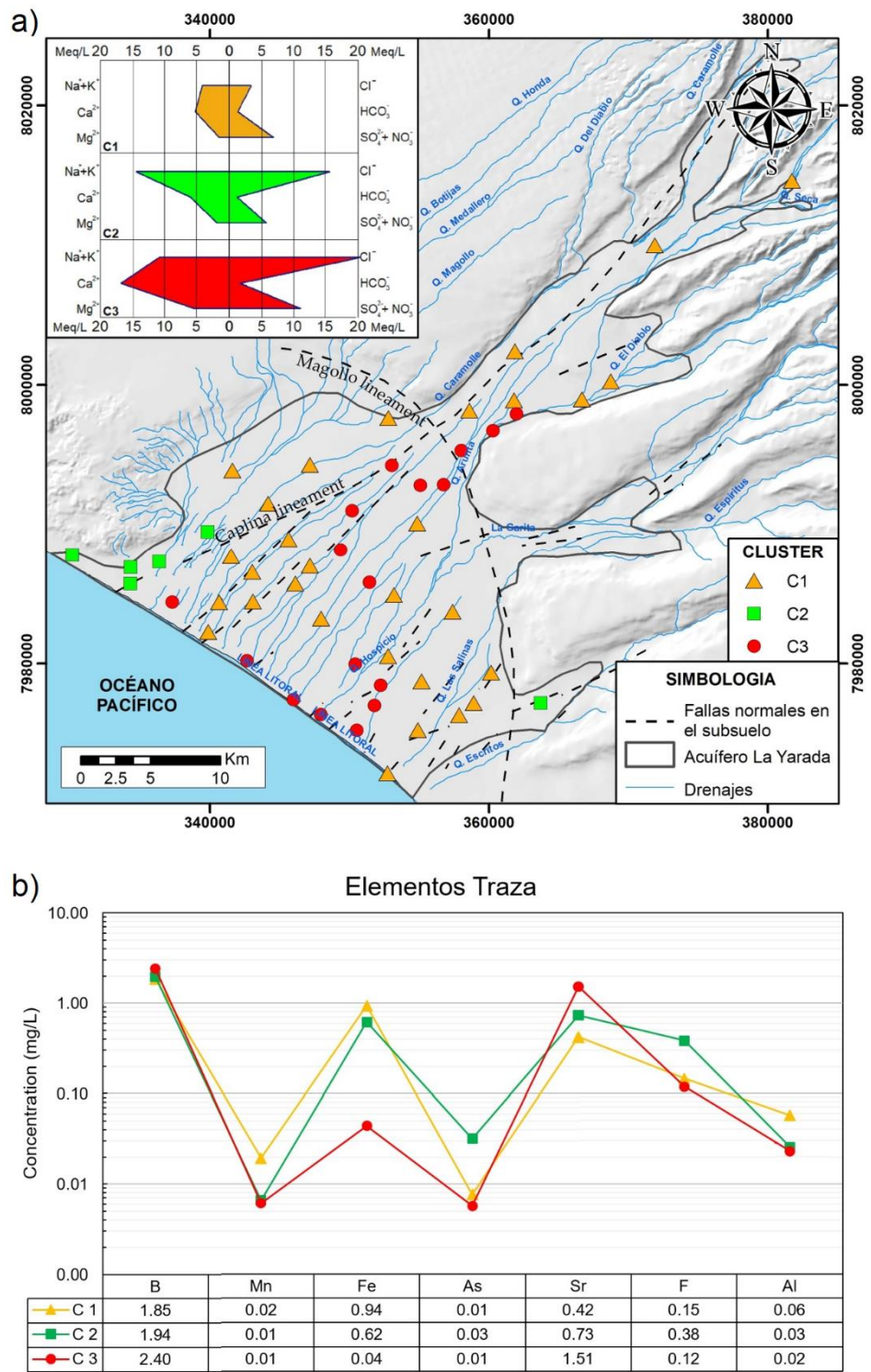


Nota. Dendograma vinculados jerárquicamente según su similitud.

En la Figura 8a se muestra la distribución espacial de los tres clústeres junto a sus diagramas de Stiff, y en la Figura 8b un diagrama comparativo de oligoelementos, permitiendo identificar las diferencias y similitudes entre cada grupo.

Figura 8

Distribución espacial de clústeres



Nota. Distribución espacial de los tres clústeres.

Observando los diagramas de Stiff (Figura 8a), el clúster 1 se caracteriza por ser la de concentración más baja de elementos principales, a comparación de los otros clústeres que tienen concentración muy elevada, pero esto no quiere decir que el agua sea poco mineralizada, sino que los otros clústeres tuvieron procesos hidrogeoquímicos mucho más contaminantes. El clúster 3 tiene la forma similar pero mucho más mineralizado, debido a más fuentes de contaminación que ocurren por intrusión marina en la zona cerca al litoral y contaminación por fuga de aguas residuales en la zona de la planta de tratamiento. El clúster 2, cuyos pozos están ubicados en los bordes del acuífero también presenta concentraciones altas, debido a la mezcla con el agua de mar, la cual contiene elevada concentración de iones, este clúster a diferencia del clúster 3, recibe una recarga relativamente baja de agua dulce, por el contrario, en el clúster 3 es relativamente alta, esto debido a que la mayor recarga del acuífero es proveniente del río Caplina (Pino & Coarita, 2018), que tiene una dirección preferencial dominada por lineamientos estructurales en el acuífero La Yarada (Peña et al., 2009; Acosta et al., 2012). El río Caplina provee mayor cantidad de elementos traza al acuífero, procedente de actividad volcánica en la naciente de su cuenca, reflejándose en las elevadas concentraciones de B en los tres clústeres (Figura 8b) y por ser un elemento con alta movilidad geoquímica. Los pozos ubicados en el clúster 3 contienen mayor concentración de B y Sr que los demás clústeres, la cual refleja intrusión marina y un largo recorrido del flujo de agua (Farrag et al., 2005). El clúster 1 tienen las mayores concentraciones de Fe, Mn y Al, reflejando condiciones reductoras que evidencian aportes de origen hidrotermal provenientes del río Caplina, que tiene un largo recorrido por el subsuelo que las empobrece de oxígeno (Liao et al., 2018). El clúster 2 tiene la mayor concentración de As y F, cuyos pozos están ubicados en los bordes del acuífero, la relativa baja recarga que recibiría esta zona al no encontrarse cerca a los lineamientos estructurales y al haber concentraciones bajas en la zona principal de recarga proveniente del río Caplina, sugiere un origen meteórico local en el agua subterránea por disolución de feldespatos y biotita al contacto de rocas riolíticas-

ignimbríticas de la formación Huaylillas con las soluciones procedentes de intrusión de agua de mar con largos periodos de residencia (Morelli et al., 2017).

4.3.1. Análisis de calidad de grupos

Se hizo un análisis de calidad para el consumo humano de manera grupal (Tabla 5), para poder hacer un análisis integral. El clúster 1 incluye un gran número de pozos (30) que abarcan la parte interna del acuífero. Respecto a los elementos principales (excepto el SO_4^{2-}), muy pocos pozos sobrepasan los estándares de calidad para consumo del MINSA, también el EC y TDS de pocos pozos del grupo sobrepasan los estándares. De los oligoelementos, el B un 80% de pozos sobrepasan los estándares de calidad, para el As un 7%, Fe un 10% y para el Al 3%. La mayor abundancia de SO_4^{2-} puede ser evidencia de contaminación por insumos agrícolas fertilizantes CaSO_4 , debido a que el riego favorece a la lixiviación de SO_4^{2-} (Marghade et al., 2012; Jabal et al., 2015). El clúster 2 contiene 6 pozos, casi todos los pozos (83%) sobrepasan los estándares de calidad en EC, TDS, Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ y en menor cantidad (17%) en Ca^{2+} . Respecto a los oligoelementos, para B un 83%, As un 67% y Fe un 33% sobrepasan los estándares de calidad. El clúster 3 contiene 17 pozos, casi todos los pozos sobrepasan los estándares de calidad en EC, TDS, Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} y en menor cantidad (35%) en Na^+ . Respecto a los oligoelementos, un 82% de los pozos para B y 6 % en Fe sobrepasan los estándares de calidad.

Los grupos 2 y 3 son los que más altos en concentraciones de elementos principales y de propiedades físicas, reflejando la influencia de la salinización y contaminación que impactan la vulnerabilidad del agua subterránea en esa parte del acuífero, pero estos se diferencian por predominio de Na^+ y Ca^{2+} en los pozos del clúster 2 y pozos del clúster 3 cerca al litoral respectivamente, producto de intercambio iónico directo e inverso, estos procesos pueden utilizarse como indicador de progreso de la intrusión de agua de mar (Sivan et al., 2005; Nair et al., 2015). Ningún pozo excede los estándares respecto a NO_3^- lo que indica pocos impactos poco significativos relacionado con la infiltración de aguas residuales. En todos los clústeres, casi todos los pozos superan los estándares de calidad respecto al B. El clúster 2 se caracteriza por

ser el que más porcentaje del total de sus pozos sobrepasan los estándares para As, por disolución de feldespatos y biotita al contacto de rocas riolíticas-ignimbríticas de la formación Huaylillas con las soluciones procedentes de intrusión de agua de mar con largos periodos de residencia.

Tabla 5

Análisis de calidad de agua por clúster

Clúster	pH	EC	TDS	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	B	Mn	Fe	As	Sr	F	Al
C1 30 pozos	0	17	17	0	77	0	-	0	0	0	-	73	0	10	7	-	0	3
C2 6 pozos	0	83	83	83	83	0	-	17	0	83	-	83	0	33	67	-	0	0
C3 17 pozos	0	100	94	71	94	0	-	71	12	35	-	82	0	6	0	-	0	0

Nota. Los números están en porcentaje según el total de pozos por grupo.

4.3.2. Valoraciones hidrogeoquímicas a partir de relaciones iónicas

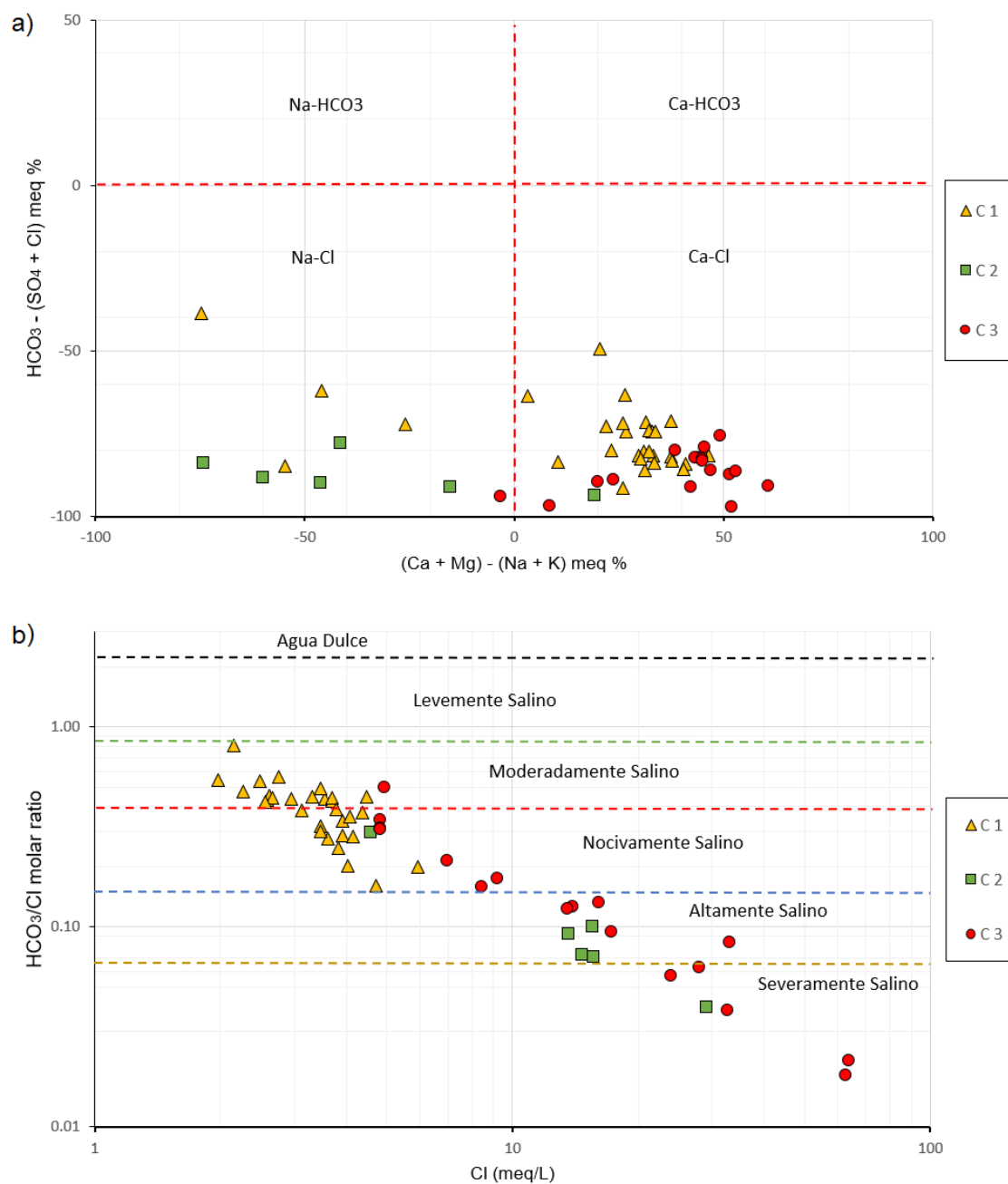
Se clasificó las aguas subterráneas según el porcentaje relativo de sus componentes químicos (Figura 9a) mediante el diagrama de Chadha. Estos reflejan procesos hidrogeoquímicos que influyen en la química del agua subterránea. La mayoría de los pozos se ubican en Ca-Cl (80%), mientras que casi todos los pozos del clúster C2 y algunos de C1 en Na-Cl, revelando que el agua subterránea del acuífero La Yarada es principalmente salina, esto se le puede atribuir a presencia de múltiples fuentes de salinización como intrusión marina en las costas, lixiviación de fertilizantes en las zonas de irrigación, mezclas con aguas residuales, aportes del río Caplina, la cual en la cabecera de su cuenca existe actividad volcánica y procesos de intercambio iónico directo e inverso entre Na y Ca, producto de la interacción agua con el medio.

Para analizar el grado de salinización se utilizó la relación $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ vs Cl^- , basado el inverso de Simpson y clasificado en seis clases (Chaudhuri & Ale, 2014). Todos los pozos

presentan salinización que van desde leve a severamente salino (Figura 9b), esto debido a la influencia de múltiples fuentes de salinización y contaminación mencionadas anteriormente, que impactan el agua subterránea.

Figura 9

Relaciones iónicas.



Nota. Clasificación de los clústeres según sus relaciones iónicas.

4.4. ASOCIACIONES HIDROQUÍMICAS

Para poder examinar la relación entre variables de las muestras, se utilizó el método análisis factorial, reduciendo en factores conformados por asociaciones de variables. Usando el criterio de Kaiser (Kaiser, 1958) se aplicó en tres enfoques diferentes de análisis: (i) usando iones principales (FP), (ii) usando oligoelementos (FO), (iii) usando ambos (FT).

