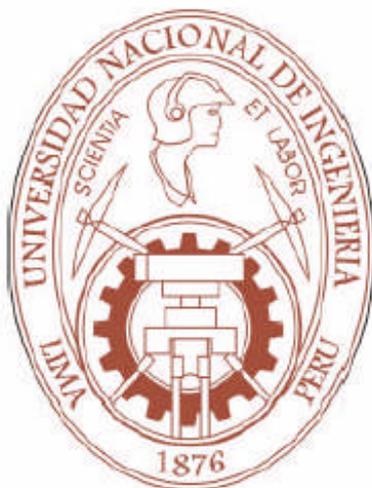


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA

SECCION DE POSGRADO



**APLICACIÓN DE ISOTOPOS AMBIENTALES
PARA LA MITIGACION DE LA CONTAMINACION
DE ARSENICO EN LA CUENCA DEL RIO MAURE**

TESIS

PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN:

MINERIA Y MEDIO AMBIENTE

PRESENTADO POR:

JACINTO VALENCIA HERRERA

LIMA – PERU

2009

A la memoria de mi hijo Hernán
por su temprana desaparición.

Sus padres: Jacinto y Carolina

...Cuando promovemos un mayor consumo de energía, la pregunta mas pertinente previa a toda decisión es: en que calidad y medida deberá ofrecerse la energía para que satisfaga óptimamente las necesidades materiales y culturales de las personas?. Es decir, no pensamos que desarrollar la producción y consumo de energía tenga el objetivo final de “ampliar la producción” , sino el de que, a través de la propia energía hacer la vida de las personas más satisfactoria y creadora . La energía no es pues un fin en sí misma, sino un medio para realizar las metas de producir mayor cantidad de bienes y de mejor calidad....

AGRADECIMIENTOS

Al ver fructificados los esfuerzos realizados durante la maestría, por los conocimientos recibidos y la orientación a seguir una disciplina en el manejo de los modelos mentales. Mi agradecimiento a la plana de docentes de la Sección de Post grado de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la UNJ por los conocimientos que allí se imparten , permitiendo adquirir nuevos paradigmas en geología y minería acorde con los conceptos modernos de medio ambiente.

Especialmente, mi agradecimiento y gratitud al Ingeniero Guillermo Pérez V. por su valiosas sugerencias durante la revisión del presente trabajo; de igual manera, mi agradecimiento al Ingeniero José Vidalón G. por las valiosas y oportunas sugerencias efectuadas al presente trabajo.

Finalmente, mi reconocimiento al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), por su decidido apoyo y contribución mediante sus proyectos de cooperación técnica.

Muchas Gracias

INDICE

	Pág.
RESUMEN EJECUTIVO.....	09
EXECUTIVE ABSTRACT.....	10

CAPITULO I

JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL ESTUDIO 11

1.1	Introducción.....	11
1.2	Antecedentes.....	12
1.3	Diagnostico ambiental de la cuenca alta del río Maure.....	13
1.4	Contaminación natural de los recursos hídricos por arsénico.....	16
1.5	Marco legal vigente.....	17
1.6	Objetivo.....	18
1.7	Metodología de trabajo.....	18
1.8	Riesgos del arsénico para la salud.....	19
1.9	Costos y ventajas de la aplicación de las técnicas isotópicas.....	20

CAPITULO II

DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO 22

2.1	Ubicación y accesibilidad.....	22
2.2	Clima.....	22
2.3	Topografía.....	23
2.4	Geomorfología.....	25
2.5	Geología general.....	26
2.5.1	Estratigrafía.....	27
2.5.2	Formaciones volcánicas.....	29
2.5.3	Geología estructural.....	30
2.6	Hidrogeología.....	30
2.6.1	Cuenca hidrográfica del río Maure.....	30
2.6.2	Acuíferos.....	31

CAPITULO III

EL VULCANISMO DEL SUR DEL PERÚ 34

3.1	Contexto geodinámico, tectónico y magmatismo del vulcanismo.	34
3.2	La tectónica de placas y el vulcanismo.....	34
3.3	Principales rasgos tectono-volcánicos del área de Challapalca....	36
3.4	Depósitos y productos volcánicos.....	37
3.5	Geoquímica de los materiales volcánicos.....	38

CAPITULO IV

ISOTOPOS AMBIENTALES 40

4.1	Principios de las técnicas isotópicas.....	40
4.2	Estado del arte de su aplicación en el país.....	41
4.3	El ciclo hidrológico y la geotermia.....	42
4.4	Contribución de los isótopos ambientales en hidrogeología.....	44
4.5	Los isótopos ambientales en sistemas geotérmicos.....	46

CAPITULO V

LA CONTAMINACION DE ARSENICO DEL RIO MAURE 47

5.1	Geoquímica del arsénico.....	47
5.2	Dispersión de los constituyentes químicos, alteraciones.....	49
5.3	El arsénico en aguas termales y la contaminación.....	50
5.3.1	El arsénico en las aguas continentales subterráneas.....	52
5.4	Dispersión del arsénico.....	53
5.5	Contaminación de suelos y curso de agua del río Maure.....	54
5.6	Consecuencias ecológicas de la contaminación de arsénico.....	54

CAPITULO VI

HIDROGEOQUÍMICA 55

6.1	Geoquímica del área geotérmica del Lote Challapalca.....	55
6.2	Parámetros físico-químicos de los manantiales termales	55
6.2.1	Muestreo y análisis.....	55
6.3	Química del agua, aniones, cationes y elementos trazas.....	56
6.3.1	Diagrama de Piper.....	56
6.3.2	Diagrama de Schoeller.....	57
6.4	Arsénico y el Boro en aguas termales.....	63
6.5	Composición isotópica de las aguas geotermiales.....	64

CAPITULO VII

EL SISTEMA GEOTERMICO DE CHALLAPALCA 68

7.1	Características geotérmicas del Lote Challapalca.....	68
7.2	Origen de las aguas termales.....	68
7.3	Geotermometría.....	68
7.4	Modelo conceptual del sistema geotérmico de “Borateras”	71

CAPITULO VIII

MITIGACION DE LA CONTAMINACION DE ARSÉNICO EN EL RIO MAURE 72

8.1	La contaminación del arsénico en el río Maure.....	72
8.2	Alternativas de mitigación del contenido de arsénico en el río Maure.....	73
8.3	Extinción de los manantiales termales.....	74
8.4	Explotación y empleo de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la cuenca del río Maure.....	77
8.5	Beneficios del estudio.....	78

CONCLUSIONES.....	81
-------------------	----

RECOMENDACIONES.....	82
----------------------	----

REFERENCIAS.....	83
------------------	----

ANEXOS:.....	85
--------------	----

Cuadros
Hidrometría
Memoria Fotográfica.

“Aplicación de Isótopos Ambientales para la Mitigación de la Contaminación de Arsénico en la Cuenca del río Maure. Departamento de Tacna”.

RESUMEN EJECUTIVO

El área en estudio se ubica en la Cordillera Occidental de los Andes del sur del Perú, a una altitud de 4,200 m.s.n.m. Políticamente, pertenece distrito de Sitajara, provincia de Tarata, departamento de Tacna. El estudio comprende la aplicación de los isótopos ambientales como herramienta útil en la exploración de áreas geotérmicas.

Los recursos de agua para la ciudad de Tacna, son captados en una zona donde predominan formaciones volcánicas y de edad reciente, con presencia de fuentes de aguas termales con valores altos de arsénico natural (hasta 18 ppm) que, contaminan las aguas del río Maure, impidiendo el aprovechamiento de este recurso.

Los estudios iniciales de hidrogeología, geofísica y geo-vulcanología, fueron realizados con fines de aprovechamiento de las aguas subterráneas los que han sido tomados en cuenta para el presente estudio, el que concluye indicando la favorabilidad, del Lote Challapalca, área “Borateras”, para albergar reservorios geotérmicos.

La información hidrogeoquímica e isotópica, han permitido determinar la composición de las aguas termales que son del tipo clorurado-sódica, afectadas, por fenómenos de mezcla. Mientras los isótopos ambientales, indican, que la recarga del sistema se produce a partir de la infiltración de aguas de lluvias en la alta cordillera, con un orden de precipitación de 300-400 mm/año, determinando, la hidrodinámica del reservorio geotérmico, información importante para la sostenibilidad del aprovechamiento energético, que se plantea como una alternativa viable a la fecha, para la mitigación de la contaminación de arsénico del río Maure, y puedan ser aprovechados los recursos hídricos en el abastecimiento de agua de la ciudad de Tacna.

La geotermometría, obtenida de las aguas termales indica una temperatura del posible reservorio de 210°C y, ha llevado a diseñar, el modelo conceptual del sistema geotérmicos de “Borateras”.

EXECUTIVE ABSTRACT

The area in study is located in the Cordillera Occidental of Andes Southern of the Perú, to an altitude of 4,200 m.s.n.m. Politically, it belongs district of Sitajara, province of Tarata, department of Tacna. The study understands the application of the environmental isotopes as useful tool in the exploration of geothermal areas.

The resources of water for the city of Tacna, they are captured in an area where volcanic formations prevail and of recent age, with presence of sources of thermal waters with high values of natural arsenic (up to 18 ppm), they contaminate the waters of the river Maure, impeding the use of this resource.

The initial studies of hydrogeologic, geophysics and geo-vulcanology, they were carried out with ends of use of the underground waters that and they have been taken into account for the present study, the one that concludes indicating the favorabilidad, of the Lot Challapalca, area "Borateras", to harbor geothermal reservoirs.

The isotope information and hydrogeochemic, they have allowed to determine the composition of the thermal waters that they are of the clorurate-sodium, affected type, for mixture phenomena. While the environmental isotopes, indicate that the recharge of the system takes place starting from the infiltration of waters of rains in the high mountain range, with an order of precipitation of 300-400 mm/year, determining, the hydrodynamic of the geothermal reservoir, important information for the sustentation of the energy use that thinks about like a viable alternative to the date, for the mitigation of the contamination of arsenic of the river Maure, and the resources hydrics can be taken advantage of in the supply of water of the city of Tacna.

The geothermometry, obtained of the thermal waters it indicates a temperature of the possible reservoir of 210°C and, it has taken to design, the conceptual model of the geothermal system of "Borateras."

CAPITULO I

JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL ESTUDIO

1.1 Introducción.

El agua constituye uno de los problemas fundamentales a resolver para el desarrollo económico del departamento de Tacna, con una población de casi 300,000 habitantes. El suministro total, tanto por aguas superficiales como subterráneas, alcanzan $12.60 \text{ m}^3/\text{s}$ a $3 \text{ m}^3/\text{s}$ en época de estiaje; siendo la demanda total $22.54 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir que en épocas de avenida, se satisface solo el 55% de la demanda, la que se agudiza en la época de estiaje. Se tiene que, si se mantendría el consumo humano de la población de $0.347 \text{ m}^3/\text{s}$, quedaría para uso agrícola, $2.65 \text{ m}^3/\text{s}$ que es insuficiente para una región desértica, ya afectada por el estrés hídrico.

La zona sur del país, presenta a lo largo de la Cordillera Volcánica del Barroso, vulcanismo relativamente reciente de una edad de (0.1 m.a.). En las inmediaciones de la localidad de Challapalca, existen colapsos de caldera próximos al volcán Tutupaca y otros, que testifican la intensa actividad volcánica ocurrida en la región, que de acuerdo a estudios previos, habría originado la concentración de arsénico en estos terrenos [1].

La zona de Challapalca, suscita el interés por la investigación de la actividad geotermal, por estar en relación con el aprovechamiento de los recursos hídricos; afectados por contaminación natural de origen volcánico. La zona en estudio se caracteriza por presentar numerosas surgencias de aguas termales con alto contenido de arsénico, las que descargan al río Maure, afectando su calidad de agua.

Constituye el objetivo del presente estudio, ver la viabilidad, como alternativa factible, la mitigación del impacto negativo que produce, principalmente, el arsénico de las aguas termales en el recurso agua y que permita el aprovechamiento, tanto en la misma localidad, así como, en la ciudad de Tacna.

En este estudio, se aplican las técnicas isotópicas, utilizando los isótopos ambientales Oxígeno-18, Deuterio y Tritio, como trazadores naturales que permiten conocer la hidrodinámica de la recarga en este caso, del reservorio geotérmico, complementada por la hidrogeoquímica y la aplicación de geotermómetros químicos;

esta última técnica, nos ha permitido diagnosticar la temperatura al interior del reservorio geotérmico, elemento fundamental para la factibilidad de un proyecto de aprovechamiento sostenible de energía geotérmica, como una alternativa para la mitigación de la contaminación de arsénico y el aprovechamiento del recurso agua.

1.2 Antecedentes

En el Sureste del Perú, diversas entidades encargadas de la gestión del recurso agua, están abocadas, desde hace varios años en un Programa de Afianzamiento de los Recursos Hídricos en el Departamento de Tacna; resultando el mayor interés el aprovisionamiento del recurso agua para toda esta Región, constituyéndose una de las cuencas de aprovisionamiento el río Maure.

El Programa antes indicado, constituido por varios proyectos está a cargo del Instituto Nacional de Desarrollo (INADE). El proyecto de abastecimiento de agua para la ciudad de Tacna, se ve dificultado por la presencia de aguas termales con valores altos de arsénico, en el denominado Lote "Challapalca"; zona geotérmica, cuya mayor expresión es el área de "Borateras". Estas aguas termales originan la contaminación natural, de aguas superficiales de la cuenca del río Maure y, posiblemente estén afectando las aguas subterráneas, las que ya se explotan en la zona del Ayro, desde hace tiempo, para cubrir parcialmente, la demanda de la urbe de la ciudad de Tacna.

Estudios preliminares, han sido realizados con fines de aprovechamiento de energía geotérmica, los que han servido de base para abordar el presente estudio sobre la descontaminación de arsénico por esta alternativa, entre los que se pueden citar:

En 1975, MINEROPERU efectuó estudios de exploración preliminar de las manifestaciones geotermales de Calacoa y Salinas en Moquegua.

En 1977 y 1978 el INIE e INGEMMET elaboraron un inventario y agrupación geográfica de afloramientos geotermales : Regiones Geotermales.

En 1986, ELECTROPERU, con asistencia técnica del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) realizó investigaciones geoquímicas en la Región V. entre Tacna y Moquegua.

En el año 1996, el Dr. Alfred Truesdell de USA, experto en geotermia, fue contratado por el OIEA para evaluar el aprovechamiento de estas fuentes geotermiales con fines de generación eléctrica, en su informe concluye, que es posible disminuir la contaminación de As, mediante la explotación geotérmica.

En 1997, CENERGIA, con el apoyo del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) de México, efectuó la evaluación de las zonas geotérmicas del sur del Perú, en base a los estudios realizados por INGEMMET, ELECTROPERU, CENERGIA, el IPEN y el OIEA.

Estudio de Factibilidad de la Descontaminación del Río Maure, Vols. Geología, Hidrogeología e Hidroquímica, Asesores Técnicos Asociados, (ATA), Nov. de 1999

Los estudios emprendidos por el Proyecto Especial Tacna (PET), están dirigidos a encontrar una solución definitiva que permita utilizar los recursos hídricos[2], el presente estudio constituye un aporte para este propósito.

1.3 Diagnostico Ambiental de la Cuenca Alta del Río Maure

La zona en estudio se ubica en la cuenca alta del río Maure, en la localidad denominada "Borateras", Challapalca, políticamente, perteneciente al distrito de Sitajara, provincia de Tarata; abarca un área de 250 km² y, sus terrenos son utilizados en su mayor parte al pastoreo.

Hacia la parte noreste de la zona de estudio, se ubican las nacientes del río Maure con una fisiografía propia de la región puna, con una altitud de 4,200 m.s.n.m, corresponden a terrenos principalmente de naturaleza volcánica, conforman una geomorfología típica de regiones con vulcanismo reciente, integrada por cadenas volcánicas, derrames lávicos, conos, cráteres, domos volcánicos y calderas parcialmente conservadas.

El acceso principal a la zona en estudio, lo constituye, la carretera afirmada Tacna-Tarata, luego, se continúa por una trocha carrozable a El Ayro-Chiluyo-Kallapuma-Challapalca y finalmente el área de "Borateras".

El clima dominante es frío, aunque los factores climáticos varían de un lugar a otro, son frecuentes las granizadas y heladas. Las precipitaciones se presentan entre

los meses de diciembre y abril (régimen tropical) y se manifiestan en lluvias generalmente acompañadas de fenómenos eléctricos (relámpagos)

La zona de Challapalca, forma parte de la región altiplánica del sur del Perú teniendo como geformas más conspicuas la denominada "Cordillera del Barroso"; la cuenca del río Maure, las lagunas Vilacota y Taccata , que dan origen al río Maure , el que sigue una dirección de Noroeste-sureste, cuyas aguas drenan hacia el río Desaguadero, con una longitud de cuenca de 100 km en territorio peruano, correspondiéndole a la zona en estudio 30 km , pasando luego a territorio boliviano.

Las aguas del río Maure, tienen un caudal promedio de $1\text{m}^3/\text{s}$ y, en época de estiaje, un caudal de $0.7\text{ m}^3/\text{s}$ y en época de avenida hasta $4.9\text{ m}^3/\text{s}$; caudal que se incrementa sucesivamente con los aportes de las aguas termales del área de Putina, Baños Termales de Calachaca y el manantial Kallapuma. Este último, con aguas frías de buena calidad, atributo que lo pierde al mezclarse con las aguas de mala calidad del río Maure, como ya se indicó, por la presencia de arsénico.

En el contexto geológico, predominan rocas volcánicas, pertenecientes a formaciones cuyas edades van del terciario al cuaternario donde destaca la formación Volcánicos Purupuruni, que descansan, discordantemente, sobre los Volcánicos Barroso. Los materiales son de composición dacítica, del tipo "tufo", brechas e ignimbritas.

En cuanto a los fenómenos de geodinámica externa e interna, como riesgo geológico es significativo. Por tanto, es recomendable se implementen estudios de prevención en el caso de iniciarse obras civiles, considerando la presencia de actividad volcánica.

Las aguas subterráneas, en la actualidad, en la zona representan el recurso más importante debido a que ya son utilizadas para el abastecimiento local pero, principalmente para la ciudad de Tacna.

La zona en estudio, desde el punto de vista hidrogeológico se han identificado dos acuíferos productores: el acuífero Capillune y el acuífero Maure, los que están siendo explotados desde hacen mas de 20 años. En cuanto al nivel freático, en la zona, está muy superficial, sobre todo el que pertenece al acuífero Capillune, que en algunas partes, se observa que se comporta como acuífero libre (zonas de recarga), mientras

que el acuífero Maure, está por debajo del anterior, es mas profundo y del tipo confinado.

Desde el punto de vista biológico y considerando el suelo como recurso difícilmente renovable, complejo y dinámico, sustento del hombre y de las plantas, es necesario conocer sus propiedades para darle el uso y cuidado adecuado. En cuanto al componente socio-económico, un aspecto que disturba las condiciones ambientales de la zona de estudio lo constituye la contaminación natural del arsénico en los cursos de manantiales y que impactan negativamente a los suelos y recursos hídricos. La contaminación en la zona, es el resultado de la interacción de las aguas termales con las rocas volcánicas en profundidad, las que deben contener inicialmente concentraciones altas de arsénico y, que pasan a las aguas termales surgentes, alcanzando una concentración que supera el LMP (0.05 mg/l), y afecta el aprovechamiento de los recursos naturales en la zona; por lo que el presente estudio, aborda la descontaminación del arsénico para hacer posible el aprovechamiento integral de los recursos hídricos de la cuenca del río Maure, mejorando la calidad de vida de las comunidades altoandinas y de la población de la ciudad de Tacna.

La línea de base de la concentración de As en ríos es de 0,1 – 0,8 $\mu\text{g l}^{-1}$, pero en algunos casos puede sobrepasar los 2 $\mu\text{g l}^{-1}$. Esta concentración varía de acuerdo a la composición del agua de recarga y a la litología de la zona. Se ha encontrado concentraciones relativamente altas de arsénico en áreas en las cuales el río es afectado por la descarga de aguas termales con altos contenidos del contaminante.

En la zona bajo estudio, como se muestra en el plano geológico, los afloramientos de aguas termales se distribuyen en una extensión de más de 200 km^2 de superficie; la integran la laguna Vilacota al noroeste, “Borateras” y Calachaca en la parte central y Chungara al sureste. Los caudales de estos manantiales son bajos conformando pequeños drenajes y discurren en dirección noreste, por estar emplazados en la vertiente derecha del río Maure y sus aportes a la cuenca son débiles, conformando un paisaje propio de áreas termales. Los precipitados originados a partir de las soluciones geotermales (sinter, caliche, travertinos) han dado lugar a depositaciones formando encostramientos en superficie. Notándose asimismo, sectores con clara Influencia y efectos de hidrotermalismo.

1.4 Contaminación Natural de los Recursos Hídricos por Arsénico

La escasez y la irregularidad de la distribución de los recursos hídricos en el sur del Perú, constituye uno de los principales problemas de su abastecimiento. Si abordamos ahora el problema, desde el punto de vista de la contaminación, la región presenta alteraciones de orden natural debido a la actividad volcánica; que como ya se indicó antes, viene disturbando las condiciones naturales del medio ambiente, dificultando el aprovechamiento de los recursos hídricos.

Inicialmente, el elemento arsénico contenido en las aguas termales, procede de los fluidos internos, generalmente al estado de vapor, los que han sido precipitados en los materiales volcánicos, para luego ser removidos por la circulación de las aguas subterráneas recalentadas en el interior, e incorporarse en los manantiales y aflorar en superficie, dando lugar a la formación de diversos compuestos como el anhídrido arsénico, del que se puede producir altas concentraciones de este elemento y, luego acumularse en el suelo o ser absorbido eventualmente por las plantas, poniendo en riesgo la vida natural. Se conoce que el As se deposita en especies de pastos, plantas de altura, en ciertas embriofitas (musgos), en concentraciones de 10 a 150 ppm [3]

En cuanto al arsénico nativo (elemental), éste existe, pero en cantidades muy pequeñas y, acompaña al azufre, antimonio, bismuto, etc. En cambio los compuestos de arsénico son muy numerosos. Los minerales más importantes son: el rejalgar, As_2S_2 , y el oropimente, As_2S_3 , que constituyen el disulfuro y trisulfuro de arsénico; y el mispíquel, que es un sulfuro de arsénico y hierro, AsFeS .

La cobaltina, es de composición similar al mispíquel, pero posee cobalto en lugar de hierro, AsCoS . Las piritas, en general, suelen contener arsénico, sea en combinación o en estado libre.

El arsénico no funde a la presión atmosférica ordinaria por la acción de la temperatura, sino que se sublima, es decir, pasa del estado sólido al gaseoso directamente, sin pasar por el estado líquido. Este elemento, puede presentarse por lo menos en dos estados alotrópicos di-sulfatos, que reciben por sus propiedades particulares los nombres de: arsénico metálico y arsénico metaloideo.

La variedad alotrópica de arsénico metálico recibe dicho nombre por su aspecto y por su color gris acerado; es la forma más estable y la que se obtiene en los procesos

metalúrgicos; se le llama también arsénico gris por su color y arsénico romboédrico por su forma cristalina.

La otra variedad alotrópica, el arsénico metaloideo se obtiene condensando los vapores de arsénico metálico a temperaturas inferiores a 0°C y en la oscuridad. Este arsénico es de color amarillo y muy inestable; se diferencia además, de la forma anterior por ser soluble en sulfuro de carbono, CS₂. El arsénico amarillo, por la acción del calor suave o bien por la acción de la luz, se transforma en arsénico metálico. A la temperatura de 18°C, el arsénico entra en combustión, produciendo llama azulada y generando anhídrido arsenioso o trióxido de arsénico, As₂O₃, llamado, también comúnmente por su color arsénico blanco.

1.5 Marco Legal Vigente

Constitución Política del Perú

El Estado determina la política nacional y promueve el uso sostenible de los recursos naturales.

Ley General de Aguas D.L. N°. 17752 y su Reglamento

Establece la clasificación de las aguas según su uso y los límites de concentración de metales y otras sustancias. Todo vertimiento debe de ser aprobado por DIGESA.

Código del medio ambiente y los recursos naturales D.L. N° 613

Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos Ley N° 26848

Norma lo relativo al aprovechamiento de los recursos geotérmicos del suelo y del subsuelo del territorio nacional

Normas Sectoriales

TUO Ley General de Minería sobre el Medio Ambiente

D.S. N° 014-92-EM. Establece el marco para la reglamentación aplicable a las actividades mineras y metalúrgicas.

Reglamento de protección ambiental para actividades minero-metalúrgicas

D.S. 016-93-EM, D.S. 059-93-EM

Señala los procedimientos a seguir por los titulares mineros para mejorar sus instalaciones a fin de que cumplan con las normas ambientales y para que nuevas operaciones de control y monitoreo de sus efectos sobre el ambiente.

Guías ambientales mineras

Normas Relacionadas.

Ley de áreas naturales protegidas, Ley N° 26834

Prohíbe extraer recursos no-renovables de los parques naturales y santuarios nacionales e históricos . En las demás áreas se permite la extracción de recursos.

Ley General de Salud, Ley N°26842

Impide descargar desechos o contaminantes en agua, aire o suelo sin haber adoptado las medidas de depuración que señalan las normas sanitarias y la protección del ambiente.

Ley N° 26821. Ley Orgánica para el aprovechamiento de los recursos naturales.

1.6 Objetivos

El presente estudio tiene por objetivo, aplicar las técnicas isotópicas, Oxígeno (^{18}O), Deuterio (^2H) y el isótopo radiactivo Tritio (^3H), para la determinación de la hidrodinámica del sistema geotérmico del área de “Borateras” y obtener información que haga factible la explotación de energía geotérmica, como una alternativa de mitigación de la contaminación de arsénico para el aprovechamiento de las aguas del río Maure.

El presente estudio también servirá de tesis para optar el grado de Maestría en Ciencias, en la especialidad de Minería y Medio ambiente, en la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, de la Universidad Nacional de Ingeniería.

1.7 Metodología de Trabajo

El estudio ha sido abordado de acuerdo a la siguiente metodología:

Recopilación de antecedentes de información técnica y planimetría de estudios sobre la contaminación de arsénico en la zona de Challapalca y en general en el sur del Perú

Planificación del trabajo de campo, en coordinación con entidades del lugar, Proyecto Especial Tacna (PET), delimitación del área de estudio.

1.- Inventario de manantiales y levantamiento de información de campo.

2.- Planificación y protocolo para el muestreo isotópico y geoquímico.

- 3.- Toma de muestras de aguas termales y frías para análisis químicos e isotópicos por espectrometría de masas, este último, para el caso de los isótopos ambientales y el tritio.
- 4.- Análisis químicos de muestras de agua y de isótopos ambientales, en laboratorios especializados del exterior.
- 5.- Utilización y procesamiento de los resultados isotópicos, en función de la Línea Meteorológica Mundial (LMM) y químicos con la aplicación del software Aqua Chem versión 3.1.
- 6.- Interpretación de resultados
- 7.- Elaboración del modelo conceptual del sistema geotérmico de "Borateras"
- 8.- Presentación de los resultados del estudio.

