

**CAPÍTULO 1**  
**INTRODUCCIÓN**

## **1.1 INTRODUCCIÓN**

En las últimas décadas la actividad humana ha producido al medio ambiente daños considerables y en algunos casos irreversibles. La ciudad de Tarija al no contar con grandes industrias ni gran mercado de consumo no presenta problemas de magnitud. Sin embargo, el crecimiento de la ciudad en los últimos años ha afectado sin duda alguna el medio ambiente.

El agua como elemento indispensable para actividad humana, es el primer afectado cuando se cambian las condiciones del hábitat donde el hombre se desenvuelve.

Las aguas subterráneas se encuentran mejor protegidas de la contaminación que las aguas superficiales, pero en caso de presentarse los problemas que se ocasionan son más relevantes y complejos debido a que los procesos de purificación son más lentos.

Por este motivo, estudios como el presente, permitirán tener una referencia ajustada la realidad de lo que sucede, en este caso con las aguas subterráneas de los pozos que concesiona COSAALT.

### **1.1.1 ANTECEDENTES**

Investigación de “Evaluación del Grado de Contaminación de las Aguas Subterráneas en la ciudad de Tarija y Zonas Aledañas”, se llevó a cabo en los años 1997-1998, donde participaron para su ejecución el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERGEOMIN) juntamente con el Convenio Alemán Boliviano de Aguas Subterráneas (CABAS). Concluyeron:

- La clasificación por iones dominantes del total de las muestras analizadas corresponden a aguas de tipo bicarbonatada cálcico magnésicas, como se pueden observar en los diferentes diagramas de Piper.
- La calidad de las aguas subterráneas es muy buena. Ninguno de los análisis efectuados reveló que alguna muestra sobrepase los valores máximos de concentración de algún ion y la conductividad máxima registrada fue de 440

us/cm en el sector de Torrecillas; el resto de las medidas oscilan entre 35 hasta 150 us/cm normalmente.

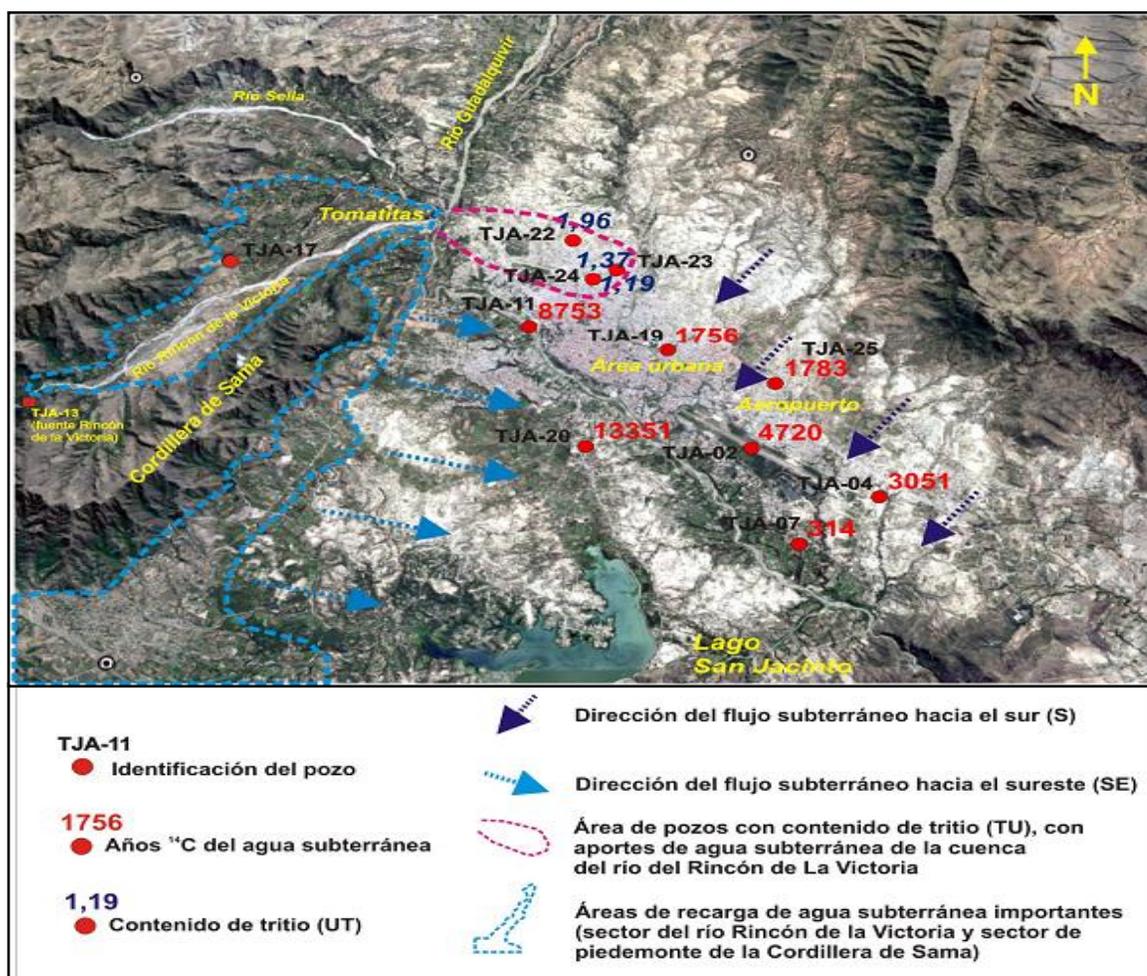
Estudio de “Origen y dinámica del agua subterránea en el valle central de Tarija, Bolivia”, fue ejecutado por la entidad de medio ambiente y agua (EMAGUA) y el Programa para el servicio sostenible de agua Potable y saneamientos en áreas periurbanas (PERIAGUA). Concluyeron:

- Mediante dataciones isotópicas se ha podido determinar que la recarga natural de la Lluvia y que alimenta a los acuíferos del sector norte de la ciudad de Tarija se genera en gran parte en el sector de la cuenca del Rincón de la Victoria (Figura I-1). En este sector, se infiltran unos  $4 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año de agua de lluvia. Debido a la elevada tasa de infiltración que acá se genera, el área es altamente vulnerable y existe un elevado riesgo de contaminación del agua subterránea. Por lo tanto, es importante realizar un manejo diferenciado (preservación) de esta subcuenca.
- Complementariamente existe una importante recarga artificial y que es producto de las fugas en el sistema de distribución de agua.
- También se identifica un área muy importante de recarga y que se encuentra ubicado en el sector de piedemonte de la cordillera de Sama, al oeste del río Guadalquivir. Ver Figura 1.
- En este sector, la recarga de agua se estima en adicionalmente  $4 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año. La futura explotación de agua subterránea debería concentrarse en captar agua proveniente de estas áreas. Sin embargo, es muy importante establecer medidas de protección de estas áreas y que evite la contaminación de las mismas, como producto de una acelerada e incontrolada expansión urbana en este sector.
- Mediante la determinación de <sup>14</sup>C, se pudo determinar las edades de los pozos en estudio. Ver Tabla 1.

Tabla 1: Edades de  $^{14}\text{C}$  de los pozos

Identificación de Pozo	Años $^{14}\text{C}$ de agua subterránea	Nombre de Pozo
TJ.22	40 años	Oscar Zamora
TJ.23	50 años	Avit "A"
TJ.25	1783 años	Anaspugio "A"
TJ.02	4720 año	Aeropuerto "A"
TJ.11	8753 años	Guadalquivir III
TJ.20	13351 años	San Jacinto
TJ.07	314 años	San Luis

Fuente: Origen y Dinámica del Agua Subterránea en el Valle Central de Tarija, Bolivia (2018).

Figura 1: Mapa de  $^{14}\text{C}$  en años, dirección y áreas de recarga.

Fuente: Origen y Dinámica del Agua Subterránea en el Valle Central de Tarija, Bolivia (2018).

## **1.2 PROBLEMÁTICA**

Quizás uno de los más graves problemas actualmente detectados, es la posible contaminación de las aguas subterráneas.

En el presente, existen importantes estudios que tratan sobre el deterioro de los acuíferos, destacándose los causados por los rellenos sanitarios, las actividades industriales, agrícolas y ganaderas, donde las aguas asociadas a las elevadas concentraciones de  $(\text{NO}_3)^{2-}$  es un problema muy común en varias regiones del mundo. (Montero, 1996:2).

Una problemática local observada está relacionada con los asentamientos de las urbanizaciones sin reglamentación ni planificación por parte de los municipios como Tarija, San Lorenzo, Padcaya y Uriondo en la zona de amortiguamiento de la Reserva biológica de Sama, pone en riesgo los afluentes naturales y acuíferos de agua que abastecen el valle central de Tarija.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN DEL TEMA**

### **1.3.1 Justificación Científica**

El presente proyecto busca dar a conocer información referencial de los pozos mediante la aplicación de diagramas hidrogeoquímicos como (Piper y Stiff) que permitan tipificar los pozos, lo cual servirá como base para futuras investigaciones de las aguas en la zona de estudio.

### **1.3.2 Justificación Social**

El estudio de investigación permitirá a los usuarios de los pozos de agua en la zona de estudio analizado; conocer la situación de la calidad de agua con la que se cuenta para su consumo.

### **1.3.3 Justificación Técnica**

Los resultados del presente estudio permitirán un mejor análisis de la situación actual en la que se encuentra los pozos en actual explotación, que permitirá establecer una

generalización en su calidad de agua para consumo humano, de los pozos en funcionamiento en la zona de analizada.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo General**

Tipificar las agua de los pozos de COSAALT en distintas zonas de Tarija, y caracterizar los fenómenos que inciden su composición, además de evaluar su calidad.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- ✓ Analizar la distribución, de la composición de las aguas subterráneas, mediante el análisis de sus elementos mayores.
- ✓ Determinar la composición química predominante en los pozos de COSAALT, para tipificar las aguas haciendo uso de los diagramas de Piper y Stiff.
- ✓ Comprender los procesos asociados a la interacción agua roca y evaluar como modifican el contenido de las aguas.
- ✓ Elaborar mapas y diagramas hidroquímicos.
- ✓ Medir la calidad de las aguas en relación a la normativa legal vigente.

## **1.5 HIPÓTESIS**

Mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos se pretende definir los tipos de agua subterráneas, además de conocer los fenómenos hidrogeoquímicos que afectan la composición de dichas aguas, y verificar la calidad de agua de los pozos.

## **1.6 DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

Los trabajos se han concentrado en el valle central de Tarija, en el departamento del mismo nombre, al sur de Bolivia.

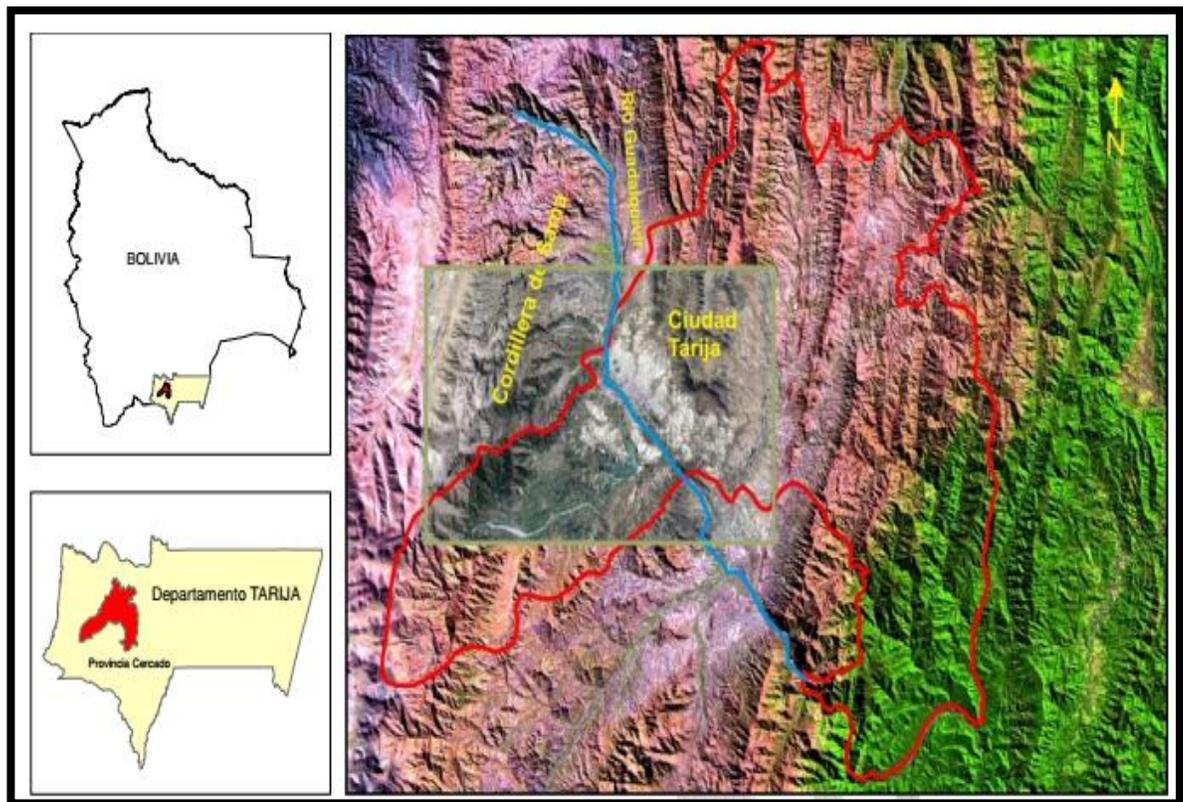
La ciudad de Tarija es la ciudad más poblada de este departamento, siendo a su vez la capital de la provincia **Cercado**.