Del primer enfoque (i), que utilizó los iones principales Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , así como pH, EC y TDS, surgieron tres factores con un intervalo de confianza del 95% y con una varianza total explicada igual al 83%. Los resultados junto a la identificación de factores se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6

Factores utilizando iones principales y propiedades físicas

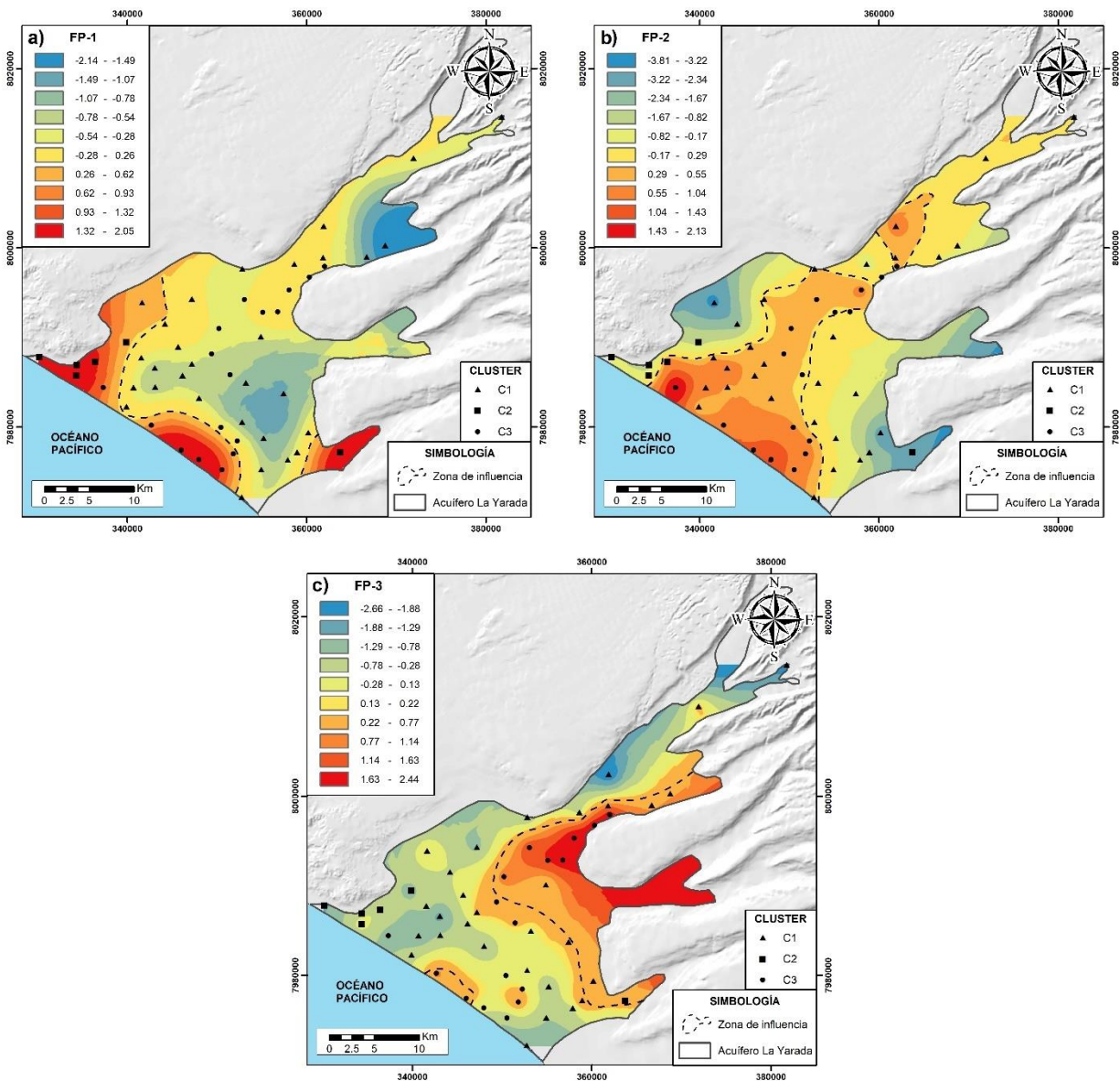
FP	Factores		
	1	2	3
pH	-0,08	-0,68	-0,44
EC	0,81	0,54	0,23
TDS	0,80	0,54	0,24
Cl^-	0,76	0,28	0,38
SO_4^{2-}	0,31	0,74	-0,02
NO_3^-	0,28	0,18	0,94
HCO_3^-	0,01	0,09	0,69
Ca^{2+}	0,34	0,86	0,31
Mg^{2+}	0,34	0,93	0,11
Na^+	0,98	0,07	0,03
K^+	0,64	0,40	-0,05
%Var	33%	32%	18%
Acum	33%	65%	83%

Nota. Carga factorial de cada factor, las variables representativas están de negrita.

El primer factor FP-1, explica el 33% de la varianza total y presenta una correlación positiva entre EC, TDS, Cl^- , Na^+ y K^+ , la Figura 10a muestra su distribución espacial paralela a la línea del mar. La ubicación de la zona de influencia y altas cargas en estas variables representan los iones principales en el agua de mar, lo que reflejaría la influencia de la intrusión marina en el agua subterránea (Abu Al Naeem et al., 2019). El segundo factor FP-2 explica el 32% de la varianza total, presenta una correlación positiva entre Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} y negativa en pH, la Figura 10b muestra su distribución espacial. Esta asociación de iones puede atribuirse a que el riego favorece a la lixiviación del SO_4^{2-} de fertilizantes agrícolas (CaSO_4) (Fryar et al., 2001). El agua infiltrada con mayor contenido de sal interactúa con la matriz del suelo elevando los niveles de salinidad, esto causa una disminución del pH en el acuífero, llevando a cabo disolución de minerales carbonatados presentes como material cementante en los depósitos aluviales, enriqueciendo el agua subterránea con Ca^{2+} y Mg^{2+} (Böhlke 2002; Vengosh et al., 2005). El enriquecimiento de iones de Ca^{2+} y Mg^{2+} en las costas, zonas susceptibles a salinización por intrusión marina, se debe al dominio del proceso de intercambio iónico inverso, lo que condujo exceso de Ca^{2+} y deficiencia de Na^+ (Slama & Bouhlila, 2017). El tercer factor FP-3 explica el 18% de la varianza total, tiene una correlación positiva entre NO_3^- y HCO_3^- y negativa en pH, la Figura 10c muestra su distribución espacial. La alta carga de NO_3^- producto de la oxidación microbiana de NH_4^+ (nitrificación) en el área de estudio dominada por entradas de aguas residuales, conduce a la acidez (Abu Al Naeem et al., 2019), disminuyendo el pH y causando disolución de minerales carbonatados y enriqueciendo el agua con HCO_3^- . Sin embargo, la principal fuente de bicarbonato podría ser el proceso de oxidación de la materia orgánica en descomposición y la respiración de las raíces (Carol & Kruse, 2012).

Figura 10

Distribución espacial de factores utilizando iones principales y propiedades físicas.



Nota. a) Distribución espacial de factor FP-1, b) Distribución espacial de factor FP-2, c) Distribución espacial de factor FP-3.

Del segundo enfoque (ii), que utilizó los oligoelementos B, Mn, Fe, As, Sr, F y Al surgieron tres factores, con un intervalo de confianza del 95% y con una varianza total explicada igual al 75%. Los resultados junto a la identificación de factores se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7

Factores utilizando oligoelementos

FO	Factores		
	1	2	3
B	0,02	0,99	0,04
Mn	0,94	0,06	-0,03
Fe	0,87	0,01	0,07
As	-0,24	-0,42	0,51
Sr	0,01	0,65	-0,25
F	0,08	-0,07	0,99
Al	0,78	0,03	-0,10
%Var	33%	23%	19%
Acum	33%	56%	75%

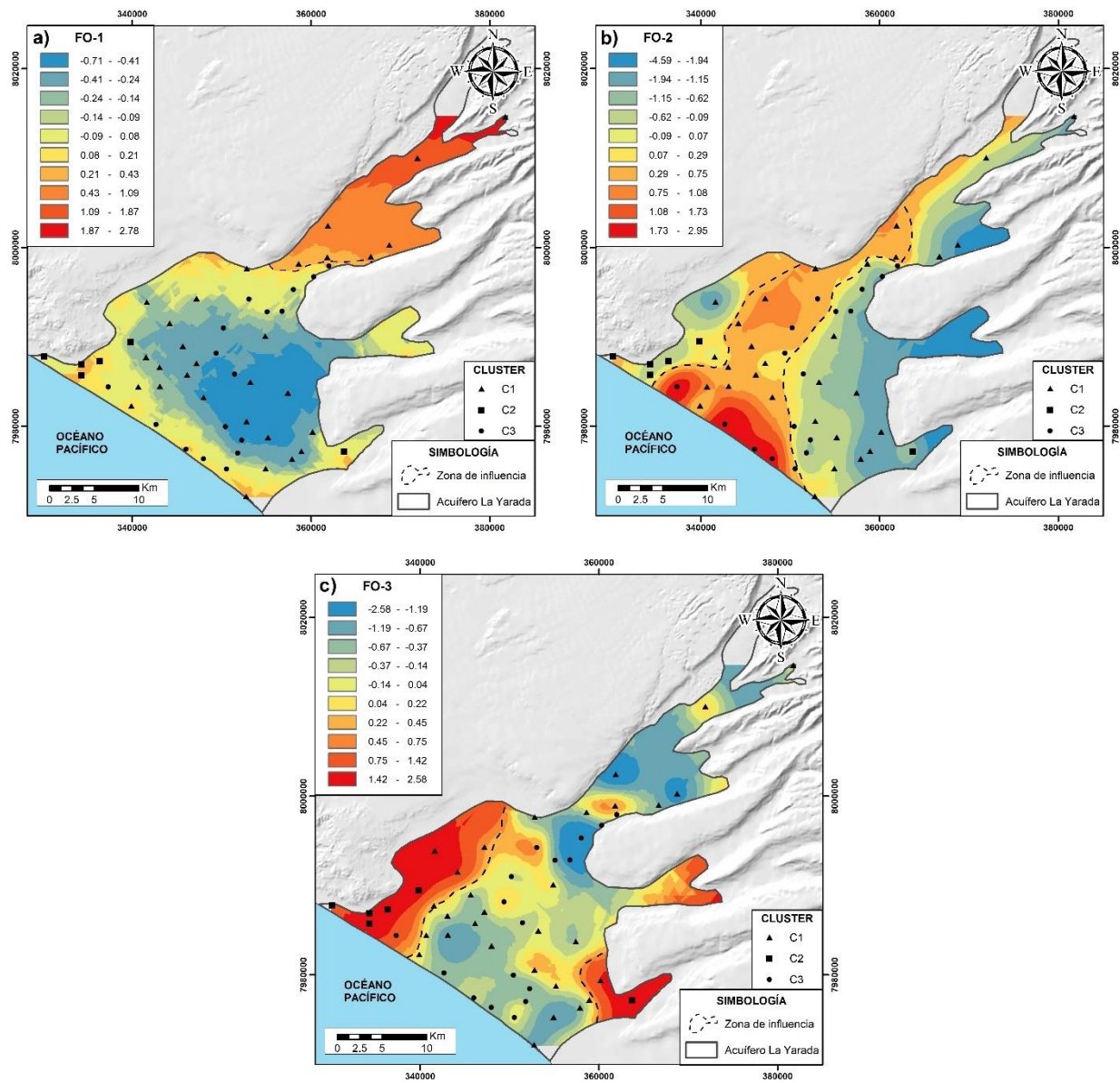
Nota. Carga factorial de cada factor, las variables representativas están de negrita.

El primer factor FO-1, explica el 33% de la varianza total y presenta una correlación positiva entre Mn, Fe y Al, la Figura 11a muestra su distribución espacial, esta asociación de iones está influenciada por condiciones reductoras, condiciones de flujo y medio por el que circula (Liao et al., 2018), evidencian aportes de origen hidrotermal provenientes de la recarga del río Caplina, debido al largo recorrido del agua por el subsuelo, empobreciéndose de oxígeno, creando las condiciones ideales para la movilidad de estos elementos. Procesos de adsorción de (Mn, Fe y Al) y filosilicatos (arcilla) eliminan estas especies químicas en la solución, regulando la distribución y movilidad de oligoelementos en acuíferos (Małeck et al., 2017; Shotyk et al., 2010). El segundo factor FO-2 explica el 23% de la varianza total, presenta una correlación positiva entre B y Sr, la Figura 11b muestra su distribución espacial. La presencia de B en las aguas subterráneas está relacionada con aportes hidrotermales provenientes de la recarga del río Caplina y la invasión de agua de mar en la zona costera, su elevada concentración que

sobrepasa los estándares de calidad en casi todo el acuífero (Tabla 5), se debe a distintos procesos por ser un elemento con alta movilidad geoquímica, alta solubilidad acuosa, abundancia natural y falta de efectos a reacciones oxido-reducción (Bassett et al., 1995), sin embargo su concentración disminuyó por la adsorción a los suelos por minerales arcillosos y pH alcalino, aliviando la alta concentración pero no lo suficiente. La concentración de Sr refleja la intrusión marina y el largo recorrido del flujo de agua (Farrag et al., 2005), debido a que el agua salina del mar penetra el agua dulce, se libera calcio junto a estroncio (Wang & Um, 2013; Bouzidi et al., 2015) El tercer factor FO-3 explica el 19% de la varianza total, tiene una correlación positiva entre As y F, la Figura 11c muestra su distribución espacial. Las recargas que derivan del río Caplina proveen de mayor cantidad de elementos traza al acuífero, pero no concentraciones considerables de As, esto sugiere elementos con capacidad de sorción, que retienen el As restringiendo su movilidad y regulando su distribución en el acuífero (Nicolli et al., 2001). El origen del arsénico es muy controvertido, se dispone de aguas subterráneas con concentraciones relativamente elevadas, pero sin una zona de recarga, reflejando que proviene de un origen meteórico local en el agua subterránea (Ortega-Guerrero, 2009). El As y F en las aguas subterráneas tiene origen relacionado con la disolución de feldespatos y biotita debido al contacto con rocas riolíticas-ignimbríticas de la formación Huaylillas y soluciones provenientes de intrusión de agua de mar con largos periodos de residencia (Morelli et al., 2017), las condiciones de oxidación, bajas velocidades de circulación en esa zona, el pH preferible, favorecen este proceso (Bundschuh et al., 2004; Vivona et al., 2007).

Figura 11

Distribución espacial de factores utilizando oligoelementos.



Nota. a) Distribución espacial de factor FO-1, b) Distribución espacial de factor FO-2, c) Distribución espacial de factor FO-3.

El tercer enfoque (iii), incluyó los iones principales, oligoelementos, propiedades físicas e isótopos estables, surgiendo cuatro factores, con un intervalo de confianza del 95% y con una varianza total explicada igual al 78%. Los resultados junto a la identificación de factores se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8

Distribución espacial de factores utilizando iones principales, oligoelementos, propiedades físicas e isótopos estables

FT	Factores			
	1	2	3	4
$\delta^2\text{H}$	0,04	0,78	-0,02	0,10
$\delta^{18}\text{O}$	-0,07	0,83	0,17	0,18
pH	-0,35	0,43	-0,69	-0,15
EC	0,88	0,15	0,43	0,09
TDS	0,87	0,16	0,44	0,10
Cl^-	0,63	0,37	0,58	0,08
SO_4^{2-}	0,83	-0,47	0,01	0,01
NO_3^-	0,25	0,08	0,78	-0,34
HCO_3^-	0,05	-0,02	0,51	-0,38
Ca^{2+}	0,71	-0,36	0,56	0,05
Mg^{2+}	0,79	-0,41	0,37	0,05
Na^+	0,77	0,52	0,11	0,10
K^+	0,78	0,14	0,03	-0,05
B	0,86	-0,30	-0,24	-0,01
Mn	0,06	0,03	-0,03	0,87
Fe	0,02	0,10	-0,10	0,86
As	-0,30	0,55	-0,06	-0,33
Sr	0,82	-0,26	0,40	0,05
F	0,05	0,69	-0,40	-0,05
Al	0,04	-0,02	-0,07	0,80
%Var	33%	17%	15%	13%
Acum	33%	50%	65%	78%

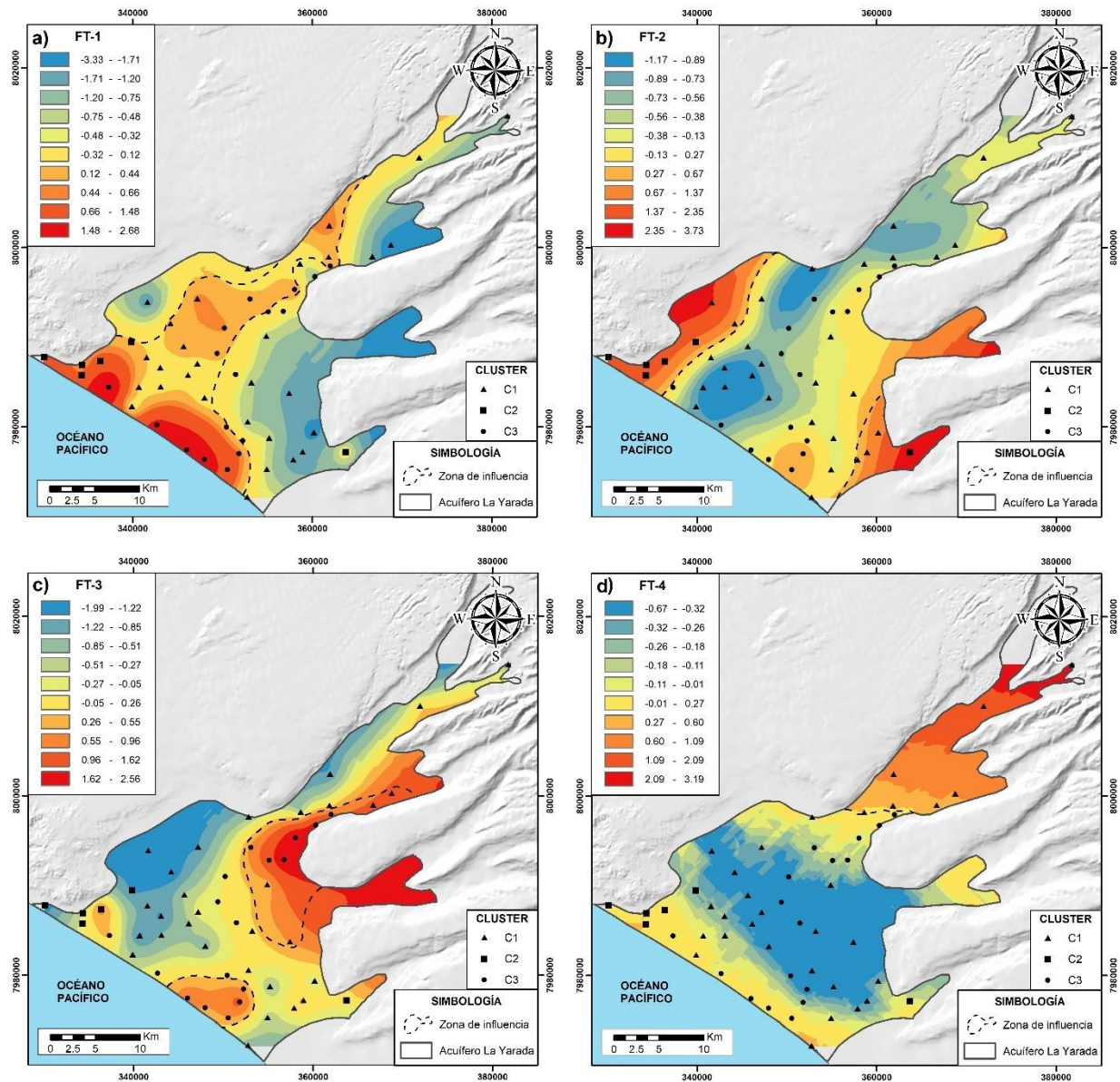
Nota. Carga factorial de cada factor, las variables representativas están de negrita.