1.8 Riesgos del Arsénico para la Salud

En general las aguas subterráneas en regiones volcánicas mayormente están conformando reservorios, denominados acuíferos volcánicos; como ocurre en el sureste del Perú, adquiriendo estas aguas algunas características de estos reservorios. Así, su uso para fines de consumo se ve seriamente dificultado por la presencia de elementos tóxicos cuando superan las concentraciones permisibles, como es el caso del arsénico, haciéndolo inadecuado para el consumo humano que, como se sabe, este elemento químico se acumula en el organismo produciendo patologías denominadas Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico (HACRE) [4].

El agua para consumo humano es la fuente natural de As que mayor efecto tiene sobre la salud humana, encontrándose las mayores concentraciones de este contaminante en el agua subterránea. Entre sus efectos se destacan las lesiones de cáncer de piel, vejiga, riñón, hígado y pulmón.

El arsénico es uno de los elementos más tóxicos que pueden ser encontrados en la naturaleza, debido a sus efectos para la salud. El arsénico inorgánico ocurre en la tierra naturalmente en pequeñas cantidades. Los humanos podemos ser expuestos al arsénico a través de los alimentos, agua y aire, el arsénico es cancerígeno en agua de bebida, si la concentración es mayor a 300 ppb y por esta razón en los Estados Unidos de Norte América, se ha bajado el Límite Máximo Permissible, entre 5-50 partes por millón según la Environmental Protection Agency (EPA). Cabe indicar que también la exposición puede ocurrir a través del contacto de la piel con el suelo o agua que contenga arsénico.

La exposición al arsénico inorgánico puede causar varios efectos sobre la salud, como es irritación del estómago e intestinos, disminución en la producción de glóbulos rojos y blancos, cambios en la piel, e irritación de los pulmones. La exposición muy alta de arsénico inorgánico puede causar infertilidad en mujeres; causar pérdida de la resistencia a infecciones, afecciones al corazón y daño del cerebro, tanto en hombres, como en mujeres.

El Arsénico no puede ser destruido una vez que éste ha entrado en el ambiente, tanto que las cantidades añadidas pueden esparcirse y causar efectos sobre la salud de los humanos y los animales en muchos lugares sobre la tierra. El As inorgánico, puede dañar el ADN; mientras que el As orgánico, es menos peligroso.

1.9 Costos y Ventajas de las Técnicas Isotópicas en el Presente Estudio

En el proceso de evaluar el costo/beneficio del estudio con la aplicación de las técnicas isotópicas y aprovechar sus ventajas comparativas, cuando involucra agua subterránea, que es donde han demostrado ser una herramienta muy útil, se ha obtenido de su aplicación en todo caso un balance económico positivo.

Como ventajas enumeramos las siguientes:

- Determinar el tiempo que el fluido se renueva en el reservorio y, volumen en el que puede ser explotado, información útil para el planeamiento y la gestión sostenible del proyecto.
- Dimensionamiento de la magnitud de la explotación, en función del tamaño del reservorio. Las muestras tomadas de diferentes puntos de este reservorio, tienen características isotópicas similares, indicando un mismo origen.
- Ubicación de la altitud de la zona de recarga y, volumen del agua de lluvia que recarga el agua subterránea del sistema, comparada con la escala de descarga de flujo, es decir tiempo de residencia del fluido en el reservorio.
- Con la aplicación de las técnicas isotópicas se ha obtenido información, que sólo se habría podido obtener con varios pozos exploratorios, información que útil para tomar la decisión de factibilidad del proyecto.

Costo de la aplicación de la técnica isotópica

Para el presente estudio isotópico han sido necesarias efectuar previamente efectuar

actividades de campo, luego enviar al laboratorio para los análisis de química del agua e isotópicos de Oxígeno-18 (O-18), Deuterio (H-2) y tritio y seguidamente, efectuar la interpretación de resultados, como se describe en el cuadro adjunto.

COSTO DEL ESTUDIO ISOTOPICO

CONCEPTO		IMPORTE UNITARIO US\$	IMPORTE TOTAL US\$
1. Inventario de información de la zona de estudio		1,400	1,400.00
2. Toma de muestras de manantiales		3,000	3,000.00
3. Análisis químico convencional: 30 muestras		120	3,600.00
4. Análisis isotópicos (*)	30 análisis: ¹⁸ O y Deuterio	80	2,400.00
	06 análisis: Tritio	100	600.00
5. Interpretación de resultados		5,000	5,000.00
6. Elaboración del informe		1,000	1,000.00
TOTAL GENERAL:			17,000.00

(*) Análisis de isótopos efectuados en los laboratorios de Geotermia Salvadoreña (GESAL) de El Salvador.

CAPITULO II

DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

2.1 Ubicación y Accesibilidad

El área de estudio se ubica en la parte oriental de La Cordillera Occidental de los Andes , a una altitud de 4,200 m.s.n.m. Políticamente pertenece al distrito de Sitajara, provincia de Tarata, departamento de Tacna, Fig 01.

Las coordenadas geográficas que delimitan la zona de estudio son:

Longitud Oeste : 69°29' 47" 69°56' 16"

Latitud Sur : 17°06' 37" 17°26' 04"

Para acceder a la zona en estudio (Borateras), la ruta más corta es, saliendo de la ciudad de Tacna, se sigue la carretera a la localidad de Palca, luego se continúa al abra Paso de los Vientos, El Ayro, Chiluyo y Kallapuma- Challapalca-“Borateras”, distante 250 km de la ciudad de Tacna, con un tiempo aproximado de viaje de 4 horas.

La localidad más cercana al área en estudio es el pueblo de Tarata, que cuenta con infraestructura logística de servicios de telecomunicaciones y alojamiento. El puerto marítimo más cercano es el de Matarani y está conectado con la ciudad de Tacna a través de la Carretera Panamericana Sur.

2.2 Clima

El clima es típico de la zona puna, caracterizado por temperaturas bajas, y precipitaciones sólidas, con amplias variaciones entre el día y la noche, los meses más cálidos corresponden al período lluvioso de diciembre a marzo con temperaturas de 2°C a 5°C, con máximas entre 15°C y 20°C , mínimas nocturnas entre -5°C y 10°C, de abril a noviembre, las temperaturas promedios son mínimas y bajan a valores negativos de julio a agosto.

Las características hidrometeorológicas son registradas por la red pluviométrica de tres estaciones, Kovire, Chuapalca y Challapalca , representado una densidad de 423 Km² /estación ; esta densidad es baja si se compara con la recomendada por la

Organización Meteorológica Mundial (O.M.M.), que para la regiones montañosas es de 200 Km² /estación, como mínimo.

La hidrología de la cuenca no es regular ya que esta expuesta a períodos de sequías y de precipitaciones intensas; sumado a esto, los recursos de agua subterránea, están afectados por el vulcanismo reciente con manifestaciones hidrotermales en la parte alta de la cuenca del río Maure.

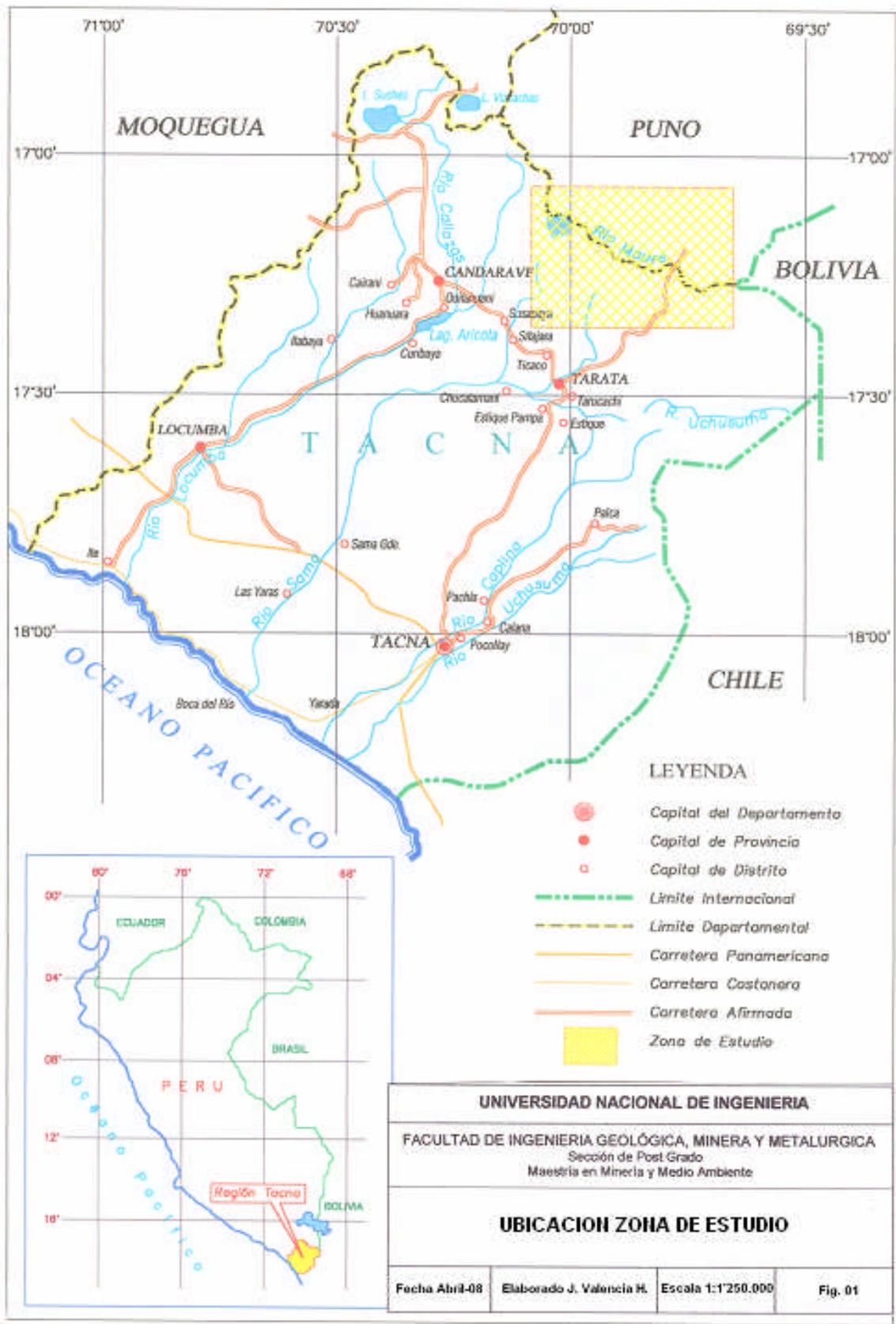
El régimen de las precipitaciones pluviales de la cuenca alta, en promedio, es de 386 mm/año, valor muy bajo para una cuenca situada a mas de 4000 msnm; la vegetación consiste de pastos naturales, representados por “ichu”, que cubre grandes extensiones en las pampas, también predominan áreas de “bofedales”, donde se puede encontrar desarrollo de gramíneas y otras yerbas pequeñas.

En cuanto a la información de la evapotranspiración, consignada en el presente estudio es de 328 mm/a. En el Anexo 1 se indican los cuadros de precipitación de las tres estaciones próximas a la zona de estudio, Challapalca, Kovire y Chuapalca de más de 30 años de registros. Cabe indicar que para el caso de la evaporación solo se tiene información histórica de la estación de Kovire, muy cerca de la zona bajo estudio y perteneciente a la cuenca del río Maure. Para calcular el valor de la evapotranspiración se ha utilizando la formula de Turc.

$$ERT = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad ERT = \frac{386 \text{ mm/a}}{\sqrt{0.9 + \frac{(386)^2}{(555)^2}}} = 328 \text{ mm/a}$$

2.3 Topografía

El altiplano del sur del Perú, es una alta meseta de cerros de suaves pendientes con una altitud de 3,800 a 4,400 m.s.n.m. El paisaje muestra una topografía madura suavemente ondulada con valles anchos y flancos tendidos, las pampas constituyen depósitos aluviales y fluvioglaciares, en algunas de ellas existen depresiones en las que se han formado áreas pantanosas que, localmente se denominan “bofedales”, calderas volcánicas, volcanes y estructuras domales. Los pequeños cursos de agua como Kallapuma, Samuta, drenan sus aguas al río Maure, que constituye el nivel de base local, pertenece a la cuenca hidrográfica del Pacífico. Otra cuenca, más al norte, esta representada por el río Callazas, que cuyas aguas forman la laguna Aricota.



2.4 Geomorfología

La geomorfología corresponde a la zona típica de terrenos volcánicos, de las formaciones Huaylillas y Barroso que originalmente habrían cubierto la cuenca superior de los ríos, observándose en la actualidad lechos de paleovalles, los que fueron cubiertos por lavas; se puede decir que el cambio de los cursos de agua, se debe a un control litológico de formaciones antiguas, para los cursos principales. El aspecto estructural y la erosión han jugado un importante rol en el modelamiento y alineamiento de cadenas volcánicas adoptando forma abovedada por efecto de la denudación. Las estructuras volcánicas, calderas, conos y domos han sido disectados, se observa cerros aislados, la erosión ha configurado un relieve suave y ondulado en la parte central de la cuenca, donde discurre el río Maure, debido principalmente a la naturaleza de las formaciones geológicas en su mayoría de origen volcánico; se observa asimismo, algunos cerros testigo, como el cerro Titire, relicto de erosión; presentan algunos, las inflexiones de pendiente en el contacto de la lava con el talud de los derrubios de erosión y el contacto de éste con la planicie.

Las estructuras volcánicas cuyas expresiones morfológicas positivas limitan a las planicies y se yerguen aisladamente dentro de ellas; muestran formas cónicas típicas, con aparatos volcánicos parcialmente destruidos, donde los afloramientos se muestran sobretodo, restringidos a las zonas más altas. Los flancos están cubiertos por depósitos fluvioglaciares y morrénicos, surcados por quebradas dispuestas radialmente.

En el aspecto estructural, el plegamiento que afectó a las rocas volcánicas de las formaciones Tarata y Huaylacollo del cretácico superior–terciario inferior, indican un tectonismo probablemente ocurrido durante el cretácico superior a terciario inferior (fase peruana de Steinman), emplazándose al mismo tiempo los macizos, stocks dioríticos, granodioríticos y graníticos, dándole la configuración del relieve que se observa en la actualidad. Las formaciones más modernas, como los volcánicos Huaylillas, tufos Sencca, clásticos Capillune y la formación Barroso (correspondientes al plioceno y pleistoceno) están, mayormente afectadas por tectonismo.

En el cuaternario, la zona sufre una extensa glaciación que dio lugar a la destrucción de gran parte de la geomorfología volcánica ya instalada. Luego se profundizan los valles debido a los reajustes epigenéticos y de neotectónica, de los Andes, generándose una gruesa capa de materiales aluviales debido al poder erosivo de los ríos e instalándose una serie de manantiales termales alineados según la

orientación estructural, como se puede observar en parte alta de la cuenca del río Maure.

2.5 Geología General

La formación geológica más antigua identificada en la zona, corresponde al Jurásico inferior. Así, durante el liásico inferior la zona era parte del geosinclinal andino en un ambiente de transgresión marina de mediana profundidad, la cual alcanzó una amplia extensión en el sur del Perú y el norte de Chile (Caloviano). Sus depósitos están representados por la formación Atascapa (Wilson 1962), Morro de Arica (Ceccione y García 1960). Estas formaciones son correlacionables con el Grupo Yura de la región de Arequipa (Jenks 1948) [5].

En el Jurásico y Cretácico inferior, se depositaron las formaciones del tipo moladas, de carácter regresivo que indican un levantamiento gradual de la región Fig. 02.

El siguiente episodio comprende un extenso período de vulcanismo que se inició en el Cretácico superior hasta el terciario inferior, durante el cual se depositaron rocas volcánicas del grupo Toquepala, con intercalaciones de clásticos gruesos a finos que sugieren la interrupción de las fases volcánicas y períodos de sedimentación en ambiente lacustrino.

En el aspecto estructural, el plegamiento que afectó a las rocas de la formación Tarata y Huilacollo del Cretácico superior–terciario inferior, indican un tectonismo probablemente ocurrido durante el Cretácico superior a terciario inferior (fase peruana de Steinman), emplazándose al mismo tiempo los macizos, stocks graníticos, granodioríticos y dioríticos

Después de estos movimientos diastróficos que afectaron a los Andes peruanos en general, se produjo una fuerte erosión que, incluso llegó a truncar el techo de los intrusivos, produciéndose la formación de una superficie de relieve bajo (superficie puna de Mc Laughlin). Sobre esta planicie que posteriormente sufrió fallamiento y plegamiento, se depositaron, en la región, clásticos de la formación Moquegua, en un ambiente continental.

Luego, en el Mioceno-plioceno se manifiesta el más grande episodio de vulcanismo que dio lugar al emplazamiento de los tufos ácidos de la formación Huaylillas, que cubrió extensas áreas del flanco occidental andino, con una altitud de

3,800 m.s.n.m. Posteriormente, se depositaron los tufos ácidos de la formación Sencca, durante el Plioceno superior, y en el terciario superior tuvo lugar el emplazamiento de la formación Capillune, con exposiciones en diversos lugares, Tarata, Maure y Antajave.

Seguidamente, otro nuevo ciclo volcánico de fines del Plioceno originó las formaciones del Grupo Barroso, que se presentan conformando expresiones de numerosos conos y domos volcánicos emplazados a lo largo de la denominada "Cordillera del Barroso".

En el Pleistoceno, la zona sufre una extensa glaciación que dio lugar a la destrucción de gran parte de los edificios volcánicos. Durante el cuaternario se profundizan los valles debido a movimientos epigenéticos de la Cordillera de los Andes, incrementándose así el poder erosivo de los ríos y depositándose un grueso manto de materiales aluviales y fluvio-glaciares en la cuenca del río Maure.

2.5.1 Estratigrafía

Basamento.

Parte basal, consiste de rocas de variada litología que incluyen intrusivos, volcánicos y rocas sedimentarias con diverso grado de deformación, plegamiento, fallamiento y erosión, son rocas casi impermeables, de edad mesozoica a paleógeno.

Terciario.

Formación Huilacollo, aunque no aflora en la zona bajo estudio, está integrada por derrames, piroclásticos y pequeñas proporciones de sedimentos, e infrayace en discordancia angular a las areniscas y materiales volcánicos de la formación Maure. Su edad está comprendida en el terciario inferior.

Formación Maure, consiste de una secuencia interestratificada de areniscas de grano fino, limos y arcillas, aglomerados y tufos redepositados, cenizas volcánicas de color gris verdoso, intercaladas con conglomerados de diversos grados de permeabilidad, sus espesores varían de 140 a 350 m, la edad asumida es del Mioceno superior.

Formación Sencca.- está integrada por rocas volcánicas de composición de riolita a riodacita, tufos y/o ignimbritas de color blanco a blanco-rosado, las rocas son blandas, impermeables y contienen fragmentos de pómez color blanco con cristales de biotita y cuarzo en una matriz criptocristalina con presencia de cuarzo violeta bipiramidal. El espesor es estimado de 10 a 80 m, su edad ha sido determinada por datación radiométrica en 6.5 ± 0.3 m.a. (Alan Clark et al. 1990) que corresponde a una edad del Mioceno superior.

Formación Capillune.- está conformada por una serie de intercalaciones de arcillas y limos, areniscas, conglomerados, piroclásticos y capas de tufos retrabajados con abundantes inclusiones de líticos, areniscas arcillosas y tufáceas. Los conglomerados consisten de material volcánico de diferente tamaño en una matriz arenosa a granular en gruesas capas, presentando algunos niveles soldados. Su espesor varía des 80 a 200 m, aunque se ha observado hasta 400 m. (Jorge Tovar 1994). La edad asignada a la formación es del Mio-plioceno.

Grupo Volcánico Barroso.- consiste de tufos aglomerados, brechas y lavas de composición andesítica a traquítica, forma conos volcánicos y extrusiones de gran extensión, los flujos de lodo, flujos de lava, y piroclásticos ocurren en gruesos bancos con fracturamiento en bloques irregulares y algunas veces con disyunción columnar que le confiere cierta permeabilidad. El Grupo Barroso lo integran, el volcánico Chila, el volcánico Barroso y Purupuruni, estos cuerpos volcánicos están relacionados con diferentes superficies de erosión y sobreyacen a rocas del Mio-plioceno, así como también, sedimentos fluvio-glaciares; su espesor varía y puede alcanzar en los conos volcánicos hasta más de 1,000 m.

Las dataciones radiométricas indican edades entre 3.23 ± 0.5 m.a. y 0.54 ± 0.18 m.a. (Wolfan Morche, Natalio de la Cruz, INGEMMET 1994) y por consiguiente de edad Plio-pleistoceno.

Cuaternario.- Los depósitos cuaternarios tienen amplia distribución en el área en estudio, consisten de materiales clásticos inconsolidados desde el pleistoceno hasta el reciente, cubriendo rocas mas antiguas y alrededor de los centros volcánicos, son de diferente origen y estratificación, escasa selección de sus fragmentos, estos materiales están integrados por arena gruesa, gravilla, grava y bloques grandes, se destaca también la presencia de "till" producto de la glaciación cuaternaria y, está

relacionado con cenizas volcánicas, los materiales más recientes, corresponden a sedimentos fluvio-glaciares y material aluvial muy permeable; su máximo espesor de estos depósitos es de 40 metros, como se puede apreciar en la ilustración adjunta.

Columna Litológica del Area de Borateras-Challapalca

EDAD	GRUPO O FORMACION	Mtr	LITOLOGIA	DESCRIPCION	
CUATERNARIO	GRUPO BARROSO	Depositos Recientes	40		Gravas y arenas, aluviales y fluviales. Gravas angulosas heter.
		Dep. Morr. y Fluvioglac.	100		Tufos traquíticos y traquiandesíticos gris claros, compactos cristales de Sanidina, se presenta en bancos gruesos
		Volcanicos Purupuruni	350		Tufos traquíticos de color y textura variable, posición horizontal Flujos andesíticos y traquiandesíticos porfiríoides, vescivulares
		Volcanico Barroso	1820		Derrames de andesita gris, grano fino, , intercalaciones de bancos gruesos de brechas volcanicas y aglomerados
		Volcanico Chila	1000		Intercalaciones de arcillas y limos, areniscas, conglomerados, piroclásticos y capas de tufos retrabajados, areniscas arcillosas
TERCIARIO	Fm Capillune	195		Rocas de composición riolítica a riódacítica, impermeables	
	Volcanicos Sencca	80		Areniscas de grano grueso y fino, que alternan con de limos y arcillas , aglomerados y tufos redepositados , cenizas volcánicas color gris verdoso, intercal. de congl.	
	Fm Maure	140		Derrames de andesitas, traquiandesitas y riódacitas, textura variable de fina a gruesa y de colores variados intercalaciones de aglomerados, tufos riolíticos y dacíticos	
	Volcanico Huilacollo	1200		Areniscas y limolitas oscuras, lutitas oscuras y verdosas. Delgados horizontes de calizas e intercalaciones de tufos y derrames volcánicos	
JURASICO-CRETACICO	Fm Atascapa	150			

2.5.2 Formaciones Volcánicas

Están referidas a las geoformas volcánicas, cuyas expresiones morfológicas positivas limitan a las planicies y se yerguen aisladamente dentro de ellas; muestran formas cónicas típicas con aparatos volcánicos medianamente destruidos, donde los afloramientos están parcialmente restringidos a las zonas más altas , los flancos están cubiertos por depósitos fluvioglaciares y morrénicos surcados por quebradas dispuestas radialmente.

Los tramos altos de estos flancos presentan fuerte pendiente que, a medida que se desciende, se atenúa hasta que en algunos casos (Volcán Jucure) dan formas más o menos planas con bordes frontales que corresponden a flujos de lava.

2.5.3 Geología Estructural

Los principales rasgos estructurales están constituidos por pliegues y fallas. Indicándose que las formaciones más modernas como los volcánicos, Sencca, Capillune y los volcánicos Barroso, no han sido mayormente afectados por este tectonismo.

La presencia de fallas longitudinales de rumbo NE-SW en el sector Chungara; fallas paralelas de rumbo N 10° W son coincidentes con la zona de descarga de manantiales termales; una falla estructural de rumbo N 64° E , delimita una interfase de agua de buena calidad entre Chungara y Kallapuma (también denominada “Ojos de Copapujo”) representado por el manantial del mismo nombre.

2.6 Hidrogeología

Un elemento importante que hace posible la presencia de agua subterránea en áreas volcánicas activas es la alta tasa de renovación, considerando que constituyen sistemas hidrológicos recientes , no existiendo tiempo para que se formen los valles fluviales , ya que continuamente han sido obstruidos por las emisiones de materiales volcánicos, como lavas, aludes, flujos de lodo, ceniza volcánica y otras acumulaciones.

En estas zonas, la infiltración alcanza valores altos en relación a la precipitación. Desde este punto de vista, estas regiones comparten las características de las áreas cársticas, drenaje hidrográfico pobremente desarrollado, presencia de lagunas y “depresiones de recarga” y flujos en sistemas fisurados a través de fracturas o fallas abiertas, como el caso de las lavas o tobas volcánicas. Su principal diferencia con las áreas cársticas es la lentitud del proceso de disolución de la roca a partir de las fracturas.

2.6.1 Cuenca Hidrográfica del Río Maure

Los afloramientos de agua son numerosos en la zona; unos manantiales son de régimen periódico entre las cotas 4,600-4,900 m.s.n.m, originados por la infiltración de la precipitación pluvial y del deshielo de los nevados; otros manantiales son de

régimen permanente, entre las cotas 4,240-4,600 m.s.n.m, por lo general de caudal considerable, manteniéndose durante todo el año [6].

El agua de escorrentía de la cuenca hidrográfica del río Maure Fig. 02A, representa el único recursos hídrico aprovechable en la zona, cuya ubicación geográfica se localiza entre los paralelos 17° 00' y 17° 30' de Latitud sur, y limita con cuencas vecinas como las del río Uchusuma al sur, la del río Chichillapi al norte, las nacientes de los ríos Sama, Locumba y Caplina al oeste y al este con la República de Bolivia.

El río Maure constituye el nivel de base de drenaje de la cuenca. Nace en el Perú, en la confluencia del río Ancoaque y la descarga de la laguna Tacata, sigue una dirección de noroeste a sureste y constituye en un tramo de 95 km, el límite entre los departamentos de Tacna y Puno, para luego ingresar a territorio de la república de Bolivia donde desemboca en el río Desaguadero.

Los afluentes principales en territorio peruano son los ríos Mamuta, Kaño, Kallapuma y Chiluyo por la margen derecha; Chiliculco y Ancomarca por la margen izquierda, este último descarga, aproximadamente, 1 km aguas arriba de la estación hidrométrica de Chuapalca. Los ríos Kaño y Uchusuma son afluentes que, naciendo en territorio peruano, descargan al río Maure en territorio boliviano.

Las lagunas de Vilacota y Ancocota, pertenecientes a la cuenca del río Maure, determinan una área de cuenca cerrada de 216 km² y descargan sus aguas a la laguna Taccata y ésta vierte sus aguas posteriormente al río Maure, que alcanza una extensión de cuenca en el área bajo estudio de 420 km², pero aportes de caudales importantes, solo en años muy húmedos.