El valle de Tarija se encuentra rodeado por una serie de cadenas montañosas, una de las más importantes es la cordillera de Sama, en su borde occidental.

La ciudad de Tarija se ubica a una cota media de 1.900 metros sobre el nivel del mar y cuenta actualmente con una población de unos 210.000 habitantes (según censo del INE, 2012).

El municipio de Tarija en tanto cuenta con una población cercana a los 247.000 habitantes (Pasig, Geyh, y Torr ez, 2018).

**Figura 2: Ubicaci3n de la zona de estudio.**



Fuente: Origen y Dinámica del Agua Subterránea en el Valle Central de Tarija, Bolivia (2018).

## 1.7 ALCANCE

El estudio se desarrolla en la zona central del valle central de Tarija, el período de estudio comprende desde el mes de febrero hasta el mes de mayo del año 2019, abarc ndose con ello parte de la época de lluvia que caracteriza a la zona de estudio.

El presente trabajo supone una etapa preliminar de obtención, recolección y estudio de información histórica asociada a la red de pozos de abastecimiento de agua potable en la ciudad de Tarija, en el que se analiza los datos de Conductividad, con el objeto de seleccionar un número de pozos eficientes distribuidos en toda la zona de estudio, con distintas conductividades.

Durante este período se tomaron muestras para análisis químico de los pozos distribuidos en la zona de estudio, los pozos muestreados corresponden a aquellos cuya conductividad son medianamente iguales donde puede presumirse que se ubica en la misma unidad acuífera.

Mediante los resultados elaborados por el Laboratorio en los pozos muestreados, se realizará la aplicación de diagramas e índices hidrogeoquímicos, para tipificar los pozos, y conocer los fenómenos que inciden en la composición de dichas aguas.

Finalmente se evaluarán los parámetros físico-químicos de los pozos en estudio con la Norma Boliviana de Agua potable y Saneamiento (NB-512) y el Reglamento de Contaminación Hídrica (RMCH).

Los resultados de la investigación serán un referente para futuros estudios que se realicen en dicha zona de estudio.

**CAPITULO 2**  
**MARCO TEORICO**

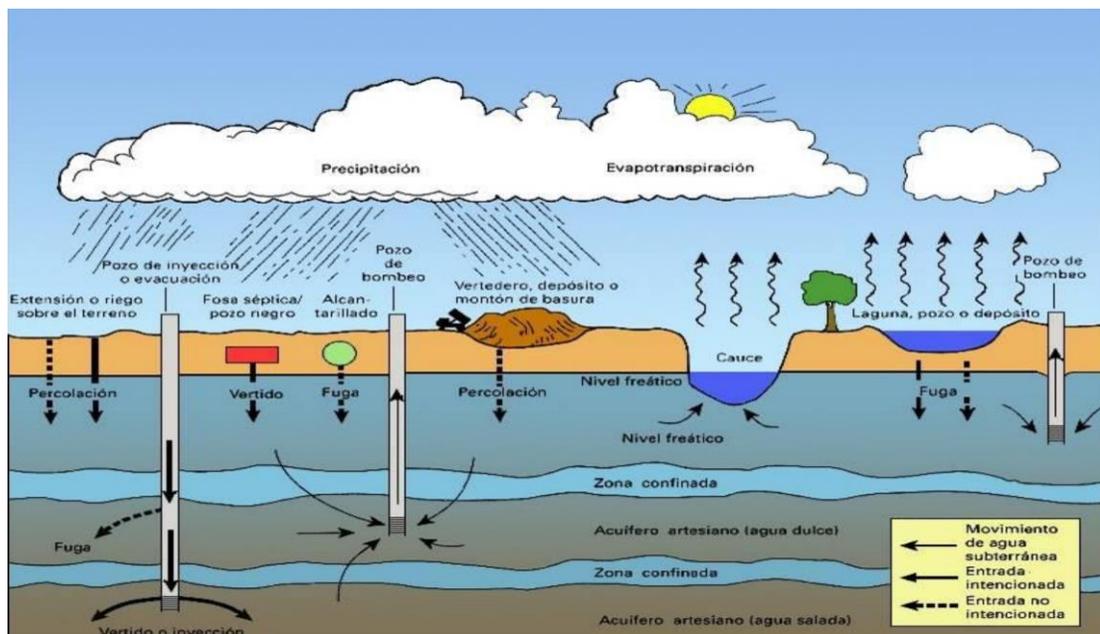
## 2.1. CONCEPTOS DE HIDROGEOLOGÍA

### 2.1.1. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico se compone de una serie de cambios físicos y procesos de transporte que experimenta el agua, considerando un sistema cerrado.

El proceso natural de precipitación del agua en forma de lluvia o nieve, la infiltración, la recarga de acuíferos, flujo subsuperficial, evaporación, evapotranspiración, se ven afectados por procesos humanos tales como la extracción e inyección por bombeo, así como procesos de percolación de lixiviados, redes de drenaje de aguas residuales urbanas y fugas y/o derrames de contaminantes.

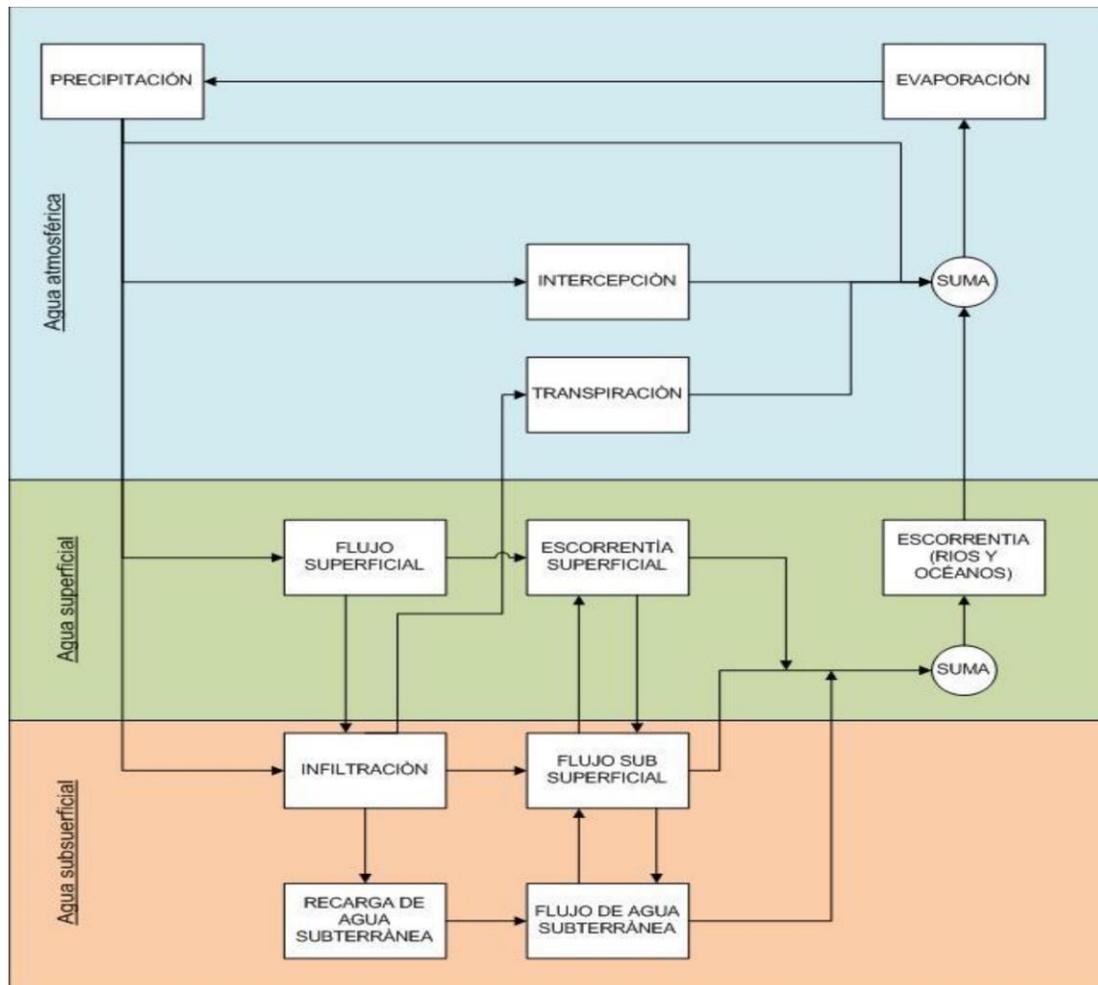
**Figura 3: Ciclo hidrológico y afectación antropogénica.**



Fuente: [http://www.zonacatastrofica.com/files/2008/07/napas\\_subterranas1.jpg](http://www.zonacatastrofica.com/files/2008/07/napas_subterranas1.jpg)

La imagen siguiente, describe los procesos de transporte de agua, conformando un ciclo cerrado.

**Figura 4 : Diagrama de bloques del sistema hidrológico global**



Fuente: Hidrogeoquímica, Sonusco

### 2.1.2. Acuíferos

Por acuífero se entiende a un **reservorio** de agua en el subsuelo, cuya capacidad de almacenamiento, retención y entrega está condicionada por la formación geológica predominante. Dicho de otro modo, es “una unidad geológica permeable y saturada lo suficientemente permeable para ceder cantidades apreciables de agua a pozos”. (Kruseman y Ridder, 2000).

Las formaciones geológicas típicas son arenas, gravas, granito fracturado, etc.

Un acuitardo es una unidad geológica que tienen una gran **capacidad** de retención de agua el cual, visto en consideración de grandes áreas y tiempos largos, permite transmitir agua en cantidades significativas; sin embargo, su permeabilidad es tan baja que no permite la entrega de cantidades de agua lo suficientemente grande para la perforación y uso de pozos.

Ejemplo de ellos son: Arcillas, arenas arcillosas, arenisca, rocas compactas con alteración y/o fracturación, y esquistos con fracturas (rocas metamórficas de arcilla, conocida como talpetate).

El concepto de **acuicludo** se emplea a aquellas unidades geológicas que no tienen capacidad para transmitir agua. Ejemplo son rocas metamórficas o rocas ígneas densas no fracturadas así como esquistos inalterados.

Hay tres tipos de acuíferos (Kruseman y Ridder, 2000):

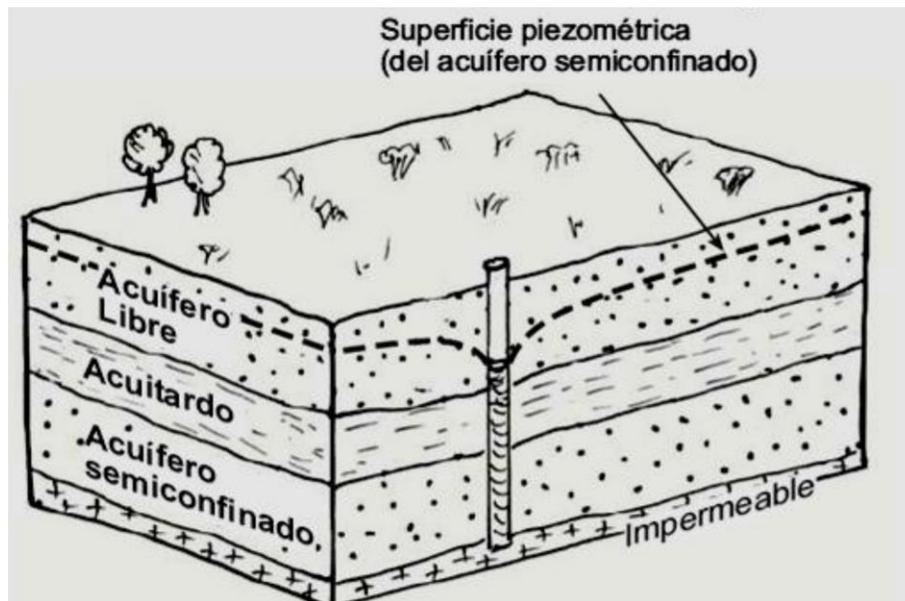
- ❖ **Confinado**, limitado arriba y abajo por un acuicludo, lo que produce una compresión del agua confinada, generando pozos surgentes al nivel del acuífero; en otras palabras, se puede acceder a ellos por medio de pozos perforados, o por manantiales que provengan de zonas fracturadas como las aguas termales.
- ❖ **Libre o somero**, limitado abajo por un acuicludo, sin capas arriba que lo restrinjan. Comúnmente se le conoce como acuífero superficial, y el nivel del agua varía con la infiltración y aportes a cuerpos de agua superficial, delimitando un nivel freático variable en profundidad, estando influenciado por efecto de la gravedad y se encuentra a presión atmosférica.

A este se accede por medio de pozos excavados o perforados, así como estanques, pozas, etc.

- ❖ **Semiconfinado**, presenta acuitardos arriba y abajo, o un acuitardo y un acuicludo.

El diagrama siguiente, esquematiza los tres tipos de acuíferos:

**Figura 5: Diagrama de la distribución de acuíferos y acuitardos.**



Fuente: <http://web.usal.es/~javisan/hidro/temas/semiconfinados.pdf>

### 2.1.3. Estratos del suelo

Generalmente, entre la superficie y un acuífero libre, y dependiendo del grado de saturación de agua, la columna de suelo se compone de una zona de aireación (o zona vadosa) y una zona de saturación.