El primer factor FT-1, explica el 33% de la varianza total y presenta una correlación positiva entre EC, TDS, Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , B y Sr, la Figura 12a muestra su

distribución espacial. Este factor contiene la mayor cantidad de elementos, todos con alta correlación con TDS y EC, estos iones serían los responsables de la salinidad del agua subterránea en el acuífero. El segundo factor FT-2 explica el 17% de la varianza total, presenta una correlación positiva entre $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, As, F y una baja correlación con pH, la Figura 12b muestra su distribución espacial, de manera similar al factor FO-3, se incluyen los isótopos $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, los cuales evidencian regiones de mezclas conservadoras de agua dulce y agua de mar, debido a la sobre explotación de pozos en la zona y al encontrarse en el borde del acuífero, donde las recargas provenientes del río Caplina son relativamente menores al no estar en la zona de lineamientos estructurales (Figura 8a). El tercer factor FT-3 explica el 15% de la varianza total, tiene una correlación positiva entre NO_3^- , HCO_3^- , Cl^- y Ca^{2+} y negativa en pH, la Figura 12c muestra su distribución espacial, de manera similar al factor FP-3. Los iones Cl^- y Ca^{2+} se incluyen en este factor, resultado del aumento de la salinidad por efecto de las aguas residuales y disolución de minerales carbonatados en la matriz cementante del suelo. El cuarto factor FT-4 explica el 13% de la varianza total, tiene una correlación positiva entre Mn, Fe y Al, la Figura 12d muestra su distribución espacial, de manera similar al factor FO-1, este representa condiciones reductoras en el agua subterránea.

Figura 12

Distribución espacial de factores utilizando iones principales, oligoelementos, propiedades físicas e isótopos estables.



Nota. a) Distribución espacial de factor FT-1, b) Distribución espacial de factor FT-2, c) Distribución espacial de factor FT-3, d) Distribución espacial de factor FT-4.

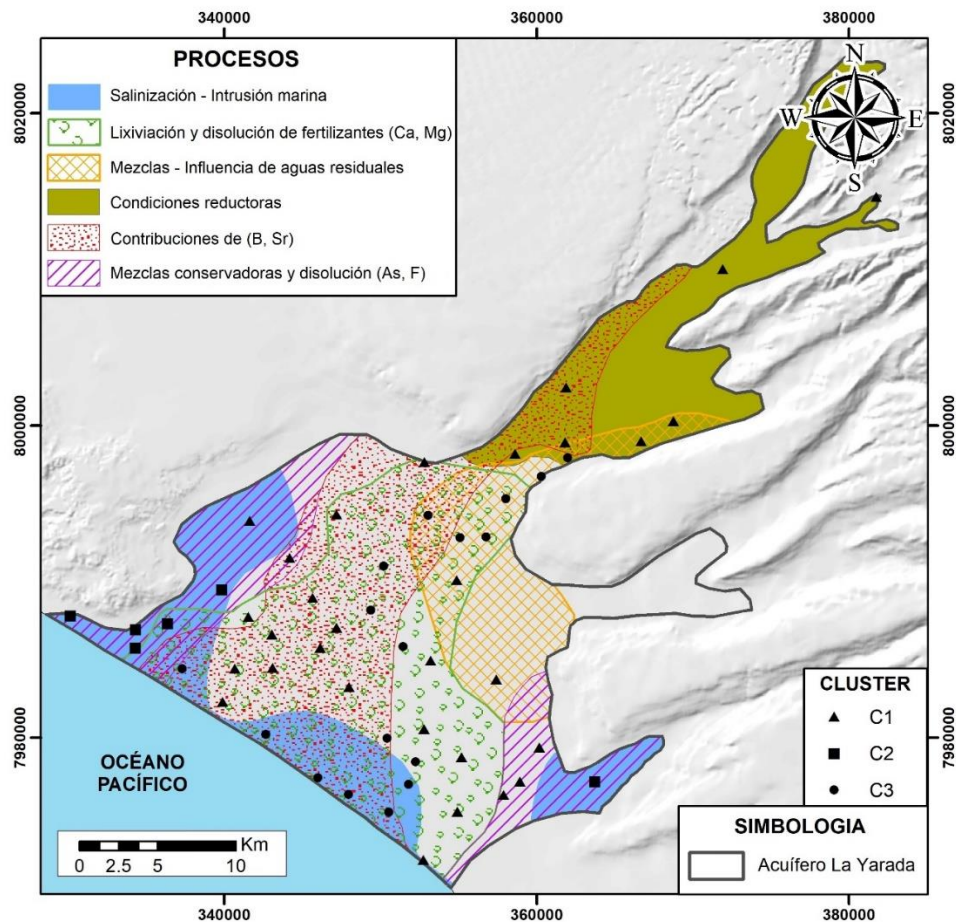
4.5. PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS

La elaboración y comparación de los tres enfoques de análisis factorial ha revelado seis procesos hidrogeoquímicos distinguibles en el acuífero y factores que los provocan (Figura 13):

i) Salinización - intrusión marina, ii) Lixiviación y disolución de fertilizantes (Ca, Mg), iii) Mezclas - Influencia de aguas residuales - Influencia de aguas residuales (NO_3^-), iv) Condiciones reductoras (Fe, Mn, Al), v) Aportes hidrotermales (B, Sr), vi) Mezclas conservadoras y disolución (As, F).

Figura 13

Procesos hidrogeoquímicos que rigen la química del agua en el acuífero La Yarada.



Nota. El contraste de áreas con los valores más altos de los tres enfoques de análisis factorial, hace posible delimitar el área de máxima influencia de los procesos hidrogeoquímicos que rigen la degradación de la calidad del agua en el acuífero La Yarada.

La intrusión de agua de mar se describe mediante el factor FP-1 (Figura 10a), abarcan el litoral y los bordes del acuífero donde invaden zonas más internas, esto sugiere dos procesos de movimiento del frente de mar y por lo tanto procesos de intercambio iónico. Esto se explica debido a que en los bordes la recarga era relativamente menor, permitiendo mezcla de agua de mar y agua dulce, a diferencia de la zona central del acuífero dominada por lineamientos estructurales geológicos, recibe mayor recarga evitando la mezcla de agua de mar y agua dulce, sin embargo, las especies químicas migran del agua de mar al agua subterránea por procesos de difusión e intercambio iónico inverso (Na^+ por Ca^{2+}) (Figura 8a). La lixiviación de fertilizantes agrícolas y disolución de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} se describe mediante el factor FP-2 (Figura 10b), este proceso principalmente abarca casi todo el sector del distrito La Yarada-Los Palos, dominada por la agricultura. La influencia de aguas residuales descritas en el factor FP-3 (Figura 10c), en esta zona se encuentran las plantas de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Tacna (Magollo y Copare), las cuales serían las principales responsables, las concentraciones de NO_3^- en el agua subterránea no superan los límites de calidad para el consumo humano (Tabla 5), indicando que no presentan un riesgo para la salud, pero se deben tomar medidas preventivas. Las condiciones reductoras descritas en el factor FO-1 (Figura 11a), evidenciadas por el largo recorrido del agua en el subsuelo y la profundidad en la que se encuentra, empobreciendo de oxígeno las aguas subterráneas de acuífero. Los aportes hidrotermales (B, Sr) descritas en el factor FO-2 (Figura 11b), provenientes del río Caplina y la actividad volcánica en la naciente de su cuenca. Las mezclas conservadoras y disolución (As, F) descritas en el factor FO-3 (Figura 11c), esta zona evidencia un origen meteórico local por disolución de feldespatos y biotita al contacto con soluciones provenientes de la mezcla conservadora entre agua de mar y agua dulce con largos periodos de residencia.

4.6. CALIDAD DE AGUA PARA USO POTABLE

Para evaluar la calidad de agua potable y la idoneidad para beber, se utilizó el índice de calidad de agua (WQI) (Horton, 1965), que combina los efectos de los parámetros individuales en comparación de límites estándar propuestos por el MINSA (Anexo 3). Las concentraciones de HCO_3^- , K^+ y Sr no se incluyeron en este cálculo porque no tienen un límite prescrito por el MINSA. A los parámetros TDS, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , B, As y F se asigna un peso (w_i) valor 5 que es el de mayor peso debido a su mayor impacto en la calidad del agua (Krishnakumar et al., 2014). El pH que tienen un papel relativamente menor en la calidad del agua, recibiendo un peso mínimo de 1 (Kumar et al., 2014). A los parámetros restantes se les asignó un peso que varía entre 1 y 5. Para el cálculo del peso relativo (W_i) se utilizó la ecuación 2, que es la relación entre el peso asignado y el peso total. El peso asignado (w_i), el peso relativo calculado (W_i) y el límite prescrito por el MINSA para los parámetros de calidad se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9

Pesos asignados para los parámetros de calidad

Parámetros de calidad del agua	Límite permisible MINSA	w_i (Peso asignado)	W_i (Peso relativo)
pH	6,5 – 8,5	1	0,02
TDS	1000	5	0,09
Cl^-	250	5	0,09
SO_4^{2-}	250	5	0,09
NO_3^-	50	5	0,09
Ca^{2+}	200	3	0,06
Mg^{2+}	150	3	0,06
Na^+	200	4	0,08
B	1,5	5	0,09
Mn	0,4	2	0,04
Fe	0,3	2	0,04
As	0,01	5	0,09
F	1,0	5	0,09
Al	0,2	3	0,06

Nota. Todas las unidades de los límites permisibles en mg/L, excepto EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH en valor numérico.

Seguidamente se calculó una escala de calificación de calidad (q_i) para cada parámetro en cada muestra de agua utilizando la ecuación 4. Se calculó el subíndice de calidad del agua (SI_i) utilizando la ecuación 5 y al final sumó todos los subíndices de calidad del agua para obtener el WQI de cada muestra (Tabla 10).

Tabla 10

Índice de calidad de agua WQI

Pozo	Este	Norte	WQI
FP-03	381730	8014614	79,87
FP-06	343047	7986588	55,75
FP-07	347170	7994281	67,38
FP-08	350194	7990989	76,87
FP-09	350529	7975218	142,22
FP-10	349383	7988153	73,82
FP-11	344185	7991485	60,60
FP-12	337297	7984403	250,15
FP-13	340667	7984406	59,45
FP-14	339838	7989476	86,00
FP-15	336381	7987320	130,57
FP-16	341530	7987724	54,98
FP-17	342674	7980202	140,72
FP-18	343096	7984441	59,53
FP-19	347963	7976350	175,00
FP-20	350438	7979951	71,11
FP-21	352795	7980527	51,14
FP-22	351444	7985835	64,21
FP-23	347989	7983230	58,92
FP-24	361812	7998903	73,40
FP-25	355193	7978726	52,24
FP-26	352241	7978450	62,56
FP-27	371913	8010000	62,44
FP-28	360296	7996726	59,99
FP-29	347178	7987018	71,22
FP-30	358615	7998174	62,28
FP-31	356773	7992858	89,37
FP-32	361999	7997930	99,18
FP-33	358026	7995292	123,40
FP-34	354884	7990073	55,89

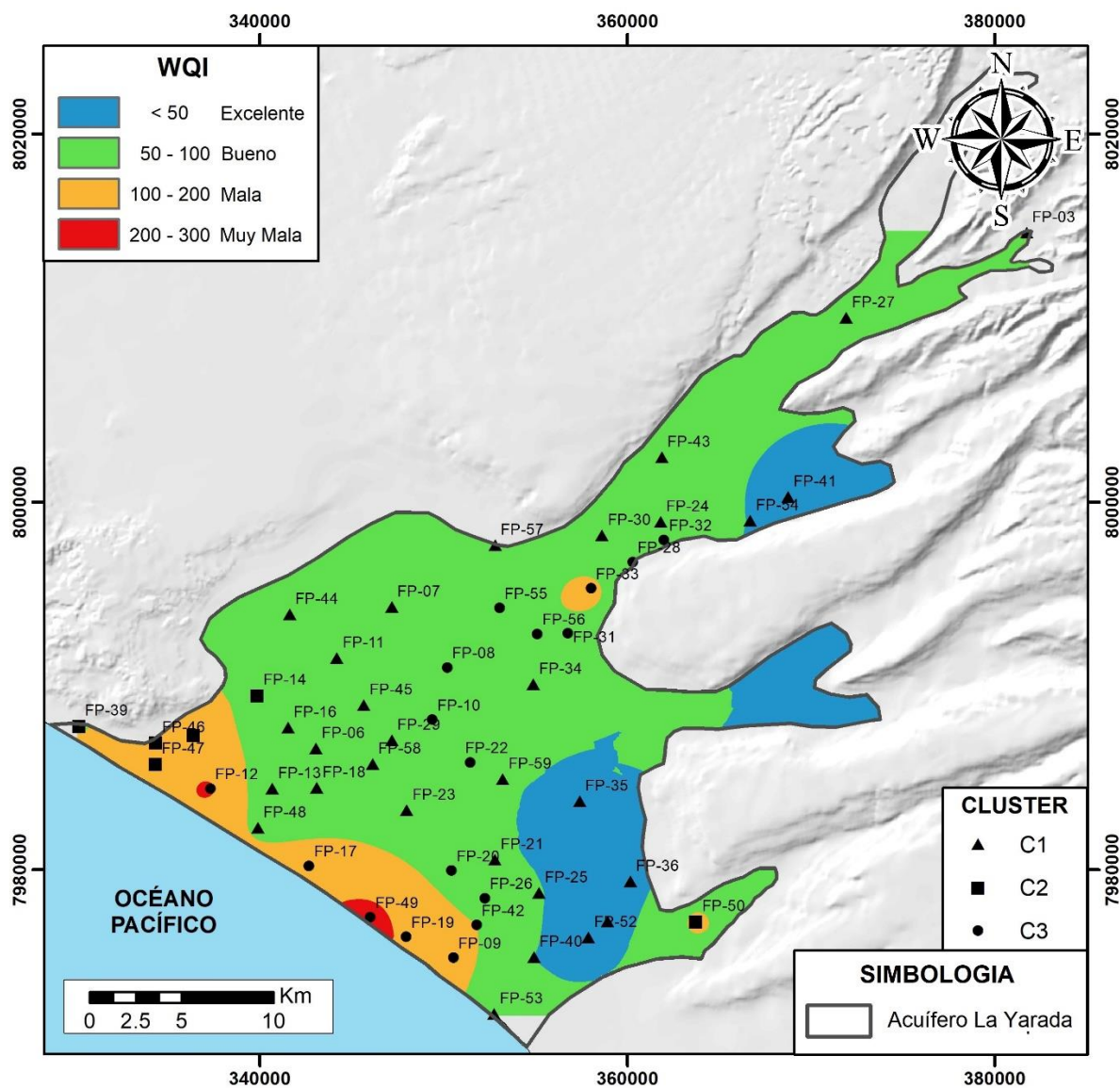
FP-35	357405	7983703	42,51
FP-36	360166	7979355	35,83
FP-39	330136	7987815	88,79
FP-40	354918	7975230	48,24
FP-41	368746	8000262	26,39
FP-42	351795	7976992	105,04
FP-43	361873	8002405	103,22
FP-44	341616	7993865	76,72
FP-45	345653	7988933	70,90
FP-46	334331	7986913	166,13
FP-47	334304	7985737	127,07
FP-48	339876	7982263	79,81
FP-49	346007	7977413	275,15
FP-50	363732	7977184	127,38
FP-51	358916	7977165	35,52
FP-52	357882	7976313	36,93
FP-53	352744	7972141	58,55
FP-54	366686	7998964	49,15
FP-55	353047	7994226	81,61
FP-56	355106	7992819	91,28
FP-57	352804	7997640	68,50
FP-58	346132	7985735	62,81
FP-59	353216	7984924	50,65

Nota. Índices de calidad de agua WQI con fines de uso potable.