2.6.2 Acuíferos

La zona en estudio está formada por vulcanismo reciente y presenta, por lo menos, dos unidades hídricas subterráneas. Ello ocurre debido a la elevada permeabilidad de los materiales volcánicos y a la presencia de cavidades en las rocas, más o menos comunicadas entre sí, sirviendo de conductos para la liberación de gases o circulación de fluidos durante los procesos efusivos. Estas formaciones volcánicas experimentan erosión hídrica, con liberación de ciertos elementos químicos. Uno de los mayores obstáculos para la recarga de los acuíferos en zonas volcánicas y para el flujo vertical en general lo constituye, la presencia de paleosuelos, originados por la generación de minerales arcillosos.

Las reservas de aguas subterráneas en la zona en estudio están contenidas en dos acuíferos principales; Capillune y Maure, como se ilustra en la Fig. 02B. El primero, es un acuífero superficial y en algunas partes se comporta como un acuífero abierto. El segundo, es potente y de carácter confinado, representa la mayor reserva de agua subterránea explotada en la zona. Su potencia máxima, medida en Comprecal, a orillas del río Maure es de 500 metros. (Según Guillermo A. Pérez V. tesis de Bach. en Geología UNMSM, 1974)[6]

Los trabajos de perforación y de estudios de geofísica, así como la interpretación geológica de la zona, indican en su columna estratigráfica, depósitos aluviales intercalados con estratos de rocas piroclásticas.

El acuífero principal en la zona en estudio(acuífero Maure) presenta límites laterales impermeables, conformados por los Volcánicos Barroso que limitan la cuenca hidrológica, originando una hidrodinámica de circulación parcial del agua subterránea, por fallas y fracturas. En la zona en estudio, los límites, en profundidad, no están todavía determinados, aunque se considera un espesor aproximado del acuífero de 450 m. en las partes bajas (Titire, Achapate).

Los acuíferos antes descritos, tienen sus puntos de descarga a través de diversos manantiales de aguas termales y manantiales de aguas frías, en el área denominada “Borateras”, ubicados en la margen derecha del río Maure (entre los sectores de Putina y Calachaca), donde vierten flujos difusos, totalizando aproximadamente un caudal máximo de 100 l/s, estas descargas contienen el elemento contaminante arsénico. En este sector, se encuentran “Los Baños de Calachaca”, constituidos por piletas naturales, las surgencias de las aguas termales en este lugar, son a partir de fracturas de rocas volcánicas muy silicificadas, que conforman escarpamientos y también el estrangulamiento del cauce del río en este tramo.

Los análisis de la química del agua de los manantiales termales indican una composición del tipo clorurada sódica para el área de “Borateras” y para Calachaca-Chungara-Quiane-Juntupujo, sulfatadas-sódico-cálcicas; y para Putina Grande sulfatada-sódico-potásica; y bicarbonatada-sódico-potásica para Kallapuma y el pozo PK-2. Las variaciones en la composición química de agua de los manantiales termales es atribuida a los diversos grados de interacción agua-roca y a mezclas con

aguas frías ocurridas en su trayectoria ascensional, hasta el punto de descarga en superficie.

Los estudios de la formación Maure datan del año 1974, e indican la surgencia de manantiales, originados en areniscas de color gris anaranjado, que constituye la roca acuífero. En cuanto a su recarga, en general, se considera que se produce a partir de la infiltración de las precipitaciones de la región.[6]

CAPITULO III

EL VULCANISMO DEL SUR DEL PERU

3.1 Contexto Geodinámico y Tectónico del Vulcanismo

La Cordillera de los Andes del Perú, tiene una orientación orográfica NO-SE a NNO- SSE. Esta cordillera, es un sistema montañoso, con modificaciones locales de dirección; la sección intercordillerana , forma las zonas de altas mesetas, donde la altitud varia de 3,800 a 4,200 m.s.n.m.

La información geofísica actual, permite admitir que, el borde oeste del continente sudamericano, es una margen continental activa, donde se produce la subducción de la placa pacífica (Nazca) bajo de la placa continental sudamericana. La evolución mas importante ha ocurrido en el curso del meso-cenozoico; así en el Triásico , la evolución geodinámica del dominio andino está caracterizada por régimen de distensión acompañado por la subsidencia de cuencas marinas asociadas a un magmatismo efusivo. Del Santoniano a la época actual, el dominio andino casi totalmente emergido estuvo sujeto a varias fases de compresión relativamente breves, separadas por períodos más largos de “calma tectónica”, caracterizados al parecer por la distensión compatible con el emplazamiento de material volcánico.

3.2 La Tectónica de Placas y el Vulcanismo

La actividad tectónica actual de la Cordillera de los Andes, se percibe por los numerosos sismos que afectan al territorio. Como consecuencia de estos movimientos se tiene en diversas partes del territorio sistemas de fallas que han sido reconocidas por su expresión en la superficie o por la distribución de sismos sobre su plano de falla.

La evolución andina es el modelo de desarrollo de una cadena asociada a una zona de subducción, y de acuerdo al análisis paleogeográfico y estructural , debe ser considerada en íntima correlación con el magmatismo. En cuanto a la relación vulcanismo-subducción, ha quedado claramente establecido por los estudios en este tema, la relación del vulcanismo andesítico calco-alcalino con la subducción de la placa pacífica (Nazca), debajo de la placa continental sudamericana. Fig 03.

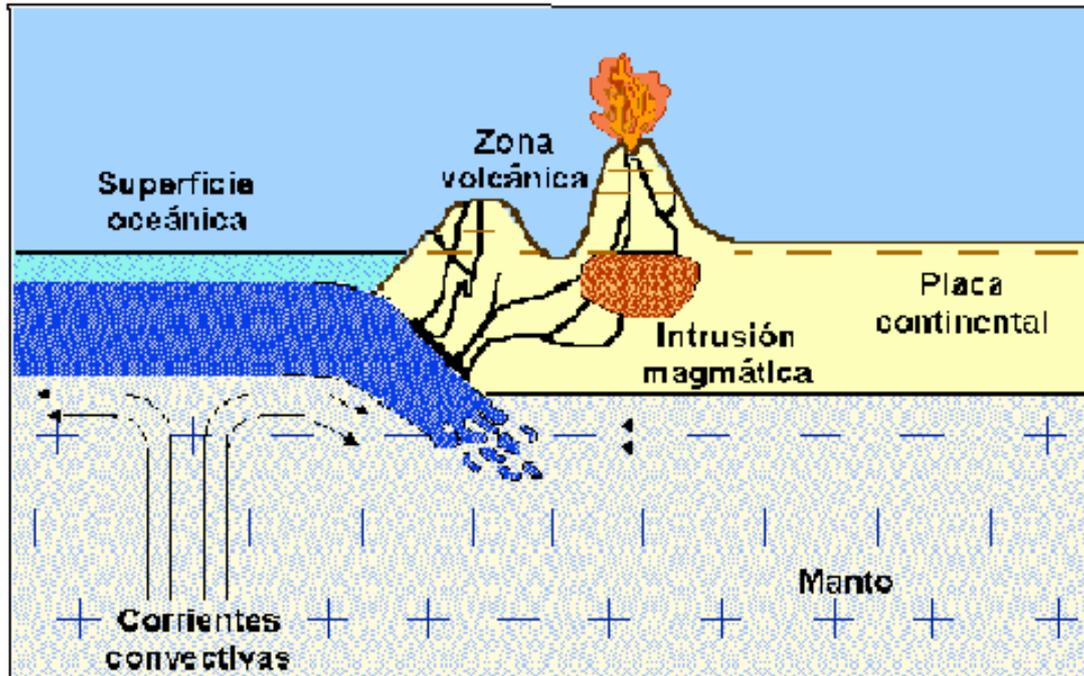
La relación del vulcanismo cenozoico con la subducción parece más evidente, pero sobre todo, el vulcanismo plio-cuaternario, es el que aporta las evidencias

petrológicas que confirman esencialmente la naturaleza andesítica de los afloramientos a lo largo de la Cordillera Occidental. Si el vulcanismo cenozoico está ligado con la actividad de subducción, actualmente en funcionamiento, varias implicancias deben producirse en lo que concierne a la edad del vulcanismo y su evolución geoquímica.

La disposición lineal de los afloramientos, paralelamente a las estructuras andinas y a la fosa oceánica, sus productos son de la misma serie magmática calco-alcalina. La secuencia de los emplazamientos es similar en los plutones y en los volcánicos. Los primeros son productos intrusivos y más básicos que los productos finales. También es indicativo el desfase espacial y temporal entre el plutonismo y vulcanismo.

El mayor volumen de productos plutónicos, entre ellos el batolito andino, están emplazados en la zona costera y entre el Cretáceo superior y el Eoceno superior. Mientras que, el mayor volumen de rocas volcánicas está emplazado en la Cordillera Occidental, más al Este del batolito andino y entre el Mioceno y el Cuaternario [7].

Fig 03 La Tectonica de placas y el vulcanismo



3.3 Principales Rasgos Tectono-volcánicos del Area de Challapalca

Las deformaciones tectono-estructurales en la zona de estudio se han producido en tres eventos importantes y con una orientación andina de NW-SE, NE-SW y E-W.

Tectónica de Basamento.- iniciada durante las fases epirogenéticas sucedidas en el plioceno, han afectado a las formaciones Maure, Sencca y Capillune, originando fallas, plegamientos de moderada inclinación, así como de reajuste estructural de carácter local.

Tectónica de Cobertura.- ha ocurrido durante la actividad volcánica del Grupo Barroso, probablemente a lo largo de zonas de debilidad, afectando tanto los sedimentos del terciario con fallamiento radial y circular originados cerca de los conos volcánicos.

La Neotectónica.- corresponde a la reactivación de algunas de las fallas ya existentes inicialmente. No hay mucha evidencia, pero es posible que estén en relación con la actividad geotérmica y en relación con algunos manantiales termales de la zona.

Desde el punto de vista estructural y apoyados por las investigaciones geológicas, hidrogeológicas, geoquímicas y geofísicas, se ha reconocido en la zona bajo estudio dos sectores con características geotermales.

El primer sector, entre la laguna Casiri y la quebrada Chungara, parte sureste de la zona de estudio, está limitado por dos fallas longitudinales de rumbo NE-SW y una transversal que bordea el volcán Jucure, estas fallas ejercen un control estructural e hidrogeológico ya que determinan una zona de interfase entre este sector geotermal y su flanco lateral NW cuyas aguas de manantiales aunque frías no presentan contaminación.

El segundo sector, que corresponde al área de Borateras-Calachaca se ubica en la parte central del zona de estudio, y al noroeste del sector Casiri-Chungara, el que se encuentra limitado al SW por los domos Purupuruni y volcán Iscampo, por el NW con el río Maure, y dos fallas paralelas menores de rumbo N 10° W, coincidente con la zona de descarga de las manifestaciones geotérmicas. La parte Este de dicho sector se encuentra limitada por una falla estructural de rumbo N 50°E, que tiene un control hidrogeológico, que delimita una interfase con aguas de buena calidad entre el

segundo sector de mayor contaminación, ya que corresponde a la zona de descarga de los fluidos geotermales.

3.4 Depósitos y Productos Volcánicos

El contexto geológico del área de “Borateras” está conformado, principalmente por rocas volcánicas de diferentes edades y composición, pertenecientes al vulcanismo del sur del Perú. Estructuralmente descansan, en discordancia, sobre rocas sedimentarias mesozoicas, correspondientes a varios ciclos volcánicos que van desde el terciario inferior al cuaternario, cubiertos por depósitos de material aluvial, de naturaleza glacial y fluvio-glacial.

Durante el Terciario (Mioceno), la tectónica andina originó fracturamientos del tipo tensional, con la reactivación de antiguos alineamientos estructurales, los que han originado diversos fallamientos en bloques, afectando la integridad de los acuíferos. Los alineamientos estructurales, guardan relación con los afloramientos de aguas geotermales de la zona.

Los aparatos volcánicos de diversos centros emisores, están emplazados en el Complejo Ignimbrítico Basal Huaylillas y corresponden a varios períodos de actividad, cubriendo sus materiales la casi totalidad del área. Posteriormente, la erosión glacial y fluvio-glacial han modificado la morfología de los diferentes ciclos volcánicos, solo permaneciendo casi inafectados los mas recientes.

En la región se ha reconocido tres principales fases volcánicas recientes; Chila, Tutupaca y Purupuruni.

Fase Chila.- Compreendida entre una edad de 5 y 8 m.a. de antigüedad, principalmente de carácter efusivo desde los centros volcánicos; Jucure, San Francisco y Chila. Un segundo período de una edad de 2 a 4 m.a. que tuvo un carácter tanto efusivo como explosivo, con productos principalmente de composición andesítica.

Fase Tutupaca.- Los materiales de esta fase han sido distribuidos por toda el área como bloques aislados sobre las formas volcánicas. La erosión glacial y fluvio-glacial han alterado los volcánicos Chila, mientras que, muy débilmente, a la fase Tutupaca. La edad de los volcánicos Tutupaca se estima en 0.7 m.a. al igual que el volcán

Casiri, San Francisco y algunos domos. En su actividad efusiva predominan productos ácidos (dacitas) y mayormente depósitos piroclásticos.

Fase Purupuruni.- Las geoformas y materiales de esta actividad, representados por estructuras domales aparecen como los productos mas diferenciados del magmatismo regional. Estos domos, de composición dacítica, ponen en evidencia la proximidad a la superficie de la cámara magmática en la zona.

La geomorfología del área de "Borateras" la conforman estructuras domales, las que aparecen como formaciones aisladas, de morfología abovedada, relacionadas en el tiempo con estructuras de colapso.

La edad radiométrica de los volcánicos Purupuruni esta determinada en 100,000 años y pertenecen a este mismo ciclo los volcanes: Casiri, Kere y Paucarani.

3.5 Geoquímica de los Materiales Volcánicos

La importancia del vulcanismo como, un fenómeno geodinámico, se inició desde que se postuló la teoría de la tectónica de placas y la diversidad de fenómenos que intervienen en su formación, como es el dinamismo eruptivo, velocidad de enfriamiento de la lava, naturaleza del magma, etc. Estas rocas constituyen facies bien diferenciadas y cada una es el resultado de una historia diferente.

En cuanto a la alteración de los materiales de naturaleza volcánica, se conoce que a temperaturas inferiores a 50°C, las reacciones se efectúan con una extrema lentitud, solo las reacciones en solución pueden realizarse a velocidad notable y alcanzar su estado de equilibrio. En la superficie terrestre, la hidrósfera esta encargada de producir las reacciones en solución acuosa.

Las aguas naturales, contienen en solución esencialmente las especies minerales que son mas o menos disociadas en iones, las reacciones entre todas las sustancias disueltas son muy numerosas, siendo necesario distinguir primero, las reacciones homogéneas en solución y las reacciones que hacen intervenir la solución de una u otra fase sólida o gaseosa. Representan estas últimas, para la geoquímica, las reacciones de interacción agua-roca entre la hidrósfera y la litósfera, siendo necesario para el presente estudio, conocer sobre todo, la dinámica del ciclo hidrológico de la zona.

En cuanto al origen del elemento As en las aguas subterráneas en el área de estudio, es atribuido a la actividad volcánica ocurrida en los Andes durante el cuaternario. Esta actividad fue muy intensa en el altiplano y, a ella se deberían las altas concentraciones de As que poseen los manantiales en la parte alta del río Maure (18 ppm). Como consecuencia del vulcanismo, en el SE del Perú y la Cordillera del Barroso, se habrían acumulado grandes cantidades de As, sobre todo en la fracción vítrea de la roca. La solubilidad del As depende de la alcalinidad del agua, especialmente aquellas aguas ricas en bicarbonato de sodio. En cambio es escaso o no se encuentra en aguas ricas en sales de calcio o magnesio, aunque sean bicarbonatadas o sulfatadas. Las aguas subterráneas que contienen mayores concentraciones de arsénico son las de carácter muy alcalino.

El As predomina en acuíferos profundos, originado a partir de probables ambientes lagunares del cuaternario. Aquí el As ha podido tener dos vías de precipitación, en profundidad, en forma de fase vapor, o haberse acumulado como sólidos en suspensión transportados desde la puna, luego se concentró por evaporación. Estudios de la litología de pozos concluyen que es posible ubicarlos en estructuras y materiales de paleo-cauces locales, y su presencia en las capas superficiales, debido a la ocurrencia de antiguas descargas de sistemas de manantiales desarrollados en la zona altiplánica.

CAPITULO IV

ISÓTOPOS AMBIENTALES

4.1 Principio de las Técnicas Isotópicas

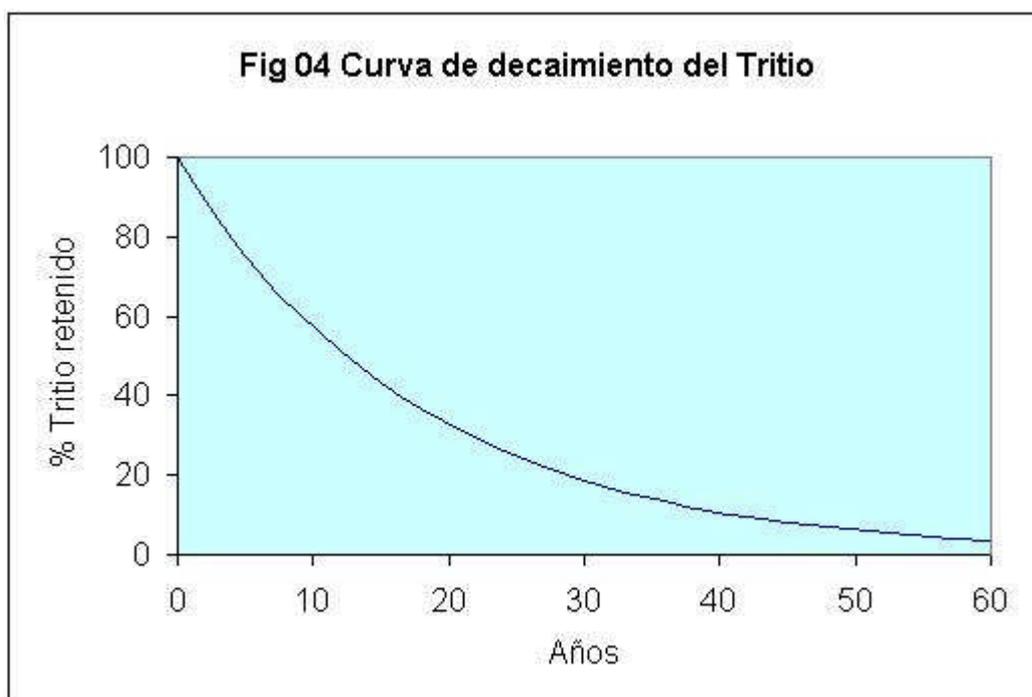
Los isótopos ambientales (isótopo = elemento químico de igual número atómico pero diferente peso atómico) y que existen en forma natural, integrando en este caso la molécula de agua; los más abundantes son los isótopos no radioactivos o también conocidos como isótopos estables; Oxígeno-18, Hidrógeno-2 (denominado Deuterio), y el isótopo radioactivo, Hidrógeno-3 (denominado Tritio).

En función del ciclo hidrológico, la variación de las concentraciones de los isótopos estables en la molécula de agua depende, entre otros factores, de la temperatura y la presión atmosférica del ambiente donde se encuentra el agua. Así como, de los cambios de fase a que está expuesta (evaporación, condensación, precipitación), en consideración de los efectos de latitud, altitud, cantidad y continentalidad, antes de su infiltración en el subsuelo y antes de pasar a constituir las aguas subterráneas. El tiempo que el agua permanece en el subsuelo, es decir, el tiempo, desde el momento en que se infiltra, hasta el momento en que sale a superficie en forma natural a través de manantiales, o inducida en el caso de pozos de explotación, se conoce como "*tiempo de residencia de las aguas subterráneas en el subsuelo*". En este último caso, se interrumpe la dinámica de flujo en el que se encuentra el sistema o reservorio acuífero [8].

En cuanto al isótopo radiactivo tritio, se debe indicar que este isótopo integrante también de la molécula de agua, se forma en la alta atmósfera como producto de las reacciones nucleares, entre los rayos cósmicos y los átomos de Nitrógeno, contenidos en el aire, los mismos que en contacto con las nubes, generan un intercambio isotópico con las moléculas del agua y llegan a la superficie de la Tierra formando parte de las aguas de lluvia. Teniendo en cuenta que el tritio es un isótopo radioactivo (con una vida media de 12.4 años), las concentraciones de este isótopo irán decayendo en el tiempo, característica, que permite estimar la edad o el tiempo de residencia en el subsuelo de las aguas subterráneas[9]. Para el caso del Perú, no se cuentan con valores de concentraciones de Tritio en lluvias recientes, pero se pueden estimar en base a los últimos valores que están disponibles y que corresponden a los años 1995 y 1996, los que tienen un valor del orden de 2-3 Unidades de Tritio (UT)

Además del origen del tritio antes descrito, hubo otro origen puntual, mucho más importante que a pesar del tiempo transcurrido, aún se notan sus efectos. Durante los años 1960, principalmente en los Estados Unidos de Norte América y la Ex-Unión Soviética, desarrollaron numerosas pruebas nucleares en la atmósfera, lo cual trajo como consecuencia un incremento muy grande de las concentraciones de tritio en las aguas de lluvia en todo el mundo, especialmente, en el hemisferio norte, razón por la cual, actualmente es posible encontrar aguas subterráneas con concentraciones de tritio mayores a las que tienen las lluvias actuales.

En la Fig. 04. Se muestra el diagrama de la representación gráfica de una curva del decaimiento radiactivo del tritio, con los tiempos de residencia del agua en el subsuelo. Con el gráfico es posible determinar por ejemplo, cuantos años tomó para que una cantidad de tritio decaiga al 20% de su contenido.



4.2 Estado del Arte de su Aplicación en el País

En estudios de los recursos hídricos, sobre todo en aguas subterráneas, los isótopos ambientales se han constituido en una herramienta muy útil para el hidrogeólogo. La técnica incorporada al país a través del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) mediante la cooperación técnica del Organismo Internacional

de Energía Atómica (OIEA), esta siendo aplicada en diversos estudios hidrológicos, permitiendo obtener una información que, por otras técnicas convencionales no es posible.

De la aplicación de las técnicas isotópicas combinadas con las técnicas convencionales, permiten abordar estudios integrales sobre las aguas subterráneas, interconexión de cuencas, origen, niveles de contaminación y procesos de mezcla. Es así como en el país, se han realizado importantes estudios en la gestión de los recursos hídricos. Los análisis isotópicos son efectuados en los espectrómetros de masas y los resultados interpretados por especialistas en la técnica de hidrología isotópica.

Con esta técnica, se vienen efectuando diversos estudios mediante asistencia técnica del IPEN a otras entidades, como INADE (Proyectos Especiales), dirigida a estudios de aguas subterráneas, para uso poblacional (Sedapal), en estudios del fenómeno cárstico, filtraciones en presas para centrales hidroeléctricas, y recientemente, su aplicación en minería, en estudios de filtraciones en minas subterráneas, la generación de drenaje ácido de mina y la contaminación de aguas subterráneas.

La importancia del recurso agua y su progresiva escasez, obligan a redoblar esfuerzos en la prevención de su contaminación. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, la FAO, en sus estudios indican que la demanda mundial de agua dulce se duplica cada 21 años. Actualmente, los recursos hídricos renovables por persona constituyen la mitad de los disponibles en 1961 y según estimaciones del Banco Mundial, citadas por el OIEA, esta cifra podría volver a reducirse a la mitad en el año 2025. Por esta razón y otras, han merecido un mayor impulso la aplicación de las técnicas isotópicas en hidrología.

4.3 El Ciclo Hidrológico y la Geotermia

Una de las contribuciones que se debe a la aplicación de las técnicas isotópicas en hidrogeología, es haber determinado en cuanto al conocimiento del origen de las aguas termales o geotérmicas, las que en mayor proporción, son originadas por aguas meteóricas que se infiltran en el subsuelo y calentadas en profundidad, donde hay participación de fluidos magmáticos en fase vapor y, nuevamente, ser devueltas a superficie a través de manantiales termales, manteniendo la misma composición isotópica de las aguas meteóricas de infiltración Fig 05; fenómeno que se observa en

zonas volcánicas, donde como se sabe, hay una aproximación del calor interno de la Tierra a superficie. Se conoce, que los campos geotérmicos son compatibles con el medio ambiente, sin embargo, estos son constantemente monitoreados.

Los reservorios geotérmicos, están caracterizados por su alta temperatura y permeabilidad, debido a fracturamiento y fallamiento, la temperatura en el entorno, produce un cambio de color por efecto de la alteración hidrotermal de las rocas afectadas y, frecuentemente, su explotación genera grandes cantidades de sales disueltas (salmueras), muy pocas veces depositadas en superficie, ya que estas, son reinyectadas al reservorio[10], logrando una explotación ambientalmente limpia.

La explotación de energía geotérmica y las aguas subterráneas en muchos países están en armonía con el medio ambiente, teniendo en cuenta que no producen efectos adversos como el CO₂, salvo, en áreas donde las aguas subterráneas en su componente presenten un carácter fósil (condición no renovable del fluido del reservorio), con muy bajo grado de recarga en las condiciones de clima actual.

En muchos casos, las aguas subterráneas de acuíferos no renovables son utilizadas para incrementar la producción de alimentos, para consumo humano y hasta para asegurar la factibilidad de proyectos de explotación geotérmica. En este

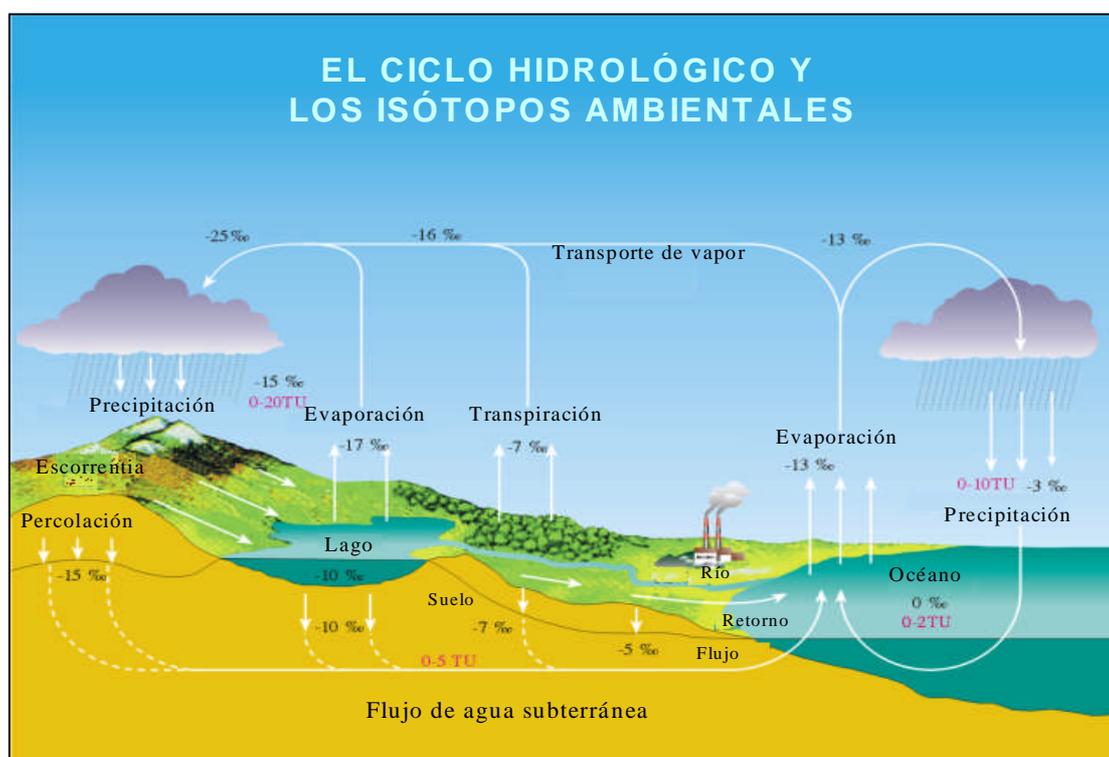


Fig. 05

último caso, pueden hacer insostenible su aprovechamiento en el tiempo. Así, un buen conocimiento de la información hidrológica, se basa en el aporte de las técnicas isotópicas, útiles para tomar la adecuada decisión, en la gestión sostenible, tanto de las aguas subterráneas, como de los recursos geotérmicos.