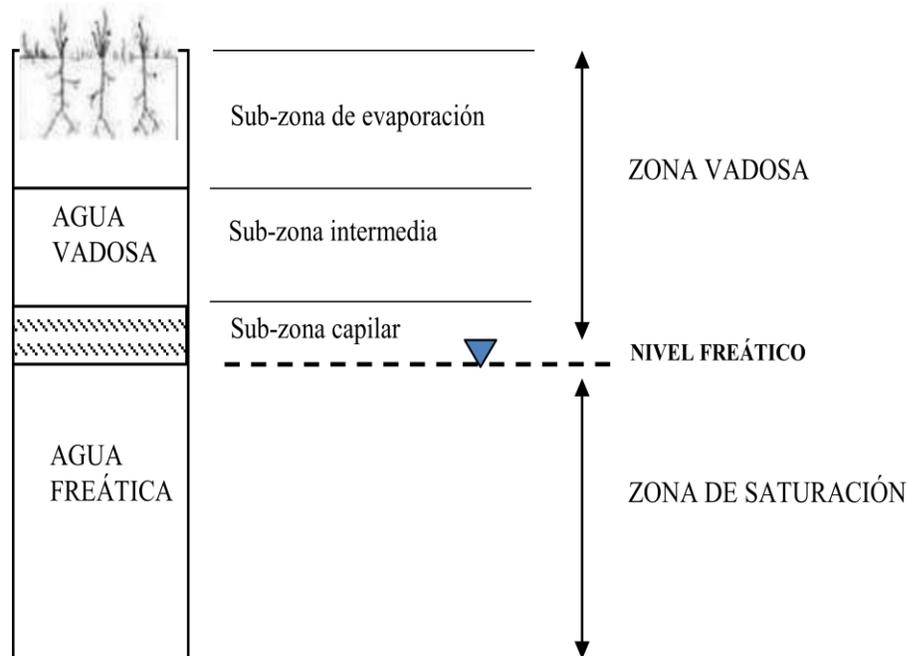
En la zona de aireación, los espacios intergranulares del suelo se encuentran parcialmente llenos con agua, y el resto por aire. En ésta, los procesos oxidativos y de percolación son muy importantes (Singhal y Gupta, 1999).

En la zona de saturación, en la cual todo el espacio intergranular está ocupado por agua, se dan procesos de reducción y deposición de minerales.

El límite entre estas dos zonas está dado por el nivel freático, por lo que el nivel de éstas es fluctuante de acuerdo a procesos de recarga/descarga (Singhal y Gupta, 1999).

En la zona vadosa, se encuentran tres regiones: Zona de evapotranspiración (suelo-agua), zona vadosa intermedia y zona capilar. El diagrama siguiente ubica estas zonas.

**Figura 6: Diagrama de distribución de los estratos del suelo.**



Fuente: [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2195/ICI\\_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2195/ICI_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

#### **2.1.4. Parámetros Físicos que definen a los Acuíferos**

Los estudios generales de hidrogeología, asumen como primera aproximación que los acuíferos y acuitardos son homogéneos e isotrópicos en sus propiedades físicas, geológicas, mineralógicas (Kruseman y N. A. de Ridder, 2000). Con esta aproximación, se infiere que la conductividad hidráulica es la misma a través de una formación geológica, en todas sus direcciones.

##### **❖ Porosidad y fracturamiento.**

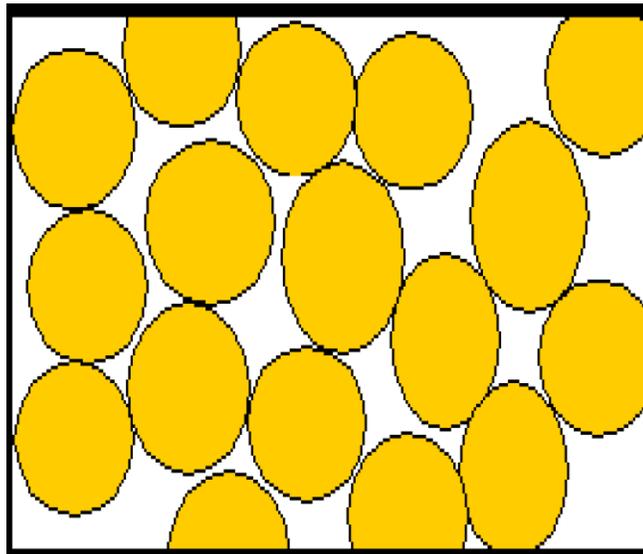
Porosidad total es la relación entre el espacio vacío y el volumen total de la masa de unidad geológica. Por otro lado, por porosidad efectiva se entiende la relación entre el espacio total que puede almacenar agua en forma efectiva y el volumen total de la masa de unidad geológica. (F.J. Sánchez, 2008).

La porosidad puede ser clasificada como Porosidad Intergranular, propia de materiales detríticos (arenas, gravas, etc.), y Porosidad por Fisuración.

El primero se origina en depósitos aluviales, principalmente.

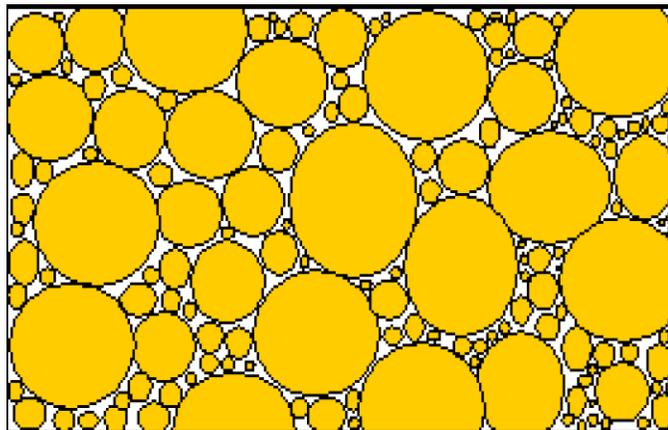
En el segundo caso, las fisuras pueden ser ocluidas por procesos de mineralización, o ensancharse por procesos de disolución de minerales (calizas, por ejemplo). Las fisuras son causadas por movimientos tectónicos, enfriamiento del magma, o discontinuidades sedimentarias (F.J. Sánchez, 2008).

**Figura 7: Acuífero poroso.**



Fuente: Hidrogeoquímica (Fagundo y González, 2005).

**Figura 8: Acuífero con poros cementados**



Fuente: Hidrogeoquímica (Fagundo y González, 2005)

### ❖ **Conductividad hidráulica, Transmisividad y Capacidad de Almacenamiento**

La **conductividad hidráulica** (K), conocida también como permeabilidad, es una constante de proporcionalidad en la ecuación de Darcy, por lo que es función de las propiedades de la porosidad del medio y el paso del flujo de agua:

(Kruseman y Ridder, 2000).

$$\frac{Q}{A} = K * \frac{dh}{dl} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Así, **K** se define como el volumen de agua que puede desplazarse a través de un medio poroso por unidad de tiempo, por efecto de un gradiente hidráulico, a través de una unidad de área medida perpendicularmente en la dirección del flujo (Kruseman y Ridder, 2000).

Para acuíferos porosos, se aplica el concepto de permeabilidad intrínseca (Ki), el cual indica el paso de un fluido (agua o soluciones, así como contaminantes orgánicos e inorgánicos) a través de la abertura de los poros.

La **transmisividad** (T) es el producto de la conductividad hidráulica y el espesor del acuífero. Así, representa la razón de flujo, por un gradiente hidráulico, a través de una sección de un acuífero. (Kruseman y Ridder, 2000).

La **Capacidad de Almacenamiento** (S) indica el volumen de agua que un acuífero puede entregar por presencia de un gradiente hidráulico.

El 90 % de los acuíferos aprovechables consisten en rocas no consolidadas, principalmente grava y arena. Las areniscas y conglomerados son formas cementadas de arena y grava, y por esa razón su permeabilidad y rendimiento han sido reducidos por el cemento. Los mejores acuíferos en areniscas son aquellos que se encuentran solo parcialmente cementados. Los conglomerados poseen una distribución limitada y no son de gran importancia como acuíferos.

Las rocas cristalinas y metamórficas son prácticamente impermeables. Los suelos arcillosos tampoco presentan estas propiedades, debido a su capacidad para retener y no transmitir el agua.

Menos frecuentemente se originan acuíferos importantes en el yeso y otras rocas solubles.

#### ❖ **Captaciones de agua: Pozos y manantiales**

Con el objeto de extraer agua del subsuelo, se ha usado el agua de ríos, manantiales, pozos excavados y pozos perforados. La presencia de agua en pozos excavados y manantiales, se debe al flujo de agua subsuperficial que alimenta el agua de los manantiales y pozos excavados. Sin embargo, la extracción de agua por pozos profundos se alimenta del almacenamiento de agua subterránea (A. M. Erazo Chicas, 2005).

En el caso de los ríos, éstos reciben agua por medio de flujo subsuperficial y por escorrentía superficial. De acuerdo a la producción de agua, los pozos pueden ser clasificados en pozos artesianos (proviene de un acuífero confinado), o pozo surgente, y pozo de extracción. En el primer caso, se requiere de la perforación de pozos (usualmente, profundidades mayores a 30 m), y en el segundo pueden ser pozos excavados o perforados.

## **2.2. CONCEPTOS DE GEOLOGÍA**

### **2.2.1. Rocas ígneas y volcánicas**

Las rocas ígneas o magmáticas son el producto final de la solidificación del magma. Estas pueden ser extrusivas o volcánicas si se solidifican fuera de la cámara magmática (superficie, océanos, etc.), e intrusivas, en el caso opuesto, como por ejemplo aquellas que se solidifican en fracturas, grietas, fallas o en la cámara magmática (Banda, Torné, 2000).

La clasificación de las rocas ígneas se realiza por medio de la concentración de sílice ( $\text{SiO}_2$ ): rocas ultrabásicas (Peridotita, Olivino), básicas o máficas (Gabro, plagioclasas cálcicas, piroxeno), intermedias (plagioclasas sódica, anfíbol, diorita, granodiorita) y ácidas o félsicas (cuarzo, feldespato cálcico, granito, moscovita, biotita, plagioclasas sódica). Al aumentar el contenido de sílice, las rocas tienden a ser más claras (Banda et al, 2000).

Otra clasificación es de acuerdo a su vulcanoclastia (Departamento de Geología, Universidad de Oviedo, 2009):

- a) **AUTOCLASTO:** Fragmento generado durante el movimiento de la lava o el desmoronamiento de domos por gravedad, por lo que es un producto de un proceso volcánico no explosivo. Se localizan in situ.
- b) **PIROCLASTO:** Partícula expulsada por cráteres volcánicos, producto de un proceso volcánico explosivo.
- c) **HIDROCLASTO:** Piroclasto generado en el contacto agua-magma, producto de un proceso volcánico más o menos explosivo.
- d) **EPICLASTO:** Partícula generada por erosión de rocas volcánicas antiguas. Consta de fragmento lítico –litoclasto– procedente de rocas volcánicas. Proviene de un proceso sedimentario largo.

### 2.2.2. Rocas metamórficas

Son rocas ígneas y sedimentarias que sufren modificaciones en su estructura cristalina por variaciones de temperatura (metamorfismo térmico), presión (metamorfismo dinámico), fluidos químicamente activos. Ejemplo son: serpentina, grafito, aluminosilicatos de hierro, silicatos aluminicos, mármol, pizarra, esquisto, cuarcita.

### 2.2.3. Rocas sedimentarias

Son rocas originadas a partir de la consolidación de fragmentos de otras rocas, de restos de plantas y animales o de precipitados químicos. Estas pueden ser detríticas, químicas u orgánicas.

- ❖ **Detríticas:** formadas a partir de la sedimentación de trozos de otras rocas después de una fase de transporte. La clasificación de estas rocas se basa en los tamaños de los trozos que las componen. Las constituidas por trozos de tamaño grande son los conglomerados, las areniscas poseen granos de tamaño intermedio y los limos y arcillas poseen trozos muy pequeños. Estas mantienen su integridad física intacta.
- ❖ **Rocas sedimentarias** de origen químico: formadas a partir de la precipitación de determinados compuestos químicos en soluciones acuosas. Ejemplo son los carbonatos, evaporitas, ferruginosas y fosfatos.
- ❖ **Rocas biogénicas:** formadas por acumulación de sustancias de origen orgánico. Un tipo muy común es la roca caliza, formada en su mayor parte por restos de organismos como corales, algas, etc. aunque también puede originarse por precipitación de cementos calcáreos. Las tobas calcáreas son rocas muy porosas y con abundantes restos vegetales que se originan en los ríos cuando el carbonato de calcio precipita sobre la vegetación.

En la formación de una roca sedimentaria pueden actuar más de un proceso sedimentario por lo que se producen rocas mixtas de difícil asignación a un grupo concreto. Tal es el caso de una roca formada por la acumulación in situ de las partes duras de organismos y por partículas aportadas por algún mecanismo de transporte (fósiles).

### **2.3. CONCEPTOS DE HIDROGEOQUÍMICA**

La aplicación de conocimientos y métodos hidrogeoquímicos permite identificar procesos de mezclado, dilución, disolución de minerales, meteorización de minerales, procesos de filtración y tipo de minerales presentes. Esto permite establecer el flujo de contaminantes que podrían afectar la calidad del agua para consumo y vida acuática (C.A.J. Appelo y D. Postma, 1994).