La distribución espacial de estos índices se muestra en la Figura 14. Según los valores de WQI, la calidad de agua para consumo humano se puede clasificar en diferentes clases, como excelente (< 50), buena (50 – 100), mala (100 – 200), muy mala (200 – 300) e inadecuada (> 300) (Sahu & Sikdar, 2007).

Figura 14

Distribución espacial de la calidad de agua para consumo humano.



Nota. Con los valores de WQI calculados según los límites permitidos del MINSA, fue posible delimitar y clasificar las zonas según su calidad para el consumo humano.

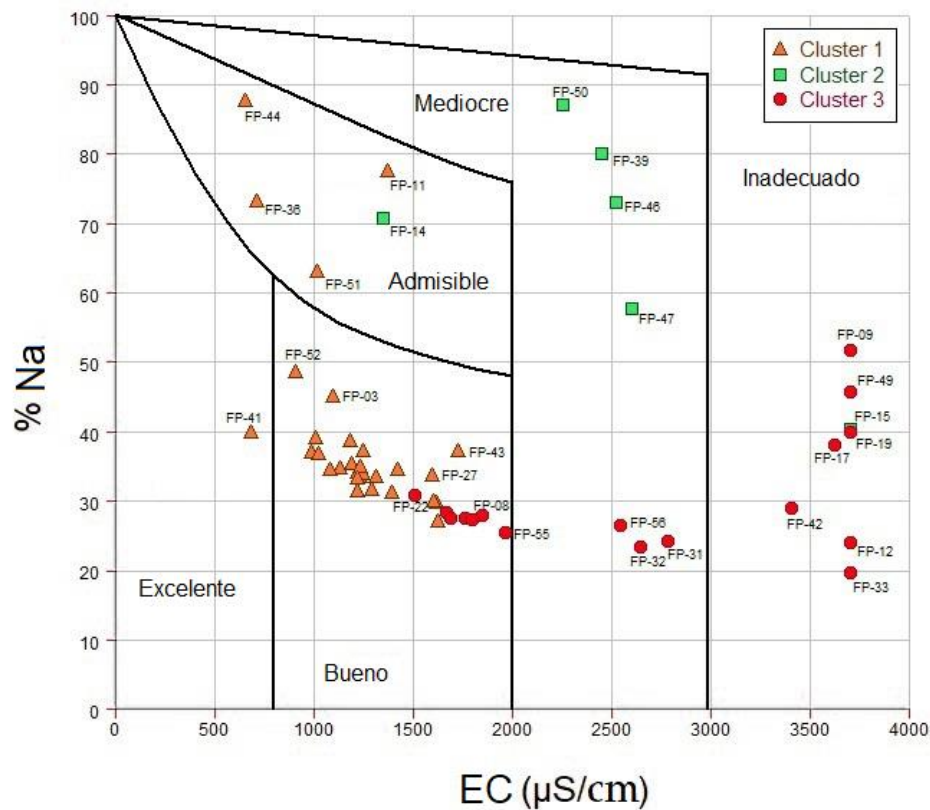
Los valores obtenidos oscilan entre las clases excelentes y muy malas. Casi todos los pozos ubicados en el interior del acuífero se encuentran clasificados como “buena”, la parte sureste del acuífero, los pozos son clasificados como “excelentes” para el consumo humano, estas son seguras para el consumo directo. Las zonas cercanas al litoral, están clasificadas como “malas” y “muy malas” para el consumo, y no deberían ser utilizadas para beber sin algún tratamiento previo, de lo contrario se podría presentar varios problemas a la salud. Estas zonas no aptas para el consumo directo, resultaron a consecuencia de la combinación de procesos naturales (interacción del agua con el medio geológico) y antropogénicos (agricultura irrigada, aguas residuales y sobreexplotación de pozos que produce intrusión de agua de mar).

4.7. CALIDAD DE AGUA PARA FINES DE RIEGO

Para evaluar la calidad e idoneidad de agua para fines de riego, se utilizó el diagrama de Wilcox, que utiliza el porcentaje de sodio (%Na) y clasifica el agua en diferentes categorías (excelente, buena, admisible, mediocre e inadecuado) para uso de riego (Wilcox, 1955), las muestras recolectadas de pozos de agua subterráneas se distribuyen en todas las clases de riego, mostrado en la Figura 15.

Figura 15

Clasificación del agua con fines de riego.



Nota. Con el diagrama de Wilcox, fue posible clasificar los pozos según la calidad e idoneidad de agua para fines de riego.

Todos los pozos pertenecientes al clúster 1 y algunos del clúster 2 y 3 pertenecen a la categoría excelente, buena y admisible para el riego, estas pueden ser utilizadas con normalidad. Todos los pozos del clúster 2 y algunos pertenecientes al clúster 3 pertenecen a la categoría mediocre, y pueden ser utilizadas para riego en ausencia de fuentes de agua alternativas. La mayoría de los pozos del clúster 3, ubicados cerca al litoral no son aptas para fines de riego. La degradación de la calidad del agua de riego se debe al aumento de sodio y la salinidad, esto también se ha observado en otras partes del mundo (Brindha et al., 2016; Nematollahi et al., 2016; Ismail et al., 2019).

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se caracterizó el acuífero La Yarada e identificó los procesos hidrogeoquímicos que gobiernan en el área de estudio y factores que lo producen: i) salinización – intrusión marina, ii) Lixiviación de fertilizantes y disolución (Ca^{2+} , Mg^{2+}), iii) Mezclas - Influencia de aguas residuales (NO_3^-), iv) Condiciones reductoras (Fe, Mn, Al), v) Contribuciones hidrotermales (B, Sr), vi) Mezclas conservadoras y disolución (As, F).
- Se determinó que influencia de la interacción agua – roca controla principalmente la movilidad de los elementos traza, provenientes de la actividad hidrotermal en la cabecera de la cuenca Caplina, en la llanura costera donde la profundidad del agua subterránea es menor, produce la precipitación de Fe y Al, estos iones reemplazan al silicio en la estructura de las arcillas, que junto al descenso del pH, crean un escenario favorable para la adsorción del As.
- Se determinó que la influencia de los mecanismos de mezcla de agua dulce y agua de mar es dominante, sin embargo, la migración de especies químicas a lo largo de la línea de costa es distinta, produciéndose en los bordes del acuífero mezcla isotópica conservadora y en el centro procesos de difusión química, los cuales son controlados por la cantidad de pozos de explotación, el carácter litológico variable de muchos materiales (gravas arenosas, arenas limosas y arcillosas) que producen reacciones de intercambio iónico inverso y directo y las fallas en el subsuelo que controlan las direcciones de flujo subterráneo.
- Se determinó que la influencia de efectos antropogénicos como mezclas con aguas residuales por riego en la superficie y riego con aguas de subsuelo, altera la química del acuífero al lixiviar fertilizantes e infiltrarse, produciendo a la vez disminución del

ph y disolución de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} presentes en material cementante en los depósitos aluviales.

- Se evidenció distintas facies hidrogeoquímicas asociadas a las direcciones de flujo y recarga regidas por los lineamientos estructurales, favoreciendo unas zonas más que otras, agrupando las muestras en tres conglomerados (C1, C2 y C3) según su similitud: (i) C1 aguas menos mineralizadas, con poca influencia de procesos hidrogeoquímicos, (ii) aguas C2 afectadas por intrusión marina con recargas bajas, (iii) aguas C3 afectadas por intrusión marina y otras mezclas con recargas altas.
- Se evaluó la idoneidad de la calidad del agua para uso potable en el acuífero y se validó con los índices (WQI), que las zonas cercanas a la costa son “malas” a “muy malas” para el consumo humano, por lo tanto, no deberían ser utilizadas para beber sin algún tratamiento previo, de lo contrario podría presentarse problemas de salud.
- Se evaluó la idoneidad de la calidad del agua con fines de riego en el acuífero y se validó con el diagrama de Wilcox, que las zonas cercanas a la costa son inadecuadas para el riego, esto se debe al aumento de sodio y la salinidad.
- La degradación de la calidad del agua, tanto para consumo humano como para fines de riego, resultaron a consecuencia de la combinación de procesos naturales, como la interacción del agua con el medio geológico y antropogénicos como la agricultura irrigada, aguas residuales y sobreexplotación de pozos que produce intrusión de agua de mar, siendo ésta última la que mayor impacto tiene sobre la calidad.
- Los resultados de este estudio son útiles, ya que reducen la subjetividad al analizar muchos parámetros y permiten distinguir entre fuentes de contaminación antropogénicas y geogénicas, ayudando a contribuir en la gestión y desarrollo del recurso hídrico en la región Tacna.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda a la entidad pública Autoridad Nacional de Agua, realizar análisis de diferentes trazadores geoquímicos e isotópicos, para dilucidar el origen de la salinidad y la contaminación por boro.
- Se recomienda a la entidad pública Autoridad Nacional de Agua, junto al Proyecto Especial Tacna, tomar medidas preventivas en las zonas influenciadas por aguas residuales, con la finalidad de desarrollar una adecuada gestión ambiental.
- Se recomienda a la entidad pública Autoridad Nacional de Agua, junto al Proyecto Especial Tacna, tomar medidas correctoras en las zonas clasificadas como malas a muy malas para el consumo, de la misma forma para zonas con aguas no adecuadas.

BIBLIOGRAFIA

- Abu Al Naeem, M. F., Yusoff, I., Ng, T. F., Maity, J. P., Alias, Y., May, R., & Alborsh, H. (2019). A study on the impact of anthropogenic and geogenic factors on groundwater salinization and seawater intrusion in Gaza coastal aquifer, Palestine: An integrated multi-techniques approach. *Journal of African Earth Sciences*, 156, 75–93. <https://doi.org/10.1016/J.JAFREARSCI.2019.05.006>
- Acosta, H., Alván-De la Cruz, A. A., Cutipa-Cornejo, M., Mamani-Huisa, M. I., & Rodríguez-Manrique, J. P. (2012). Geología de los cuadrángulos de La Yarada, Tacna y Huaylillas, hojas 37-u, 37-v y 37-x, escala 1: 50,000 – [Boletín A 145]. In *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET*: Lima, Perú.
- Adams, J. (1906). Caudal, procedencia y distribución de aguas en los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna. In *Repositorio Institucional INGEMMET*. Cuerpo de Ingenieros de Minas del Perú. Lima, Perú.
- Agoubi, B., Kharroubi, A., & Abida, H. (2013). Saltwater intrusion modelling in Jorf coastal aquifer, South-eastern Tunisia: Geochemical, geoelectrical and geostatistical application. *Hydrological Processes*, 27(8), 1191–1199. <https://doi.org/10.1002/HYP.9207>
- Alván, A. A., Bustamante, Y. F., Sánchez, E. A., & Mamani, M. I. (2020). Arquitectura estratigráfica, paleogeografía y proveniencia sedimentaria de las rocas cenozoicas del sur de Perú (Tacna, 18° S). *Andean Geology*, 47(2), 351–383. <https://doi.org/10.5027/ANDGEOV47N2-3168>
- ANA. (2010). Estudio de la caracterización hidrogeoquímica del acuífero Caplina. *Autoridad Nacional del Agua*. Autoridad Nacional del Agua. Lima, Perú. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3578>
- Bassett, R. L., Buszka, P. M., Davidson, G. R., & Chong-Diaz, D. (1995). Identification of Groundwater Solute Sources Using Boron Isotopic Composition. *Environmental Science and*

- Technology*, 29(12), 2915–2922. <https://doi.org/10.1021/ES00012A005>
- Böhlke, J. K. (2002). Groundwater recharge and agricultural contamination. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 153–179. <https://doi.org/10.1007/S10040-001-0183-3>
- Bouderbala, A. (2015). Groundwater salinization in semi-arid zones: an example from Nador plain (Tipaza, Algeria). *Environmental Earth Sciences*, 73(9), 5479–5496. <https://doi.org/10.1007/S12665-014-3801-9>
- Bouzidi, A., Ararem, A., Imessaoudene, D., & Yabrir, B. (2015). Sequential extraction of Cs and Sr from Ain Oussera soils around Es-Salam research reactor facility. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 36, 163–172. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2015.05.014>
- Brindha, K., Pavelic, P., Sotoukee, T., Douangsavanh, S., & Elango, L. (2016). Geochemical Characteristics and Groundwater Quality in the Vientiane Plain, Laos. *Exposure and Health* 2016 9:2, 9(2), 89–104. <https://doi.org/10.1007/S12403-016-0224-8>
- Brown, T. (2015). *Confirmatory for Analysis for Applied Research*. The Guilford Press.
- Bundschuh, J., Farias, B., Martin, R., Storniolo, A., Bhattacharya, P., Cortes, J., Bonorino, G., & Albouy, R. (2004). Groundwater arsenic in the Chaco-Pampean Plain, Argentina: case study from Robles county, Santiago del Estero Province. *Applied Geochemistry*, 19(2), 231–243. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOCHEM.2003.09.009>
- Bustamante, Y. F. (2017). Procedencia sedimentaria de depósitos cenozoicos en base a análisis de minerales pesados en Pachia (36v) y Tacna (37v), Tacna. *Universidad Nacional de Cajamarca*. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/1416>
- Carol, E. S., & Kruse, E. E. (2012). Hydrochemical characterization of the water resources in the coastal environments of the outer Río de la Plata estuary, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 37, 113–121. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2012.02.009>
- Cauna, C. (2020). Sistema de tratamiento de aguas residuales del sector Arunta para reúso de áreas verdes de la provincia de Tacna. *Universidad Nacional de San Agustín*. <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12773/11366/IScaquce.pdf>

- Chaudhuri, S., & Ale, S. (2014). Long term (1960-2010) trends in groundwater contamination and salinization in the Ogallala aquifer in Texas. *Journal of Hydrology*, 513, 376–390. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2014.03.033>
- Cruz, V. (2016). Recursos geotérmicos promisorios en área de conservación regional: caso Vilacota Maure, Región Tacna. *Congreso Peruano de Geología*, 18, 4. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2642>
- Cruz, V., Flores, R., & Velarde, Y. (2020). Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de la zona geotermal Casiri-Kallapuma, región Tacna . *INGEMMET, Boletín Serie B: Geología Económica*, 69, 315. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2801>
- Cuadras, C. M. (2014). *Nuevos métodos de análisis multivariante*. CMC Editions.
- Dalton, M. G., & Upchurch, S. B. (1978). Interpretation of Hydrochemical Facies by Factor Analysis. *Groundwater*, 16(4), 228–233. <https://doi.org/10.1111/J.1745-6584.1978.TB03229.X>
- Davis, J. (1986). Statistics and Data Analysis in Geology. *John Wiley & Sons*. Nueva Jersey, EE.UU., (1), 522.
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1997). Physical and Chemical Hydrogeology. *Wiley-Blackwell*. Nueva Jersey, EE.UU., (2), 522.
- Farrag, A. A., Ibrahim, H. A., El-Hussaini, A. H., & Kader, A. A. (2005). Geophysical and hydrogeological tools for groundwater exploration and evaluation in the area around idfu-marsa alam road eastern desert, Egypt. *Assiut University Bulletin for Environmental Researches*, 8.1(8.1), 67–86. <https://doi.org/10.21608/AUBER.2005.150302>
- Flores, A., & Sempere, T. (2002). Avances sobre la historia geológica del valle de Tacna. *Sociedad Geológica Del Perú*.
- Fryar, A., Mullican, W., & Macko, S. (2001). Groundwater recharge and chemical evolution in the southern High Plains of Texas, USA. *HydJ*, 9(6), 522–542. <https://doi.org/10.1007/S10040-001-0161-9>

- García, E., Gil, I., & Rodríguez, G. (2000). Análisis factorial (Cuadernos de estadística). *La Muralla*. España. (1), 128 .
- Gonzales, H. (2016). Modelo sostenible de infraestructura zoológica-botánica para mejorar las condiciones de habitabilidad animal en el parque zoológico del bosque municipal de Tacna *Universida Nacional JorgeBasadre*. Tacna, Perú.
<http://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/3055>
- Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for natural reources evaluation. In *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press; Applied Geostatistics Series.
https://books.google.com/books/about/Geostatistics_for_Natural_Resources_Eval.html?hl=es&id=CW-7tHAaVR0C
- Güler, C., Thyne, G. D., McCray, J. E., & Turner, K. A. (2002). Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal* 2002 10:4, 10(4), 455–474. <https://doi.org/10.1007/S10040-002-0196-6>
- Hair, J. F., Anderson, R. E., Latham, R. L., & Black, W. C. (1999). Análisis multivariante. *Prentice Hall Iberia* . España, (5), 286.
- Hernández, D., Espinosa, J., Peñaloza, M., Rodriguez, J., Chacón, J., Toloza, C., Arenas, M., Carrillo, S., & Bermúdez, V. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos Venezolanos de Farmocología y Terapéutica*, 37. <https://orcid.org/0000-0003->
- Hiscock, K. M., & Bense, V. F. (2014). Hydrogeology : Principles and practice. *Wiley-Blackwell*. Nueva Jersey, EE.UU., (2), 522.
- Horton, R. K. (1965). An Index Number System for Rating Water Quality. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 37(3), 300–306.
- Huang, G., Liu, C., Sun, J., Zhang, M., Jing, J., & Li, L. (2018). A regional scale investigation on factors controlling the groundwater chemistry of various aquifers in a rapidly urbanized area: A case study of the Pearl River Delta. *Science of The Total Environment*, 625, 510–518.