Considerando la cada vez mayor demanda del recurso agua; la investigación y desarrollo dentro de los objetivos de los programas del uso de este recurso, con aplicación de las técnicas isotópicas, resultan ser fundamentales para su gestión, incluidos los recursos geotérmicos, particularmente, asegurando la explotación en el largo plazo y haciendo posible estas técnicas, el monitoreo de los sistemas, tanto en los procesos de explotación y de reinyección, como en el de salinización. Así como, evitar el riesgo de contaminación de acuíferos y de las aguas subterráneas en general.

El uso y desarrollo de las aplicaciones de los isótopos ambientales en la gestión del recurso agua, requieren una base de datos isotópicos de varios componentes del ciclo hidrológico. Esta información, llamada "data de referencia global", es puesta a disposición por el OIEA a los estados miembros quien, conjuntamente con la Organization Meteorological World (OMW), mantienen una red isotópica internacional de las precipitaciones, juntamente con la Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP), con lo que se monitorean las precipitaciones a nivel global.

4.4 Contribución de los Isótopos Ambientales en Hidrogeología

El revolucionario desarrollo de la introducción de aceleradores nucleares como los espectrómetros de masas, han estimulado grandemente las aplicaciones de los isótopos tanto en salud, en agricultura como en hidrología, por su muy bajo nivel de detección. Igualmente el Carbono-14 (^{14}C), ha permitido ser estudiado con la aplicación de esta nueva tecnología. La metodología de la aplicación de la técnica de los isótopos ambientales, Oxígeno-18 (^{18}O) y Deuterio (^2H), como trazadores del movimiento de las aguas subterráneas, su utilidad consiste en caracterizar la hidrodinámica de masas de agua que se infiltran en el subsuelo a partir de aguas de lluvia u otras aguas superficiales (lagos, ríos, glaciares), es decir la caracterización de las diversas masas de agua que pueden interactuar o mezclarse en su movimiento. Como se ha indicado anteriormente, para la aplicación de las técnicas isotópicas, se debe tener, como antecedentes, la hidrogeología de la zona, la que permitirá conceptuar el movimiento del agua en un determinado sistema acuífero [11].

De la naturaleza de la información isotópica resultante, de acuerdo a las características específicas de los isótopos utilizados, sean estos estables o radiactivos, se destacan tres tipos de aplicaciones:

- Los isótopos estables y radiactivos naturales, que son utilizados como *trazadores*, (marcadores naturales) de un cuerpo de agua mediante los cuales puede ser rastreado el movimiento de las aguas subterráneas.
- Durante la transición de una fase a otra de compuestos tales como agua o dióxido de carbono, el ratio de concentración de los isótopos de un elemento a menudo cambia, bajo el concepto del *fraccionamiento isotópico*, observándose diferencias en la concentración de los isótopos estables, informándonos acerca de los procesos físicos, químicos o hidrológicos que ocurren en el lugar. Por ejemplo, como resultado de una serie de procesos, la composición isotópica del carbono, así como también del oxígeno en el carbonato de calcio, es diferente el de origen marino al que está contenido en aguas frescas (lluvias). La composición de los isótopos estables, ^{18}O y el ^2H en aguas de lluvia, cambian con la latitud, altitud, el clima y la época del año.
- De otro lado, el decaimiento radiactivo del tritio, ofrece la posibilidad de determinar la “edad” de las aguas subterráneas por encontrarse este en forma natural en la molécula del agua. El tritio tiene una vida media de 12.4 años, por esto, es posible determinar el tiempo transcurrido desde el momento de la infiltración del agua por comparación del contenido de ^3H en una muestra de agua subterránea, tomada de un manantial o pozo surgente.

Además de la existencia de los isótopos naturales del medio ambiente, el hombre en el laboratorio es capaz de producir isótopos radiactivos artificiales; estos isótopos, pueden ser aplicados como trazadores expresamente adicionados, para seguir el movimiento de las aguas subterráneas, filtraciones de reservorios, interconexiones de cuencas, medidas de caudales de grandes volúmenes de agua, origen y relación de filtraciones en minas. Los métodos de trazadores radiactivos artificiales son de uso similar al de trazadores químicos, aunque con aplicación para estudios de carácter más local.

También se utilizan los cloro-fluoro-carbonos (CFC) en la datación de aguas subterráneas más recientes.

4.5 Los Isótopos Ambientales en Sistemas Geotérmicos

En los primeros estudios de los sistemas geotérmicos, se asumía que, tanto el calor así como gran parte del agua de los reservorios geotérmicos, ingresaba al sistema como vapor o fluidos magmáticos del interior de la Tierra. Esta hipótesis, no pudo ser superada hasta el desarrollo de las técnicas isotópicas y, su aplicación permitió, comprobar que la composición del oxígeno y del hidrógeno de aguas termales desde el punto de vista isotópico, son las mismas de las aguas meteóricas que se infiltran. Sin embargo, aunque mínima, hay que mencionar que existe una contribución de aguas magmáticas, en estos sistemas geotérmicos

Durante el ciclo hidrológico, por el fraccionamiento isotópico del Oxígeno-18 (^{18}O) y Deuterio (^2H) debido a la evaporación a bajas temperaturas y la condensación desde la evaporación del agua de mar, el agua evaporada, resulta progresivamente empobrecida en isótopos pesados de oxígeno-18 y deuterio durante la precipitación y el movimiento de la masa de vapor hacia el interior del continente, hasta mayores altitudes, haciéndola cada vez mas pobre en los isótopos pesados Oxígeno-18 y Deuterio.

La composición isotópica del agua natural, fue establecida por Craig [11], para elaborar la *Línea de aguas meteóricas*, donde la composición isotópica del deuterio “marca” el agua de lluvia, para que pueda ser indicada el área de recarga de las aguas subterráneas en estudio, por la comparación de su composición isotópica con aquella de aguas subterráneas representadas en la *Línea de aguas meteóricas*, obtenida directamente de la precipitación, desde las áreas de recarga.

Con la utilización de las técnicas isotópicas en los estudios de recursos geotérmicos se puede delinear un modelo conceptual hidrogeológico, que es la base para la identificación y evaluación de un sistema geotérmico. Así por ejemplo W. Giggenbach y R. Gonfiantini, años atrás, en estudios en América Latina con aplicación tanto de isótopos y técnicas geoquímicas en la exploración geotérmica, identificaron los principales factores que gobiernan los procesos de aguas termales con relación a campos geotérmicos [12].

CAPITULO V

LA CONTAMINACIÓN DE ARSÉNICO DEL RIO MAURE

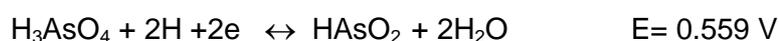
5.1 Geoquímica del Arsénico

El Arsénico, elemento químico, cuyo símbolo es As, número atómico 33 y peso atómico de 74.92 g mol^{-1} y su punto de fusión 817°C a 36 atmósferas. Tiene una tendencia definida a formar cationes, encontrándose distribuido ampliamente en la naturaleza (abundancia en la corteza terrestre, cerca de $5 \times 10^{-4} \%$). El As elemental se obtiene por reducción de sus óxidos con hidrógeno o carbono. También se puede obtener a partir de la condensación de vapores alótropos amarillos que probablemente contienen moléculas tetraédricas de As_4 . La particularidad de este elemento, es que cada átomo tiene un ión covalente con tres de los seis átomos circundantes, formando capas de unidades estructurales estrechamente unidas (enlaces de Van der Waals), es decir, muy débiles, lo que determina su buen clivaje (según 0001) y baja dureza.

Existen tres formas alotrópicas o modificaciones polimórficas del arsénico. La forma a) cúbica de color amarillo, se obtiene por condensación del vapor a muy bajas temperaturas. La forma b) polimórfica negra, que es iso-estructural con el fósforo negro, ambas revierten a la forma más estable, la forma i) gris o metálica del arsénico romboédrico, al calentarlas o por exposición a la luz en la forma metálica es un conductor térmico y eléctrico moderado, quebradizo, fácil de romper y de baja ductibilidad.

En solución acuosa, el As no forma cationes, pero existen muy pocas pruebas directas que permitan en forma inequívoca la existencia de cationes tri-positivos, aun en soluciones fuertemente ácidas [13].

La existencia del ácido arsenioso no se conoce aun en forma precisa, siendo probable que se trate en realidad el óxido hidratado As_2O_3 (solución acuosa). Este ácido se oxida fácilmente aun en contacto con el aire, sin embargo, se conoce sales del ión arsenito. El ácido arsénico H_3AsO_4 se comporta como un agente oxidante moderadamente efectivo en medio ácido



En la naturaleza, los minerales de arsénico se encuentran en rocas, suelos, aguas, sales, plantas, tejidos animales. Generalmente ocurre en forma pentavalente. Existen más de 150 minerales que lo contienen, algunos de éstos son:

Arsenolita: As_2O_3

Arsenopirita o Mispiquel: FeAsS

Oropimente: As_2S_3

Rejalgar: As_2S_2

Cobaltita: CoAsS

Como arseniuros tenemos por ejemplo: As_2Fe y As_2Fe_4 , AsNi , AsNiS , etc. El promedio de contenido de arsénico en la corteza terrestre es de 2 ppm, no obstante su distribución es muy heterogénea, en los suelos que yacen sobre sulfuros se ha encontrado concentraciones de hasta 8000 mg Kg^{-1} . El arsénico se encuentra en aguas naturales a las que llega por la erosión de rocas volcánicas.

En el ciclo del arsénico; en el suelo, los estados de oxidación más probables de As son +3 y +5, sin embargo, en suelos fuertemente reductores y sedimentos, se pueden encontrar formas de As con estados de oxidación -3 y 0. El arsenito (+3), el cual toma varias formas como: As(OH) , As(OH)_4^- , $\text{AsO}_2(\text{OH})^{2-}$ y AsO_3^{3-} es comúnmente encontrado en suelos anaeróbicos y el arseniato (+5), AsO_4^{3-} es estable en suelos aeróbicos.

En el agua, en acuíferos confinados profundos se puede encontrar especies de As(V) y As(III). En aguas con pH cercanos a 7.8 las especies dominantes son los oxianiones cargados H_2AsO_4^- y HAsO_4^{2-} , aunque se espera que haya una pequeña contribución del H_3AsO_3 .

Al arsénico se le encuentra en zonas de yacimientos hidrotermales y geotermiales relacionados con vulcanismo como formaciones metalo-coloidales en las cavidades, habiéndose constituido, al parecer en los últimos estadios de la actividad hidrotermal, en especial en zonas de actividad volcánica reciente. Entre los productos generados por el hombre se encuentran el arsénico metálico, el pentóxido y el trióxido, los arseniatos de calcio y plomo, los arsenicales orgánicos, etc.

El arsénico elemental tiene algunos usos. Es uno de los pocos metales disponibles con un 99.99 % de pureza. En el estado sólido se ha empleado

ampliamente en los materiales láser GaAs. El óxido de arsénico se utiliza en la elaboración de vidrio. Los sulfuros de arsénico se usan como pigmentos y en juegos pirotécnicos. El arseniato de hidrógeno se emplea en medicina, así como otros compuestos de arsénico. La mayor aplicación medicinal de los compuestos de arsénico se basa en su naturaleza tóxica.

5.2 Dispersión de los Constituyentes Químicos, Alteraciones

El arsénico se halla en las aguas naturales como especie disuelta, la cual se presenta, por lo común, como oxi-aniones con arsénico en dos estados de oxidación, arsénico trivalente [As(III)] y arsénico pentavalente [As(V)], y con menos frecuencia como As(0), As(-I) y As(-II). El As(V) aparece como H_3AsO_4 y sus correspondientes productos de disociación (H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} y AsO_4^{3-}). As(III) aparece como H_3AsO_3 y sus correspondientes productos de disociación (H_4AsO_3^+ , H_2AsO_3^- , HAsO_3^{2-} y AsO_3^{3-}). Aunque tanto As(III) como As(V), son móviles en el medio natural, es precisamente el As(III) el estado más lábil y bio-tóxico.

El estado de oxidación del arsénico y, por tanto su movilidad, está controlada fundamentalmente por las condiciones redox (potencial redox, Eh) y el pH (Fig. 06). El arsénico, es un elemento singular entre los metaloides pesados y elementos formadores de oxi-aniones por su sensibilidad a movilizarse en los valores de pH típicos de las aguas subterráneas (pH 6,5-8,5). Como aproximación, y sin tener en cuenta otros factores como el contenido en materia orgánica, en condiciones oxidantes, el estado As(V) predomina sobre As(III), encontrándose fundamentalmente como H_2AsO_4^- a valores de pH bajos (inferiores a 6,9), mientras que a pH más alto, la especie dominante es HAsO_4^{2-} (en condiciones de extrema acidez, la especie dominante será H_3AsO_4^0 , mientras que en condiciones de extrema basicidad, la especie dominante será AsO_4^{3-}). En condiciones reductoras a pH inferior a 9,2, predominará la especie neutra. (Brookins, et al. 2000).

Otros factores, como la concentración de determinados elementos, también controlan la especiación del arsénico y por tanto su movilidad. Por ejemplo, en presencia de concentraciones altas de azufre, predominan las especies acuosas con azufre y arsénico. Si en ese caso, se establecen condiciones reductoras y ácidas, precipitarán sulfuros de arsénico (oropimente, As_2S_3 , y rejalgar, AsS).

En general, la forma pentavalente del arsénico As(V) tiende a predominar frente a la forma trivalente As(III) en las aguas superficiales más oxigenadas que las aguas subterráneas. Sin embargo, en estas últimas no siempre predomina la forma

trivalente, pudiéndose encontrar ambos estados de oxidación. Las concentraciones y proporciones relativas de As(III) y As(V) dependen de la entrada de arsénico en el sistema, de las condiciones redox y la actividad biológica. Por ejemplo, la presencia de arsenito puede ser mantenida en condiciones oxidantes por reducción biológica de arsenato [14]. Por otra parte, la cinética de las reacciones redox es muy lenta, por lo que las relaciones As(V)/As(III) observadas en muchas ocasiones no corresponden exactamente con las condiciones redox del medio, reflejando desequilibrio termodinámico.

Las formas orgánicas de arsénico, suelen aparecer en concentraciones menores que las especies inorgánicas, aunque pueden incrementar su proporción como resultado de reacciones de metilación catalizadas por actividad microbiana (bacterias, algas). Las formas orgánicas dominantes son, el ácido dimetil-arsínico (DAMA), $(\text{CH}_3)_2[\text{AsO}(\text{OH})]$ y el ácido mono-metil-arsénico (MMAA, $\text{CH}_3\text{AsO}(\text{OH})_2$), donde el arsénico está presente en ambos casos como As(V).

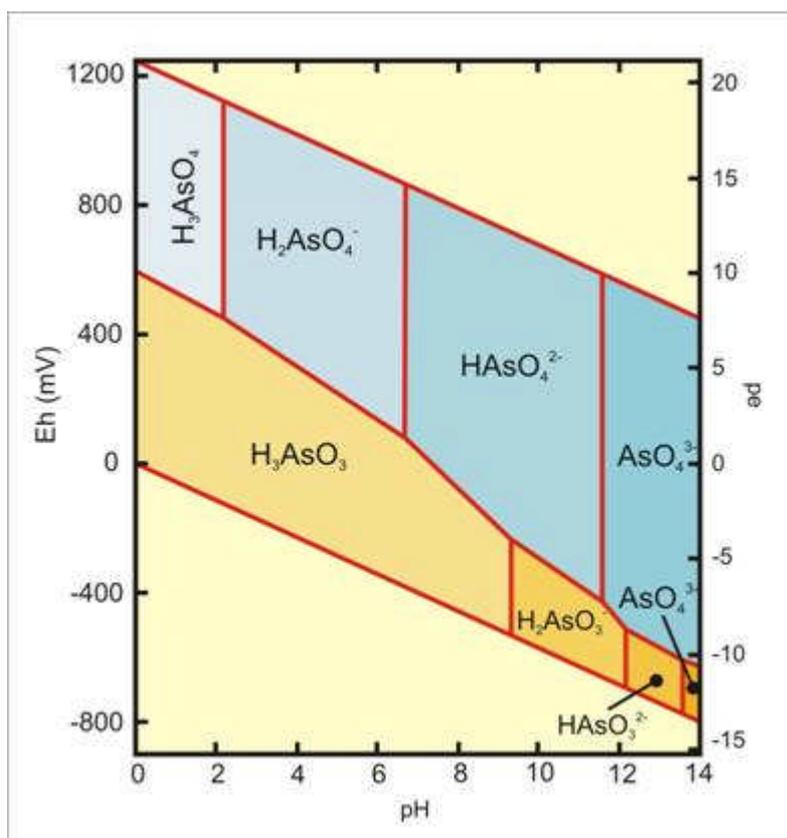


Figura 6. Diagrama Eh-pH de especies acuosas de arsénico en el sistema As-O₂-H₂O a 25°C y 1 bar de presión total

5.3 El Arsénico en las Aguas Termales y la Contaminación

Según los resultados de estudios, la mayoría de las altas concentraciones de arsénico se presentan donde existen afloramientos de aguas geotérmicas relacionadas con cuencas cerradas, zonas de vulcanismo reciente, indicando una fuerte correlación entre los elementos arsénico y fluor, debido a las condiciones físico-químicas del agua que favorece la migración de ambos compuestos [14].

En la zona bajo estudio, desde el punto de vista de la contaminación de arsénico, se ha identificado dos sectores bien definidos, que están en relación con afloramientos de aguas geotérmicas.

El sector de Chungara-Quiane, con contaminación de B y As, aunque dispersa y el sector “Borateras”–Calachaca, con la mayor contaminación de arsénico, separados por un sector intermedio. El sector de Copapujo, donde aflora un manantial de aguas frías de buena calidad.

En la zona en referencia como ya se indicó, los elementos trazas más importantes desde el punto de vista de la contaminación lo constituyen el arsénico (18 ppm) [2] y el boro (99 ppm) y tomando en consideración los contenidos de cloro y litio (elementos conservativos), éstos nos indicarían un origen profundo para el As, concordante con la circulación de las aguas termales, en los dos puntos de mayor descarga de las aguas termales en “Borateras”, donde su contenido relativo muestra dos características distintas; para aguas de “Putina Chico”, alto contenido de Cloro (2,237 mg/l) debido a la interacción con rocas volcánicas en profundidad (85°C de temperatura del agua), mientras que para “Putina Grande” con un circuito de convección más superficial, un posible origen a partir de aguas subterráneas poco profundas (Cl: 0.88 mg/l), y un efecto de mezcla con aguas frías más acentuado, que sería la consecuencia, de su menor temperatura (71°C) con relación a la de “Putina Chico”.

Los resultados de los análisis de estudios anteriores obtenidos tanto por INGEMMET de muestras de esta misma área como del Laboratorio de la Dirección Regional de Agricultura de Tacna, presentan valores similares en B y As a los obtenidos por el presente estudio; sin embargo, estos contenidos, varían de acuerdo con el grado de temperatura y caudal del manantial y como ya se indicó antes, existe un sector intermedio con valores bajos en los elementos de contaminación (B: 0.98-0.07 mg/l) y (As: 0.6-0.01 mg/l), muestras GT-29 y GT-32, que se explica por el

efecto del control estructural del fallamiento en bloques generando discontinuidad en el comportamiento del acuífero Maure, en el que se emplaza el reservorio geotérmico.

5.3.1 Arsénico en las Aguas Continentales Subterráneas

En general, los valores de fondo en concentración de arsénico en aguas subterráneas son en la mayoría de los casos, inferiores a $10 \mu\text{g l}^{-1}$ [15]. Sin embargo, los valores citados en la literatura para aguas naturales definen un rango muy amplio entre $<0,5$ a más de $5,000 \mu\text{g l}^{-1}$.

Las concentraciones altas de As no se restringen a determinadas condiciones o ambientes naturales, como en acuíferos de condiciones oxidantes y de pH alto; en condiciones reductoras, en acuíferos con circulación geotermal; sino también, en acuíferos afectados por procesos relacionados con depósitos minerales, o de la propia actividad minera y, hasta acuíferos relacionados a procesos antropogénicos (como actividad industrial, asentamientos urbanos, actividad agropecuaria, etc). Sin embargo, la literatura indica que, la mayor parte de los acuíferos con contenidos altos de arsénico tienen un origen relacionado a procesos geoquímicos naturales. A diferencia de la contaminación antropogénica, la cual genera una afectación de carácter más local, la ocurrencia de concentraciones altas de arsénico de origen natural afecta a grandes áreas. Los numerosos casos de “contaminación natural” de aguas subterráneas por arsénico que existen en el mundo, están relacionadas con ambientes geológicos muy diversos: meta-sedimentos con filones mineralizados, formaciones volcánicas, formaciones volcano-sedimentarias, distritos mineros, sistemas hidrotermales activos, cuencas aluviales terciarias y cuaternarias.

Se ha identificado un gran número de áreas con aguas subterráneas que presentan contenidos de arsénico superiores a $50 \mu\text{g l}^{-1}$ en distintos lugares del planeta. Los problemas más importantes citados en la literatura se sitúan en Argentina, Bangladesh, Nepal, Chile, China, Hungría, India (Bengala Oeste), México, Rumania, Taiwan, Vietnam y Estados Unidos de N. A, siendo en este último país y en Bangladesh donde han sido objeto de estudios más profundos. Además se cita las áreas directamente relacionadas con procesos hidrotermales, Argentina, Chile, Japón, Nueva Zelanda, Estados Unidos de N. A, Islandia, Francia, etc.

Áreas con problemas de arsénico en relación a depósitos minerales y minería han sido reconocidas en numerosas partes del mundo, siendo los casos más destacables los de Ghana, Grecia, Tailandia, Chile y Estados Unidos de N. A.

Una de las particularidades más notables del problema del arsénico de origen natural en las aguas subterráneas, es que no siempre hay una relación directa entre el alto contenido en arsénico en el agua y un alto contenido en este en los materiales que constituyen el acuífero. De hecho, como a continuación se expone, no existe un modelo hidrogeológico común para todas las ocurrencias identificadas; encontrándose aguas contaminadas con arsénico en situaciones muy variadas, tanto en condiciones oxidantes, reductoras o en acuíferos sobre-explotados; en zonas áridas (altiplánicas) como en zonas húmedas, en acuíferos superficiales libres como en acuíferos profundos confinados.

Esta diversidad de situaciones, viene definida por la peculiaridad de las condiciones y procesos que concurren en cada uno de los casos, o dicho de otra manera, la presencia de arsénico en cada caso es la consecuencia de su ambiente geoquímico y las condiciones hidrogeológicas específicas para ese caso.

5.4 Dispersión del Arsénico

El ciclo del arsénico indica que este es dispersado (extendido) naturalmente y como consecuencia de la interferencia humana, debido a esto, grandes cantidades de arsénico terminan en el ambiente y luego pasa a los organismos vivos. El arsénico es mayoritariamente emitido por las industrias productoras de cobre, pero también durante la producción de plomo y zinc en las refinerías y en la agricultura.

El arsénico no puede ser destruido una vez que este ha entrado en el ambiente, así las cantidades que son incorporadas, pueden dispersarse y causar efectos sobre la salud de las personas y los animales, como se conoce en muchas de las localidades donde se ha detectado su presencia.

Las plantas absorben arsénico muy fácilmente, por este hecho, pueden estar presentes en los alimentos en un alto contenido. Las concentraciones del peligroso arsénico inorgánico que está actualmente presente en las aguas superficiales como en caso del río Maure, aumentan las posibilidades de afectar a la salud humana, a través de la acumulación de éste elemento en los organismos de agua dulce o los consumidores de plantas.

5.5 Contaminación de Suelos y Cursos de Agua del Río Maure

Los valores de fondo de contenido de arsénico en ríos son relativamente bajos, en general inferiores a $0,8 \mu\text{g l}^{-1}$, aunque pueden variar dependiendo de factores como recarga (superficial y subterránea), litología de la cuenca de drenaje de zonas mineralizadas, clima. Para el caso del río Maure, por ejemplo, para el tramo entre “Borateras” y Baños de Calachaca, los valores están en 9.87 mg l^{-1} de As, como ésta zona es de clima árido, el aumento de la concentración de arsénico en las aguas superficiales se ve favorecido por procesos de evaporación, que además provocan un aumento en la salinidad y pH de las aguas. El proceso de saturación por evaporación causa incremento de los valores y, están en relación a los procesos asociados con la circulación de los fluidos geotermales, habiéndose observado concentraciones en las zonas de influencia del sistema geotérmico. Las escorrentías fluviales muestran contenidos altos de arsénico, generalmente por el lavado del suelo por aguas superficiales, concentración que se ve incrementada en la época de lluvias.

En el sector de los Baños de Calachaca en la cuenca del río Maure, existen varios manantiales subfluviales que descargan directamente al río y otros están siendo utilizados para balneología pero descargan al río, los contenidos promedio de arsénico en estas surgencias es 3.28 mg l^{-1} .

En el tramo del río, aguas abajo de los Baños de Calachaca, los valores de As se incrementan ligeramente por la contribución de manantiales y debido a su presencia de éste elemento en los suelos, donde el río Maure amplía ligeramente su cauce, hasta recibir aguas del manantial “Ojos de Copapujo”, se trata de aguas frías de buena calidad y luego los aportes de manantiales del sector de Kallapuma y Quiane, distantes 15 km.

5.6 Consecuencias Ecológicas de la Contaminación de Arsénico

El arsénico como ya se indicó, es uno de los elementos más tóxicos encontrados en la naturaleza. Debido a sus efectos dañinos, las asociaciones de arsénico inorgánico ocurren en la tierra naturalmente en pequeñas cantidades. Los seres humanos pueden ser expuestos al arsénico a través de la comida, agua y aire. La exposición puede también ocurrir a través del contacto de la piel con el suelo o agua que contenga arsénico. En este último caso y en nuestra área de estudio, como recomendación sería necesario efectuar un análisis más específico en el contenido de As en las aguas termales de los “Baños de Calachaca”.