Otros factores que afectan la química del agua son:

- ❖ La ingesta de selectiva debido a la **materia orgánica**, generada en el almacenamiento de iones en la biomasa, principalmente por la presencia de fertilizantes (nitrógeno, fósforo y potasio) y la absorción de gases de la atmósfera (amoníaco, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno).
- ❖ Descomposición de la materia orgánica, debido a procesos de oxidación (liberación de dióxido de carbono), liberación de nutrientes.
- ❖ Meteorización y **disolución** de **minerales** de rocas (carbonatos y silicatos) por **tiempos** de **residencia** por la **presencia** de acuíferos porosos, permeables y otros con velocidades de flujo elevadas. El tipo de roca es determinante para evidenciar **procesos** de meteorización: Altas concentraciones de **sólidos disueltos** totales indican **mayor tiempo** de residencia y, por tanto, mayor meteorización.
- ❖ Precipitación mineral, la cual indica si un mineral se encuentra sobresaturado o subsaturado, dando un posible rastro de los minerales existentes en las unidades acuíferas.
- ❖ **Intercambio iónico**, cuyos subproductos pueden cambiar la composición de aniones.
- ❖ Proceso de mezclado, el cual puede cambiar el estado de saturación disolviendo o precipitando minerales. Esta se determina por medio de un balance de aguas versus acción de masas, según las siguientes ecuaciones:
- ❖ Contaminación, por sales, metales, agentes contaminantes del aire, hidrocarburos, fertilizantes, plaguicidas, desechos radioactivos, etc.
- ❖ **Tiempo** de **residencia** del **agua**, es decir la relación de la cantidad de agua en el acuífero respecto a flujo de agua en éste. Los valores obtenidos permiten determinar si las aguas subterráneas pertenecen a un flujo **local**, **regional** o **intermedio**: Un flujo local indica aguas de corto tiempo de tránsito, de días, semanas o años, las aguas regionales indican aguas que

han tenido un tiempo de tránsito muy largo, de siglos e incluso milenios (paleoaguas), y las aguas intermedias períodos de tránsito que van de años a siglos, ya que van del lapso de algunos días a decenas de miles de años.

- ❖ Zona de descarga y recarga, la cual puede presentar presencia de minerales, materia orgánica, plaguicidas, fertilizantes, metales pesados, y otros que no sean propios de la geología de la zona.

### 2.3.1 Composición Química de las Aguas Subterráneas

Los factores que condicionan entonces la composición del agua subterránea natural son múltiples. Entre ellos cabe citar: naturaleza y disposición espacial de los materiales con los que el agua entra en **contacto**, **superficie** y **duración del contacto**, **temperatura**, **presión**, **existencia** de gases, **grado** de **saturación** del agua en relación con las distintas sustancias incorporables (Lagrange, 1979).

La hidrogeoquímica del agua **superficial** y **subterránea** puede determinarse midiendo la concentración de aniones y cationes **mayoritarios**, la cual varía significativamente del agua lluvia.

#### ❖ Constituyentes Mayoritarios o Fundamentales

**Aniones:**  $(\text{HCO}_3)^-$  ;  $\text{Cl}^-$  ;  $(\text{SO}_4)^{2-}$ ;  $(\text{NO}_3)^-$

**Cationes:**  $\text{Ca}^{2+}$ ;  $\text{Mg}^{+2}$ ;  $\text{Na}^+$ ;  $\text{K}^+$ ;  $\text{NH}_4^+$

**Otros:**  $\text{CO}_2$ ;  $\text{O}_2$ ;  $\text{SiO}_2$

#### ❖ Constituyentes Minoritarios o Secundarios

**Aniones:**  $\text{F}^-$  ;  $\text{S}^{2-}$ ;  $\text{Br}^-$  ;  $\text{I}^-$  ;  $(\text{NO}_2)^-$ ;  $(\text{PO}_4)^{3-}$ ;  $(\text{BO}_3)^{3-}$

**Cationes:**  $\text{Mn}^{2+}$ ;  $\text{Fe}^{2+}$ ;  $\text{Li}^+$ ;  $\text{Sr}^{2+}$ ;  $\text{Zn}^{2+}$

#### ❖ Constituyentes Traza

$\text{Al}^{3+}$ ;  $\text{Ti}^{4+}$ ;  $\text{Co}^{2+}$ ;  $\text{Cu}^{2+}$ ;  $\text{Pb}^{2+}$ ;  $\text{Ni}^{2+}$ ;  $\text{Cr}^{3+}$

En un agua natural dulce estos constituyentes aparecen por lo general en forma iónica (sales casi totalmente disociadas), con menor frecuencia se presentan en forma molecular, parcialmente disociadas o como iones complejos de sustancias orgánicas o inorgánicas.

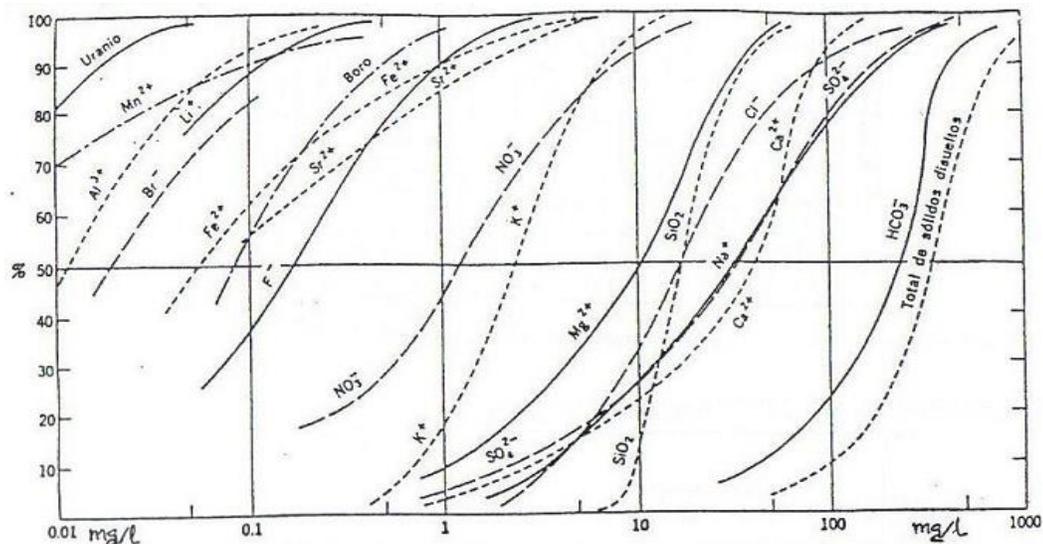
A continuación se hace una breve exposición del origen y propiedades geoquímicas de los principales constituyentes significativos y mayoritarios o fundamentales, que son de nuestro interés para entender los procesos hidrogeoquímicos que suceden en el agua.

### 2.3.2 Concentración frecuente en aguas subterráneas.

Las concentraciones de las principales sustancias disueltas en aguas subterráneas, de iones **mayoritarios**, y otros esta mejor descrita por (Custodio y Llamas, 1983).

Ver Figura 9.

**Figura 9: Concentración en mg/l de iones frecuente en agua subterránea.**



Fuente: Hidrología Subterránea (Custodio y Llamas, 1983).

Como ejemplo de aplicación, para el ion nitrato en el 80% de los casos su concentración será menor que 4,5 (mg/l).

### 2.3.2.1 Constituyentes mayoritarios

#### ❖ Ion Cloruro ( $\text{Cl}^{-}$ ).

##### **Procedencia según (Custodio y Llamas, 1983).**

Agua de **lluvia** y su **concentración** en el terreno.

Lavado de terrenos de origen marino; las aguas congénitas y fósiles pueden aportar cantidades importantes.

Mezcla con agua marina en regiones costeras.

Ataque de rocas, aunque en general el aporte es pequeño por ser un elemento escaso en la corteza terrestre.

Muy localmente tiene interés el aporte de ion cloruro por rocas evaporitas (sal gema) y por el ataque de ciertos minerales asociados a rocas **ígneas** y **metamórficas** (sodalita, apatito, etc.).

Más raramente puede proceder de gases y líquidos asociados a emanaciones volcánicas.

Los vertidos **urbanos** e industriales pueden aportar cantidades importantes

No es adsorbido significativamente ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, lo que le da un carácter de trazador casi ideal.

##### **Concentración según (Custodio y Llamas, 1983).**

Entre 10 y 250 mg/l en aguas dulces, no siendo raro encontrar contenidos mucho mayores, hasta varios miles de mg/l. El agua del mar tiene entre, 8.000 y 21.000 mg/l. Las salmueras naturales pueden llegar a tener 220.000 mg/l (saturación).

##### **Nocividad y toxicidad según (Custodio y Llamas, 1983).**

Más de **300** mg/l comunican sabor salado al agua de bebida, pero no es perjudicial por lo menos hasta algunos **miles** de mg/l. Es esencial para la vida. Contenidos elevados son perjudiciales para muchas plantas y comunican **corrosividad** al agua.

❖ **Ion Sulfato ( $\text{SO}_4$ )<sup>2-</sup>.**

**Procedencia según (Custodio y Llamas, 1983).**

Concentración en el suelo de agua de lluvia.

Oxidación de sulfuros en rocas **ígneas, metamórficas o sedimentarias**.

Disolución de yeso, anhidrita y terrenos yesíferos.

Las actividades **urbanas, industriales** y en ocasiones **agrícola** pueden aportar cantidades importantes

**Concentración según (Custodio y Llamas, 1983).**

Entre 2 y 150 mg/l en aguas dulces pudiendo llegar a 5.000 mg/l en aguas salinas si existe Ca y hasta 200.000 si está asociado a Mg y Na en ciertas salmueras. El agua del mar contiene alrededor de 3.000 mg/l.

**Nocividad y toxicidad según (Custodio y Llamas, 1983).**

Las aguas selenitosas (elevado contenido en sulfato) no quitan la sed y tienen sabor poco agradable y amargo. Por sí mismo o si va asociado a Mg o Na en cantidad importante puede generar propiedades laxantes. En cantidades elevadas puede ser perjudicial las plantas. Más de algunos **centenares** de mg/l perjudican a la resistencia del hormigón y cemento.

❖ **Anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ), Ion Bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ )<sup>-</sup> y Ion Carbonato ( $\text{CO}_3$ )<sup>2-</sup>**

**Procedencia según (Custodio y Llamas, 1983).**

El  $\text{CO}_2$  disuelto en agua procede fundamentalmente de la zona edáfica (respiración de organismos y descomposición de la materia orgánica).

El anhídrido carbónico disuelto en agua y los diversos compuestos que forma en ella juegan un papel importantísimo en la química del agua. El anhídrido carbónico se disuelve en el agua, una parte permanece en disolución en forma de gas mientras otra

reacciona con el agua para dar ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) que se disocia parcialmente para dar iones carbonato y bicarbonato. Estos iones generan alcalinidad al agua en el sentido que da capacidad de consumo al crear una solución tampón.

Proviene de la incorporación del dióxido de carbono en el agua y de la disolución de rocas carbonatadas como la caliza y la dolomita.

#### **Concentración según (Custodio y Llamas, 1983).**

El ion bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) varía entre 50 y 350 mg/l en aguas **dulces** pudiendo llegar a veces hasta 800 mg/l. El agua de mar tiene alrededor de 100 mg/l. (Davies, 1985). El ion carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) está en concentraciones mucho menores que el ion bicarbonato y si el  $\text{pH} < 8.3$  se le considera cero. En aguas alcalinas con un  $\text{pH} > 8.3$  puede haber cantidades importantes, hasta 50 mg/l en algunas aguas naturales. El agua de mar tiene menos de 1 mg/l.

#### **❖ Ion Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )**

##### **Procedencia según (Custodio y Llamas, 1983).**

Procesos de nitrificación naturales (bacterias nitrificantes), por ejemplo en la descomposición de materia orgánica y contaminación urbana, industrial y ganadera.

Abonos agrícolas.

En pequeña proporción del agua de lluvia.

Muy raramente del lavado de ciertos minerales nitrogenados, emanaciones volcánicas o lavado de suelos antiguos.

Muchas veces es un indicador de contaminación, en cuyo caso suele estar estratificado, dominando las concentraciones mayores en la parte alta del acuífero libre. Si se tiene menos de 10 mg/l se considera que el contenido es bajo, aunque en aguas subterráneas no contaminadas es raro superar unas pocas mg/l.

**Concentración según (Custodio y Llamas, 1983).**

Normalmente entre 0,1 mg/l y 10 mg/l pero en aguas polucionadas puede llegar a 200 mg/l y en algún caso hasta 1.000 mg/l. El agua del mar tiene alrededor 1 mg/l o menos.

**Nocividad y toxicidad según (Custodio y Llamas, 1983).**

Concentraciones elevadas en agua de bebida puede producir cianosis en los niños y comunican corrosividad (oxidaciones) al agua y producen interferencias en fermentaciones.

**❖ Ion Sodio ( $\text{Na}^+$ ).****Procedencia según (Custodio y Llamas, 1983).**

Ataque de feldespatos, feldespatoides y otros silicatos.

Lavado de sedimentos de origen marino y cambio de bases con arcillas del mismo origen.

Mezcla con agua del mar

Localmente de la disolución de sal gema o sulfato sódico natural (sales evaporitas)

Raras veces de emanaciones y fenómenos relacionados con procesos magmáticos

Contaminación urbana e industrial.

Concentración del agua de lluvia.

Sin embargo el  $\text{Na}^+$  puede ser adsorbido en arcillas de elevada capacidad de cambio catiónico y puede ser intercambiado por Ca provocando una disminución de la dureza de las aguas (ablandamiento natural).

**Concentración según (Custodio y Llamas, 1983).**

Entre 1 a 150 mg/l no siendo raro encontrar contenidos mucho mayores, hasta varios miles de mg/l.

El agua del mar tiene alrededor de 10.000 mg/l, las salmueras naturales pueden llegar a tener 100.000 mg/l, siendo un límite que rara vez sobrepasa de 500 meq/l que es igual a 110.000 mg/l.

### **Nocividad y toxicidad según (Custodio y Llamas, 1983).**

Aguas con contenidos elevados en  $\text{CO}_3\text{HNa}$  originan problemas de espumas en calderas

Las aguas con concentraciones elevadas en sodio son perjudiciales a las plantas al reducir la **permeabilidad** del suelo, son especialmente nocivas si las concentraciones de Ca y Mg son bajas.

### **❖ Ion Potasio ( $\text{K}^+$ ).**

#### **Procedencia según (Custodio y Llamas, 1983).**

Ataque de la ortosa y otros silicatos (micas, **arcillas**). Localmente de la disolución de sales potásicas naturales (silvinita, carnalita, etc.).