<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.12.322>

- Ismail, A. H., Shareef, M. A., & Alatar, F. M. (2019). Hydrochemistry of Groundwater and its Suitability for Drinking and Irrigation in Baghdad, Iraq. *Environmental Processes* 2019 6:2, 6(2), 543–560. <https://doi.org/10.1007/S40710-019-00374-X>
- Jabal, M. S. A., Abustan, I., Rozaimy, M. R., & El Najar, H. (2015). Groundwater beneath the urban area of Khan Younis City, southern Gaza Strip (Palestine): hydrochemistry and water quality. *Arabian Journal of Geosciences*, 4(8), 2203–2215. <https://doi.org/10.1007/S12517-014-1346-6>
- Jaén, H., & Ortiz, G. (1963). Geología de los cuadrángulos de La Yarada y Tacna (Hojas 37-u y 37-v) - [Boletín A 6]. In *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET*. Comisión Carta Geológica Nacional. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/136>
- Kaiser, H. F. (1958). The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika* 1958 23:3, 23(3), 187–200. <https://doi.org/10.1007/BF02289233>
- Kazakis, N., Kantiranis, N., Kalaitzidou, K., Kaprara, M., Mitrakas, M., Frei, R., Vargemezis, G., Tsourlos, P., Zouboulis, A., & Filippidis, A. (2017). Origin of hexavalent chromium in groundwater: The example of Sarigkiol Basin, Northern Greece. *Science of The Total Environment*, 593–594, 552–566. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.03.128>
- Krishnakumar, P., Lakshumanan, C., Kishore, V. P., Sundararajan, M., Santhiya, G., & Chidambaram, S. (2014). Assessment of groundwater quality in and around Vedaraniyam, South India. *Environmental Earth Sciences*, 71(5), 2211–2225. <https://doi.org/10.1007/S12665-013-2626-2>
- Kumar, P. J., Elango, L., & James, E. J. (2014). Assessment of hydrochemistry and groundwater quality in the coastal area of South Chennai, India. *Arabian Journal of Geosciences* 2013 7:7, 7(7), 2641–2653. <https://doi.org/10.1007/S12517-013-0940-3>
- Liao, F., Wang, G., Shi, Z., Huang, X., Xu, F., Xu, Q., & Guo, L. (2018). Distributions, Sources, and Species of Heavy Metals/Trace Elements in Shallow Groundwater Around the Poyang

- Lake, East China. *Exposure and Health*, 10(4), 211–227. <https://doi.org/10.1007/S12403-017-0256-8>
- Locsey, K. L., & Cox, M. E. (2003). Statistical and hydrochemical methods to compare basalt- and basement rock-hosted groundwaters: Atherton Tablelands, north-eastern Australia. *Environmental Geology*, 43(6), 698–713. <https://doi.org/10.1007/S00254-002-0667-Z>
- Machiwal, D., Cloutier, V., Güler, C., & Kazakis, N. (2018). A review of GIS-integrated statistical techniques for groundwater quality evaluation and protection. *Environmental Earth Sciences*, 77(19). <https://doi.org/10.1007/S12665-018-7872-X>
- Machiwal, D., & Jha, M. K. (2015). Identifying sources of groundwater contamination in a hard-rock aquifer system using multivariate statistical analyses and GIS-based geostatistical modeling techniques. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 80–110. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2014.11.005>
- Małecki, J. J., Kadzikiewicz-Schoeneich, M., Eckstein, Y., Szostakiewicz-Hołownia, M., & Gruszczyński, T. (2017). Mobility of copper and zinc in near-surface groundwater as a function of the hypergenic zone lithology at the Kampinos National Park (Central Poland). *Undefined*, 76(7). <https://doi.org/10.1007/S12665-017-6527-7>
- Mamani, M., Wörner, G., & Sempere, T. (2010). Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. *GSA Bulletin*, 122(1–2), 162–182. <https://doi.org/10.1130/B26538.1>
- Marghade, D., Malpe, D. B., & Zade, A. B. (2012). Major ion chemistry of shallow groundwater of a fast growing city of Central India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(4), 2405–2418. <https://doi.org/10.1007/S10661-011-2126-3>
- Marocco, R., Delfaud, J., & Lavenue, A. (1985). Ambiente deposicional de una cuenca continental intramontaña andina: el Grupo Moquegua (Sur del Perú). *Sociedad Geológica Del Perú*.
- Martínez-Ríos, C., Vargas-Huamán, R., Montoya-Mendoza, J., Chamorro-Bellido, C., Zenteno-Tupíño, E., Ascue-Contreras, C., Vigil-Deza, L., & Fernández-Alvarado, F. (1996). Estudio

- hidrogeológico de las pampas de La Yarada y Hospicio - Tacna. *Repositorio Institucional - ANA*. INRENA. Perú. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4314>
- Masoud, A. A., El-Horiny, M. M., Atwia, M. G., Gemail, K. S., & Koike, K. (2018). Assessment of groundwater and soil quality degradation using multivariate and geostatistical analyses, Dakhla Oasis, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 142, 64–81. <https://doi.org/10.1016/J.JAFREARSCI.2018.03.009>
- Milovanovic, M. (2007). Water quality assessment and determination of pollution sources along the Axios/Vardar River, Southeastern Europe. *Desalination*, 213(1–3), 159–173. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2006.06.022>
- MINSA. (2011). Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. *MINSA*. Perú.
- Monjerezi, M. (2012). *Groundwater salinity in lower Shire River valley (Malawi) - Hydro-geochemical constraints on sources and evolution* [University of Oslo, Norway]. https://www.mn.uio.no/kjemi/english/research/groups/environmental-science/environmental-chemistry/previous-phd-theses/PhD_thesis_monjerezi.pdf
- Morelli, G., Rimondi, V., Benvenuti, M., Medas, D., Costagliola, P., & Gasparon, M. (2017). Experimental simulation of arsenic desorption from Quaternary aquifer sediments following sea water intrusion. *Applied Geochemistry*, 87, 176–187. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOCHEM.2017.10.024>
- Nair, I. S., Rajaveni, S. P., Schneider, M., & Elango, L. (2015). Geochemical and isotopic signatures for the identification of seawater intrusion in an alluvial aquifer. *Journal of Earth System Science*, 124(6), 1281–1291. <https://doi.org/10.1007/S12040-015-0600-Y>
- Narvaez-Montoya, C., Torres-Martínez, J. A., Pino, E., Cabrera-Olivera, F., Loge, F. J., & Mahlnecht, J. (2021). Predicting adverse scenarios for a transboundary coastal aquifer system in the Atacama Desert (Peru/Chile). *Science of The Total Environment*, 806, 150386. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.150386>
- Nematollahi, M. J., Ebrahimi, P., & Ebrahimi, M. (2016). Evaluating Hydrogeochemical Processes

- Regulating Groundwater Quality in an Unconfined Aquifer. *Environmental Processes* 2016 3:4, 3(4), 1021–1043. <https://doi.org/10.1007/S40710-016-0192-9>
- Nicolli, H. B., Tineo, A., Falcón, C. M., & García, J. W. (2001). *Distribución del arsénico y otros elementos asociados en aguas subterráneas de la región de Los Pereyra. Provincia de Tucumán, Argentina.*
- Ortega-Guerrero, M. A. (2009). Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(1), 143–161. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742009000100012
- Peña-Laureano, F., Cotrina-Chávez, G. J., & 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>
- Peña, D. (2002). Análisis de Datos Multivariantes. *Universidad Carlos III de Madrid*. https://www.researchgate.net/publication/40944325_Analisis_de_Datos_Multivariantes
- PET. (2004). Estudio hidrogeológico de las pampas de La Yarada y Hospicio. *PET*, Tacna, Perú.
- PET. (2007). Análisis de la línea base geofísica: Informe de avance noviembre, estudios litoestratigráficos. *PET*, Tacna, Perú.
- Pino, 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, E., Chávarri, E., & Ramos, L. (2018). Governability and governance crisis its implications in the inadequate use of groundwater, case coastal aquifer of La Yarada, Tacna, Perú. *Idesia (Arica)*, 36(3), 77–85. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018005001301>
- Pino, E., & Coarita, F. (2018). Caracterización hidrogeológica para determinar el deterioro de la calidad del agua en el acuífero la yarada media. *Revista de Investigaciones Altoandinas*,

- 20(4), 477–490. <https://doi.org/10.18271/RIA.2018.424>
- Pino, E., Ramos F., L., Mejía M., J., Chávarri V., E., & 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, E., Ramos, L., Avalos, O., Tacora, P., Chávarri, E., Angulo, O., Ascencios, D., & 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., & 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*, 8(6), 77–99. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2017-06-06>
- Pulido-Leboeuf, P. (2004). Seawater intrusion and associated processes in a small coastal complex aquifer (Castell de Ferro, Spain). *Applied Geochemistry*, 19(10), 1517–1527. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOCHEM.2004.02.004>
- Redwan, M., & Moneim, A. A. (2016). Factors controlling groundwater hydrogeochemistry in the area west of Tahta, Sohag, Upper Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 118, 328–338. <https://doi.org/10.1016/J.JAFREARSCI.2015.10.002>
- Rojas-Rubio, H. A. (2008). Modelamiento para el análisis de la variación hidrogeológica espacial del acuífero la Yarada - Tacna [Universidad Nacional de Ingeniería]. In *Universidad Nacional de Ingeniería*. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/539>
- Rossi, R. E., Mulla, D. J., Journel, A. G., & Franz, E. H. (1992). Geostatistical Tools for Modeling and Interpreting Ecological Spatial Dependence. *Ecological Monographs*, 62(2), 277–314. <https://doi.org/10.2307/2937096>
- Sahu, P., & Sikdar, P. K. (2007). Hydrochemical framework of the aquifer in and around East Kolkata Wetlands, West Bengal, India. *Environmental Geology* 2007 55:4, 55(4), 823–835.

<https://doi.org/10.1007/S00254-007-1034-X>

- Salomon, H. (2013). *Application of multivariate statistics and Geographic Information Systems (GIS) to map groundwater quality in the Beaufort West area, Western Cape, South Africa* [UWC]. <http://etd.uwc.ac.za/xmlui/handle/11394/3069>
- Shotyk, W., Krachler, M., Aeschbach-Hertig, W., Hillier, S., & Zheng, J. (2010). Trace elements in recent groundwater of an artesian flow system and comparison with snow: Enrichments, depletions, and chemical evolution of the water. *Journal of Environmental Monitoring*, 12(1), 208–217. <https://doi.org/10.1039/B909723F>
- Sivan, O., Yechieli, Y., Herut, B., & Lazar, B. (2005). Geochemical evolution and timescale of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3), 579–592. <https://doi.org/10.1016/J.GCA.2004.07.023>
- Slama, F., & Bouhlila, R. (2017). Multivariate statistical analysis and hydrogeochemical modelling of seawater-freshwater mixing along selected flow paths: Case of Korba coastal aquifer Tunisia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 198, 636–647. <https://doi.org/10.1016/J.ECSS.2016.10.005>
- Steinmann, S. (1929). Geologie von Peru. In Carl Winters (Ed.), *Science* (Vol. 70, Issue 1804).
- Tóth, J. (1999). Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal* 1999 7:1, 7(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/S100400050176>
- Vargas, V., & Cruz, V. (2010). Geothermal Map of Perú. *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia*, 7. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2079>
- Vargas, V., Cruz, V., Antayhua, Y., Rivera, M., Chirif, H., & West, J. (2012). Estudio geotérmico del campo Borateras. *INGEMMET. Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, 47, 74. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/287>
- Vengosh, A., Kloppmann, W., Marei, A., Livshitz, Y., Gutierrez, A., Banna, M., Guerrot, C., Pankratov, I., Raanan, H., Marei, A., Livshitz, Y., Gutierrez, A., Banna, M., Guerrot, C.,

- Pankratov, I., & Raanan, H. (2005). Sources of salinity and boron in the Gaza strip: Natural contaminant flow in the southern Mediterranean coastal aquifer. *Water Resources Research*, 41(1), 1–19. <https://doi.org/10.1029/2004WR003344>
- Vera, A., Pino, E., Verma, M. P., Chucuya, S., Chávarri, E., Canales, M., Torres-Martínez, J. A., Mora, A., & Mahlknecht, 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, Peru. *Water* 2021, Vol. 13, Page 3161, 13(22), 3161. <https://doi.org/10.3390/W13223161>
- Vivona, R., Preziosi, E., Madé, B., & Giuliano, G. (2007). Occurrence of minor toxic elements in volcanic-sedimentary aquifers: a case study in central Italy. *HydJ*, 15(6), 1183–1196. <https://doi.org/10.1007/S10040-007-0169-X>
- Wang, G., & Um, W. (2013). Facilitated strontium transport by remobilization of strontium-containing secondary precipitates in Hanford Site subsurface. *Journal of Hazardous Materials*, 248–249(1), 364–370. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2013.01.021>
- Wang, H., Jiang, X. W., Wan, L., Han, G., & Guo, H. (2015). Hydrogeochemical characterization of groundwater flow systems in the discharge area of a river basin. *Journal of Hydrology*, 527, 433–441. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2015.04.063>
- Ward, J. H. (1963). Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. In *Journal of the American Statistical Association* (Vol. 58, Issue 301). <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
- Wilcox, L. (1955). *Classification and use of irrigation waters* (Vol. 969). Circular del USDA.
- Wilson, J. J., & García, W. (1962). Geología de los cuadrángulos de Pachía y Palca (Hojas 36-v y 36-x) - [Boletín A 4]. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET*. <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/114>
- Zenteno-Tupíño, E., Rojas-Vega, C., Castañeda-Zavaleta, M., Tueros-Giler, C., Chunga-Tapia, J., Rubio-Flores, R., Gamarra-Mejía, J., Montoya, S., & Carrillo-MoscOSO, L. (2018).

Evaluación de la zona de veda en el acuífero Caplina. ANA, Tacna, Perú.