CAPITULO VI

HIDROGEOQUIMICA

6.1 Geoquímica del Área Geotérmica del Lote Challapalca

La hidrogeoquímica al proveer información sobre la distribución de los elementos (aniones, cationes y elementos pesados) , su evolución espacial y temporal en los sistemas hídricos; en el caso de “Borateras”, permite determinar tanto las condiciones físico-químicas como químicas de las aguas termales y definir el tipo de agua. En el otro aspecto que nos ayuda la geoquímica, es el conocimiento de los procesos que ocurren en profundidad en los ambientes geotérmicos, fundamental en la caracterización, evaluación y planeamiento para la gestión del recurso geotérmico, en particular, para asegurar su explotación sostenible.

En el área de “Borateras” se ha identificado dos sectores de descarga natural del sistema geotérmico, los cuales nos han permitido durante el estudio de campo efectuar la toma de muestras y los análisis de laboratorio, para obtener información acerca de las características del comportamiento químico de los fluidos en profundidad.

6.2 Parámetros Físico-químicos de los Manantiales Termales

La información de los parámetros físico-químicos del agua de los diversos manantiales, ha sido levantada durante los trabajos de campo, como conductividad, temperatura, TDS, pH y se le ha utilizado para la interpretación de la química del agua. En cuanto a la temperatura de las manifestaciones geotérmicas en las diferentes surgencias del área de estudio, están en el rango de 71° y 85°C para los manantiales Putina Grande y Putina Chico, respectivamente (temperatura de ebullición del agua a esa altitud 85°C) y se conoce que, con el aumento de la temperatura con la profundidad, el grado de *interacción agua-roca*, se ve incrementado en un sistema geotérmico.

6.2.1 Muestreo, Análisis.

Enmarcado dentro de las actividades del estudio se programó y ejecutó una campaña de muestreo, cubriendo un área aproximada de 50 km², área emplazada en la vertiente derecha del río Maure, implementándose para esto su propia nomenclatura y base de datos. En la campaña de muestreo, se estableció una red de

muestreo de 30 puntos, considerando la ubicación tanto de las manifestaciones termales de “Borateras”, como los puntos de la red de control geotérmico representados en el plano geológico, es decir, los sectores, Quiane, Casiri, Laguna Vilacota, Calachaca y Pampa Chillicolpa, los registros y medidas de parámetros de campo y los resultados de los análisis se muestran en los Cuadros N° 01 y 01A

Para la interpretación de los resultados de los análisis químicos, éstos se han centrado mayormente en el área de “Borateras” e incluyendo algunos puntos de los sectores aledaños. Los análisis tanto químicos como isotópicos, por ser aguas geotérmicas, fueron, efectuados en un laboratorio de análisis especializados, el Laboratorio de Geotérmica Salvadoreña de la república de El Salvador, resultados que han sido utilizados para la elaboración de los diversos diagramas hidrogeoquímicos, conjuntamente con los análisis isotópicos, los cuales han servido para caracterizar los tipos de aguas, grado de *interacción agua-roca* y, procesos físico-químicos de las aguas termales.

6.3 Química del Agua, Aniones, Cationes y Elementos Trazas

Como se ha indicado líneas arriba, los resultados de los análisis químicos de las muestras de aguas termales del área de “Borateras” han servido para efectuar la clasificación y tipo de aguas geotérmicas. Para definir el tipo y calidad del agua existen parámetros, los cuales deben ser tomados en cuenta de acuerdo a la utilidad del agua que, según la bibliografía deben ser físicos, químicos, biológicos y radiológicos. Para clasificar mejor las aguas geotérmicas del estudio se ha utilizado varios diagramas, donde se ha representado los resultados químicos de las muestras tomadas para el presente estudio.

Diagrama de Piper

Representado en el diagrama de la (Fig.07). Este procedimiento gráfico es un indicador analítico de datos en el estudio con respecto al origen de los constituyentes disueltos en las aguas termales; en términos generales, el agua natural puede ser representada en parámetros de variables de tres cationes y tres aniones en donde el carácter químico esencial del agua es indicado gráficamente en el triángulo. Así se muestra, que el carácter predominante de la composición de las aguas termales son del tipo clorurada-sódica para la muestra del manantial termal mas importante Putina Chico (GT-4) , al igual que de las otras muestras de manantiales termales, indicando un mismo origen e interacción agua-roca y variadas condiciones de mezcla , cabe

mencionar la muestra del manantial Saipiutapa (GT-8), ya que esta agua tiene un contenido alto en sulfatos y bicarbonatos, indicativo del efecto de mezcla, en este caso con aguas superficiales que se infiltran probablemente del río Maure.

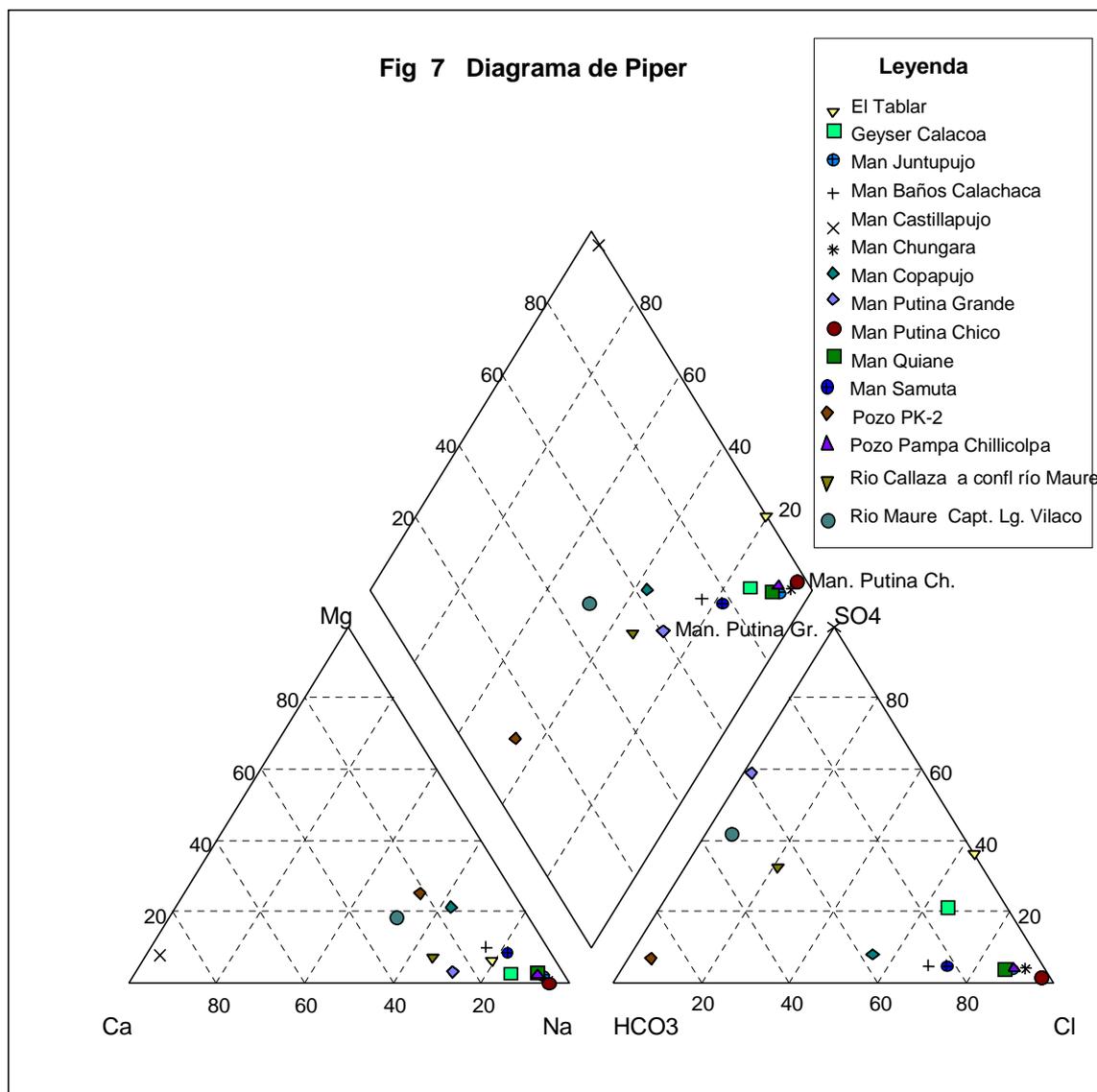


Diagrama de Schoeller

En el diagrama de Schoeller, se observa con más detalle la caracterización de las aguas termales en cuanto a la concentración de elementos aniones y cationes principalmente de los manantiales calientes de interés, que corresponden a los afloramientos de aguas geotermales (diagrama de la Fig 8), y muestra claramente el tipo de agua por su origen, claramente agrupada en una misma tendencia, caso de los manantiales de Putina Grande y Chico, de composición clorurada-sódica-

potásica. Los manantiales de Putina Chico (GT 4, GT 5 y GT 6) , Putina Grande (GT 3) muestran un origen de aguas profundas. El Diagrama de la Fig 8A, representa las aguas superficiales de manantiales fríos y el río Maure (muestras GT 1 , GT 2, GT 7, GT 9 y GT15) del mismo carácter de las aguas termales, pero afectadas por un mayor grado de mezcla con aguas superficiales frías. La muestra de agua de la Laguna Vilacota (GT 22) tiene el comportamiento de aguas expuestas a evaporación aunque con tiempo de renovación rápida.

En general, se observa el efecto debido a la interacción agua-roca en profundidad de las aguas geotérmicas. Las muestras de manantiales termales por su carácter geotermal, tienen un alto grado hidrotimétrico, indicando la dureza de las aguas, debido a su contenido en los compuestos de Ca, Mg y SO_4 .

Fig 8 Diagrama de Schoeller Manantiales Termales, Borateras

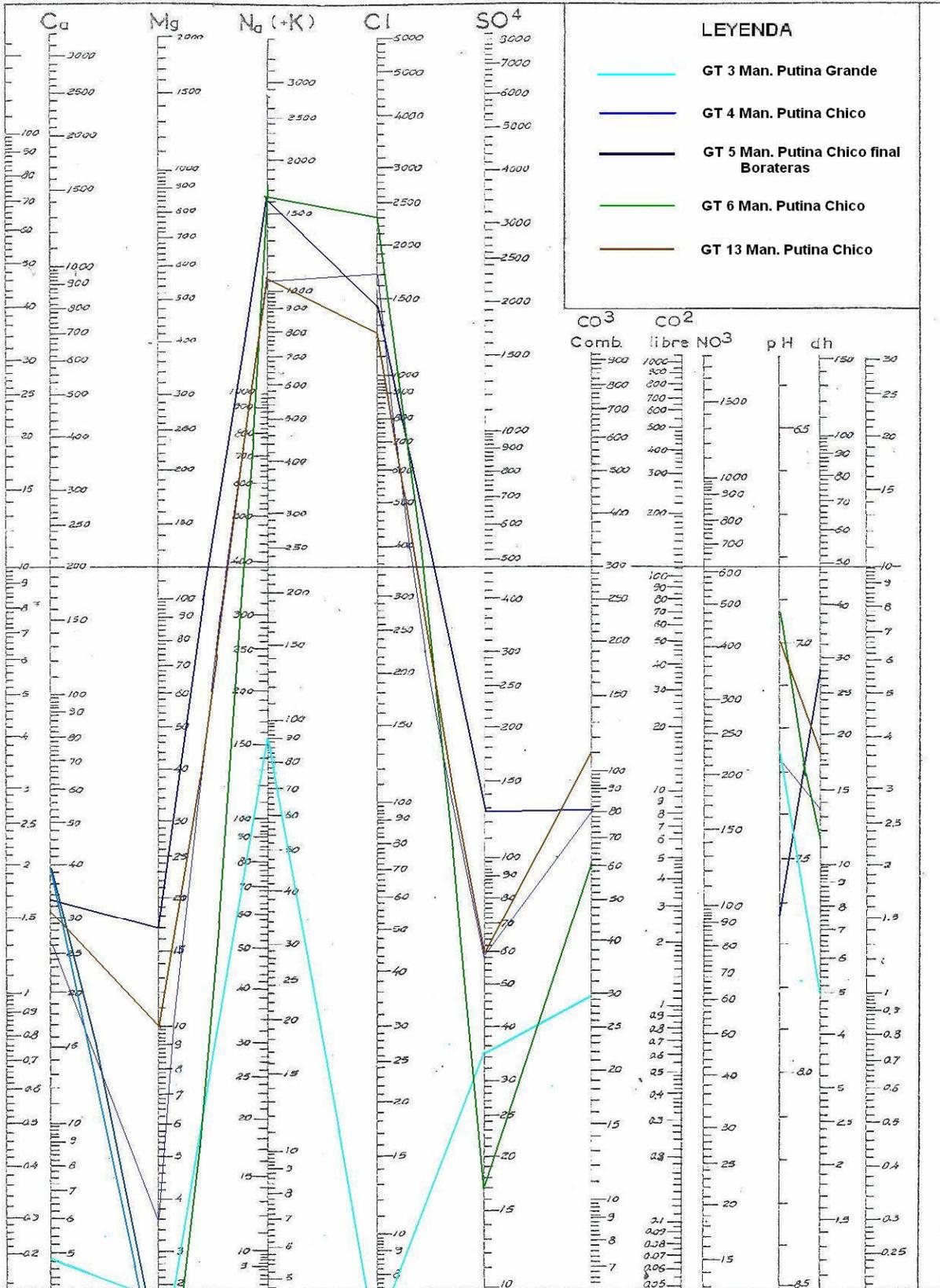


Fig 8A Diagrama de Schoeller, Manantiales, Pozos y Lagunas

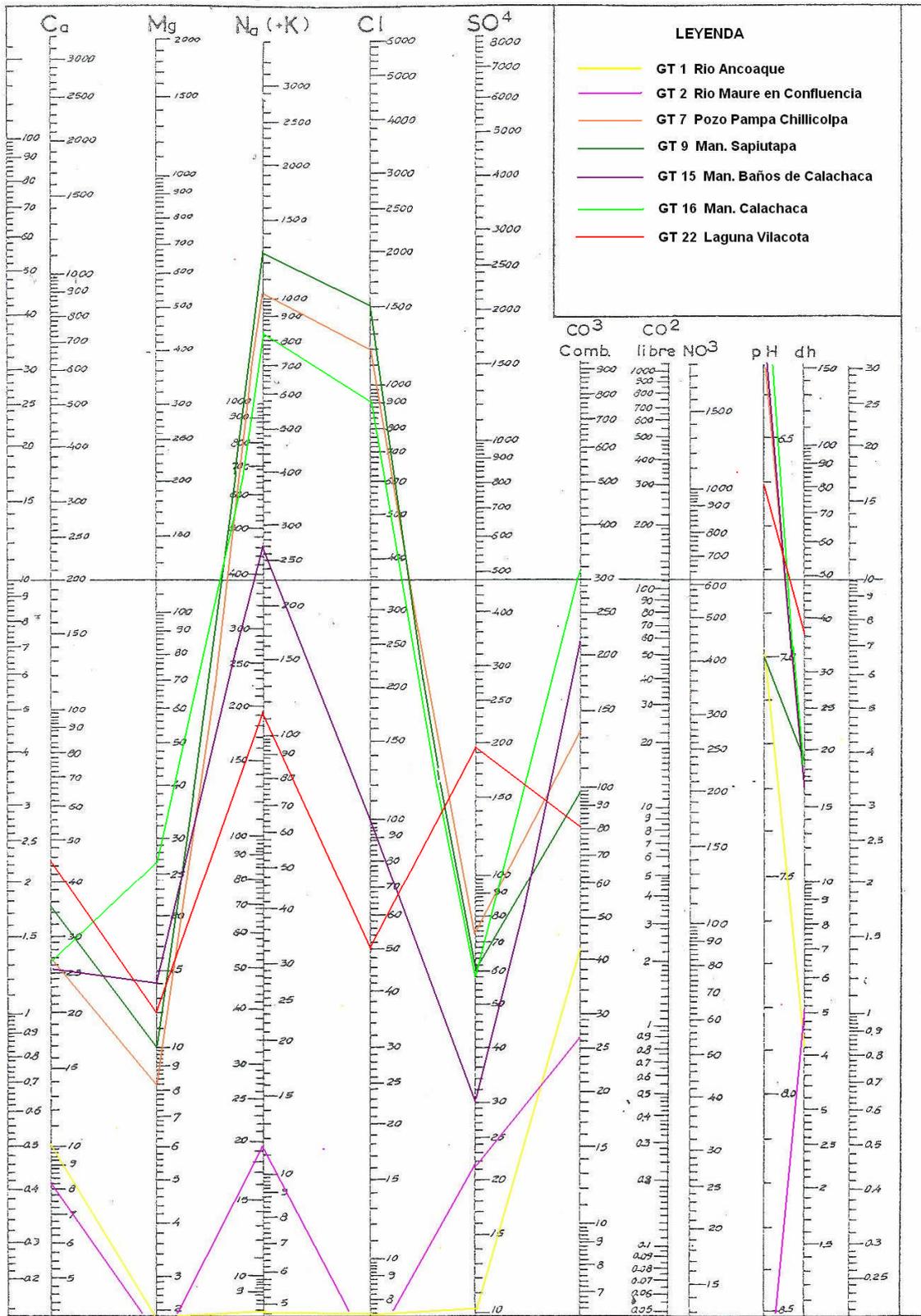


Diagrama $\text{SO}_4\text{-Cl-HCO}_3$

Igualmente para la misma muestra (GT-4), se puede observar en el diagrama triangular $\text{SO}_4\text{-Cl-HCO}_3$ (Fig 09), que muestra el predominio del carácter clorurado, Ubicándose en el diagrama, en el campo de las “aguas maduras” y como era también de esperarse, se ubican en este mismo campo, las muestras de aguas termales de las áreas referenciales cercanas de Calacoa y el Tablar, conocidas por su carácter geotérmico. En cambio la muestra de Putina Grande se ubica dentro del campo de “vapor de agua calentada” ; mientras que la muestra del pozo PK-2 situado en la pampa Chillicolpa, parte baja del área “Borateras”, se reitera como muestra de composición de carácter bicarbonatado por la influencia y mezcla con aguas superficiales, posiblemente del río Maure.

Fig. 9 Diagrama $\text{SO}_4\text{-Cl-HCO}_3$

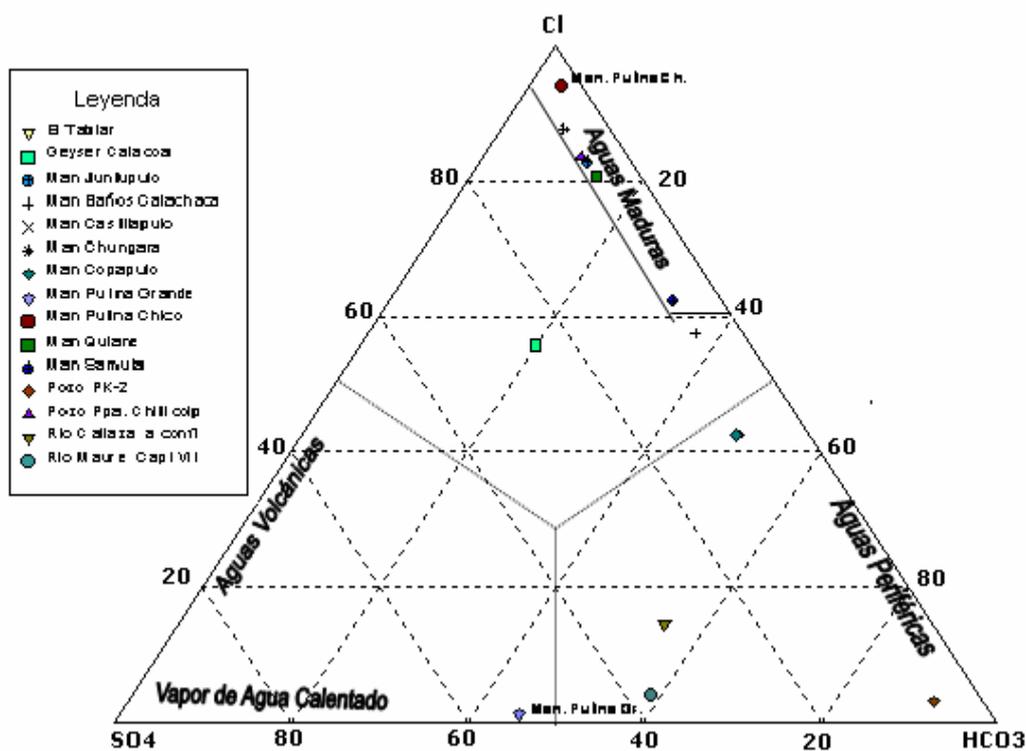
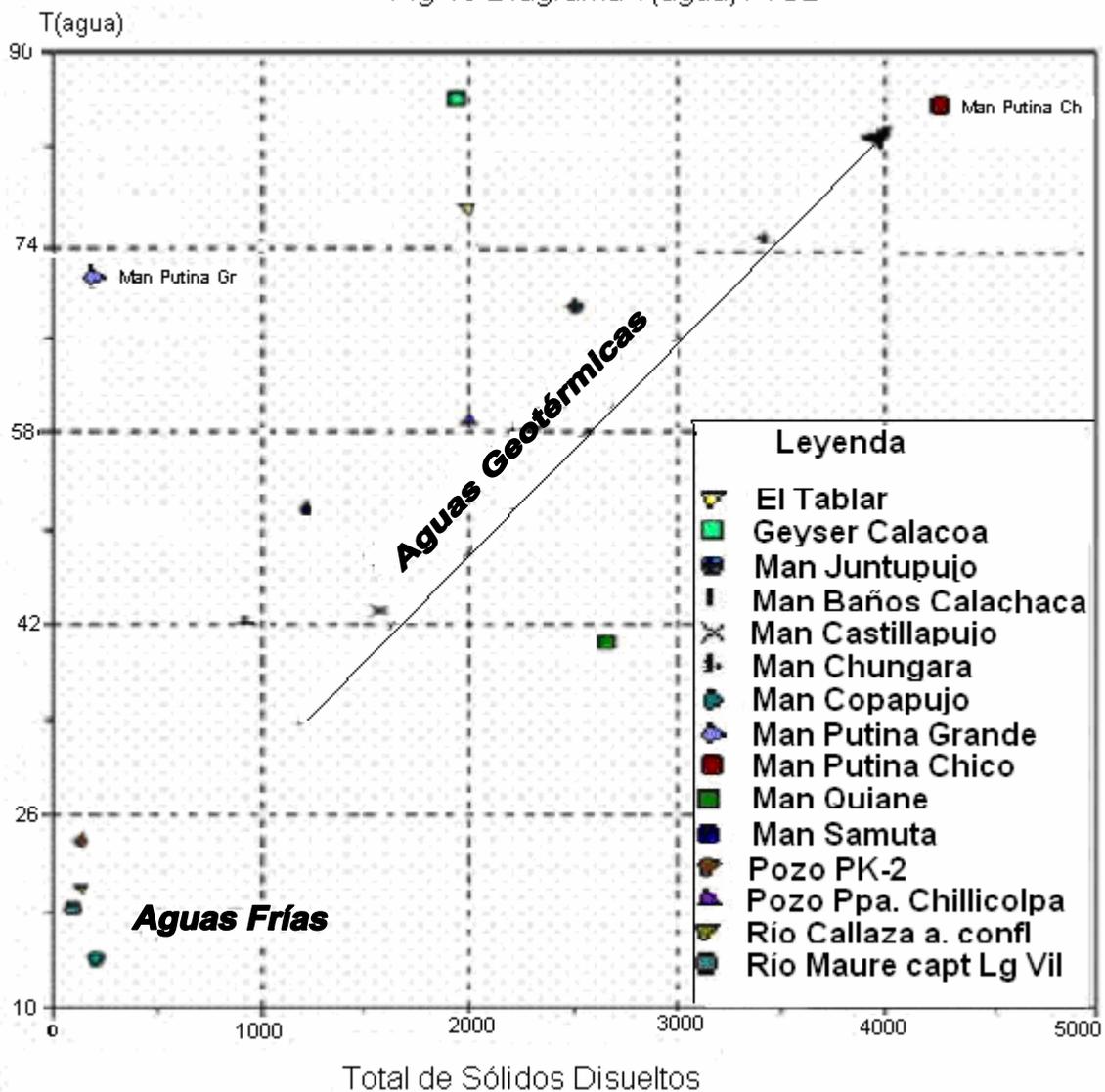


Diagrama Temperatura(agua) / Total de Sólidos Disueltos (TSD)

El contenido de total de sólidos disueltos (TSD), están en mayor proporción en las aguas geotérmicas y estos se incrementan con la temperatura (Fig. 10). El contenido de sílice es mayor en aguas geotérmicas principalmente en las de Putina Chico ($\text{SiO}_2=284.7 \text{ mg l}^{-1}$) siendo un criterio utilizado para reconocer el grado de interacción agua-roca, en relación a los contenidos en manantiales de agua fría y superficiales.

Las aguas superficiales del río Maure, tienen pH 8.11, antes de la confluencia con las aguas termales de “Borateras”; las aguas termales de mediana temperatura (tibias); aguas de los baños de Calachaca, Castellapujo tienen un pH 7 y 7.31 respectivamente; mientras que Putina Grande, tiene una mayor acidez (pH: 5.87) en comparación con las de Putina Chico que presenta solamente aguas con pH de 6.95, lo que estaría en relación con la naturaleza del sustrato y la temperatura, como se muestra en el diagrama.

Fig 10 Diagrama T(agua) / TSD



6.4 Arsénico y el Boro en Aguas Termales

Según la literatura especializada, la mayoría de las altas concentraciones de boro y arsénico se presentan donde existen afloramientos de aguas geotérmicas relacionadas a zonas volcánicas, presentando una fuerte correlación entre As y Cl, debido a las condiciones fisico-químicas del agua que favorecen la migración de ambos compuestos.