En ocasiones procede de contaminación industrial, minera y agrícola (abonos)

Tiende a ser fijado irreversiblemente por el terreno durante la formación de arcillas por lo que  $r \text{K}/r \text{Na}$  es mucho menor que 1, excepto en aguas muy **diluidas**, en las que ese valor puede llegar a ser 1

En pequeña cantidad de aportes del **agua** de lluvia.

#### **Concentración según (Custodio y Llamas, 1983).**

Entre **0,1** y **10** mg/l en aguas dulces. Extraordinariamente se pueden tener algunos cientos de mg/l y solo muy raramente se puede tener salmueras de hasta 100.000 mg/l. El agua del mar tiene alrededor de 400 mg/l.

**Nocividad y toxicidad según (Custodio y Llamas, 1983).**

No presenta problemas especiales a las concentraciones habituales y es un elemento vital para las plantas.

**❖ Ion Calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ )****Procedencia según (Custodio y Llamas, 1983).**

El calcio suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas debido a su amplia difusión en rocas ígneas, **sedimentarias** y metamórficas.

Está frecuentemente en estado de saturación y su estabilidad en solución depende del equilibrio  $\text{CO}_2 \text{ — } (\text{HCO}_3) \text{ — } (\text{CO}_3)^{2-}$ .

Puede precipitarse con facilidad y es muy afectado por el cambio iónico.

Disolución de calizas, dolomías, yesos, anhidritas.

Concentración de **agua de lluvia**.

Disolución de cemento calcáreo de muchas rocas.

**Concentración según (Custodio y Llamas, 1983).**

Entre 10 y 250 mg/l en aguas dulces, pudiendo llegar a 600 mg/l en aguas selenitosas.

El agua del mar contiene alrededor de 400 mg/l. Excepcionalmente se puede tener 50.000 mg/l en salmueras de  $\text{Cl}^-\text{Ca}$

**Nocividad y toxicidad según (Custodio y Llamas, 1983).**

El mayor inconveniente va asociado al aporte de dureza y producción de incrustaciones.

### ❖ Ion Magnesio ( $Mg^{2+}$ )

#### **Procedencia según (Custodio y Llamas, 1983).**

El magnesio menos abundante que el Ca en las aguas naturales, procede de la disolución de rocas carbonatadas (dolomías y calizas, magnesianas), evaporitas y de la alteración de Silicatos ferro magnesianos, así como de agua marina.

La solubilidad de la magnesita ( $MgCO_3$ ) en las aguas subterráneas naturales es mayor que la de la calcita ( $CaCO_3$ ) por lo que, en condiciones normales, el  $MgCO_3$  no precipita directamente de la disolución de modo que, para un período dilatado de tiempo, puede producirse cierto grado de sobresaturación respecto a los diferentes carbonatos magnésicos.

Aunque se disuelve más lentamente es más soluble que el Ca y tiende a permanecer en solución cuando éste se precipita. Es afectado por el cambio iónico.

Los procesos de intercambio iónico influyen también en las concentraciones de Mg en aguas subterráneas. En ellas el Mg es retenido con preferencia al Ca en suelos y rocas.

#### **Concentración según (Custodio y Llamas, 1983).**

Entre 1 y 100 mg/l en aguas dulces pudiendo llegar a veces a algunos miles de mg/l en aguas salinas o salmueras. El agua del mar contiene 1200 mg/l.

#### **Nocividad y toxicidad según (Custodio y Llamas, 1983).**

Propiedades laxantes y de sabor amargo al agua de bebida si hay algunos **centenares** de mg/l. Contribuye a la dureza del agua y además a pH elevado puede dar  $Mg(OH)_2$  incrustante.

### **2.4. Características físicas del agua.**

El agua subterránea natural, como consecuencia de su composición química y de acciones naturales externas, presenta una serie de propiedades o características fisicoquímicas: Dureza, Densidad, Temperatura, Alcalinidad, Turbidez, Acidez,

Color, Sabor y Olor, Demanda de Oxígeno, Sólidos disueltos totales, pH, Conductividad Eléctrica, etc.

Estas propiedades varían en el espacio y en el tiempo (Lagrange, 1979).

#### ❖ **Temperatura.**

En el agua subterránea, hay un incremento aproximado de 3°C por cada 100 m de profundidad (F.J. Sánchez, 2004).

Las variaciones de las temperaturas, ya sea un descenso o un incremento anómalo, debe ser analizado de acuerdo al tipo de formación geológica, ya que la presencia de rocas fracturadas o porosas, puede evidenciarse.

Las aguas se clasifican, de acuerdo a su termalismo, en aguas frías (<20°C), hipotermas (21-30°C), mesotermas (31-40°C) e hipertermas (> 40°C).

En cualquier caso, la **temperatura** de las **aguas subterráneas** es muy **poco variable**. Sin embargo, es un parámetro importante en lo que se refiere al **control** de la composición química de las aguas, en particular cuando entre áreas diferentes del acuífero existen notables **diferencias** de **temperatura** que pueden influir en la **solubilidad** de determinadas sustancias. (Lagrange, 1979).

#### ❖ **Conductividad Eléctrica (CE).**

Como consecuencia de su contenido iónico, el agua se hace conductora de la electricidad. A medida que la concentración iónica aumenta, aumenta también hasta cierto límite la conductividad (C) o capacidad de un agua para conducir la corriente eléctrica. La unidad de medida de conductividad es  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (microsiemens/cm). (Lagrange, B. 1979.)

Los valores de conductividad de las aguas subterráneas naturales varían considerablemente. Valores normales en aguas dulces oscilan entre 100 y 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ : en Salmueras pueden alcanzarse valores de 100.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . (Lagrange, B. 1979.)

En estudio preliminar la hidroquímica de una zona, disponiendo de muchos datos, podemos elaborar un mapa de isoconductividades que nos indicará la iso-salinidad del agua subterránea.

**Tabla 2: Valores Típicos de Conductividad.**

	C(μs/cm)
Pura	0,05
Destilada	0,5-5
Lluvia	5-30
Subterránea potable	30-10.000
Mar	50.000

Fuente: [http://ocw.usal.es/ciencias-experimentales/hidrologia/contenidos/11.Hidroquimica\\_Basica.pdf](http://ocw.usal.es/ciencias-experimentales/hidrologia/contenidos/11.Hidroquimica_Basica.pdf)

#### ❖ **Sólidos disueltos**

Sólidos totales disueltos (STD): se refiere a la cantidad de residuo del agua que pasa a través de un filtro (usualmente 0.45 mm), y luego evaporado a 180°C y pesado. Representa la cantidad de iones solubles que están disueltos en agua. Se puede calcular a partir de la CE como una aproximación:

$$SDT = 0,7 * CE \quad \text{Ecuación 2.}$$

#### ❖ **pH**

El pH aumenta con el aumento de temperatura hasta en un 8% por lo que debe referirse a la temperatura de medida in situ.

Por regla general el pH de las aguas se mantiene entre 6.5 y 8, aunque excepcionalmente puede variar entre 3 y 11. El pH juega un papel importante en muchos procesos químicos y biológicos de las aguas subterráneas naturales (**equilibrio carbonatado, procesos redox**). Es fácilmente **alterable** por lo que su determinación debe hacerse en el momento de la **toma de muestra** (Lagrange, 1979).

La medida de pH es una de las pruebas más importantes y frecuentes utilizadas en el análisis químico del agua; se utiliza en las determinaciones de alcalinidad y CO<sub>2</sub>.

### ❖ Dureza Total

La dureza total es la medida por la concentración de iones alcalinos térreos, es decir  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  disueltos en el agua, esto se puede percibir por el poder de generar incrustaciones.

Según Custodio y Llamas, (1983) la **dureza** también es definida como la capacidad de consumir jabón o producir incrustaciones del agua, por esta razón se establece una clasificación. Ver Tabla 2.

$$\text{Dureza} \left( \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = (\text{Ca}^{2+}) + (\text{Mg}^{2+}) \quad \text{Ecuación 3.}$$

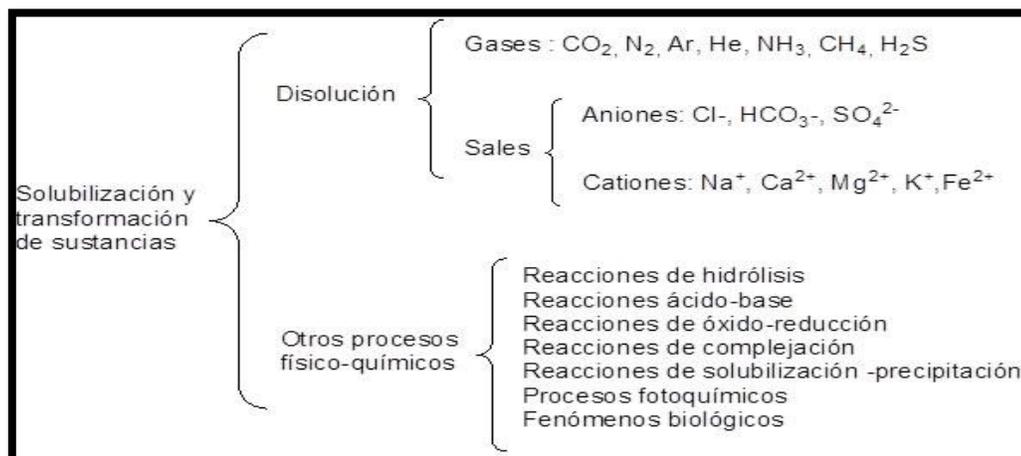
**Tabla 3: Clasificación según al contenido de carbonatos**

Tipo de Agua	Dureza en $\text{CO}_3\text{Ca}(\text{mg/l})$
Blanda	<50
Ligeramente dura	50 a 100
Dura	>100 a 200
Muy dura	>200

Fuente: Hidrología Subterránea (Custodio y Llamas, 1983).

## 2.5 PROCESOS FÍSICO-QUÍMICOS QUE INFLUYEN EN LA COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS

**Figura 10: Tipos de procesos y reacciones que modifican la composición del agua.**



Fuente: Orozco 2003

### 2.5.1 Factores que afectan a los procesos físico-químicos

Se pueden señalar tanto factores inherentes a las propias características del agua como otros de tipo ambiental o referente a las interacciones del agua con los terrenos y rocas con los que se pone en contacto.

- ✓ Entre las características del agua, se pueden destacar: **pH**, **potencial redox**, temperatura, concentración de gases y especies disueltas, microorganismos. (Orozco, 2003).
- ✓ Entre los factores ambientales deben destacarse la **temperatura** y la **presión**: la temperatura porque modifica la solubilidad de todas las sustancias y el producto de solubilidad de sales insolubles; la presión, porque es factor determinante en la solubilidad de gases y hasta de sales, como en el par carbonato/hidrogenocarbonato de calcio, que depende de la presión parcial del dióxido de carbono en el agua (Orozco, 2003).
- ✓ Entre los factores relativos a la **interacción agua-terreno**, merecen reseñarse: tiempo de contacto, superficie de contacto que incluye propiedades como la granulometría y porosidad del material sólido, capacidad de intercambio iónico y adsorción (Orozco, 2003).

### 2.5.2 Fenómenos limitantes del contenido de sales disueltas

La composición de un agua cambia a lo **largo** de su **recorrido** por el correspondiente cause, ya sea superficial o subterráneo, como consecuencia no solo de los procesos físico-químicos, sino también por una serie de fenómenos que pueden influir en los mismos, entre los que se pueden destacar :

#### ❖ **Intercambio Iónico.**

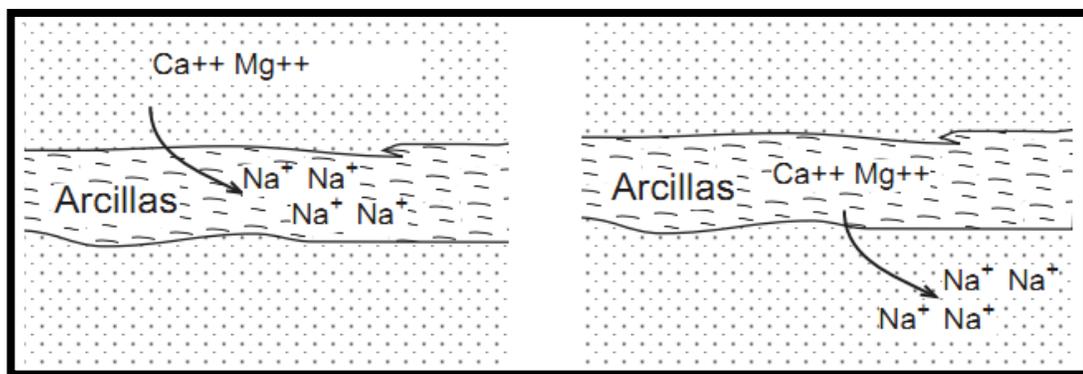
Según (Custodio y Llamas, 1983) el intercambio iónico afecta principalmente a los cationes y por eso se le denomina por extensión, cambio de bases. Fenómeno especialmente acusado en los minerales de la arcilla que poseen un grado notable de capacidad de quimisorción.

Según (Custodio y Llamas, 1983) su interés está relacionado con acuíferos con una fracción arcillosa, ya que las formaciones predominantemente arcillosas son impermeables a efectos prácticos. El cambio de bases afecta principalmente a los cationes  $\text{Na}^{1+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ .

Los divalentes son adsorbidos más fuertemente que los monovalentes, y dentro de cada grupo, más fuerza los de menor radio iónico hidratado (a igualdad de carga, el más pequeño tendrá más carga por unidad de superficie). La secuencia de mayor a menor fuerza es:



**Figura 11: Proceso de Intercambio Catiónico en Arcillas.**



Fuente: [http://hidrologia.usal.es/temas/Evolucion\\_geoquimica.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Evolucion_geoquimica.pdf)

#### ❖ **Concentración por disolución y por evaporación**

Según (Orozco, 2003) la concentración por **disolución** se produce por influencias litológicas, pues las sales proceden de los terrenos drenados por el agua: los factores que influyen son la temperatura, la presión, superficie y tiempo de contacto, volumen de agua, etc.

La concentración por evaporación tiene lugar por causas climáticas, teniendo lugar en zonas de superficie.

### ❖ Nuevas disoluciones

Según (Orozco, 2003) la disolución de **nuevas sales** hace que pueda variar el contenido de las ya existentes, lo que puede producirse en **dos sentidos opuestos**, aumentando o disminuyendo la concentración.

#### ✓ Efecto Salino

El primer efecto es el denominado efecto salino; si aumenta la concentración de ion cloruro o ion sodio, esto permitirá una mayor disolución de sulfato o carbonato de calcio.

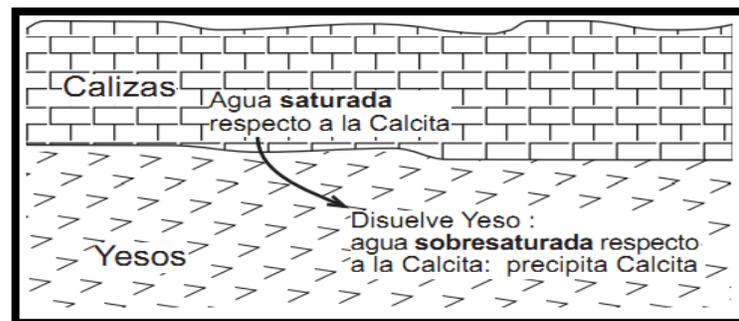
El agua de mar puede disolver más yeso que el agua destilada. Esta aparente paradoja es posible porque los iones contenidos en el agua de mar no coinciden con los liberados en la disolución del yeso.

Este mismo fenómeno es considerado habitualmente a lo largo del flujo subterráneo. Al aumentar la salinidad de un agua, ésta disuelve mayor cantidad de una sustancia siempre que no existan iones **comunes** entre los contenidos **previamente** en el **agua** y los que está **disolviendo** ahora.

#### ✓ Efecto ion común

El segundo efecto, denominado del **ion** común, provoca la precipitación de determinados iones: por ejemplo la disolución yesos (sulfato de calcio) podrá provocar la precipitación de carbonato de calcio en aguas con alto contenido en calcio.

**Figura 12: Efecto ion Común.**



Fuente: [http://hidrologia.usal.es/temas/Evolucion\\_geoquimica.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Evolucion_geoquimica.pdf)

Se produce con mucha frecuencia cuando un agua que ha alcanzado el equilibrio respecto a una sal, encuentra otra diferente con un ion en común con la anterior.

#### ❖ Mezclas

Según (Orozco, 2003) en la confluencia de dos ríos o de un río con un embalse, se producen mezclas de aguas de distintas composiciones. Esto puede dar lugar a distintos tipos de procesos físico-químicos, en función de las diferentes especies disueltas en cada agua que se mezcla.

El equilibrio existente, principalmente por fenómenos de precipitación (superación de producto de solubilidad de las sales) y en otros casos por procesos de complejación. Por formación o destrucción de determinados compuestos de coordinación.

## 2.6 EVOLUCIÓN GEOQUÍMICA DEL AGUA EN ACUÍFEROS

Según Appelo, C. Y Postma, D. (1993) desde que el agua alcanza la superficie freática más próxima hasta que sale al exterior en un río, manantial o captación, pueden transcurrir unos días o miles de años; el recorrido puede ser de unos metros o de varios kilómetros. Por tanto, la evolución química del agua dependerá de los minerales con los que entre en contacto y de la duración de dicho contacto, que a su vez depende de la velocidad del flujo subterráneo.

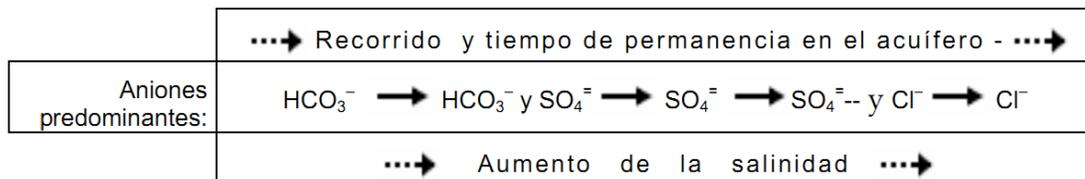
Como norma general, a mayor tiempo de permanencia en el terreno, mayor será la salinidad del agua. Esto es relativo: un agua que permanezca unas horas en contacto con cloruro de sodio será más salina que otra que esté muchos años en contacto con cuarzo. También veremos circunstancias en las que alguna de las sustancias disueltas en el agua no aumentan sino disminuyen.

Si atraviesa yesos se obtendrán  $(\text{SO}_4)^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , si encuentra niveles salinos, con sales cloruradas adquirirá  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ , y si atraviesa formaciones calizas adquirirá  $(\text{HCO}_3)^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$ .

En los casos citados hablaríamos, respectivamente, de aguas sulfatadas cálcicas, cloruradas sódica y bicarbonatadas cálcicas.

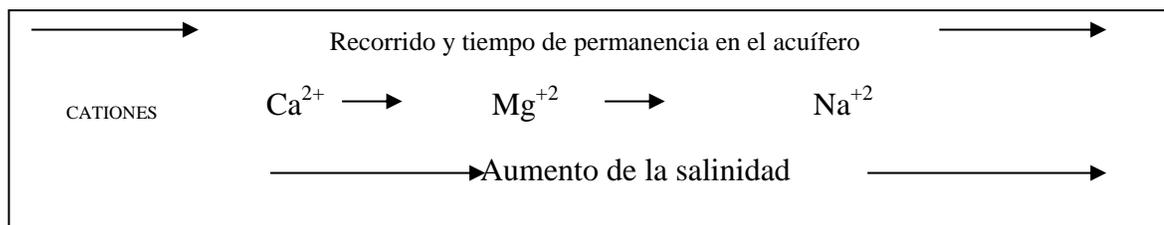
Las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en subsuelo son generalmente carbonatadas. Después predomina el sulfato, y las aguas muy salinas son cloruradas. Esta evolución se denomina secuencia de Chevotareb. Ver Fig.13 y Fig.14.

**Figura 13: Secuencia de Chevotareb para Aniones.**



Fuente:[http://hidrologia.usal.es/temas/Evolucion\\_geoquimica.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Evolucion_geoquimica.pdf)

**Figura 14: Secuencia de Chevotareb para Cationes.**



Fuente: [http://hidrologia.usal.es/temas/Evolucion\\_geoquimica.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Evolucion_geoquimica.pdf)

Esta secuencia se debe a dos causas: solubilidad y abundancia en el subsuelo de las distintas sales.

-La **solubilidad** de los carbonatos es mucho más baja que la de los sulfatos, que a su vez, son menos solubles que los cloruros. Por tanto, primero se alcanza el tope para los bicarbonatos, después para los sulfatos y finalmente para los cloruros.

El segundo factor, la **abundancia** se refiere a la diferente probabilidad que existe de que un agua encuentre minerales que le aporten bicarbonatos, sulfatos o cloruros. Si un agua estuviera en contacto simultáneamente desde su infiltración con minerales

que le aportarán todos estos iones, no se producirá la secuencia de Chebotareb, sino que desde el primer momento las aguas serían cloruradas, puesto que son las sales más solubles.

-La disponibilidad de las sales comienza con aportes de bicarbonatos, el  $\text{CO}_2$  del suelo, cuando no existan sales carbonatadas, normalmente calcita, también muy abundante. En segundo lugar, los yesos (sulfato cálcico) son relativamente frecuentes en series sedimentarias. Y finalmente las sales cloruradas son las menos abundantes.

La secuencia de Chebotareb nos hace pensar en un proceso lineal: el agua al principio de su viaje es bicarbonatada; a medio viaje, sulfatada; al final, clorurada.

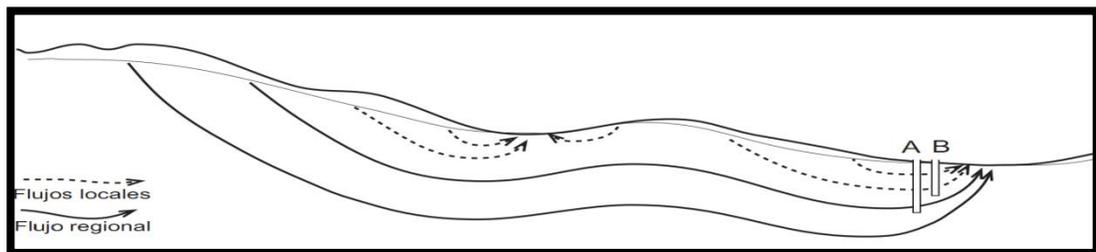
La distribución de la geoquímica del agua en el subsuelo de una región está mejor descrita por el esquema trazado por Domenico. En las grandes cuencas sedimentarias, distingue tres zonas en profundidad. Ver Fig.15

**1. Una zona superior:** con flujo activo, generalmente con recorridos cortos y tiempos de permanencia de años o decenas de años. Aguas bicarbonatadas y pocas salinas.

**2. Una zona intermedia:** con flujo menos activo, recorridos más largos y tiempos de permanencia de cientos a miles de años. Aguas más salinas y el anión predominante será el sulfato.

**3. Una zona inferior:** con flujo muy lento, cuando no estancado, largos recorridos y tiempos de miles a millones de años. La salinidad es elevada y el agua es clorurada.

**Figura 15: Evolución geoquímica en flujos Locales, Regionales**



Fuente: [http://hidrologia.usal.es/temas/Evolucion\\_geoquimica.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Evolucion_geoquimica.pdf)

### 2.6.1 Índices hidrogeoquímicos.

Las relaciones entre los iones disueltos en un agua pueden guardar cierta relación con el terreno del que procede el agua o indicar la acción de fenómenos modificadores, o indicar una característica específica del agua considerada. En lo que sigue, todos los valores se darán en meq/l, tal como indica el signo r. (Custodio y Llamas, 1983).

#### a) Relación ( $rK^+/rNa^+$ ).

Según Schoeller, (1956) el valor de la relación en aguas dulces puede variar entre 0,001 mg/l y 1 mg/l siendo lo más frecuente que varíe entre 0,004 mg/l y 0,3 mg/l mientras, que para el agua marina vale de 0,02 a 0,025.

Debido a la **fijación** preferente de  $K^+$  en el terreno esta relación es menor en el **agua** que en la roca origen, tanto **menor** cuanto más **concentrada** en **sales** está el agua. (Custodio y Llamas, 1983)

Según (Schoeller, 1956:136-145) cuando el contenido de los alcalinos ( $Na^+$  y  $K^+$ ) es menor que 3 mg/l ( $rK^+/rNa^+$ ), varía entre 0,5 y 1; para 50 mg/l, vale alrededor de 0,1 y para 100 mg/l, 0,01 como valor medio.

Si existen aportes artificiales de  $K^+$ , se puede seguir su disminución en el sentido del flujo y entonces esa relación puede ser interesante. (Custodio y Llamas, 1983.)

#### b) Relación ( $rMg^{2+}/rCa^{2+}$ ).

Según Custodio y Llamas, (1983) en aguas **continentales** varía frecuentemente entre **0,3 y 1,5**; los valores próximos a 1 indican la posible influencia de terrenos dolomíticos, o con serpentina y valores superiores a 1 suelen estar en general relacionados con terrenos ricos en silicatos magnésicos como los gabros y basaltos.

El mismo manifiesta que es preciso actuar con gran precaución ya que cuando se produce una precipitación de  $CO_3Ca$  en un agua aumenta la relación r Mg/r Ca sin que ello indique nada sobre los terrenos atravesados. En caso de disolución de caliza sucede lo contrario.

En los procesos de reducción de sulfatos suele crecer la relación  $r \text{ Mg/r Ca}$ , en especial si el contenido en  $(\text{SO}_4)^{2-}$ , queda reducido a unas pocas mg/l, pero la presencia simultánea de cambio iónico  $\text{Mg}^{2+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+}$  puede permitir que la precipitación posible de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  se realice a expensas del  $\text{Mg}^{2+}$ . (Custodio y Llamas, 1983).

### c) Relación $r (\text{SO}_4)^{2-}/r \text{ Cl}^- * 100$

Índice variable que indica si existe alguna intrusión salina, o si está exenta de intrusión (agua dulce).

En aguas algo salinas el contenido en ion  $(\text{SO}_4)^{2-}$  tiende a hacerse constante y entonces buen indicador del proceso de concentración en sales en el sentido del flujo subterráneo; aunque esa concentración hace crecer ligeramente el denominador, un aumento en la relación indica un avance en el proceso de concentración (Custodio y Llamas, 1983).

En aguas poco o moderadamente salinas la relación  $(\text{SO}_4)^{2-}/r \text{ Cl}^-$  puede ser similar a la de la roca acuífera y su valor se mantiene aproximadamente constante al irse concentrando el agua (Custodio y Llamas, 1983).

Cuando satura el  $(\text{SO}_4)^{2-}$ , la relación deja de ser útil en este sentido, aunque ello solo sucede cuando la salinidad es ya muy elevada.

**Tabla 4: Relación  $[r (\text{SO}_4)^{2-}/r \text{ Cl}^-] * 100$ .**

DESCRIPCIÓN	VALORES
Aguas subterráneas dulces.	400-500
Agua de mar.	10
Intrusión Salina	
Aguas Fósiles.	1

Fuente: [https://www.academia.edu/4228995/hidrogeoquimica\\_zona\\_tochac\\_tecomulco](https://www.academia.edu/4228995/hidrogeoquimica_zona_tochac_tecomulco).