<https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4443>

ANEXOS

ANEXO

ANEXO 1 – MAPAS

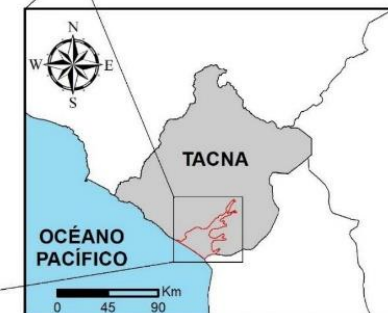
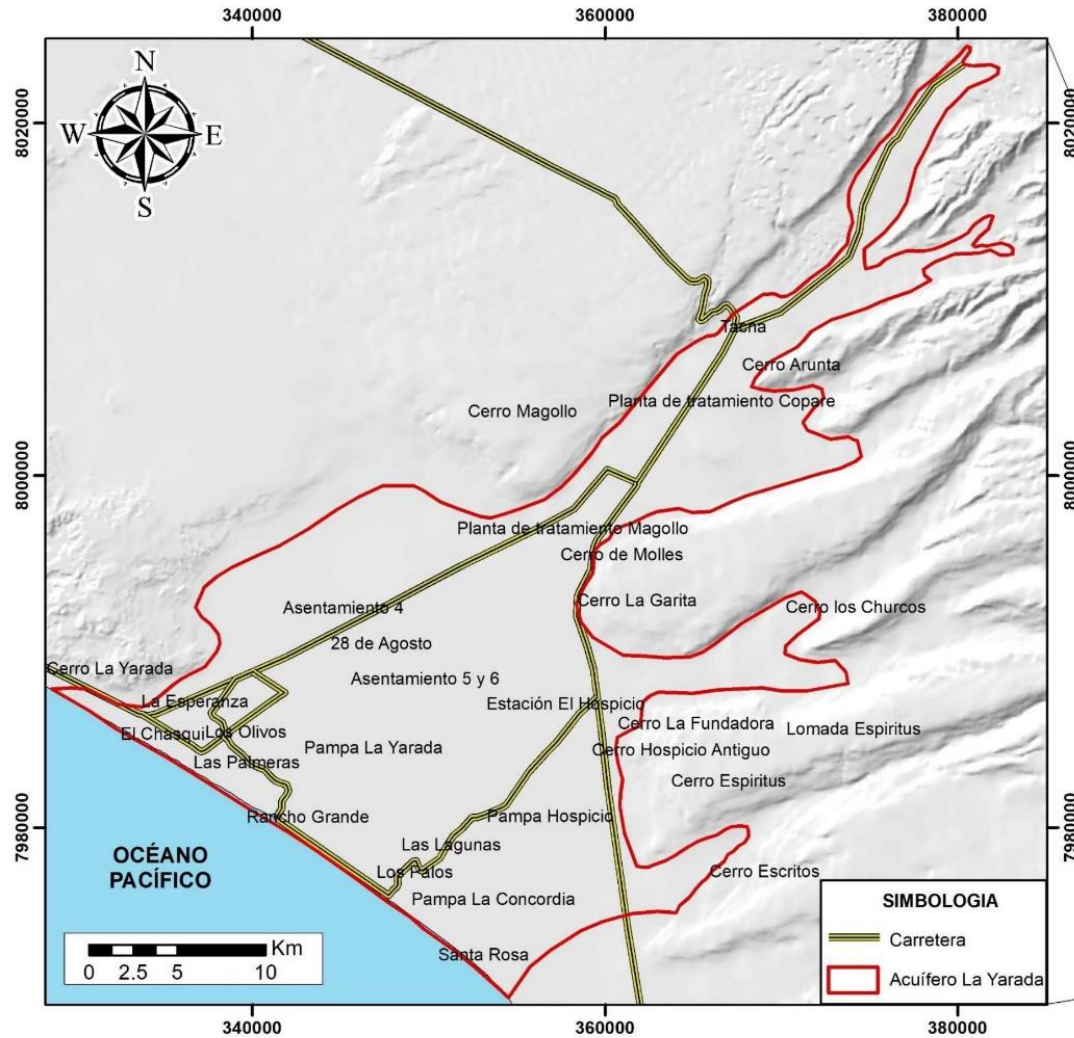
- 01 UBICACIÓN DEL ÁREA ESTUDIO
- 02 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL ÁREA IRRIGADA EN LA SUPERFICIE DEL ACUÍFERO LA YARADA
- 03 GEOLOGÍA DEL ACUÍFERO LA YARADA
- 04 GEOMORFOLOGIA DEL ACUÍFERO LA YARADA
- 05 HIDROLOGIA DE LA CUENCA CAPLINA

ANEXO 2 – CÁLCULOS ESTADÍSTICOS PYTHON

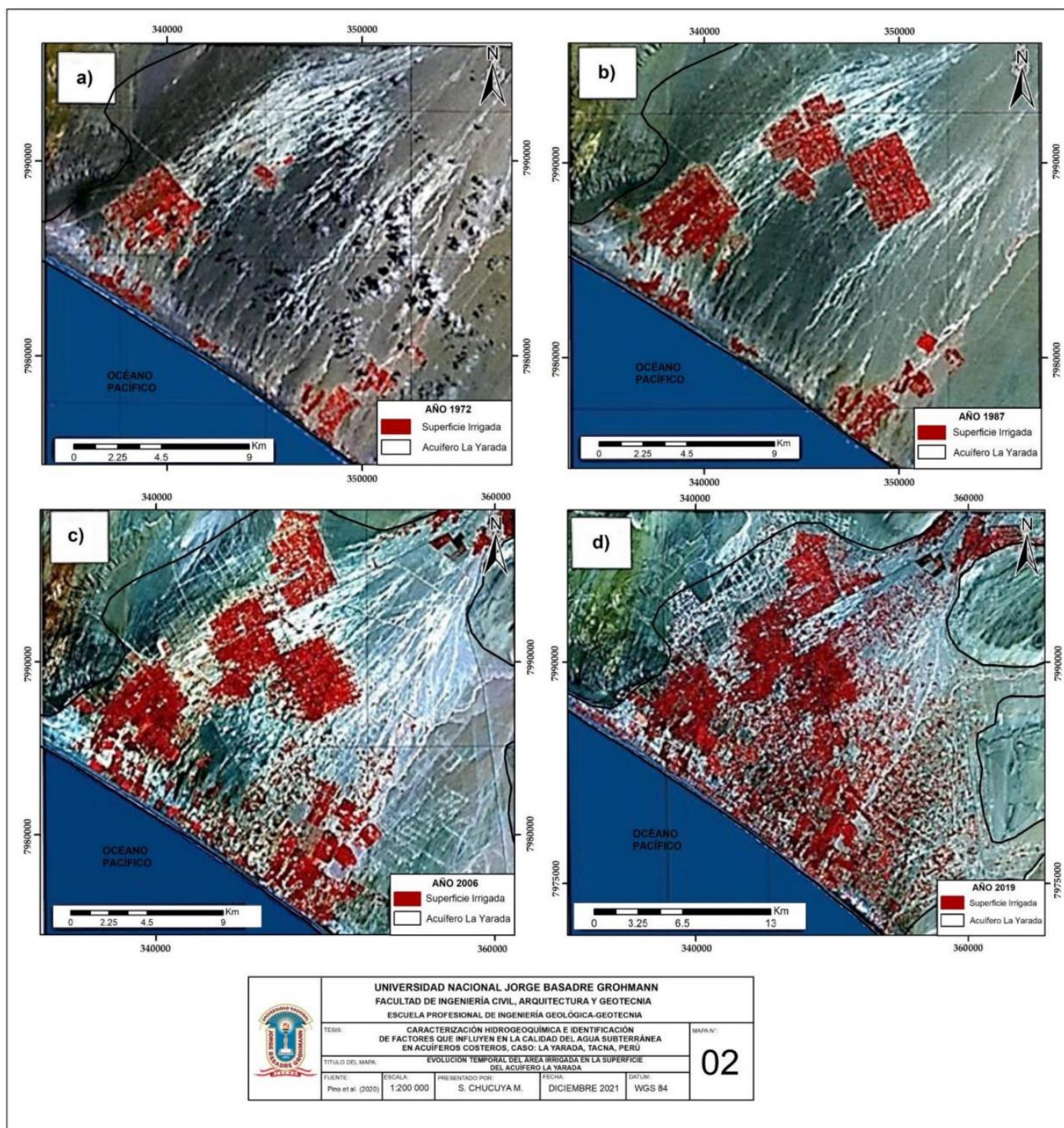
ANEXO 3 – CÁLCULOS DE ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA WQI