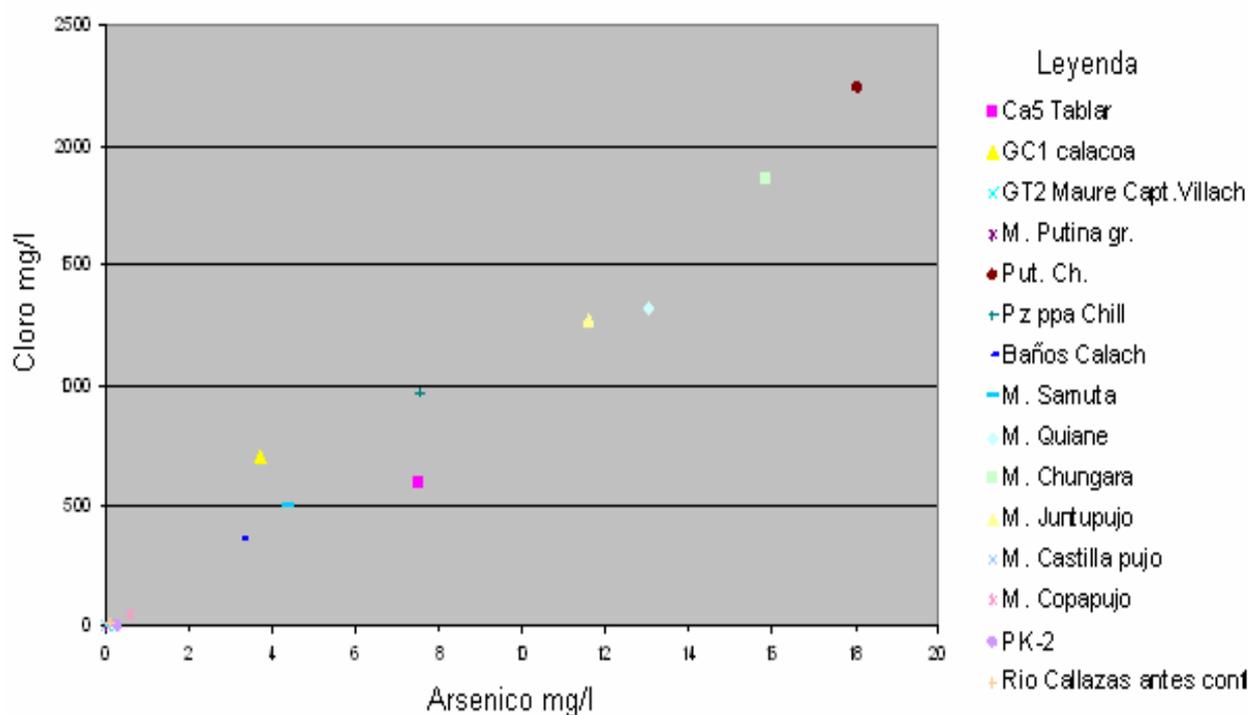
Desde el punto de vista de la contaminación se ha podido identificar dos sectores geotérmicos bien definidos; el sector de Chungara-Quiane con contaminación de As, separados por un sector intermedio, el de Copapujo con aguas frías de buena calidad y el sector de "Borateras-Calachaca con la mayor contaminación en As.

En la zona de estudio, como ya se indicó, los elementos trazas más importantes desde el punto de vista de la contaminación lo constituyen el Boro (99-0.07 ppm) y el Arsénico (18-0.01 ppm) y tomando en consideración la presencia de cloro y litio (elementos conservativos), indican para las aguas termales, un origen y circulación profunda, en los dos puntos de mayor descarga de las aguas termales en "Borateras". Como se muestra en el diagrama de Cl-As de la (Fig. 11), donde el contenido relativo en cloro, muestra dos comportamientos distintos así; para aguas de Putina Chico, alto contenido de Cloro ($2,237 \text{ mg l}^{-1}$), debido a la interacción con rocas volcánicas profundas y la temperatura de 85°C en superficie, mientras que para Putina Grande con un circuito de convección mas superficial, un posible origen a partir de aguas subterráneas poco profundas, bajo contenido de cloro ($\text{Cl: } 0.88 \text{ mg l}^{-1}$), donde el efecto de mezcla con aguas superficiales frías, también sería la consecuencia y por su menor temperatura (71°C) con relación a la de Putina Chico.

Los resultados obtenidos de anteriores análisis efectuados de muestras de esta misma área efectuados por INGEMMET y Laboratorio de la Dirección General de Agricultura de Tacna, presentan valores parecidos en As y B a los obtenidos por el presente estudio, sin embargo, se indica que estos contenidos se ven afectados de acuerdo con la temperatura y características del manantial; y como se indicó anteriormente, existe un sector intermedio con valores bajos en los elementos de contaminación ($\text{B: } 0.98\text{-}0.07 \text{ mg l}^{-1}$) y ($\text{As: } 0.6\text{-}0.01 \text{ mg l}^{-1}$) muestras GT-29 y GT-32 que se atribuye por el efecto del control estructural del fallamiento en bloques que ha afectado el comportamiento homogéneo del acuífero Maure.

En cuanto a la contaminación de boro y arsénico en “Borateras”, de acuerdo a la información geoquímica disponible a la fecha, sobre todo de los últimos análisis efectuados en el laboratorio de Geotermia de El Salvador, se evidencia que la contaminación de boro es indicativa de lixiviación y su presencia es una medida de la intensidad de la reacción y contacto agua-roca por calentamiento, alteración y disolución, la que está en relación a la *interacción agua-roca* en niveles profundos y a la alta temperatura como la registrada en la muestra de Putina Chico GT-4 (boro 99 mg l⁻¹) contra la muestra de Putina Grande GT-3 con menor temperatura (0.24 mg l⁻¹ de boro). En consecuencia, se tiene que, la fuerte correlación Cl-As mostrada en el diagrama de la Fig 11, a partir de resultados del Cuadro N. 1A, indica un origen del arsénico de niveles profundos de la secuencia volcánica reconocida en la zona.

Fig. 11 Diagrama Cl/As Area Borateras



6.5 Composición Isotópica de las Aguas Geotermiales

El área bajo estudio, debido a factores naturales y ubicación, se presenta el fenómeno de continentalidad y, como se señaló, los isótopos Oxígeno-18 ($\delta^{18}\text{O}$) y Deuterio ($\delta^2\text{H}$), también son dependientes de los efectos de latitud y altitud,

produciéndose en la molécula de agua el denominado *fraccionamiento isotópico*. La aplicación de las técnicas isotópicas permite obtener información de la hidrodinámica de las aguas geotermales, información que es lograda con los análisis de los isótopos estables $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de muestras de agua de los manantiales termales, cuyo comportamiento, es dependiente tanto de la interacción *agua-roca* a alta temperatura, como de los procesos fisico-químicos, tales como mezcla con aguas frías, su interpretación permite determinar la dinámica del sistema geotérmico de “Borateras”

Del muestreo efectuado con fines de análisis isotópicos, cuyos resultados se dispone para el presente estudio, están reportados en el Cuadro N° 02; estos resultados están asimismo, representados en el Diagrama $\delta^{18}\text{O} / \delta^2\text{H}$ de la Fig. 12

En la interpretación isotópica del diagrama $\delta^{18}\text{O} / \delta^2\text{H}$ se han utilizado los resultados de los análisis del muestreo del área de “Borateras”. Se interpreta que existen principalmente, tres comportamientos isotópicos en las aguas en estudio.

- a.- Aguas de río y manantiales fríos, con un carácter de aguas meteóricas y ubicadas en el diagrama próximas a la *Línea de agua meteórica*, son aguas originadas por las precipitaciones de lluvias locales, estacionales, que alcanzan una rápida escorrentía y/o infiltración, como la muestra GT-1($\delta^{18}\text{O} -15.37$, $\delta^2\text{H} -116.48$) y GT-2($\delta^{18}\text{O} -15.55$, $\delta^2\text{H} -116.61$)
- b.- Aguas termales, de muestras del área de “Borateras”, ubicadas en el diagrama en el trazo de la línea de aguas geotérmicas, que se agrupan en dos sectores GT-4, GT-6, GT-13 y dentro de este mismo alineamiento un tanto más distante en la ubicación en el diagrama, la muestra GT-3 del sector Putina Grande, que presenta un carácter de aguas geotérmicas, con débil efecto de mezcla con aguas subsuperficiales.
- c.- Aguas evaporadas, correspondientes a muestras de la laguna Vilacota distante 15 km del área de “Borateras”

Las muestras de aguas geotermales de “Borateras” en Putina Chico, muestras GT-4, GT-5 corresponden a los puntos de mayor descarga, con una composición ($\delta^{18}\text{O} -11.18$, $\delta^2\text{H} -104.31$ y $\delta^{18}\text{O} -10.90$, $\delta^2\text{H} -100.85$), se interpretan como aguas geotérmicas de origen profundo, concordante con su comportamiento geoquímico, como se ilustra en el diagrama (Fig. 12), alta concentración de cloro ($2,237 \text{ mg l}^{-1}$), litio (16.96 mg l^{-1}) y en elementos contaminantes, boro (99.00 mg l^{-1}) y arsénico

(18.08 mg l⁻¹), debido a la interacción *agua-roca*; estas aguas presentan características de aguas geotérmicas, pero afectadas por un grado de mezcla con aguas subterráneas. En cuanto a las muestras GT-6 y GT-13 con valores de $\delta^{18}\text{O}$ -12.96 , $\delta^2\text{H}$ -108.93 y $\delta^{18}\text{O}$ -13.53 , $\delta^2\text{H}$ -110.46 respectivamente, se interpretan como aguas geotérmicas afectadas igualmente por fenómenos de mezcla con aguas subterráneas someras, con menor interacción con la roca reservorio , por consiguiente mayor empobrecimiento isotópico.

Con respecto al comportamiento del sector Putina Grande, con la muestra GT-3, situada a dos kilómetros al SW de Putina Chico, indica un comportamiento distinto al anterior sector, con valores isotópicos más enriquecidos de $\delta^{18}\text{O}$ -3.50 , $\delta^2\text{H}$ -85.12, con relación a los valores isotópicos de Putina Chico, es decir, menos afectada por mezcla y con características de “aguas andesíticas”

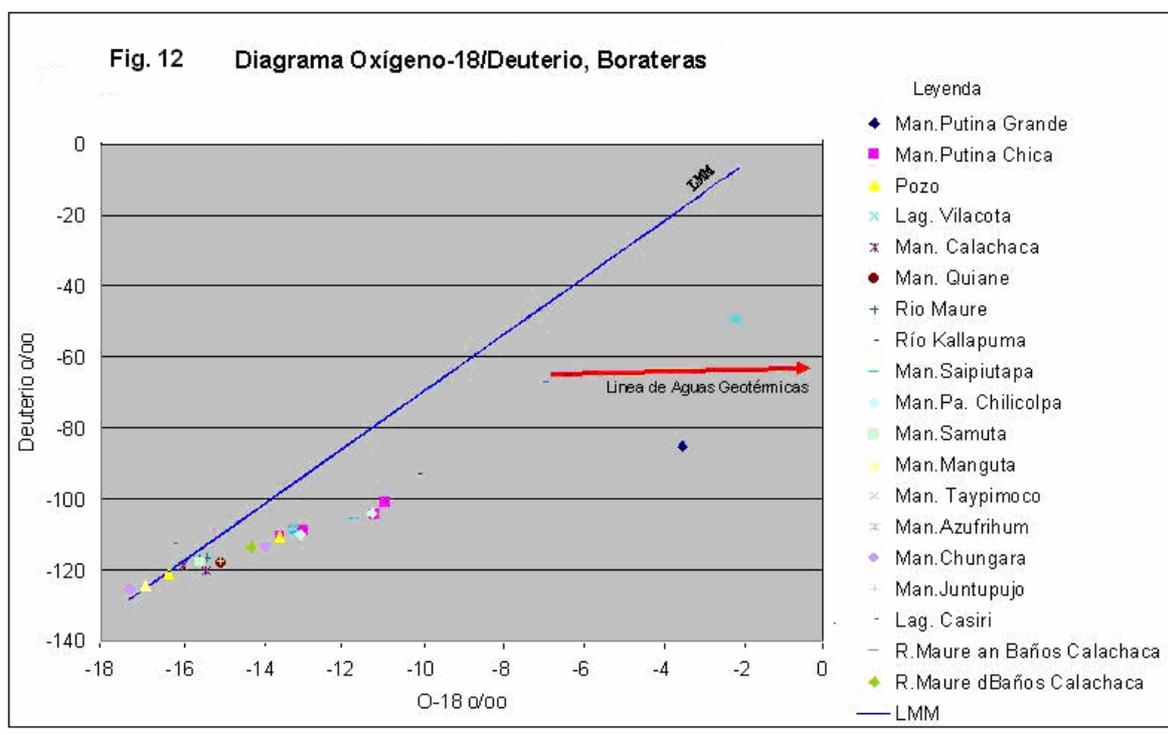
La composición isotópica de agua de la laguna Vilacota, GT-21 ($\delta^{18}\text{O}$ -2.13, $\delta^2\text{H}$ -49.44), GT-22 ($\delta^{18}\text{O}$ -2.22, $\delta^2\text{H}$ -49.10), como se muestra en el diagrama, se ubican en el campo típico de las aguas isotópicas superficiales afectadas por evaporación.

Lo indicado líneas arriba, permite establecer que la recarga para el reservorio geotérmico del área de “Borateras”, estaría comprendida en la parte alta de la cuenca del río Maure, a partir de agua de lluvias que se infiltran según el patrón estructural. Así, para Putina Chico se tendría una circulación profunda con *interacción agua-roca* a alta temperatura, pero afectada por fenómenos de mezcla, acorde con el comportamiento geoquímico. La misma recarga tiene Putina Grande aguas que se infiltran, pero con participación de aguas isotópicas evaporadas (laguna Vilacota), la menor temperatura y menor concentración de cloro son explicados por la composición de aguas superficiales; asimismo, explicados por los bajos valores en elementos B y As (0.24, 0.02 mg l⁻¹), respectivamente, con relación a los altos valores de estos mismos elementos en Putina Chico.

Considerando el comportamiento de los isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) como trazadores naturales[9], en el diagrama anterior nos indica en principio, el efecto de mezcla con aguas subterráneas, las muestras de Putina Chico (GT-6, GT-13), y en la muestra GT-4 se observa una tendencia de evolución hacia el campo de aguas geotérmicas (aguas volcánicas) (Giggenbach 1992) [15], cuya zona de recarga la constituye la infiltración de aguas de lluvia. Por lo tanto, el origen de las aguas

geotérmicas de “Borateras”; de acuerdo a la interpretación isotópica es a partir de agua de la cuenca alta del río Maure (cordillera) por tener condiciones hidrogeológicas favorables; según se ilustra en el modelo conceptual del posible sistema geotérmico de “Borateras” (Fig. 14)

En cuanto a los bajos contenidos de tritio en muestras de aguas termales de “Borateras”, indican que tienen un tiempo de tránsito lento y largo tiempo de residencia en relación con aguas subterráneas de manantiales fríos, la presencia de estos valores bajos en tritio, guardan relación igualmente, con valores propios de zonas al interior del continente.



CAPITULO VII

EL SISTEMA GEOTÉRMICO DE CHALLAPALCA

7.1 Características Geotérmicas del Lote Challapalca

Si bien los sistemas geotérmicos existen donde hay una aproximación del calor interno de la Tierra (calor magmático) hacia la superficie, a unos pocos km de ésta y que interactúa con aguas subterráneas en movimiento a través de fallas y fracturas profundas, como es el caso de “Borateras”, en el lote Challapalca; este reservorio está caracterizado por la alta temperatura y permeabilidad producida por fallas y fracturas, el afloramiento de fluidos termales en superficie han provocado fuerte alteración hidrotermal (argilización y kaolinización), debido a que estos fluidos contienen grandes cantidades de salmueras, este carácter le confiere al terreno una baja resistividad eléctrica en y cerca del reservorio, contrastando con las rocas adyacentes.

7.2 Origen de las Aguas Geotermales

Los fluidos geotérmicos de “Borateras” son aguas termales que se han originado principalmente a partir de aguas meteóricas (Craig 1963) que precipitan en la zona de recarga de la cuenca, lo cual ha quedado demostrado con la aplicación de las técnicas isotópicas ^{18}O y ^2H . Un aspecto importante en el presente estudio geotérmico ha sido, determinar el origen de la recarga del sistema geotérmico y, en este aspecto la aplicación de las técnicas isotópicas son una herramienta muy útil.

Una de las contribuciones más importantes de los isótopos ambientales en hidrología, es la de haber determinado el origen de las aguas geotérmicas, desplazando, la antigua teoría de que los fluidos geotérmicos, tenían un origen enteramente magmático [16]. Gracias a los análisis isotópicos de muestras de aguas geotérmicas, se establece su origen, a partir de aguas meteóricas que se infiltran, aunque participan en menor grado, fluidos magmáticos, en zonas donde el grado geotérmico de la tierra se incrementa, como es el caso en sureste del Perú.

7.3 Geotermometría

Los geotermómetros químicos e isotópicos probablemente constituyen la herramienta geoquímica más importante para la exploración y desarrollo de recursos

geotérmicos. Son también muy importantes, durante la explotación para el monitoreo de la respuesta del reservorio geotérmico durante la etapa de producción.

En el estudio, los geotermómetros se les ha utilizado para estimar la temperatura subsuperficial, que son esperadas a ser confirmadas por las perforaciones, utilizando para esto la composición química de las descargas de los manantiales termales.

La geotermometría química que permite estimar la temperatura en profundidad a la que ocurre el equilibrio químico de la *interacción agua-roca* en el posible sistema geotérmico de “Borateras”. Se ha utilizado el geotermómetro Na-K-Mg, de Giggenbach (1989)[17], el de mayor aplicación en estos estudios. En el diagrama de la Fig.13, se representan los valores químicos de los manantiales de descarga del posible reservorio geotérmico, donde se puede observar que, en las aguas geotérmicas de “Borateras” se define principalmente un estado de evolución geotérmica hacia la curva de *equilibrio completo* “aguas maduras”, como el caso de la muestra GT-4 de Putina Chico, que se ubica en el diagrama, próxima al equilibrio completo con una temperatura en profundidad de 210 °C, flujo que durante el movimiento ascensional debe de estar afectado por mezcla. La muestra GT-3 de Putina Grande, se ubica en el extremo de las aguas de manantiales medianamente termales a fríos, campo de las *aguas inmaduras*, las que pueden haber sufrido pérdida de calor conductivo en su flujo ascensional y por consiguiente, estar afectadas por alguna modificación en su composición química.

En el estudio, con la aplicación de la geotermometría, se confirma sobre todo la característica y presencia de aguas geotérmicas del manantial termal GT-4 Putina Chico, indicando la existencia de un sistema geotérmico de alta entalpía; condición que será confirmada con los posteriores estudios exploratorios.

En este diagrama, la muestra GT-3 de Putina Grande, igual que su comportamiento químico; en lo referente a la geotermometría, no sigue la misma evolución que la muestra GT-4, lo que puede ser debido a dos causas; aguas evaporadas que siguen un circuito de convección muy somero, sin mezcla en su flujo ascendente y menor temperatura; o que responda a otro flujo convectivo por los valores químicos diferentes a los de la muestra GT-4 de Putina Chico.

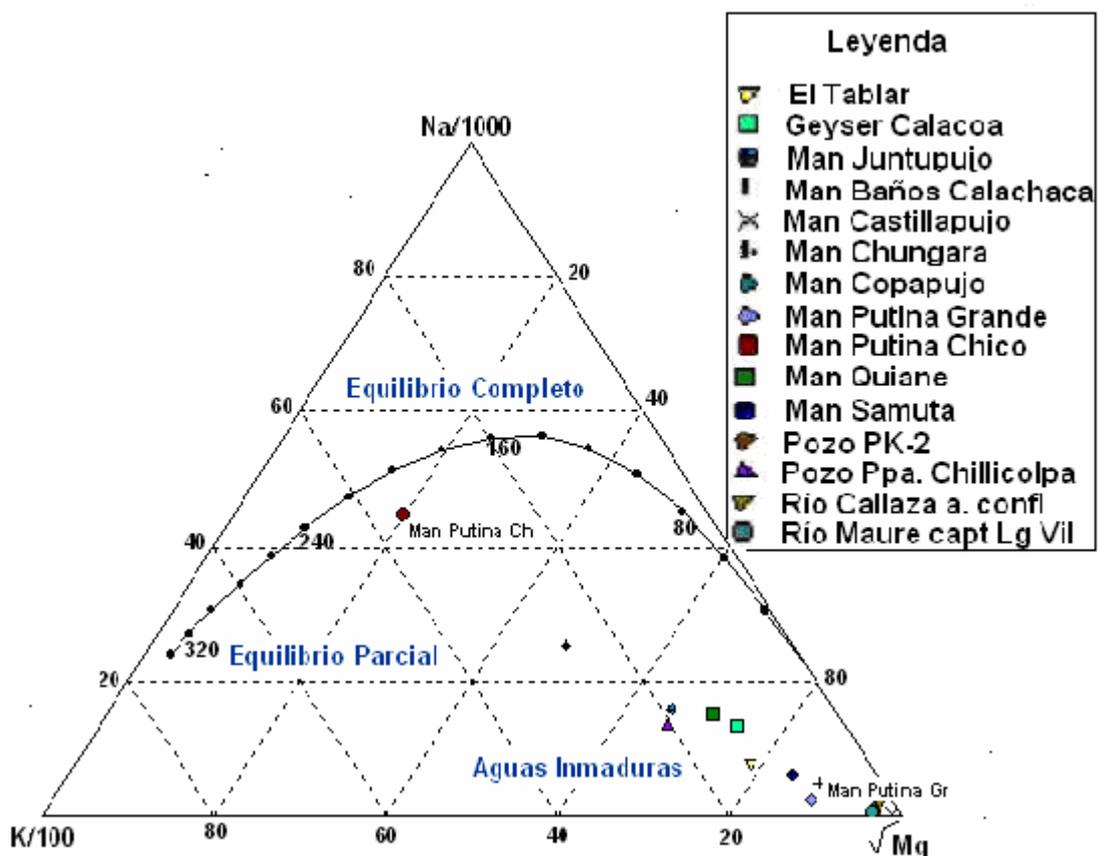
Además, es destacable en el diagrama la posición y carácter que presenta la muestra GT-26 del manantial Chungara, aunque distante del área de “Borateras”, se

ubica en el diagrama en la zona de equilibrio parcial, posiblemente afectada por mezcla, durante el flujo hacia superficie..

Utilizando la fórmula del geotermómetro de Fournier (1987) también se obtiene valores de temperatura muy próximos a los obtenidos en el geotermómetro Na-K-Mg de Giggenbach.

$$\begin{aligned}
 T_{Na/K} &= 1217 / \log(Na/K) + 1.483 - 273.15 \quad (\text{Geot. Fournier 1987}) \\
 &= 1217/2.39 + 1.483 - 273.15 \\
 &= 237 \text{ }^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Fig. 13 Geotermómetro Na-K-Mg (Giggenbach)



Como referencia, en el diagrama se ha incluido valores de los conocidos prospectos geotérmicos del sur, el Tablar y Calacoa, no obstante que los estudios de estos indican ser de buen potencial geotérmico, se emplazan en el mismo campo que la muestra G-26, y hacen considerar que la naturaleza de estos sistemas, están afectados, en profundidad, por mezcla con aguas frías.

7.4 Modelo Conceptual del Sistema Geotérmico de “Borateras”

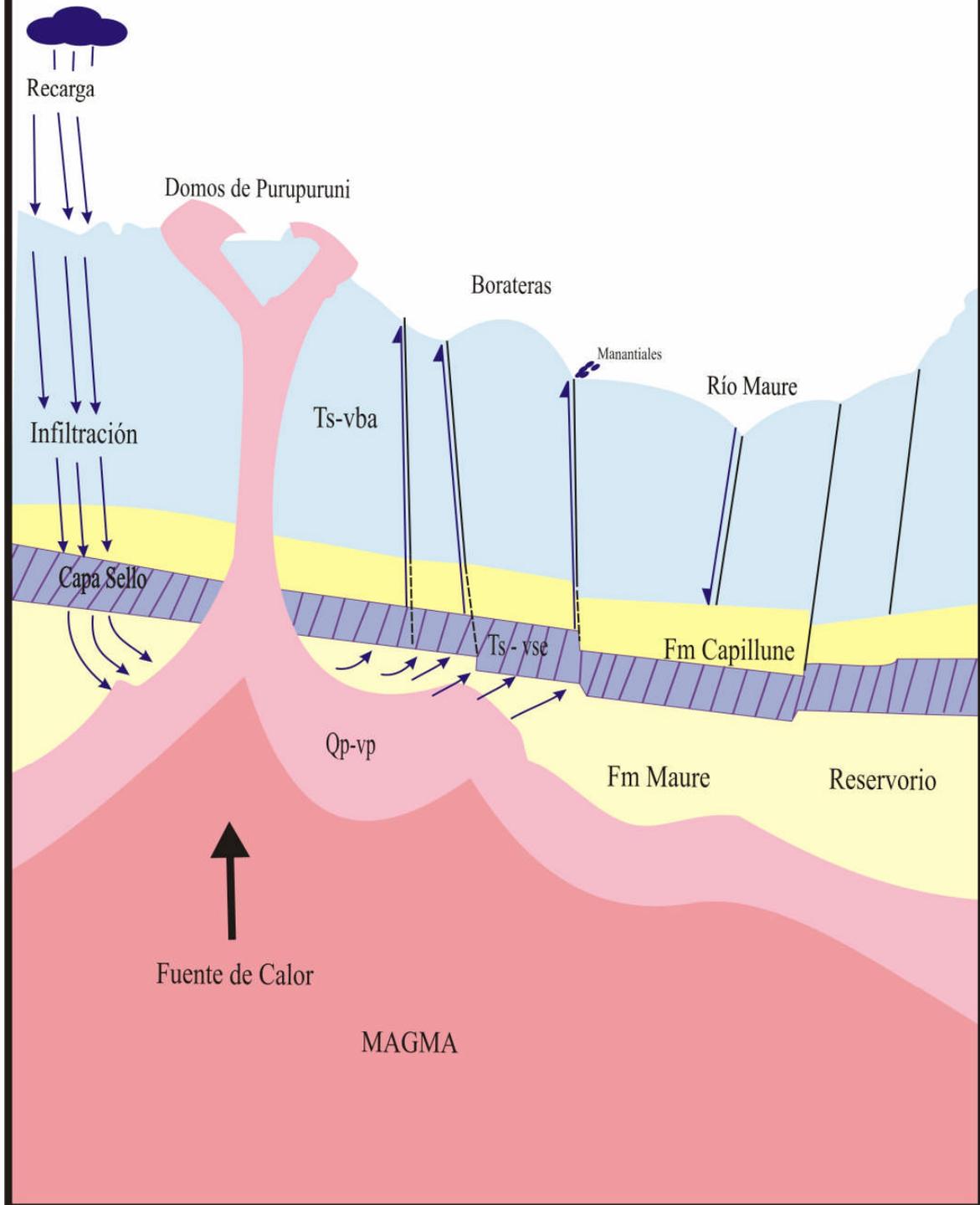
La presencia de sistemas geotérmicos en zonas volcánicas es muy frecuente por las manifestaciones que incluyen, manantiales termales, fumarolas, alteraciones hidrotermales del suelo, rocas huesped, el sistema tectono-estructural y, el reservorio acuífero. Pero este reservorio geotérmico no siempre puede ser renovable en cuanto a su recarga por el fluido. En el presente estudio, los resultados isotópicos nos muestran, el carácter dinámico de este sistema con una recarga activa.

En el área de “Borateras”, de acuerdo a la interpretación de los resultados de análisis químicos, estudios de campo, la aplicación de la geotermometría, consideraciones volcano-tectónicas, la existencia de actividad volcánica reciente en la región y sobre todo los resultados de la interpretación isotópica, han permitido visualizar un modelo conceptual del posible sistema geotérmico de “Borateras”, que se ilustra en la Fig. 14

En la zona en estudio existen dos acuíferos: Maure y Capillune, los que son reconocidos regionalmente. El acuífero Capillune, es el más superficial y en algunos sectores tiene las características de un acuífero libre; siendo las aguas de lluvia las que, directa o indirectamente recargan estas rocas acuífero. El reservorio Maure, que es donde está instalado el sistema geotérmico de “Borateras”, las estructuras como fallas y fracturas permiten primero el movimiento descendente de aguas meteóricas (frías), hasta alcanzar en profundidad las zonas de alta temperatura de acuerdo al grado geotérmico de la zona, donde el agua es calentada y al alcanzar alta temperatura y presión es nuevamente devuelta a superficie a través de la conducción hidráulica de fallas y fracturas, observándose en superficie el alineamiento de las surgencias de los manantiales termales, evidenciando un control estructural (Putina Chico y Putina Grande) y la existencia del sistema geotérmico en estudio, donde los fluidos del reservorio se recargan por las lluvias estacionales precipitadas en la parte alta de la cuenca.