### c) Índice de cambio de bases ( $i_{cb}$ )

$$i_{cb} = \frac{rCl - r(\text{Na} + \text{K})}{rCl}$$

Ecuación 4.

Donde  $r$  = concentración en meq/l.

En un agua subterránea este valor suele tomar un valor positivo o negativo. Si hay ablandamiento, es decir, aporte de  $\text{Na}^{1+}$  y merma de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , el índice tiende a disminuir y se hace negativo.

## 2.7 TÉCNICAS DE ESTUDIO HIDROQUÍMICO

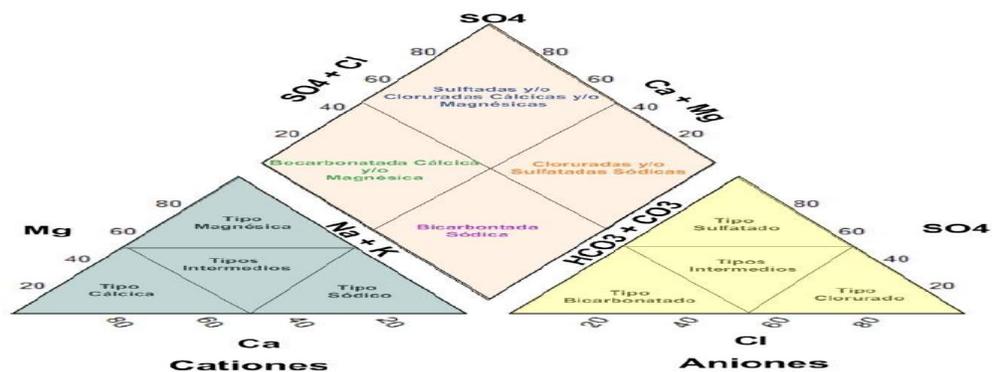
El manejo y estudio de análisis químicos puede simplificarse con el empleo de **gráficos** y **diagramas**, en especial cuando se trata de hacer comparaciones entre varios análisis de aguas de un mismo lugar o de diferentes lugares. (Custodio y Llamas, 1983)

Estas gráficas y diagramas pueden poner de relieve variaciones **temporales**, **variaciones espaciales** o bien **resaltar relaciones entre los iones** de una misma muestra (Custodio y Llamas, 1983:1037).

### 2.7.3 Diagrama Piper

Es una de las gráficas más utilizadas, en él se incluyen aniones y cationes en forma simultánea. Este gráfico permite representar muchos análisis sin dar origen a confusiones. Las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas. (Custodio y Llamas, 1983).

Figura 16: Diagrama de Piper.

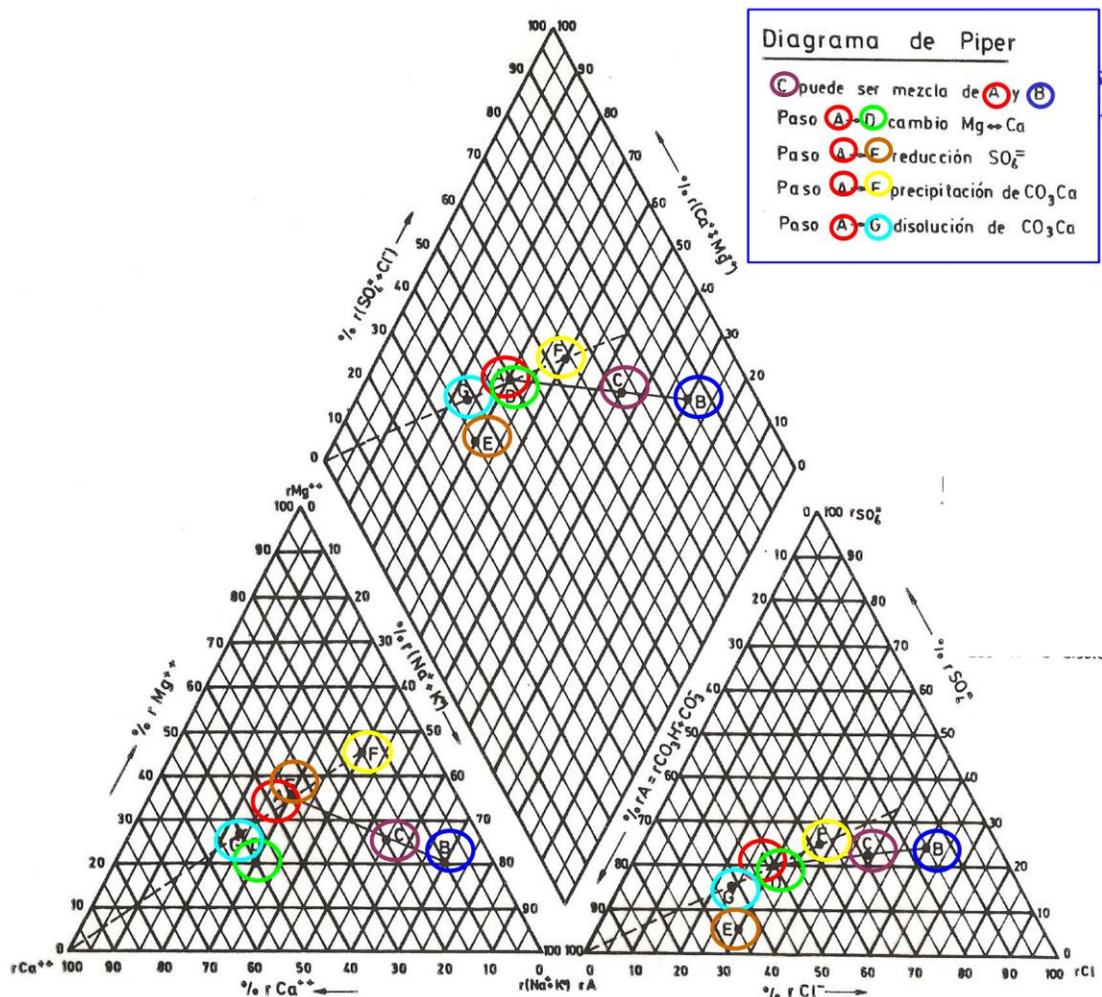


Fuente: Hidrología Subterránea (Custodio y Llamas, 1983).

Las concentraciones de los iones dadas en (meq/l) se expresan como porcentaje con respecto a la suma de aniones y cationes respectivamente. En cada triángulo se reúnen solo tres aniones y tres cationes. A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión. Ver fig.16.

Además, este diagrama permite reflejar las variaciones provocadas por la presencia de **mezclas**, **precipitaciones**, **disoluciones**, **procesos de intercambio iónico** que están ocurriendo en el comportamiento del agua, es decir, visualizar la **evolución hidrogeológica** del agua. (Custodio y Llamas, 1983)

**Figura 17: Fenómenos modificadores de composición del agua.**



Fuente: Hidrología Subterránea (Custodio y Llamas, 1983).

En la fig.17, se ilustra los fenómenos **hidrogeoquímicos** que modifican la composición del agua entre dos o más muestras de agua que provienen del misma área de recarga.

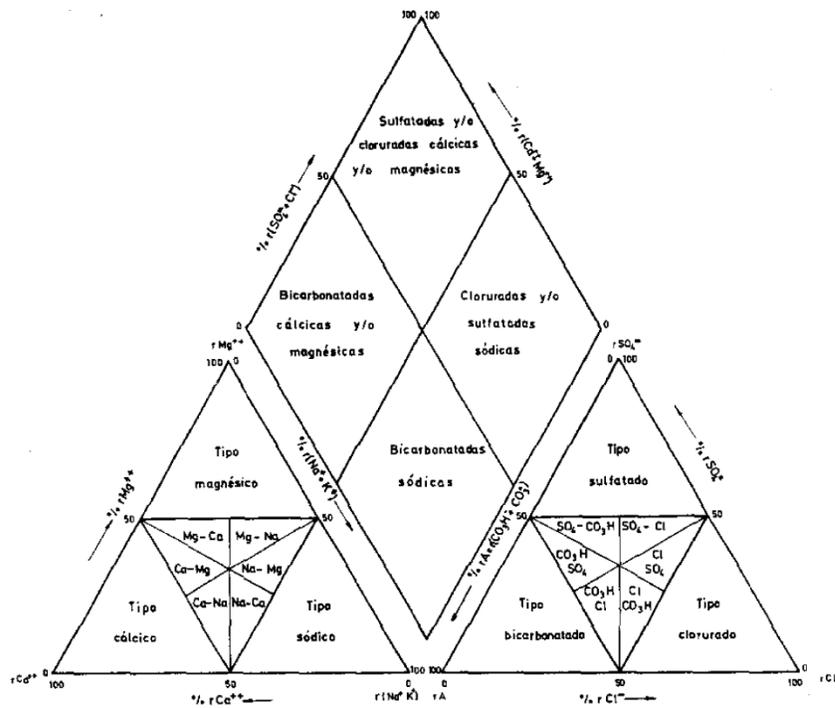
#### ❖ Clasificación de aguas según (SAR)

Empíricamente, se pueden sugerir algunos procesos o reacciones químicas que llevan a cabo en el agua.

Las principales familias de agua son las siguientes: – Sulfatada cálcica – Sulfatada magnésica – Sulfatada sódica – Clorurada cálcica – Clorurada magnésica – Clorurada sódica – Bicarbonatada sódica – Bicarbonatada cálcica – Bicarbonatada magnésica.

La clasificación para aguas agrícolas (**SAR**), deduce de una forma simple a que tipos de agua, pueden pertenecer dichas muestras. Ver Figura 18.

**Figura 18: Tipos de aguas deducidas según SAR**



Fuente: Hidrología Subterránea (Custodio y Llamas, 1983:1042).

### ❖ Clasificación por Iones Dominantes.

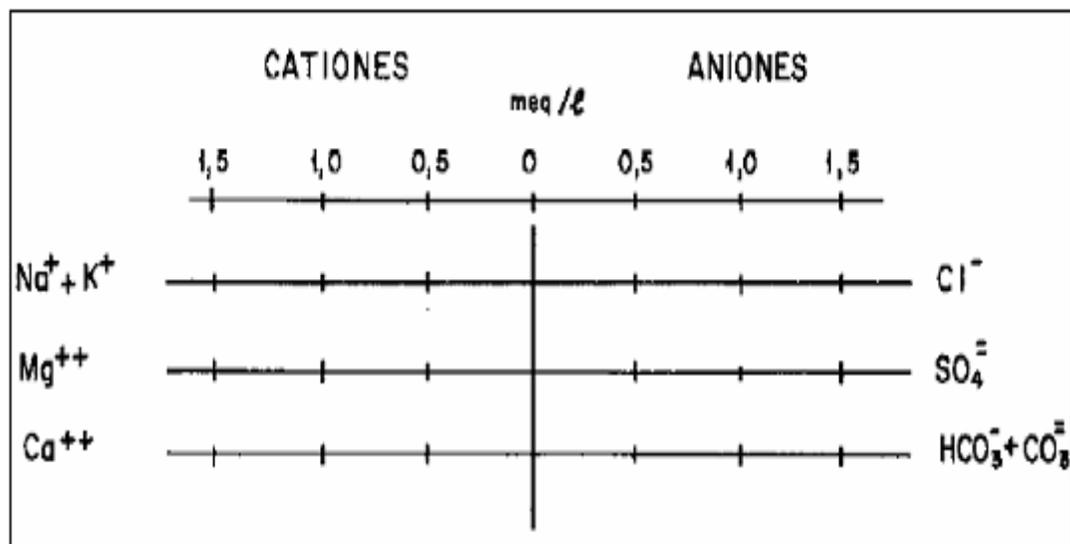
Se nombra el agua por el anión o el catión que sobrepasa al 50% de sus sumas respectivas; si ninguno supera al 50 % se nombra los dos más abundantes. Si conviene se puede añadir el nombre de algún ion menor de interés y que esté en concentración anormalmente alta. (Custodio y Llamas, 1983.)

### 2.7.2 Diagrama de Stiff.

En este diagrama se tienen cuatro rectas paralelas igualmente espaciadas interceptadas por una recta perpendicular dando así, cuatro semirrectas a la izquierda (campo de cationes), y cuatro semirrectas a la derecha (campo de aniones).

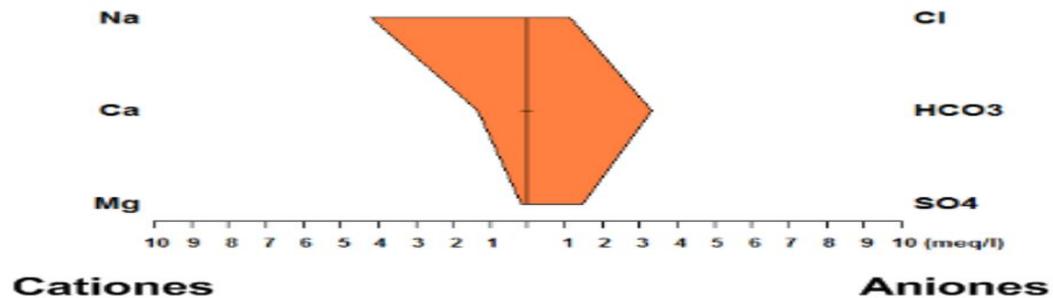
Sobre cada recta se toma un segmento proporcional a los mili-equivalentes/litro del ion correspondiente y se unen los extremos, obteniendo un polígono representativo. (Custodio y Llamas, 1983). Ver Figura 19.

**Figura 19: Configuración del diagrama de Stiff para aguas subterráneas.**



Fuente: Hidrología Subterránea (Custodio y Llamas, 1983:1042).