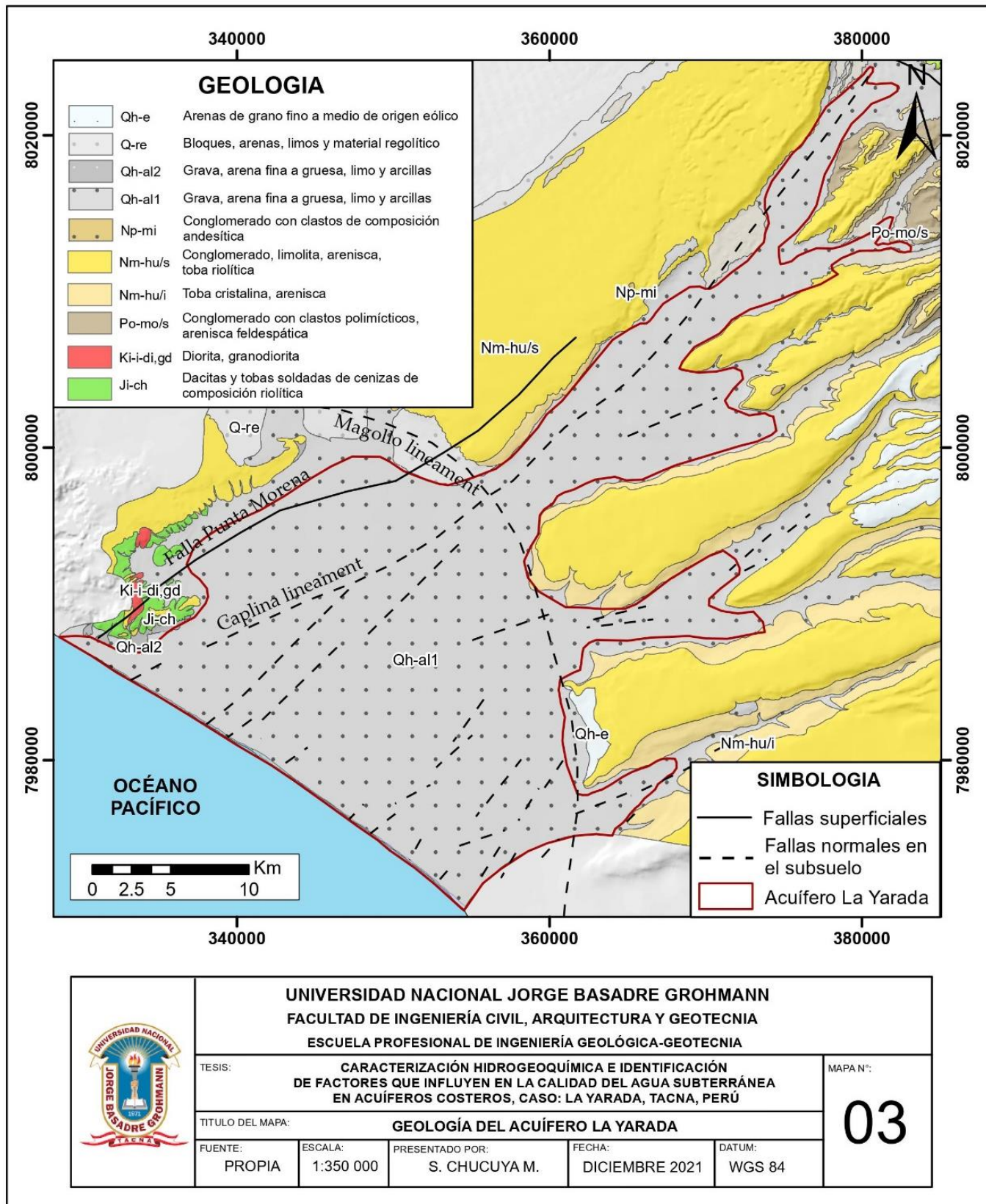
ANEXO 4 – PANEL FOTOGRÁFICO EN CAMPO

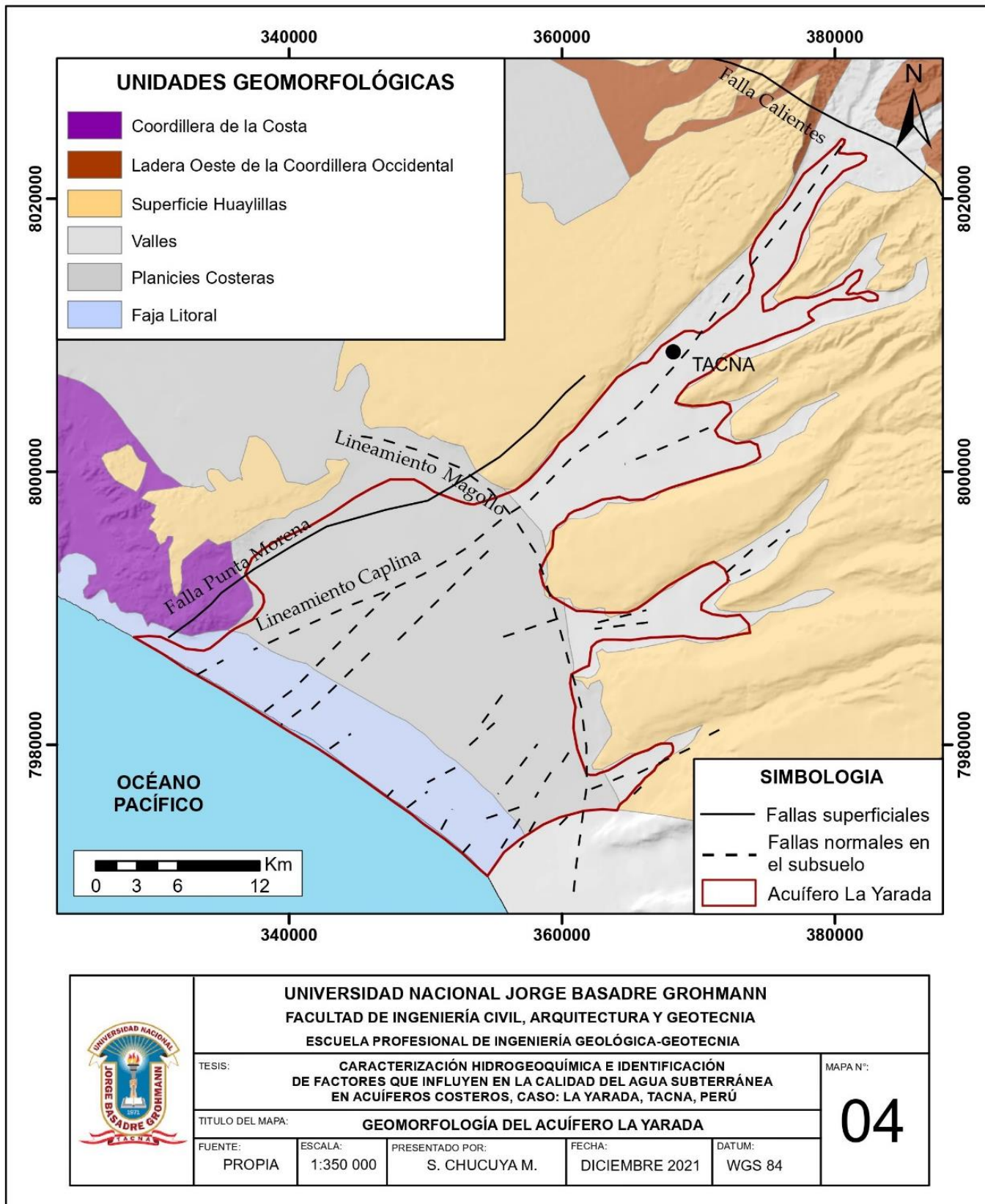
ANEXO 1 – MAPAS

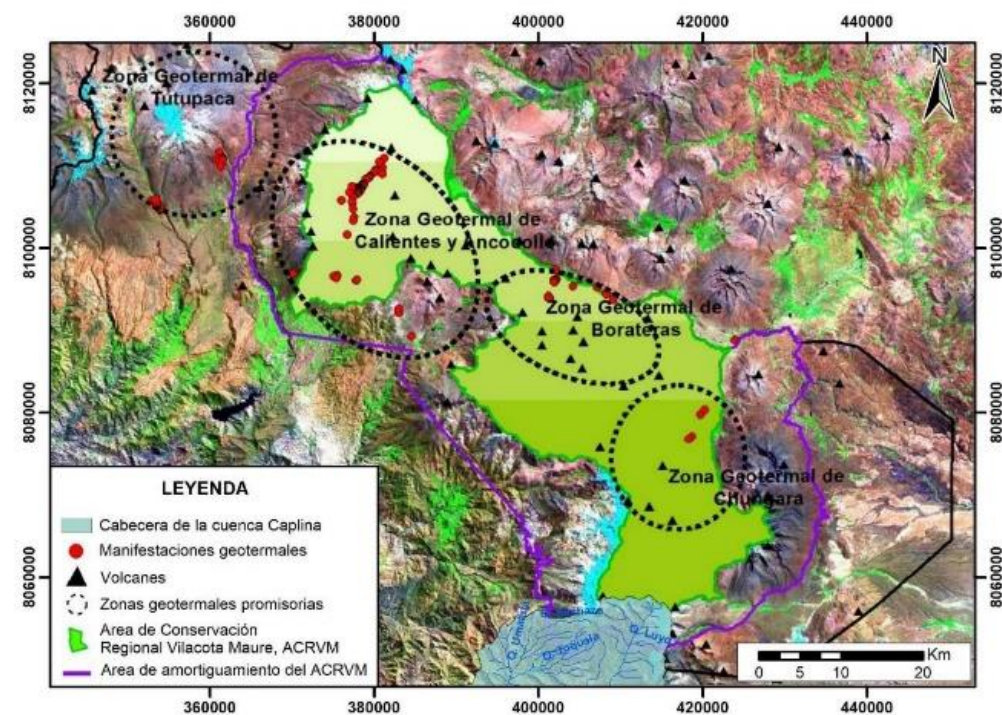
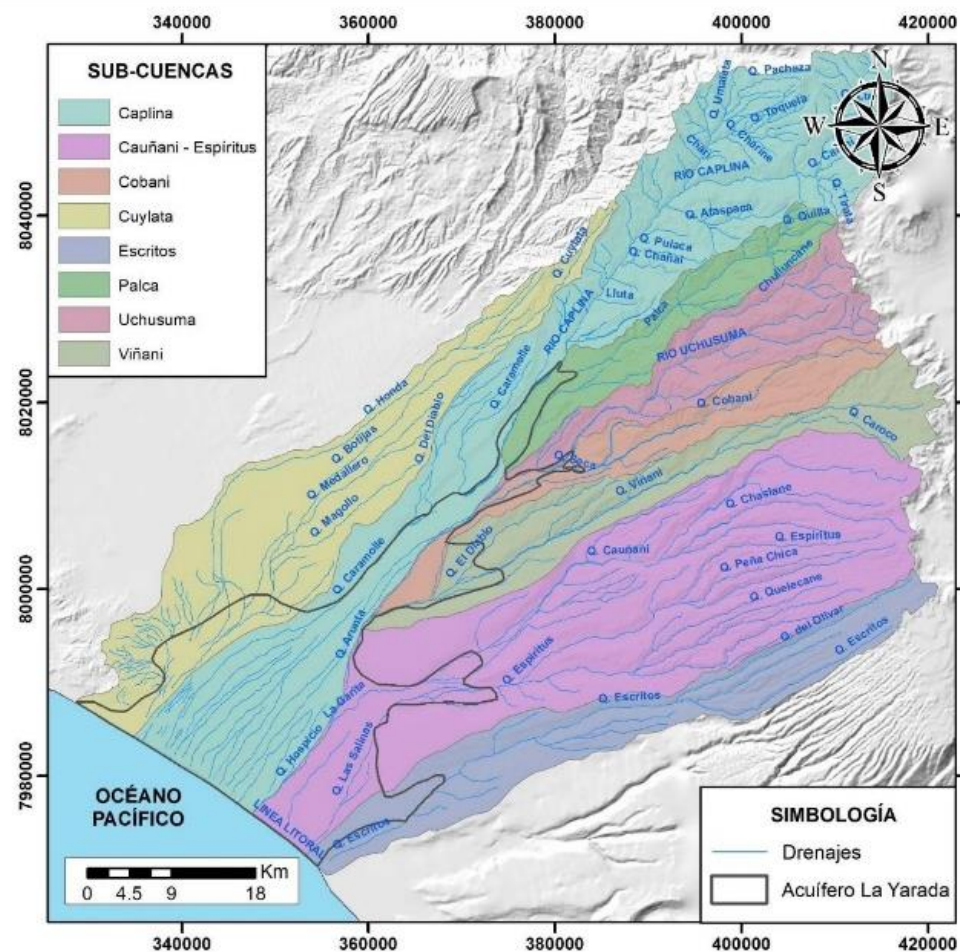


	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA					MAPA N°: 01
	TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E IDENTIFICACIÓN DE FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN ACUÍFEROS COSTEROS, CASO: LA YARADA, TACNA, PERÚ					
	TÍTULO DEL MAPA: UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO					
	FUENTE: PROPIA	ESCALA: 1:350 000	PRESENTADO POR: S. CHUCUYA M.	FECHA: DICIEMBRE 2021	DATUM: WGS 84	





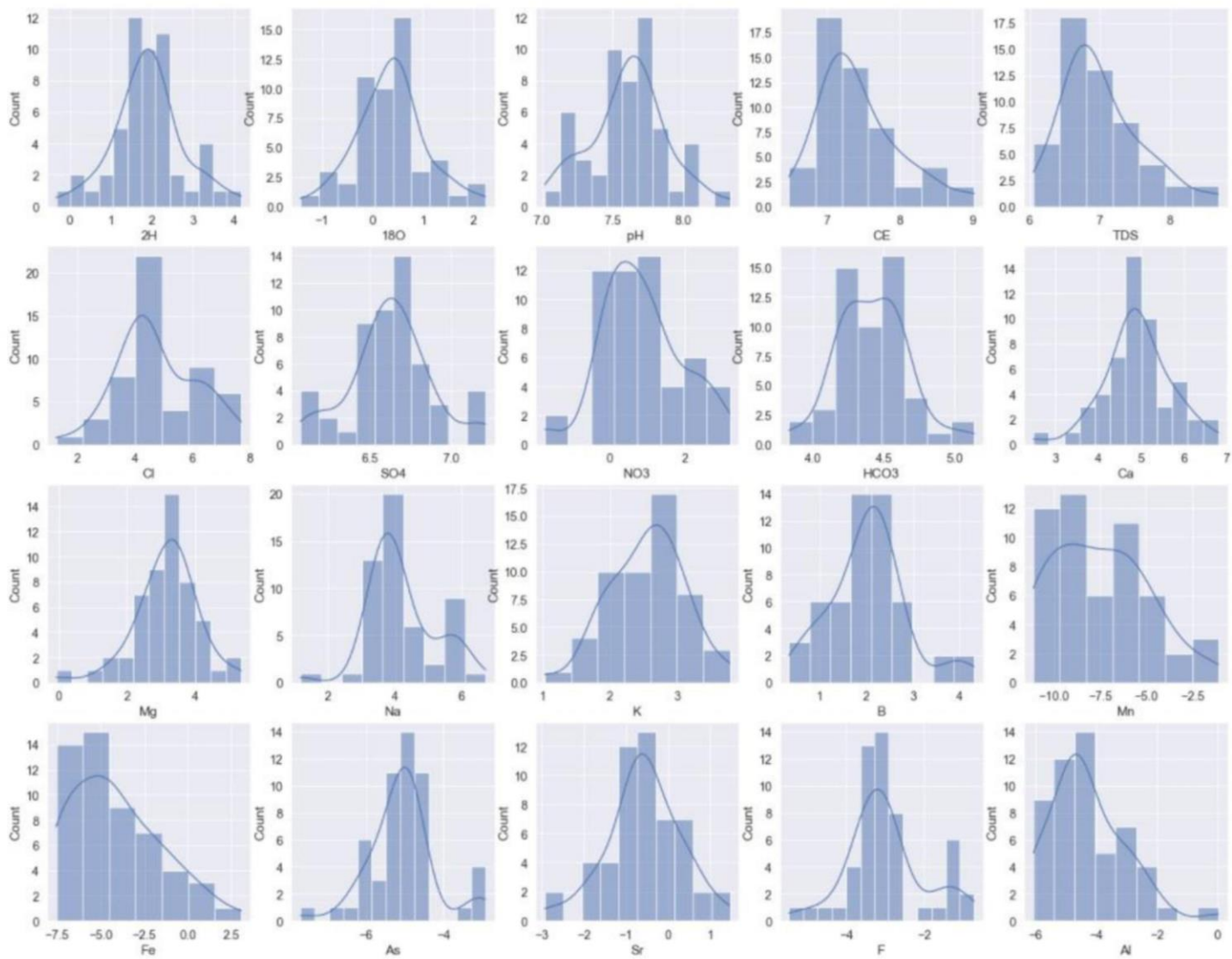




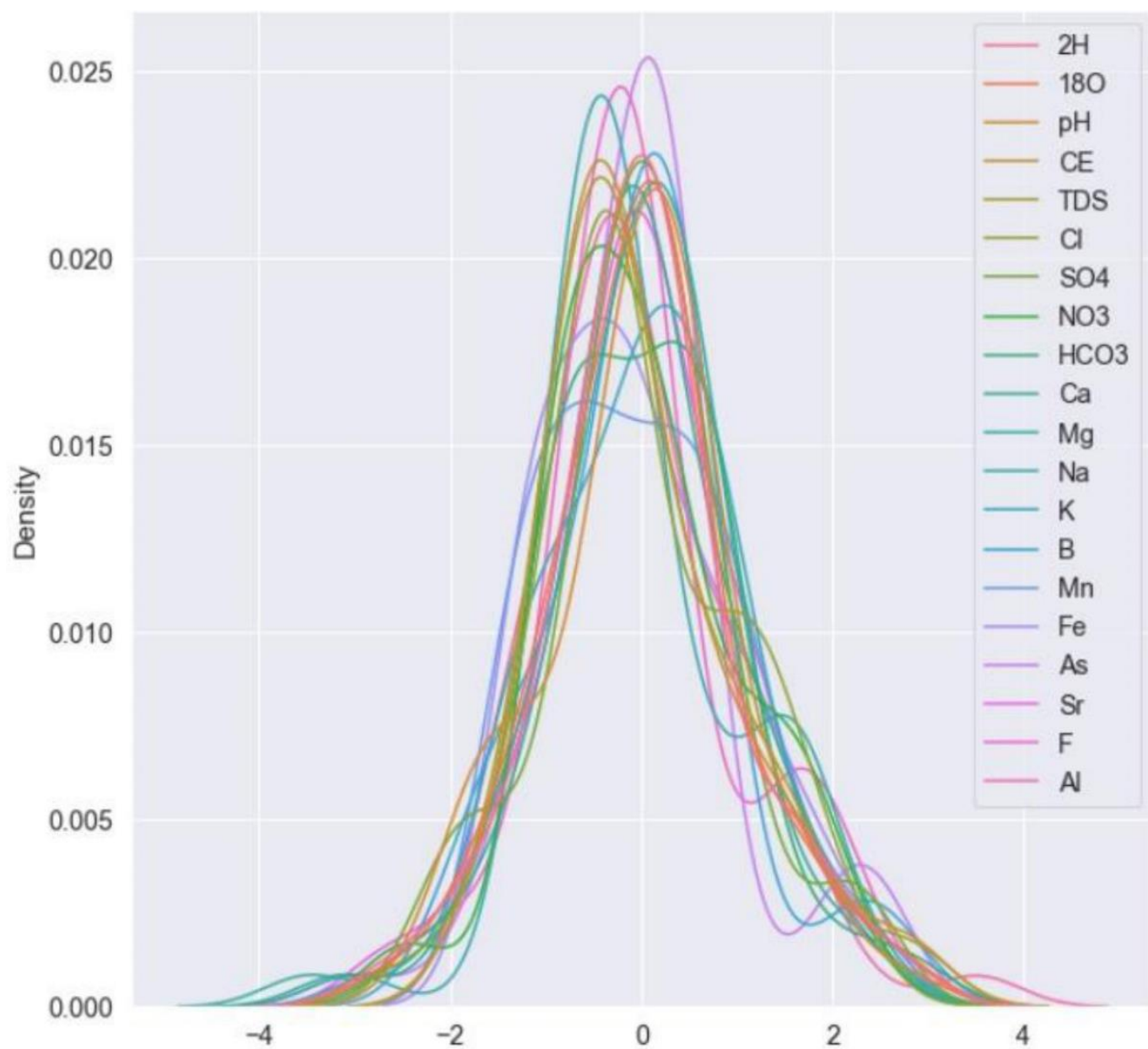
	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA					MAPA N°: 05
	TESIS: CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E IDENTIFICACIÓN DE FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN ACUÍFEROS COSTEROS, CASO: LA YARADA, TACNA, PERÚ					
	TÍTULO DEL MAPA: HIDROLOGIA DE LA CUENCA CAPLINA					
	FUENTE: Cruz (2016)	ESCALA: 1:600 000	PRESENTADO POR: S. CHUCUYA M.	FECHA: DICIEMBRE 2021	DATUM: WGS 84	

ANEXO 2 – CÁLCULOS ESTADÍSTICOS PYTHON

ANEXO 2: VALORES DE PARÁMETROS NORMALIZADOS SIN ESTANDARIZAR



ANEXO 2: VALORES DE PARÁMETROS NORMALIZADOS Y ESTANDARIZADOS



ANEXO 3 – CÁLCULOS DE ÍNDICE DE CALIDAD DE AGUA WQI

RESULTADOS DEL CALCULO PARA SUB-INDICE DE CALIDAD (SI_i)

Pozo	ESTE	NORTE	pH	TDS	Cl	SO4	NO3	Ca	Mg	Na	B	Mn	Fe	As	F	Al
FP-03	381730	8014614	1,93	6,68	5,40	8,94	0,00	2,39	0,51	3,64	6,47	3,19	5,59	4,80	1,27	29,07
FP-06	343047	7986588	1,95	6,86	2,65	14,23	0,12	2,82	0,91	2,87	14,25	0,00	0,06	7,58	1,14	0,32
FP-07	347170	7994281	1,94	9,27	4,83	17,58	0,13	3,67	1,12	3,90	16,92	0,00	0,06	6,35	1,46	0,13
FP-08	350194	7990989	1,91	11,13	6,45	22,26	1,29	5,88	1,64	4,25	16,57	0,00	0,01	4,08	1,13	0,27
FP-09	350529	7975218	1,90	27,78	43,92	13,06	0,68	8,39	2,44	18,21	14,17	0,02	0,48	8,66	1,22	1,29
FP-10	349383	7988153	1,90	10,49	6,45	19,62	0,61	5,18	1,34	3,78	14,49	0,00	0,01	8,66	1,21	0,07
FP-11	344185	7991485	2,02	8,42	5,13	14,04	0,13	1,23	0,23	7,53	17,62	0,01	0,06	1,70	2,36	0,11
FP-12	337297	7984403	1,80	49,19	84,15	36,04	0,20	25,46	7,89	16,18	25,38	0,00	0,11	1,15	1,96	0,64
FP-13	340667	7984406	1,94	6,98	3,03	15,25	0,16	3,03	1,09	3,33	17,31	0,01	1,81	3,96	1,19	0,36
FP-14	339838	7989476	2,01	8,03	6,15	11,40	0,19	1,42	0,37	6,69	13,75	0,00	0,11	32,29	3,52	0,07
FP-15	336381	7987320	1,90	25,38	39,02	12,26	0,72	9,78	2,42	12,69	12,08	0,09	5,59	3,20	3,40	2,05
FP-16	341530	7987724	1,94	7,14	3,47	15,40	0,16	2,74	0,91	2,71	13,03	0,00	0,06	6,11	1,25	0,07
FP-17	342674	7980202	1,83	22,65	21,51	36,57	2,00	10,16	2,92	12,36	27,11	0,00	0,05	2,54	0,95	0,07
FP-18	343096	7984441	1,95	8,09	4,64	14,15	0,16	3,43	1,02	3,02	15,08	0,00	0,05	6,80	0,92	0,20
FP-19	347963	7976350	1,81	31,84	44,38	32,45	1,37	13,41	4,05	18,15	24,12	0,02	0,05	1,93	0,99	0,41
FP-20	350438	7979951	1,91	11,63	9,36	15,62	0,39	5,05	1,29	3,56	13,09	0,00	0,01	7,96	1,06	0,16
FP-21	352795	7980527	1,93	7,20	4,45	10,19	0,31	2,96	0,61	2,76	10,70	0,00	0,01	8,64	1,28	0,10
FP-22	351444	7985835	1,90	9,32	6,45	15,62	0,51	4,15	1,04	3,39	12,35	0,01	0,01	7,21	1,17	1,08
FP-23	347989	7983230	1,95	7,91	3,50	15,09	0,16	3,27	0,81	3,06	14,33	0,00	0,05	7,46	1,02	0,31
FP-24	361812	7998903	1,90	10,13	4,75	21,66	0,82	5,26	1,17	3,61	15,80	0,00	0,11	6,54	1,42	0,22
FP-25	355193	7978726	1,93	5,69	3,32	10,79	0,12	2,52	0,44	2,83	12,13	0,00	0,01	10,81	1,25	0,38
FP-26	352241	7978450	1,92	11,30	11,28	11,09	0,54	4,74	1,26	3,37	9,46	0,00	0,01	6,43	0,99	0,16
FP-27	371913	8010000	1,90	9,55	6,00	16,64	0,54	4,48	0,75	4,05	12,42	0,00	0,53	3,81	1,31	0,46
FP-28	360296	7996726	1,81	10,97	12,30	8,45	3,36	5,63	1,04	3,77	5,88	0,00	0,11	5,65	0,94	0,07
FP-29	347178	7987018	1,94	9,78	5,25	20,75	0,41	4,64	1,18	3,54	13,41	0,04	2,13	4,73	1,13	2,29
FP-30	358615	7998174	1,96	7,16	3,56	14,26	0,12	3,34	0,47	3,69	13,19	0,15	9,93	2,11	1,15	1,18
FP-31	356773	7992858	1,80	17,11	23,09	12,38	3,02	8,88	1,57	5,02	8,25	0,05	2,17	4,98	0,83	0,20
FP-32	361999	7997930	1,90	17,26	18,64	18,23	2,15	8,80	1,58	4,86	14,35	0,03	1,57	8,40	1,19	0,22
FP-33	358026	7995292	1,80	25,42	37,55	14,87	4,55	14,92	2,47	6,36	9,20	0,00	0,01	5,27	0,78	0,18
FP-34	354884	7990073	1,89	8,04	4,94	12,45	0,36	3,37	0,63	3,12	10,57	0,01	0,37	8,63	1,23	0,28
FP-35	357405	7983703	1,92	6,66	4,94	6,49	0,38	2,59	0,42	2,56	6,50	0,00	0,01	8,74	1,09	0,20
FP-36	360166	7979355	2,03	4,43	5,25	1,62	0,29	0,85	0,11	3,92	5,18	0,02	0,23	8,38	2,96	0,56
FP-39	330136	7987815	2,02	14,66	18,19	11,89	0,19	1,62	0,65	14,33	14,16	0,00	0,18	6,61	3,06	1,23
FP-40	354918	7975230	1,92	6,83	3,96	10,38	0,18	2,86	0,61	3,01	11,98	0,02	0,28	2,32	0,96	2,93
FP-41	368746	8000262	1,81	4,45	3,69	3,31	0,27	1,66	0,33	1,95	2,12	0,02	1,46	4,12	0,87	0,33
FP-42	351795	7976992	1,90	22,44	32,00	11,09	1,84	10,36	2,48	7,94	10,36	0,01	0,01	3,30	1,05	0,26
FP-43	361873	8002405	1,89	10,56	6,30	22,11	0,00	4,00	1,55	4,88	16,77	1,56	30,45	0,42	0,81	1,89
FP-44	341616	7993865	2,10	4,01	2,89	3,20	0,21	0,34	0,03	3,83	4,92	0,00	0,33	49,14	5,35	0,36
FP-45	345653	7988933	1,93	10,36	5,55	20,30	0,39	4,84	1,49	3,91	15,17	0,00	0,12	5,52	1,07	0,27
FP-46	334331	7986913	1,97	16,52	20,98	9,51	0,30	2,60	0,51	13,00	12,76	0,21	38,10	46,15	3,26	0,25
FP-47	334304	7985737	1,96	17,29	19,66	14,83	0,59	4,37	1,21	11,65	11,79	0,00	0,11	40,33	3,23	0,07
FP-48	339876	7982263	1,90	8,00	4,64	15,28	0,18	3,25	1,00	3,09	14,53	0,24	21,67	2,22	1,31	2,50
FP-49	346007	7977413	1,77	55,83	85,51	35,47	1,65	18,76	6,05	32,87	23,58	0,79	4,23	2,46	1,17	5,02
FP-50	363732	7977184	1,97	15,15	20,83	3,89	0,75	1,19	0,19	14,46	8,77	0,08	2,49	51,79	5,21	0,61
FP-51	358916	7977165	1,97	5,30	7,96	2,52	0,55	1,46	0,21	4,36	3,38	0,00	0,01	6,29	1,30	0,20
FP-52	357882	7976313	1,93	5,34	5,47	4,38	0,35	1,87	0,40	3,24	4,06	0,00	0,01	8,55	1,06	0,27
FP-53	352744	7972141	2,04	7,72	4,64	12,57	0,14	3,55	0,70	3,72	12,96	0,01	0,28	8,52	0,99	0,73
FP-54	366686	7998964	1,85	7,92	5,85	9,58	0,58	3,59	0,62	2,90	7,53	0,15	1,11	5,38	1,02	1,05
FP-55	353047	7994226	1,85	12,63	6,60	23,17	2,83	6,19	1,59	3,85	16,20	0,00	0,02	5,02	1,42	0,24
FP-56	355106	7992819	1,86	15,94	18,11	15,92	1,88	7,91	1,45	5,06	12,53	0,05	0,59	8,38	1,00	0,59
FP-57	352804	7997640	1,85	7,60	3,42	15,66	0,17	3,03	0,96	3,06	15,97	0,03	10,40	4,03	1,07	1,25
FP-58	346132	7985735	1,96	8,86	4,19	17,81	0,24	4,13	1,06	3,41	14,08	0,002	0,12	5,65	1,01	0,30
FP-59	353216	7984924	1,92	7,25	5,06	11,25	0,34	3,52	0,68	3,09	9,86	0,000	0,01	6,46	1,13	0,09