Fig. 14

POSIBLE SISTEMA GEOTÉRMICO DE BORATERAS



CAPITULO VIII

MITIGACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE ARSÉNICO EN EL RÍO MAURE

8.1 La Contaminación de Arsénico en el Río Maure

En el sudoeste del Perú, predominan terrenos de naturaleza volcánica y de edad reciente, con diverso contenido de arsénico, pero donde se evidencia una mayor presencia de éste elemento, es en la zona de “Borateras”, donde el arsénico es removido por las aguas termales de la profundidad como consecuencia de la *interacción agua-roca* a elevada temperatura. Así, el arsénico pasa a incorporarse a las aguas termales y posteriormente su descarga en superficie, contaminando tanto aguas de escorrentía como suelos del curso superior del río Maure.

8.2 Alternativas de Mitigación del Contenido de Arsénico en el Río Maure

Varios países de la región, han reportado la existencia de concentraciones de arsénico en aguas subterráneas y donde la población está expuesta a éste elemento en tenores superiores a los permitidos para el agua de bebida (0.10 mg/l); convirtiéndose en un problema endémico. Se pueden citar los casos de Argentina, Chile, Bolivia, México, El Salvador. Algunos de estos países están afrontando y resolviendo, total o parcialmente el problema de la contaminación de arsénico.

Si bien es cierto, el tratamiento de las aguas de bebida consiste en remover el color, la turbidez y los microorganismos. Esta remoción se logra mediante una serie de procesos como: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Pero, cuando se desea remover elementos químicos del agua, como el arsénico, es necesario recurrir a métodos más depurados.

Existen alrededor de 14 tecnologías para remover el arsénico del agua, con eficiencias que van desde el 70 al 99 %. Coagulación-floculación y ablandamiento con cal, son los más utilizados en grandes sistemas. Las tecnologías emergentes son las que emplean arena recubierta con óxidos de hierro, filtraciones con zeolitas, adición de hierro con filtración directa, remoción convencional de hierro y manganeso. La eficiencia del proceso elegido depende de la concentración inicial, del estado de oxidación del arsénico y el pH. Para el caso de la zona de “Borateras”, se han ensayado y propuesto las siguientes tecnologías:

Pilas de Evaporación.- Constituyen pruebas piloto de campo, efectuadas por el Proyecto Especial Tacna (PET), que consisten en cubetas de evaporación de muy poca profundidad, impermeabilizadas, emplazadas próximas a la zona contaminada, donde son vertidas las aguas de los manantiales termales de "Borateras" con arsénico y luego por evaporación natural; lograr la precipitación de los sólidos y con ellos el arsénico, como se aprecia en la fotografía 05 de la memoria fotográfica. Estas pruebas, realizadas con el objeto de amenguar la contaminación de las aguas termales mediante la eliminación del arsénico del agua[2] ; según lo que se conoce, por ser un proceso lento, es necesario la disposición de una batería de piletas, no resultando ser una buena práctica ambiental.

Explotación de Energía Geotérmica.- Los resultados obtenidos en el presente estudio, permiten hacer avizorar la descontaminación del arsénico, por la vía de la explotación de energía geotérmica. El presente estudio, al determinar la hidrodinámica del sistema geotérmico de "Borateras", indica que el reservorio geotérmico se recarga con aguas de lluvias meteóricas, con lo que se aseguraría su explotación, sin perturbar el sistema en general, según la interpretación de los valores de los isótopos ambientales, O-18 y Deuterio (H-2) y, en consecuencia, lograr la descontaminación del arsénico por ésta vía, haciendo posible el aprovechamiento de las agua del río Maure.

8.3 Extinción de los Manantiales Termales

En países donde se benefician de la explotación de campos geotérmicos, indican que si bien, estos sistemas son muy sensibles, que con el tiempo de explotación del reservorio, baja su presión, provocando en superficie, la extinción de los manantiales termales; aspecto que se ha tomado en consideración en el presente estudio, para el caso de la mitigación de la contaminación de arsénico de los manantiales de descarga del reservorio en el área de "Borateras".

Para su control, se implementará un programa sistemático de monitoreo, el que también comprende la re-inyección de fluido nuevamente al reservorio, luego de haber sido utilizado, por medio de pozos ya explotados. Para esto, debe haberse conseguido antes la disminución de la presión del reservorio. La re-inyección constituye una práctica necesaria en todos los campos geotérmicos en explotación, tanto para mantener la producción permanente del reservorio, como para el adecuado manejo ambiental de los fluidos (salmueras), evitando afectar el ecosistema.

Producida la extinción de los manantiales en el tiempo por la explotación del reservorio geotérmico de “Borateras”, este proceso debe continuar con la operación de la planta, como un proyecto sostenible, como todos los de este tipo de energías renovables y a fin de mantener la presión deseada del reservorio, se utilizará la re-inyección de los fluidos ya utilizados, pero después de la extinción de los manantiales con As. En todo caso, se postula que la planta debe operar indefinidamente, para esto, nuevos pozos productores reemplazarán a los que se vayan agotando. En un reservorio geotérmico, los fluidos están presurizados y coexisten en dos fases, fase líquida y fase vapor.

Una de las principales razones de efectuar la re-inyección en un reservorio, es que con la explotación éste se despresuriza, lo que repercute en la producción de los pozos, por este proceso que se da durante la explotación inicial del reservorio, hacen necesaria la re-inyección, como lo afirman las investigaciones del Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norte América (DOE) por sus siglas en inglés, que indican: “casi todos los campos geotérmicos requieren la re-inyección del retorno al reservorio de los fluidos ya utilizados, para mantener la presión y la producción del reservorio”. En el mismo sentido, opinan investigadores del Instituto de Investigaciones Eléctricas de México; indicando que, “ha sido observado en muchos sistemas geotérmicos alrededor del mundo que, la extracción de fluidos geotérmicos de alta temperatura, reducen la presión del reservorio y consecuentemente el flujo natural de los fluidos geotérmicos que forman las manifestaciones superficiales”.

Un adecuado programa diseñado para su manejo y desarrollado, utilizando métodos apropiados de ingeniería de reservorio, permitirán, predecir cambios futuros en la presión y temperatura, química de los fluidos, grado de producción; esta información es crucial para la rentabilidad del proyecto.

Otra razón por la que se aplica la re-inyección de un reservorio es, evitar que aguas frías alcancen los pozos productores; para esto, existen una variedad de trazadores químicos, que al ser inyectados permiten seguir y monitorear el movimiento de los fluidos en el reservorio geotérmico.

Finalmente, como una buena práctica ambiental, se utiliza la re-inyección para evitar que las aguas geotérmicas ya utilizadas (verdaderas salmueras), puedan aun contaminar los suelos y el curso del río Maure.

A título de ejemplo, se mencionan algunos reservorios geotérmicos en explotación:

Geotermia en Italia.

A partir de 1910 en Larderello, el vapor caliente de baja presión en una parte de la Toscana al norte de Italia, se empezó a utilizar con fines industriales y residencial, el vapor geotérmico, pero en 1904, se obtuvo la primera generación de electricidad de este tipo de energía: En la actualidad tiene una capacidad instalada de 791 MW en cuatro centrales.

Los estudios y la larga historia de producción de Larderello revelan diversas tendencias de la composición de los fluidos en diferentes áreas del campo en ambas, con relación a la distribución espacial y evolución en el tiempo. La primera, la variación espacial, estaría controlada por mezcla de fluidos del reservorio original con agua de recarga y condensación gradual del flujo de vapor de las zonas de vaporización hacia los bordes del campo. La segunda, variaciones observadas en el tiempo en algunos pozos antiguos del área central de Larderello, han sido interpretados como la consecuencia de cambio en la contribución de diferentes fuentes de vapor para la producción del fluido.

Se indica que en Larderello existen dos reflectores sísmicos debajo del área geotérmica, que alberga dos fluidos diferentes.

- 1) vapor sobre calentado, en el Horizonte Superior-H, alcanzado por perforaciones.
- 2) Fluido supercrítico, en la parte mas profunda del Horizonte-K, alcanzado por pocos pozos no productivos o dañados.

Larderello se ha caracterizado por tener reservorios de vapor sobrecalentado, mientras que los fluidos supercríticos, representan un potencial no-convencional de recursos emplazados en profundidad, todavía no evaluados.

Geotermia en México.

En 1954 se perforó en Pathé, Hidalgo el primer pozo geotérmico y en 1959, en el mismo lugar operó la primera planta de generación comercial en América Latina con 3.5 MW de potencia.

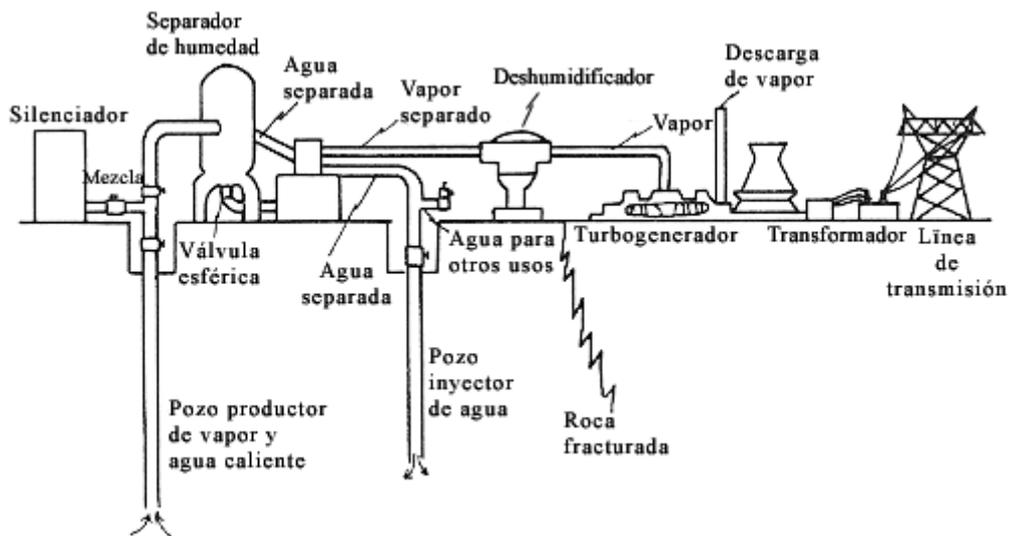
Actualmente, se tiene en operación tres campos geotérmicos; Cerro Prieto, en Baja California con 25 años de operación ininterrumpida; tiene con una capacidad instalada de 620 MW. Los Azufres en Michoacán tiene 88 MW y Los Humeros en Puebla con 35 MW, emplazado en una estructura volcánica "caldera", la zona

productora se encuentra a 1300 y 2000 m. de profundidad con temperatura de 320°C , en la actualidad hay siete plantas a contrapresión de 5MW cada una , su energía se envía al sistema de distribución de la Confederación Federal de Electricidad (CFE) y se cita que la energía generada en un año , significa un ahorro para el país de unos 700,000 barriles de petróleo, cantidad que habría tenido que quemarse si la energía se hubiera producido en una central termoeléctrica.

Geotermia en Indonesia.

En la ciudad de Garut, al oeste de Java, 200 km al sur de Yakarta, la planta geotérmica de Darajat, inició su producción industrial en noviembre de 1994. El reservorio es uno de los pocos del mundo que produce “vapor seco” inicialmente producía 55 MW, en otra fase de expansión del proyecto y el desarrollo de un adicional campo geotérmico incorporó 70 MW más. Amoseas, la empresa encargada de la explotación, utiliza un sistema de control de presión variable, para maximizar la utilización de energía y minimizar la pérdida de vapor, la vida proyectada de la planta es 30 años.

La producción global de energía a partir de la geotermia es de 5,500 GWh. anuales y contribuye con el 3.4% de la generación eléctrica total mundial, los principales campos en explotación utilizan las plantas de generación del sistema convencional, como se muestra a continuación.



8.4 Explotación y Empleo de los Recursos Hídricos Superficiales y Subterráneos de la Cuenca del Río Maure

En la actualidad, por la Ley General de Aguas D.L. N°. 17752, se considera como recursos diferentes, el agua superficial y el agua subterránea, y por este hecho hasta

se debe realizar gestiones separadas para ser utilizadas, situación que se espera deba ser superada con la nueva Ley de recursos hídricos, que está en estudio final.

El ordenamiento y uso integrado de los recursos hídricos, se basa en el concepto de que el agua es parte integrante del ecosistema y, que una alteración de sus condiciones naturales de ésta, repercutirá en el ecosistema, por eso es considerado un recurso natural, un bien social, un bien económico y recientemente considerado, como un recurso sujeto a conflictos. Por estas razones, el manejo de los aspectos relativos a la tierra y el agua, deberían efectuarse en forma integrada y a nivel de cuenca, que como se sabe es la unidad hidrológica. Así, el agua subterránea debe utilizarse racionalmente, igualmente el agua superficial; considerando que el agua subterránea por su excelente calidad de preferencia, debería utilizarse para uso domestico. Por lo que, en el presente estudio y, en el contexto del ordenamiento en el uso de los recursos hídricos, se promueve la importancia del aprovechamiento conjunto de este recurso, utilizando para esto, toda la tecnología disponible, lo que se considera y sustenta con el presente estudio.

8.5 Beneficios del estudio

El presente estudio es una contribución para el mejor conocimiento y empleo de los recursos hídricos en la zona altoandina del departamento de Tacna, zona muy importante en el abastecimiento de este recurso para la ciudad de Tacna.

Mediante la aplicación de los isótopos ambientales se ha determinado la composición isotópica de las aguas subterráneas, las que constituyen el fluido del sistema geotérmico de "Borateras", esta técnica indica que, el origen de la recarga se produce a partir de aguas meteóricas que se infiltran con un tiempo largo de residencia en el subsuelo, lo que asegura el funcionamiento del sistema geotérmico de "Borateras" y consecuentemente, la explotación de los recursos geotérmicos.

Con la explotación de la energía geotérmica en el Lote Challapalca, como se ha indicado anteriormente. Primero, se obtendrá una mejora de las condiciones ambientales y calidad de los recursos hídricos: permitiendo su aprovechamiento al disminuir el contenido de arsénico de las aguas y, la mitigación de los elementos contaminantes, evitando afectar la salud e impactar negativamente las aguas superficiales y subterráneas en el curso superior del río Maure. Segundo, mejor aprovechamiento de los recursos hídricos de la zona, por las comunidades rurales

altoandinas de la zona, y principalmente por la ciudad de Tacna, con una población de 300,000 habitantes.

La posibilidad de producir energía geotérmica, en uno de los más importantes lotes geotérmicos del país (Lote Challapalca) y en un área deprimida, la que se constituiría en un factor inductor de desarrollo socio-económico de la Región Sur. Energía eléctrica de origen geotérmico, que podría incrementar el suministro de energía en forma modular para la gran minería del sur del Perú y la posibilidad de que en el futuro, este tipo de energía, con un mayor desarrollo, sea incorporada en la matriz energética y en el sistema interconectado nacional.

Uso en balneología, balneoterapia y el sistema de invernadero para el cultivo de plantas en altura, logrando un mayor beneficio de un tipo de energía no convencional, renovable y ambientalmente limpia.

Con el aprovechamiento de la energía geotérmica, incrementará el potencial de fuentes de energía en el país, en éste caso, en una de las zonas de buen potencial geotérmico; evitando la vulnerabilidad de depender de una sola fuente de energía.

Existen plantas geotérmicas modulares de generación de 5MW de capacidad [18], la que inicialmente, sería la más conveniente para el proyecto, bajo costo (US\$ 3000/ Kw), operación y funcionamiento simple como se ilustra en el diagrama adjunto:

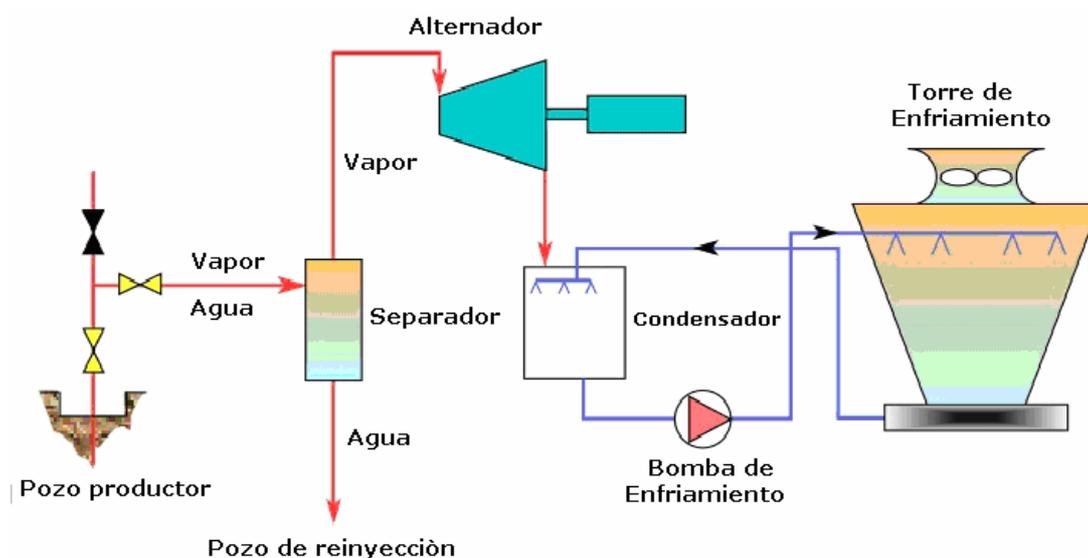


Diagrama de un tipo de planta de energía geotérmica de vapor condensado. El flujo del fluido de alta temperatura está indicado en color rojo y del agua de enfriamiento en azul.

En este tipo de proyectos, donde están involucrados los recursos hídricos, tanto las técnicas isotópicas como la hidrogeoquímica, dan información, en las fases iniciales del proyecto, respecto a los principales elementos de un sistema geotérmico, la temperatura, dinámica de la recarga y profundidad del reservorio, abaratando los costos de exploración.

Finalmente, el presente estudio de investigación, con aplicación de las técnicas isotópicas, aporta información para un mejor conocimiento y sustento para el aprovechamiento de los recursos naturales en un contexto de desarrollo sostenible, mejorando la calidad de vida de la sociedad y fomentando el uso de fuentes alternativas de energías limpias y renovables, contribuyendo a disminuir el uso de combustibles fósiles, reduciendo las emisiones de CO₂ y la generación de gases de efecto invernadero (GEI), ayudando eficazmente a atenuar los graves efectos del calentamiento global.

CONCLUSIONES

- 1.- La presencia de arsénico en las aguas termales en el área de “Borateras” se producen por la mezcla de gases de origen interno con aguas termales las que originan la removilización de este elemento del substrato en su ascenso a superficie.
- 2.- Por las características isotópicas de las aguas termales de “Borateras” en Putina Chico, indican la existencia de un sistema geotérmico con recarga a partir de la infiltración de agua de lluvias en la alta cordillera y con un tiempo largo de residencia en el reservorio.
- 3.- Los resultados de los análisis químicos e isotópicos del presente estudio, confirman la existencia de fluidos geotérmicos en el área de “Borateras” y constituyen el argumento que justifican efectuar estudios mas detallados.
- 4.- En general se ha observado en el diagrama de los isótopos ambientales ^{18}O y ^2H que los manantiales con mayor enriquecimiento de ^{18}O , corresponden a los de mayor temperatura geotermométrica, por efecto de la interacción agua-roca.
- 5.- Un elemento importante que facilita la explotación de las aguas geotérmicas del área de “Borateras” es la tasa de renovación y recarga del agua del reservorio, la que se debe a la “juventud” del sistema hidrológico de la zona.
- 6.- La hidrogeoquímica, muestra aguas termales de composición del tipo clorurada- sódicas, es decir, aguas de carácter geotérmico, afectadas por mezcla de aguas subterráneas frías en su proceso ascensional. Las características, isotópicas e hidroquímicas, sustentan un proyecto de explotación de energía geotérmica en la zona de “Borateras”
- 7.- Existen dos puntos importantes de descarga del sistema geotérmico de “Borateras” que han permitido conseguir la información para formular el modelo conceptual del reservorio, sin embargo estas manifestaciones se caracterizan por presentar un reducido flujo de gases.
- 8.- Por la geotermometría de 210°C , obtenida de los manantiales termales y la presencia de estructuras tectono-volcánicas, son indicativas de la existencia de

un reservorio geotérmico de posible explotación económica, la que permitirá la extinción de manantiales termales, con la consiguiente mitigación de la contaminación de arsénico en el río Maure, haciendo posible el uso del recurso agua.

- 9.- Los resultados obtenidos del área bajo estudio y considerando la dispersión de As, una alternativa viable de solución para la mitigación de ésta contaminación en el río Maure, es mediante el aprovechamiento de energía geotérmica .

RECOMENDACIONES.

- 1.- Continuar las investigaciones del presente estudio, a fin de reunir la información necesaria de la zona mas importante, “Borateras” ; efectuar investigaciones de prospección geofísica , termometría de superficie y mediante pozos exploratorios.
- 2.- Para determinar el potencial geotérmico del área de “Borateras” se requiere efectuar la exploración mediante perforaciones de 500 a 1000 m de profundidad y poder caracterizar un reservorio geotérmico convectivo y de alta entalpía.
- 3.- Dentro de las áreas de interés geotérmico de la zona, tener en cuenta el manantial Chungara, ya que en el diagrama de geotermometría, el valor obtenido, indica tendencia y evolución hacia la línea de equilibrio completo de aguas geotérmicas.
- 4.- Para las investigaciones futuras se debe considerar, la toma de muestras de gases de las principales manantiales y manifestaciones termales en el área de “Borateras”
- 5.- Mayor promoción y difusión de parte de los organismos pertinentes a la comunidad y minería del Sur del Perú sobre los objetivos , alcances e importancia de este proyecto, a fin de que se efectúe el estudio de factibilidad que conlleve a concretar la alternativa propuesta en el presente estudio.
- 6.- El Gobierno debe reconocer y apoyar el desarrollo de las energías renovables como una alternativa de suministro futuro de energía y la prevención de los graves problemas de contaminación por el uso de combustibles fósiles.

REFERENCIAS.

- [1].- Evaluación de las Zonas Hidrotermales de las Pampas de Kallapuma y Alrededores, INGEMMET, agosto de 1995
- [2].- Estudio de Factibilidad de la Descontaminación del Río Maure, Vols. Geología, Hidrogeología e Hidroquímica. Asesores Técnicos Asociados, (ATA), Noviembre de 1999
- [3].- Química inorgánica avanzada. Cotton, F A, Wilkinson, G. Editorial LIMUSA, SA. México, 1975
- [4]. Artículo de As HACRE
- [5].- Geología del Cuadrángulo de Tarata, Boletín No. 11. Autor: Hugo Jaén La Torre, Comisión Carta Geológica Nacional, Lima, 1965
- [6].- “El acuífero Maure en la pampa del Ayro” Prov. y Dpto. de Tacna por: Guillermo A. Pérez Verástegui ; tesis para optar el grado académico de Bachiller en Geología, U.N.M.S.M, P. A. de Geología , Lima, 1974
- [7].- Geologie des Andes Peruviennes travaux et documents de L' ORSTOM, N.122, Autores: B. Dalmayrac, G. Laubacher , R. Marocco. ORSTOM, Paris, 1980
- [8].- Fundamentos de Hidrogeología Ediciones Mundi-Prensa, impreso en España, 2005
- [9]. - Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico: Principios y aplicaciones. Editor: W.G Mook, IGME, Madrid 2002
- [10].- Isotopic and Chemical Techniques in Geothermal Exploration Development and Use. Edited by: Stefan Arnórsson IAEA Viena, Austria, 2000
- [11].- Chemical and Isotopic Ground water Hydrology The Applied Approach, Second Edition Emanuel Mazor wezmamn, Institute of science, Rehovot, Israel, 1997
- [12].- Isotope and Geochemical Techniques Applied to Geothermal Investigations. IAEA –TECDOC- 788 , Vienna, Austria, February-1995
- [13].- Arsenic in Ground water supplies of the U.S , cts Welch, A. H in, Eds. Elsevier Science, N. York pp. 9-17, 1999
- [14] Smedley y Kinniburgh (2002)
- [15].- Stable Isotope Hydrology , Deuterium and Oxigen-18 in the water cycle Technical report , Series N° 210, IAEA, Vienna, 1981

- [16].- Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin.
W. F. Giggenbach, Institute of geological and nuclear sciences, Lower hut, New Zeland. Earth and planetary Science Letiers, Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam.
- [17].- Environmental isotopes in geothermal studies
C. Panichi and R. Gonfiantini, Geothermics, Vol. 6, pp 143-161
Pergamon Press Ltd, printed in Great Britain, 1978.
- [18].- What is geothermal energy?
Mary H. Dickson and Mario Fanelli
Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italy, February 2004
- [19].- Environmental isotopes in geothermal studies
C. Panichi and R. Gonfiantini
International Institute for geothermal research, CNR, via del Buongusto 1, Pisa, Italy/International Atomic Energy Agency, Section Isotope Hydrology, Vienna, 1978