RESULTADOS DEL CÁLCULO PARA ESCALA DE CALIFICACIÓN (qi)

Pozo	ESTE	NORTE	pH	TDS	Cl	SO4	NO3	Ca	Mg	Na	B	Mn	Fe	As	F	Al
FP-03	381730	8014614	102,40	70,80	57,20	94,80	0,004	42,15	8,98	48,28	68,53	84,475	148,07	50,900	13,500	513,50
FP-06	343047	7986588	103,20	72,70	28,08	150,80	1,32	49,84	16,12	37,99	151,07	0,048	1,61	80,300	12,100	5,57
FP-07	347170	7994281	103,07	98,30	51,20	186,40	1,34	64,80	19,77	51,65	179,40	0,009	1,61	67,300	15,500	2,38
FP-08	350194	7990989	101,33	118,00	68,40	236,00	13,64	103,80	28,92	56,25	175,60	0,024	0,36	43,300	12,000	4,75
FP-09	350529	7975218	100,67	294,50	465,60	138,40	7,20	148,15	43,12	241,30	150,20	0,630	12,71	91,800	12,900	22,79
FP-10	349383	7988153	100,53	111,20	68,40	208,00	6,50	91,60	23,67	50,10	153,60	0,039	0,36	91,800	12,800	1,20
FP-11	344185	7991485	107,07	89,30	54,40	148,80	1,36	21,71	4,14	99,80	186,73	0,365	1,61	18,000	25,000	1,98
FP-12	337297	7984403	95,33	521,40	892,00	382,00	2,16	449,80	139,40	214,35	269,00	0,016	3,00	12,200	20,800	11,28
FP-13	340667	7984406	103,07	74,00	32,12	161,60	1,67	53,45	19,22	44,09	183,53	0,390	47,93	42,000	12,600	6,38
FP-14	339838	7989476	106,40	85,10	65,20	120,80	2,00	25,11	6,59	88,65	145,73	0,016	3,00	342,300	37,300	1,20
FP-15	336381	7987320	100,53	269,00	413,60	130,00	7,64	172,85	42,72	168,15	128,00	2,280	148,07	33,900	36,000	36,27
FP-16	341530	7987724	102,67	75,70	36,80	163,20	1,65	48,34	16,11	35,88	138,07	0,016	1,61	64,800	13,300	1,18
FP-17	342674	7980202	97,07	240,10	228,00	387,60	21,20	179,50	51,61	163,80	287,33	0,015	1,37	26,900	10,100	1,15
FP-18	343096	7984441	103,20	85,80	49,20	150,00	1,67	60,65	18,00	40,01	159,87	0,015	1,37	72,100	9,800	3,59
FP-19	347963	7976350	96,13	337,50	470,40	344,00	14,56	236,90	71,53	240,55	255,67	0,530	1,37	20,500	10,500	7,27
FP-20	350438	7979951	101,47	123,30	99,20	165,60	4,16	89,30	22,77	47,17	138,73	0,039	0,36	84,400	11,200	2,90
FP-21	352795	7980527	102,27	76,30	47,20	108,00	3,24	52,25	10,80	36,51	113,47	0,005	0,28	91,600	13,600	1,82
FP-22	351444	7985835	100,67	98,80	68,40	165,60	5,42	73,25	18,45	44,87	130,93	0,255	0,18	76,400	12,400	19,03
FP-23	347989	7983230	103,33	83,80	37,12	160,00	1,68	57,70	14,37	40,53	151,93	0,039	1,37	79,100	10,800	5,42
FP-24	361812	7998903	100,67	107,40	50,40	229,60	8,72	92,85	20,67	47,88	167,47	0,093	3,00	69,300	15,000	3,94
FP-25	355193	7978726	102,53	60,30	35,24	114,40	1,27	44,60	7,80	37,46	128,53	0,115	0,28	114,600	13,300	6,73
FP-26	352241	7978450	101,60	119,80	119,60	117,60	5,68	83,75	22,31	44,67	100,27	0,005	0,28	68,200	10,500	2,87
FP-27	371913	8010000	100,67	101,20	63,60	176,40	5,76	79,15	13,19	53,70	131,60	0,061	13,94	40,400	13,900	8,14
FP-28	360296	7996726	95,73	116,30	130,40	89,60	35,60	99,55	18,30	49,95	62,31	0,004	3,00	59,900	10,000	1,23
FP-29	347178	7987018	102,80	103,70	55,60	220,00	4,32	82,05	20,77	46,93	142,13	0,975	56,50	50,100	12,000	40,46
FP-30	358615	7998174	103,87	75,90	37,72	151,20	1,28	59,05	8,26	48,87	139,87	3,910	263,13	22,400	12,200	20,91
FP-31	356773	7992858	95,33	181,40	244,80	131,20	32,00	156,85	27,76	66,55	87,47	1,380	57,57	52,800	8,800	3,62
FP-32	361999	7997930	100,53	183,00	197,60	193,20	22,80	155,40	27,97	64,40	152,13	0,743	41,57	89,000	12,600	3,96
FP-33	358026	7995292	95,60	269,50	398,00	157,60	48,20	263,65	43,62	84,25	97,53	0,004	0,28	55,900	8,300	3,27
FP-34	354884	7990073	100,27	85,20	52,40	132,00	3,84	59,50	11,13	41,37	112,00	0,198	9,84	91,500	13,000	4,98
FP-35	357405	7983703	102,00	70,60	52,40	68,80	4,02	45,77	7,43	33,88	68,87	0,004	0,28	92,600	11,600	3,59
FP-36	360166	7979355	107,73	47,00	55,60	17,12	3,12	15,07	1,91	51,90	54,89	0,560	6,15	88,800	31,400	9,90
FP-39	330136	7987815	106,80	155,40	192,80	126,00	2,06	28,66	11,54	189,85	150,07	0,005	4,65	70,100	32,400	21,81
FP-40	354918	7975230	102,00	72,40	42,00	110,00	1,92	50,50	10,73	39,88	127,00	0,453	7,50	24,600	10,200	51,70
FP-41	368746	8000262	95,87	47,20	39,16	35,04	2,84	29,31	5,78	25,89	22,48	0,568	38,63	43,700	9,200	5,87
FP-42	351795	7976992	100,53	237,90	339,20	117,60	19,48	182,95	43,87	105,25	109,87	0,150	0,28	35,000	11,100	4,58
FP-43	361873	8002405	100,13	111,90	66,80	234,40	0,00	70,70	27,41	64,70	177,80	41,425	807,00	4,500	8,600	33,44
FP-44	341616	7993865	111,07	42,50	30,64	33,92	2,18	6,03	0,62	50,80	52,17	0,128	8,84	520,900	56,700	6,37
FP-45	345653	7988933	102,53	109,80	58,80	215,20	4,10	85,45	26,25	51,75	160,80	0,061	3,20	58,500	11,300	4,70
FP-46	334331	7986913	104,40	175,10	222,40	100,80	3,20	46,01	9,05	172,25	135,27	5,553	1009,67	489,200	34,600	4,42
FP-47	334304	7985737	103,73	183,30	208,40	157,20	6,30	77,15	21,31	154,30	124,93	0,016	3,00	427,500	34,200	1,15
FP-48	339876	7982263	100,93	84,80	49,20	162,00	1,88	57,35	17,59	40,91	154,00	6,368	574,33	23,500	13,900	44,18
FP-49	346007	7977413	93,60	591,80	906,40	376,00	17,44	331,45	106,87	435,50	250,00	20,863	112,13	26,100	12,400	88,65
FP-50	363732	7977184	104,40	160,60	220,80	41,20	7,92	21,08	3,35	191,60	93,00	2,015	65,97	549,000	55,200	10,80
FP-51	358916	7977165	104,53	56,20	84,40	26,68	5,80	25,88	3,75	57,80	35,83	0,004	0,28	66,700	13,800	3,49
FP-52	357882	7976313	102,40	56,60	58,00	46,40	3,70	33,09	7,15	42,97	43,06	0,004	0,28	90,600	11,200	4,73
FP-53	352744	7972141	107,87	81,80	49,20	133,20	1,54	62,65	12,45	49,23	137,33	0,295	7,40	90,300	10,500	12,84
FP-54	366686	7998964	98,00	84,00	62,00	101,60	6,20	63,40	10,97	38,49	79,80	4,025	29,48	57,000	10,800	18,57
FP-55	353047	7994226	97,87	133,90	70,00	245,60	30,00	109,40	28,16	50,95	171,73	0,054	0,44	53,200	15,000	4,29
FP-56	355106	7992819	98,80	169,00	192,00	168,80	19,96	139,70	25,64	67,05	132,87	1,345	15,53	88,800	10,600	10,37
FP-57	352804	7997640	97,87	80,60	36,24	166,00	1,84	53,50	16,90	40,61	169,27	0,820	275,60	42,700	11,300	22,07
FP-58	346132	7985735	103,87	93,90	44,40	188,80	2,50	72,95	18,78	45,15	149,20	0,061	3,20	59,900	10,700	5,26
FP-59	353216	7984924	101,73	76,80	53,60	119,20	3,60	62,20	11,99	40,98	104,47	0,010	0,18	68,500	12,000	1,62

RESULTADOS DEL CALCULO PARA ÍNDICE DE CALIDAD (WQI)

Pozo	ESTE	NORTE	WQI
FP-03	381730	8014614	79,87
FP-06	343047	7986588	55,75
FP-07	347170	7994281	67,38
FP-08	350194	7990989	76,87
FP-09	350529	7975218	142,22
FP-10	349383	7988153	73,82
FP-11	344185	7991485	60,60
FP-12	337297	7984403	250,15
FP-13	340667	7984406	59,45
FP-14	339838	7989476	86,00
FP-15	336381	7987320	130,57
FP-16	341530	7987724	54,98
FP-17	342674	7980202	140,72
FP-18	343096	7984441	59,53
FP-19	347963	7976350	175,00
FP-20	350438	7979951	71,11
FP-21	352795	7980527	51,14
FP-22	351444	7985835	64,21
FP-23	347989	7983230	58,92
FP-24	361812	7998903	73,40
FP-25	355193	7978726	52,24
FP-26	352241	7978450	62,56
FP-27	371913	8010000	62,44
FP-28	360296	7996726	59,99
FP-29	347178	7987018	71,22
FP-30	358615	7998174	62,28
FP-31	356773	7992858	89,37
FP-32	361999	7997930	99,18
FP-33	358026	7995292	123,40
FP-34	354884	7990073	55,89
FP-35	357405	7983703	42,51
FP-36	360166	7979355	35,83
FP-39	330136	7987815	88,79
FP-40	354918	7975230	48,24
FP-41	368746	8000262	26,39
FP-42	351795	7976992	105,04
FP-43	361873	8002405	103,22
FP-44	341616	7993865	76,72
FP-45	345653	7988933	70,90
FP-46	334331	7986913	166,13
FP-47	334304	7985737	127,07
FP-48	339876	7982263	79,81
FP-49	346007	7977413	275,15
FP-50	363732	7977184	127,38
FP-51	358916	7977165	35,52
FP-52	357882	7976313	36,93
FP-53	352744	7972141	58,55
FP-54	366686	7998964	49,15
FP-55	353047	7994226	81,61
FP-56	355106	7992819	91,28
FP-57	352804	7997640	68,50
FP-58	346132	7985735	62,81
FP-59	353216	7984924	50,65

ANEXO 4 – PANEL FOTOGRÁFICO EN CAMPO



Fotografía 1. Medición de parámetros de conductividad eléctrica (CE) y ph in situ en el pozo FP-49, ubicado en el sector Los Palos cerca al litoral.



Fotografía 2. Medición del nivel del agua en el pozo FP-49, ubicado en el sector Los Palos cerca al litoral.



Fotografía 3. Sellado y etiquetado de las muestras de agua en botellas de polietileno.



Fotografía 4. Riego tecnificado en la zona cercana al pozo FP-49.



Fotografía 5. Ubicación del pozo FP-39, ubicado cerca al sector Los Chasquis.



Fotografía 6. Medición de parámetros de conductividad eléctrica (CE) y ph in situ en el pozo FP-39, ubicado cerca al sector Los Chasquis.



Fotografía 7. Ubicación del pozo FP-33, ubicado en el sector de Magollo, es utilizado por la asociación agropecuaria Las Palmeras II.



Fotografía 8. Medición de parámetros de conductividad eléctrica (CE) y ph in situ en el pozo FP-33, ubicado en el sector de Magollo.



Fotografía 9. Vista a los alrededores del pozo FP-33, la cual presenta actividades agrícolas.



Fotografía 10. Bombeo del pozo FP-33, ubicado en el sector de Magollo.



Fotografía 11 Muestreo de agua a nivel de salida del pozo de bombeo FP-27, ubicado en el Parque Perú.



Fotografía 12. Medición de parámetros de conductividad eléctrica (CE) y ph in situ en el pozo FP-27, ubicado en el Parque Perú.