ANEXOS

CUADROS

CUADRO Nro. 1ª

RESULTADOS QUIMICOS TERCER MUESTREO AREA BORATERAS

Nº DE MTRA	CODIGO MUESTRA		FECHA	pH CAMP.	pH LAB.	Temp. °C CAMPO	Miligramos por litro													% Error
							Na	K	Ca	Mg	Li	Cl	SO4	HCO3	SiO2	B	As	Hg	Fe	
1	Ca-5	El Tablar	25/10/2000	4.01	3.40	76.9	438.5	76.4	69.2	18.8	2.92	598.4	459	0.00	288.4	19.80	7.490	<0.0005	10.200	-0.77
2	GC-1	Geyser Calacoa	25/10/2000	6.00	8.01	86.0	560.4	52.7	68.2	9.68	5.29	707.1	312	255.22	202.9	19.20	3.700	<0.0005	0.395	-1.15
3	GT-2	Rio Maure Captac. Villachaulani	24/10/2000	8.11	7.00	18.2	11.1	4.8	5.6	2.12	0.036	2.32	22.5	35.50	49.3	0.31	0.097	<0.0005	0.570	-2.67
4	GT-3	Manantial Putina Grande	24/10/2000	5.87	7.00	71.0	20.9	7.5	6.3	0.5	0.014	0.882	37.3	31.59	130.6	0.24	0.021	0.003	0.099	4.93
5	GT-4	Manantial Putina Chico	24/10/2000	6.95	8.10	85.6	1295.7	102.1	54.4	0.32	16.967	2237	54	86.40	284.7	99.00	18.080	<0.0005	0.037	-3.07
6	GT-7	Pozo Pampa Chillicolpa	24/10/2000	7.08	7.39	59.2	563.3	86.5	32	7.63	6.037	974.2	64	131.31	190.1	43.00	7.560	0.0008	0.095	-3.37
7	GT-15	Manantial Baños Calachaca	24/10/2000	7.00	7.49	42.2	218.0	31.2	34.4	15.07	2.603	357	34	232.30	151.1	14.89	3.280	<0.0005	0.044	-4.83
8	GT-17	Manantial Samuta	24/10/2000	5.64	7.45	51.8	310.1	47.4	32.7	17.41	3.527	500.9	45.3	259.00	174.2	22.70	4.370	<0.0005	0.050	-4.18
9	GT-24A	Manantial Quiane	23/10/2000	6.73	7.38	40.5	822.2	78.3	45.3	14.98	7.612	1323	83	237.66	176.7	43.00	13.030	<0.0005	0.050	-1.98
10	GT-26	Manantial Chungara	23/10/2000	6.85	7.21	74.4	1072.0	111.2	41.9	4.16	10.163	1860	112.4	153.20	120	58.50	15.860	<0.0005	0.670	-4.94
11	GT-27	Manantial Juntupujo	23/10/2000	6.93	7.20	68.6	745.3	88.8	33.7	9.46	6.918	1277	78.8	188.26	188.4	41.80	11.620	<0.0005	0.209	-4.60
12	GT-29	Manantial Castilla Pujo	23/10/2000	7.31	3.31	43.2	16.5	4.7	402.2	21.06	0.029	1.32	1065	0.00	37.4	<0.05	0.010	<0.0005	25.560	0.96
13	GT-32	Manantial Copapujo	24/10/2000	6.96	7.12	14.2	32.8	6.7	7.4	5.89	0.199	50.33	10.2	58.68	80	0.98	0.609	<0.0005	0.092	-2.85
14	PK-2	Pozo PK- 2	24/10/2000	6.55	7.11	24.0	12.1	5.0	4.2	3.01	0.076	2.19	4.1	65.02	103.6	0.07	0.286	<0.0005	0.072	-4.38
15	RC-1	Rio Callazas antes de confluencia	25/10/2000	7.00	7.60	20.1	29.4	2.1	10.7	1.78	0.065	14.18	29.9	54.04	54.1	0.47	0.130	<0.0005	0.145	2.71

Cuadro Nro 02 RESULTADOS ISOTOPICOS MUESTREO AREA "BORATERAS"

Nº de Muestra	CODIGO DE MUESTRA	FECHA	COORDENADAS UTM		δD (‰)	δO^{18} (‰)	δO^{18} (‰)	δD (‰)	Exc D
			Norte	Este					
1	GT-1 Rio Ancoaque	25/10/1999	8099200	399700	-116.48	-15.37	-15.37	-116.48	6.48
2	GT-2 Rio Maure en C	25/10/1999	8097715	402602	-116.61	-15.55	-15.55	-116.61	7.79
3	GT-3 Man. Put.Gr	26/10/1999	8094735	401549	-85.12	-3.50	-3.50	-85.12	-57.12
4	GT-4 Man Put Ch	27/10/1999	8096678	402094	-104.31	-11.18	-11.18	-104.31	-14.87
5	GT-5 Put Ch final B	25/10/1999	8096820	403125	-100.85	-10.90	-10.90	-100.85	-13.65
6	GT-6 Mant Put Ch	27/10/1999	8096950	402320	-108.93	-12.96	-12.96	-108.93	-5.25
7	GT-7 Pz explor p chi	27/10/1999	8096505	404190	-110.53	-13.54	-13.54	-110.53	-2.61
8	GT-8 Man. Sapiutapa	27/10/1999	8096245	403765	-105.43	-11.70	-11.70	-105.43	-11.83
9	GT-9 Man Sapiutapa	27/10/1999	8097025	402634	-109.42	-13.17	-13.17	-109.42	-4.06
10	GT-10 Man ppa. Chillic	27/10/1999	8096493	404352	-109.90	-13.01	-13.01	-109.90	-5.82
11	GT-11 Rio Maure a.b. Ca	26/10/1999	8095105	408255	-107.79	-13.18	-13.18	-107.79	-2.35
12	GT-12 Rio Maure d.b.Ca.	26/10/1999	8094530	409153	-113.41	-14.25	-14.25	-113.41	0.59
13	GT-13 Man put Ch	27/10/1999	8096980	402685	-110.46	-13.53	-13.53	-110.46	-2.22
14	GT-14 Man p. chillic.	27/10/1999	8095620	404220	-103.89	-11.24	-11.24	-103.89	-13.97
15	GT-15 Man b. Calach	26/10/1999	8095100	408345	-118.81	-15.96	-15.96	-118.81	8.87
16	GT-16 Man. Calach	26/10/1999	8095180	408615	-120.24	-15.37	-15.37	-120.24	2.72
17	GT-17 Man Samuta	26/10/1999	8095400	407525	-117.79	-15.53	-15.53	-117.79	6.45
18	GT-18 Man Manguta	27/10/1999	8097375	404815	-124.34	-16.89	-16.89	-124.34	10.78
19	GT-19 Man. Taipimoco	26/10/1999	8092874	400483	-107.58	-15.31	-15.31	-107.58	14.9
20	GT-20 Man. Azufrihum	26/10/1999	8092960	400634	-108.88	-15.17	-15.17	-108.88	12.48
21	GT-21 Juntopujo L Vil W	25/10/1999	8102996	388706	-49.44	-2.13	-2.13	-49.44	-32.4
22	GT-22 Lag Vil est. Bomb	25/10/1999	8102211	390493	-49.10	-2.22	-2.22	-49.10	-31.34
23	GT-23 Pozo PVL-2	25/10/1999	8104885	392311	-120.76	-16.31	-16.31	-120.76	9.72
24	GT-24 Man Quiane	27/10/1999	8081647	418559	-118.07	-15.00	-15.00	-118.07	1.92
25	GT-25 Man. Chungara	27/10/1999	8075981	416956	-125.45	-17.26	-17.26	-125.45	12.63
26	GT-26 M. Chungara hidr	27/10/1999	8078174	419464	-113.53	-13.88	-13.88	-113.53	-2.49
27	GT-27 Man Juntupujo	27/10/1999	8080198	422021	-117.29	-15.02	-15.02	-117.29	2.87
28	GT-28 Lag Casiri	27/10/1999	8073584	414108	-67.22	-6.96	-6.96	-67.22	-11.61
29	GT-29 Lag. Casiri hidrot	27/10/1999	8073227	413877	-112.56	-16.19	-16.19	-112.56	16.96
30	GT-30 Rio Kallapuma	26/10/1999	8088178	423726	-93.20	-10.10	-10.10	-93.20	-12.4

HIDROMETRIA

PRECIPITACION TOTAL MENSUAL (mm)

CODIGO DE ESTACION 19151101 LONGITUD : 69° 39' (8172500)N
 NOMBRE DE ESTACION CHUAPALCA DPTO. : TACNA LATITUD : 17° 21' (4333000)E
 CATEG. DE ESTACION PLU PROV. : TARATA ALTITUD 4,250 m.s.n.m.

CUENCA	ENE	FEB	MAURE MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL	PROM	D.STD
1964	8.0	74.6	70.7	3.8	1.0	0.0	0.0	3.0	16.0	7.0	10.4	67.0	261.5	21.8	29.9
1965	71.0	132.1	34.9	4.1	0.0	1.7	0.0	0.9	20.5	0.0	15.1	39.1	319.4	26.6	39.8
1966	13.1	91.1	26.6	0.0	20.1	0.0	0.0	0.0	0.0	22.8	38.4	54.1	266.2	22.2	28.0
1967	62.7	139.5	118.0	33.8	3.2	0.0	2.3	0.0	12.3	6.0	2.4	67.5	447.7	37.3	49.1
1968	85.6	130.8			25.8	13.4	0.0	0.0	4.2	43.9	105.9	31.4	441.0	44.1	47.1
1969	124.5	68.0	41.1	0.5	0.0	0.0	0.1	0.0	5.6	0.2	8.8	82.7	331.5	27.6	42.2
1970	113.5	70.3	53.2	7.3	3.4	0.0	0.0	4.6	0.0	8.5	0.0	86.0	346.8	28.9	40.7
1971	77.1	196.3	22.9	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.5	45.7	384.0	32.0	57.4
1972	194.8	99.7	193.1	31.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	17.4	1.0	116.4	654.9	54.6	76.5
1973	184.8	132.2	126.6	29.2	0.0	0.2	0.0	19.4	0.9	0.0	0.5	31.4	525.2	43.8	65.3
1974	285.8	148.8	40.0	27.1	0.0	1.4	0.0	0.0				27.0	530.1	58.9	97.3
1975	154.9	204.3	83.8	3.6	3.7	0.0	0.0	0.0	6.0	0.2	0.0	160.0	616.5	51.4	77.9
1976	234.3	70.3	70.8	1.6	6.1	0.0	0.1	10.0	15.2	0.0	0.0	18.8	427.2	35.6	67.7
1977	69.0	177.1	94.6	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.7	0.9	8.1	46.2	397.0	33.1	55.7
1978	177.4	12.7	37.5	3.7	0.0	0.0	0.0	0.4	0.1	7.8	39.0	27.8	306.4	25.5	50.1
1979	46.7	1.5	100.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	5.6	17.6	173.6	14.5	30.4
1980	34.6	23.1	173.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1	3.3	5.3	12.4	253.0	21.1	49.3
1981	75.1	144.8	58.0	4.7	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.7	8.7	293.5	24.5	45.6
1982	81.0	24.9	18.3	13.1	0.0	0.0	0.0	0.1	1.3	10.8	2.0	10.5	162.0	13.5	22.8
1983	2.6	20.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	28.0	51.6	4.3	9.5
1984	168.7	148.7	155.3	0.1	0.0	1.3	0.0	0.2	0.0	54.4	133.8	39.1	701.6	58.5	71.4
1985	96.8	204.7	81.9	50.3	0.1	6.5	0.0	0.0	2.7	1.4	213.6	99.0	757.0	63.1	78.8
1986	111.9	60.2	78.7	35.5	0.2	0.0	0.5	1.4	0.0	0.0	14.1	116.9	419.4	35.0	45.5
1987	180.4	28.8	21.7	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.6	10.4	3.0	262.5	21.9	50.9
1988	264.7	19.9	29.0	23.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	41.4	378.8	31.6	74.8
1989	82.7	9.5	57.4	9.8			0.0	0.0					159.4	26.6	34.9
1990	8.7	25.9	3.4	2.2	1.0	4.4	0.0	0.5	0.0	0.0	12.7	97.1	155.9	13.0	27.5
1991	59.4	14.6	40.6	0.6	0.0	12.4	0.0	0.0	0.0	0.2	1.2	25.7	154.7	12.9	19.6
1992	44.0	20.8	4.8	1.0	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0	2.5	35.5	85.2	194.4	16.2	26.6
1993	169.6	1.8	75.6	8.2	0.0	0.3	0.0	48.5	0.0	13.3	10.0	76.6	403.9	33.7	51.7
1994	59.3	132.1	46.8	4.9	3.9	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	18.9	56.5	322.6	26.9	40.5
1995	72.2	20.0	95.8	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	22.7	40.5	258.7	21.6	32.2
1996	132.9	96.6	40.8	15.5	6.7	0.0	T	1.9	T	T	15.1	62.6	372.1	41.3	47.1
1997	150.6	161.6	37.9	2.0	10.8	0.0	0.0	17.8	28.6	2.7	20.0	38.5	470.5	39.2	56.4
1998	175.2	68.7	21.1	6.6	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	4.9	19.3	20.7	316.9	26.4	50.8
1999	56.7	197.6	139.3	69.7	0.1	0.0	0.7	0.0	9.9	13.7	0.0	46.5	534.2	44.5	64.1
2000	156.1	114.4	91.1	1.8	4.0	0.0	0.0	0.0					367.4	45.9	64.3
TOTAL	4086.4	3288.5	2385.9	408.8	90.5	42.0	4.1	111.0	125.3	239.9	809.1	1827.6	13419.1	--	--
PROMEDIO	110.4	88.9	66.3	11.4	2.5	1.2	0.1	3.0	3.8	7.3	23.8	52.2	362.7	31.9	--
D.STD	71.8	65.5	48.0	16.2	5.6	3.2	0.4	8.9	7.1	12.5	44.1	35.8	--	25.4	--
MAX	285.8	204.7	193.1	69.7	25.8	13.4	2.3	48.5	28.6	54.4	213.6	160.0	--	285.8	--
MIN	2.6	1.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	--	0.0	--

PRECIPITACION TOTAL MENSUAL (mm)

CODIGO DE ESTACION : 19151102 LONGITUD : 69° 47' (8095700)N
 NOMBRE DE ESTACION : CHALLAPALCA DPTO. : TACNA LATITUD : 17° 13' (418800)E
 CATEG. DE ESTACION : PLU PROV. : TARATA ALTITUD : 4,250 m.s.n.m.
 CUENCA : MAURE DIST. : TARATA FUENTE : PET SENAMHI

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL	PROM	D.STD
1964	8.0	74.6	70.7	3.8	1.0	0.0	0.0	3.0	16.0	7.0	10.4	67.0	261.5	21.8	29.9
1965	71.0	132.1	34.9	4.1	0.0	1.7	0.0	0.9	20.5	0.0	15.1	39.1	319.4	26.6	39.8
1966	13.1	91.1	26.6	0.0	20.1	0.0	0.0	0.0	0.0	22.8	38.4	54.1	266.2	22.2	28.0
1967	62.7	139.5	118.0	33.8	3.2	0.0	2.3	0.0	12.3	6.0	2.4	67.5	447.7	37.3	49.1
1968	85.6	130.8			25.8	13.4	0.0	0.0	4.2	43.9	105.9	31.4	441.0	44.1	47.1
1969	124.5	68.0	41.1	0.5	0.0	0.0	0.1	0.0	5.6	0.2	8.8	82.7	331.5	27.6	42.2
1970	113.5	70.3	53.2	7.3	3.4	0.0	0.0	4.6	0.0	8.5	0.0	86.0	346.8	28.9	40.7
1971	77.1	196.3	22.9	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	38.5	45.7	384.0	32.0	57.4
1972	194.8	99.7	193.1	31.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	17.4	1.0	116.4	654.9	54.6	76.5
1973	184.8	132.2	126.6	29.2	0.0	0.2	0.0	19.4	0.9	0.0	0.5	31.4	525.2	43.8	65.3
1974	285.8	148.8	40.0	27.1	0.0	1.4	0.0	0.0				27.0	530.1	58.9	97.3
1975	154.9	204.3	83.8	3.6	3.7	0.0	0.0	0.0	6.0	0.2	0.0	160.0	616.5	51.4	77.9
1976	234.3	70.3	70.8	1.6	6.1	0.0	0.1	10.0	15.2	0.0	0.0	18.8	427.2	35.6	67.7
1977	69.0	177.1	94.6	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.7	0.9	8.1	46.2	397.0	33.1	55.7
1978	177.4	12.7	37.5	3.7	0.0	0.0	0.0	0.4	0.1	7.8	39.0	27.8	306.4	25.5	50.1
1979	46.7	1.5	100.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	5.6	17.6	173.6	14.5	30.4
1980	34.6	23.1	173.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1	3.3	5.3	12.4	253.0	21.1	49.3
1981	75.1	144.8	58.0	4.7	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.7	8.7	293.5	24.5	45.6
1982	81.0	24.9	18.3	13.1	0.0	0.0	0.0	0.1	1.3	10.8	2.0	10.5	162.0	13.5	22.8
1983	2.6	20.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	28.0	51.6	4.3	9.5
1984	168.7	148.7	155.3	0.1	0.0	1.3	0.0	0.2	0.0	54.4	133.8	39.1	701.6	58.5	71.4
1985	96.8	204.7	81.9	50.3	0.1	6.5	0.0	0.0	2.7	1.4	213.6	99.0	757.0	63.1	78.8
1986	111.9	60.2	78.7	35.5	0.2	0.0	0.5	1.4	0.0	0.0	14.1	116.9	419.4	35.0	45.5
1987	180.4	28.8	21.7	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.6	10.4	3.0	262.5	21.9	50.9
1988	264.7	19.9	29.0	23.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	41.4	378.8	31.6	74.8
1989	82.7	9.5	57.4	9.8			0.0	0.0					159.4	26.6	34.9
1990	8.7	25.9	3.4	2.2	1.0	4.4	0.0	0.5	0.0	0.0	12.7	97.1	155.9	13.0	27.5
1991	59.4	14.6	40.6	0.6	0.0	12.4	0.0	0.0	0.0	0.2	1.2	25.7	154.7	12.9	19.6
1992	44.0	20.8	4.8	1.0	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0	2.5	35.5	85.2	194.4	16.2	26.6
1993	169.6	1.8	75.6	8.2	0.0	0.3	0.0	48.5	0.0	13.3	10.0	76.6	403.9	33.7	51.7
1994	59.3	132.1	46.8	4.9	3.9	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	18.9	56.5	322.6	26.9	40.5
1995	72.2	20.0	95.8	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	22.7	40.5	258.7	21.6	32.2
1996	132.9	96.6	40.8	15.5	6.7	0.0	T	1.9	T	T	15.1	62.6	372.1	41.3	47.1
1997	150.6	161.6	37.9	2.0	10.8	0.0	0.0	17.8	28.6	2.7	20.0	38.5	470.5	39.2	56.4
1998	175.2	68.7	21.1	6.6	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	4.9	19.3	20.7	316.9	26.4	50.8
1999	56.7	197.6	139.3	69.7	0.1	0.0	0.7	0.0	9.9	13.7	0.0	46.5	534.2	44.5	64.1
2000	156.1	114.4	91.1	1.8	4.0	0.0	0.0	0.0					367.4	45.9	64.3
TOTAL	4086.4	3288.5	2385.9	408.8	90.5	42.0	4.1	111.0	125.3	239.9	809.1	1827.6	13419.1	--	--
PROMEDIO	110.4	88.9	66.3	11.4	2.5	1.2	0.1	3.0	3.8	7.3	23.8	52.2	362.7	31.9	--
D.STD	71.8	65.5	48.0	16.2	5.6	3.2	0.4	8.9	7.1	12.5	44.1	35.8	--	25.4	--
MAX	285.8	204.7	193.1	69.7	25.8	13.4	2.3	48.5	28.6	54.4	213.6	160.0	--	285.8	--
MIN	2.6	1.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	--	0.0	--

PRECIPITACION TOTAL MENSUAL (mm)

CODIGO DE ESTACION : 19151104
 NOMBRE DE ESTACION : KOVIRE
 CATEG. DE ESTACION : PLU
 CUENCA : MAURE

DPTO. : TACNA
 PROV. : TARATA
 DIST. : TICACO

LONGITUD : 69° 56' (8098500)N
 LATITUD : 17° 12' (403800)E
 ALTITUD 4,350 m.s.n.m.
 FUENTE PET

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL	PROM	D.STD
1990										23.0	15.0	28.9	66.9	22.3	7.0
1991	189.9	62.5	189.0	10.7	0.0	14.8	0.0	0.0	0.0	22.1	10.1	64.3	563.4	47.0	70.3
1992	110.5	147.0	0.0	6.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.5	26.1	33.9	46.2	371.3	30.9	48.9
1993	304.0	46.5	173.0	1.5	0.0	16.8	0.0	4.1	0.0	0.7	9.8	44.6	601.0	50.1	93.8
1994	83.5	106.9	214.0	0.0	10.2	0.0	0.0	0.0	10.2	0.0	13.0	49.0	486.8	40.6	65.5
1995	32.1	25.1	82.6	6.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7	36.1	100.0	286.7	23.9	34.4
1996	84.1	121.2	31.3	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.6	39.7	305.9	25.5	39.3
1997	180.9	156.1	69.9	32.5									439.4	109.9	70.2
1998			4.7	1.0	0.0	10.3							16.0	4.0	4.7
TOTAL	985.0	665.3	764.5	70.8	10.2	41.9	0.0	5.2	10.7	76.6	134.5	372.7	2616.1	--	--
PROMEDIO	140.7	95.0	95.6	8.9	1.5	6.0	0.0	0.9	1.8	10.9	19.2	53.2	436	36.1	--
D.STD	91.2	50.9	85.4	10.6	3.9	7.7	0.0	1.6	4.1	12.1	11.1	23.2	--	32.5	--
MAX	304.0	156.1	214.0	32.5	10.2	16.8	0.0	4.1	10.2	26.1	36.1	100.0	--	304.0	--
MIN	32.1	25.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.8	28.9	--	0.0	--

DESCARGAS MEDIAS MENSUALES (m³/s)

CODIGO DE ESTACION : 19151112
 NOMBRE DE ESTACION : CHALLAPALCA
 CATEG. DE ESTACION : LIMNIMETRICA
 CUENCA : MAURE
 RIO : MAURE

DPTO. : TACNA
 PROV. : TARATA
 DIST. : TICACO

LONGITUD : 69° 47' (8095700)N
 LATITUD : 17° 13' (418800)E
 ALTITUD 4,230 m.s.n.m.
 FUENTE PET

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM	D.STD
1964	1.138	1.321	1.276	1.221	1.150	1.223	0.952	1.087	1.166	0.915	0.770	1.028	1.104	0.162
1965	1.194	1.690	1.174	1.018	0.934	0.912	0.847	0.882	0.833	0.820	0.824	0.879	1.001	0.252
1966	0.927	0.932	0.879	0.821	0.843	0.823	0.742	0.732	0.811	0.839	0.918	0.954	0.852	0.072
1967	0.997	1.166	1.333	1.028	0.948	0.809	0.796	0.707	0.724	0.988	1.068	1.284	0.987	0.206
1968	1.414	1.655	1.760	1.470	1.324	1.013	0.861	0.822	0.873	0.729	0.829	0.842	1.133	0.368
1969	0.949	1.164	1.097	0.961	0.933	0.856	0.724	0.770	0.804	0.833	0.837	0.918	0.904	0.129
1970	1.065	1.189	1.240	1.171	1.100	0.955	0.887	0.886	0.875	0.776	0.765	0.880	0.982	0.164
1971	1.124	1.955	1.669	1.181	0.990	0.891	0.895	0.955	0.796	0.795	0.866	1.149	1.106	0.360
1972	3.667	1.237	1.860		1.310	1.281	1.242		1.254	1.041	0.999	0.999	1.489	0.804
1973	1.359	2.340	4.980	2.253	1.140	1.164	1.439	1.475	1.340	1.361	1.412	1.401	1.805	1.070
PROMEDIO	1.383	1.465	1.727	1.236	1.067	0.993	0.939	0.924	0.948	0.910	0.929	1.033	1.087	--
D.STD	0.818	0.435	1.184	0.424	0.165	0.172	0.228	0.238	0.219	0.185	0.195	0.187		--
MAX	3.667	2.340	4.980	2.253	1.324	1.281	1.439	1.475	1.340	1.361	1.412	1.401	4.980	--
MIN	0.927	0.932	0.879	0.821	0.843	0.809	0.724	0.707	0.724	0.729	0.765	0.842	0.707	--

DESCARGAS MEDIAS MENSUALES (m³/s)

CODIGO DE ESTACION : 19151118
 NOMBRE DE ESTACION : COPAPUJO
 CATEG. DE ESTACION : LIMNIMETRICA
 CUENCA : MAURE
 RIO : COPAPUJO

DPTO. : TACNA
 PROV. : TARATA
 DIST. : TARATA

LONGITUD : 69° 46' (8092330)N
 LATITUD : 17° 16' (435330)E
 ALTITUD : 4,235 m.s.n.m.
 FUENTE : PET

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM	D.STD
1990							0.266	0.237	0.216	0.217	0.230	0.311	0.246	0.037
1991	0.390	0.393	0.379	0.340	0.338	0.356	0.389	0.411	0.448	0.406	0.435	0.464	0.396	0.040
1992	0.468	0.470	0.484	0.382	0.313	0.311	0.332	0.346	0.361	0.323	0.267	0.261	0.360	0.077
1993	0.270	0.270	0.271	0.248	0.238	0.210	0.191	0.194	0.185	0.166	0.143	0.161	0.212	0.046
1994	0.211	0.265	0.257	0.198	0.191	0.189	0.250	0.280	0.300	0.300	0.300	0.300	0.253	0.045
1995	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.000
1996	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.000
PROMEDIO	0.323	0.333	0.332	0.295	0.280	0.278	0.290	0.295	0.301	0.287	0.282	0.300	0.300	
D.STD	0.092	0.081	0.086	0.065	0.055	0.064	0.063	0.071	0.087	0.077	0.088	0.089	0.013	
MAX	0.468	0.470	0.484	0.382	0.338	0.356	0.389	0.411	0.448	0.406	0.435	0.464	0.485	
MIN	0.211	0.265	0.257	0.198	0.191	0.189	0.191	0.194	0.185	0.166	0.143	0.161	0.143	

EVAPORACIÓN MENSUAL (mm)

CODIGO DE ESTACION : 19151144 LONGITUD : 69° 55' (8098500)N
 NOMBRE DE ESTACION : KOVIRE (Bofedal) DPTO. : TACNA LATITUD : 17° 12' (403800)E
 CATEG. DE ESTACION : PLU PROV. : TARATA ALTITUD : 4,389 m.s.n.m.
 CUENCA : MAURE DIST. : TICACO FUENTE : PET

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL	PROM	D.STD
1990										109.0	77.0	89.0	275.0	91.7	16.2
1991	110.0	118.0	105.0	112.0	146.0	124.0	147.0	153.0	159.0	138.0	154.0	174.0	1640.0	136.7	22.3
1992	116.0	178.0	194.0	160.0	169.0	115.0	92.0	109.0	160.0	158.0	139.0	114.0	1704.0	142.0	32.2
1993	60.0	130.0	104.0	127.0	119.0	88.0	94.0	101.0	134.0	200.0	145.0	94.0	1396.0	116.3	35.4
1994	103.0	37.0	111.0	138.0	140.0	102.0	114.0	121.0	124.0	165.0	176.0	101.0	1432.0	119.3	35.5
1995	131.0	118.0	83.0	161.0	137.0	113.0	147.0	160.0	162.0	191.0	198.0	173.0	1774.0	147.8	33.4
1996	122.0	141.0	107.0	119.0	130.0	114.1	97.6	108.0	157.0	184.0	142.0	141.0	1562.7	130.2	24.4
1997	50.0	69.3	105.7	123.2									348.2	87.1	33.4
1998			157.0	183.0	129.9	101.4	123.6						694.9	139.0	31.6
TOTAL	692.0	791.3	966.7	1123.2	970.9	757.5	815.2	752.0	896.0	1145.0	1031.0	886.0	9508.7		
PROMEDIO	98.9	113.0	120.8	140.4	138.7	108.2	116.5	125.3	149.3	163.6	147.3	126.6	1585		--
D.STD	31.4	46.6	36.1	25.0	15.9	11.9	23.7	25.1	16.1	32.0	37.6	36.3			--
MAX	131.0	178.0	194.0	183.0	169.0	124.0	147.0	160.0	162.0	200.0	198.0	174.0			--
MIN	50.0	37.0	83.0	112.0	119.0	88.0	92.0	101.0	124.0	109.0	77.0	89.0			--