**Figura 20: Representación del diagrama de Stiff.**



Fuente: <https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/587/3/TMIPICYTA7C32010.pdf>

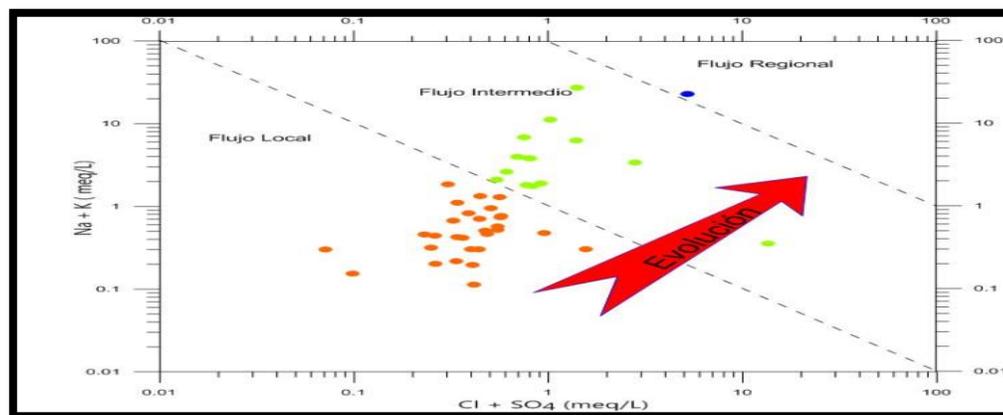
#### 2.7.4 Diagrama Mifflin

Este diagrama proporciona información sobre la evolución del agua subterránea en base a la creciente concentración de los iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $(\text{SO}_4)^{2-}$  a lo largo del flujo.

El gráfico se subdivide en 3 secciones, determinando puntos de flujo local, intermedio y regional, siendo este último el más evolucionado y ligado a zonas de descarga.

El diagrama se construye sumando de manera independiente cationes ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) y aniones ( $\text{Cl}^- + (\text{SO}_4)^{2-}$ ) en meq/L, en escala logarítmica. Ver Fig.21

**Figura 21: Diagrama de Mifflin.**



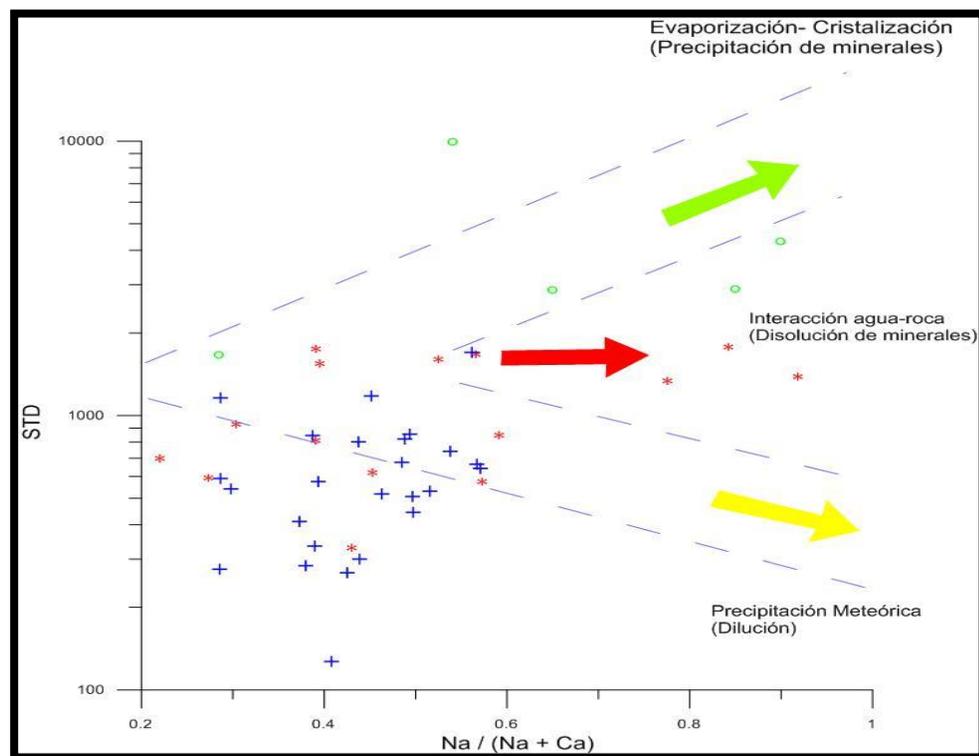
Fuente: <https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/1259/1/TMIPICYTB8I32017.pdf>

Mifflin menciona que las aguas subterráneas pertenecientes al flujo local corresponden a aguas poco evolucionadas y de reciente infiltración; las pertenecientes al flujo intermedio se sitúan con una mayor evolución hidrogeoquímica dada así por el tiempo de permanencia con el medio geológico y la profundidad a la cual se infiltraron, mientras que las aguas subterráneas de flujo regional corresponden a una zona de deposición de solutos, donde la composición química del agua tiende a ir aumentando su mineralización hasta ir saturándose en los diferentes iones a lo largo de la trayectoria recorrida.

### 2.7.5 Diagrama de Gibbs

El diagrama fue desarrollado por (Gibbs 1970), para estudiar los componentes iónicos de las aguas superficiales, dadas las condiciones similares de estudio, también es aplicado para aguas subterráneas.

**Figura 22: Diagrama de Gibbs para Cationes.**

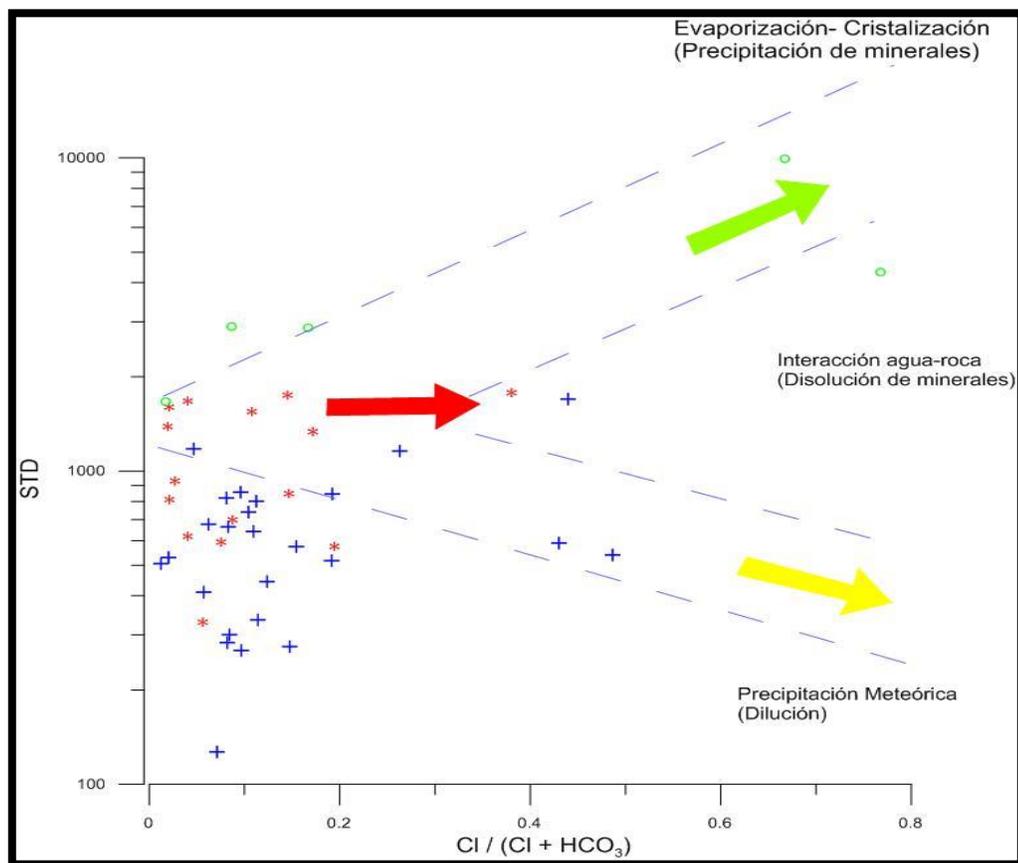


Fuente: <https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/1259/1/TMIPICYTB8I32017.pdf>

Este diagrama grafica la concentración de los sólidos disueltos y la relación de  $\text{Na}^{1+}/(\text{Na}^{2+}+\text{K}^{2+})$ , para cationes y para aniones  $\text{Cl}^{1-}/(\text{Cl}^{1-}+(\text{HCO}_3)^{-1})$ , lo cual permite identificar si las aguas están siendo o no afectadas por el intercambio iónico.(Jalali, 2005)

En este diagrama es posible identificar tres procesos ocurientes en la dinámica del agua subterránea mediante su química, siendo: el proceso de precipitación meteórica (lluvia y su rápida infiltración), proceso de intemperismo (interacción agua-roca), y el proceso de evaporación – cristalización (tomando como factor la temperatura).

**Figura 23: Diagrama de Gibbs para Aniones.**



Fuente:<https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/1259/1/TMIPICYTB8I32017.pdf>

### 2.7.6 Diagramas bidimensionales de dispersión

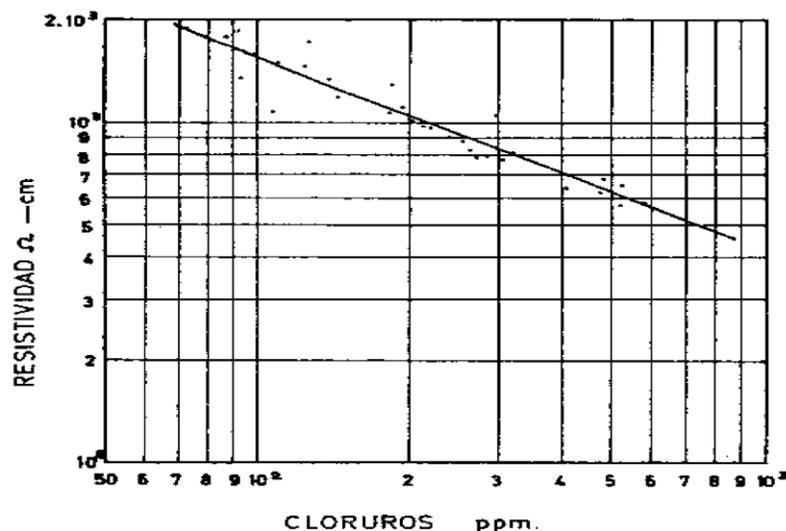
En estos diagramas se utilizan las partes positivas de dos ejes coordenados cartesianos. Tienen interés en estudios de análisis repetidos de un mismo punto y en estudios de análisis de aguas semejantes de una misma zona, y sirven para poner de relieve relaciones entre iones. (Custodio y Llamas, 1983.)

Permite establecer balances estequiométricos entre iones, la identificación de procesos hidrogeoquímicos como intercambio iónico, dilución y evolución del agua subterránea (Lloyd & Heathcote, 1985).

El ion  $\text{Cl}^-$ , no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce en aguas naturales, no es absorbido significativamente ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, por lo que estas particularidades le dan un carácter elemento conservativo y de trazador casi ideal (Davis y Elderfield, 2004).

El  $\text{Cl}^-$  y el boro son elementos conservativos porque no interaccionan con el medio geológico. Por su característica ayudan a definir la evolución del agua subterránea en acuíferos.

Figura 24: Relación de Cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) y Conductividad (CE).



Fuente: Hidrología subterránea (Custodio y Llamas, 1983)

Así por ejemplo, si se tienen n análisis del agua de un acuífero, puede representarse en abscisas la **conductividad** y en ordenadas el contenido en cloruros correspondiente. Si los puntos tienden a una recta o una curva sencilla se tiene un modo de obtener el contenido en cloruros a partir de la conductividad (Custodio y Llamas, 1983:1044). Ver figura 24.

## **2.8 MARCO LEGAL**

### **2.8.1 Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH)**

**Artículo 1°** La presente disposición legal reglamenta la ley de medio ambiente N° 1333 del 27 de abril 1992 en lo referente a la prevención y control de la contaminación hídrica en el marco del desarrollo sostenible.

**Artículo 2°** El presente reglamento se aplicara a toda persona natural o colectiva pública privada, cuyas actividades industriales, comerciales, agropecuarias, domésticas, recreativas y otras, puedan causar contaminación de cualquier recurso hídrico.

**Artículo 4°** Esta clasificación general de cuerpos de agua, en relación con su aptitud de uso, obedece a los siguientes lineamientos.

**CLASE “A”:** Aguas naturales de máxima calidad, que las habilita como agua potable para consumo humano sin ningún tratamiento previo, o con simple desinfección bacteriológica en los casos necesarios verificados por laboratorio.

**CLASE “B”:** Aguas de utilidad general, que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica.

**CLASE “C”:** Aguas de utilidad general, que para ser habilitadas para consumo humano requieren tratamiento físico químico completo y desinfección bacteriológica.

**CLASE “D”:** Aguas de calidad mínima, que para consumo humano, en los casos externos de necesidad pública, requieren un proceso inicial de presedimentación, pues pueden tener una elevada turbiedad por elevado contenido de sólidos en suspensión, y

luego tratamiento físico químico completo y desinfección bacteriológica especial contra huevos y parásitos intestinales.

**Tabla 5: Clasificación de los cuerpos de agua según su aptitud de uso.**

<b>ORDEN</b>	<b>USOS</b>	<b>CLASE “A”</b>	<b>CLASE “B”</b>	<b>CLASE “C”</b>	<b>CLASE “D”</b>
<b>1</b>	Para abastecimiento doméstico de agua potable después de:				
	a) Solo una desinfección y ningún tratamiento	<b>SÍ</b>	<b>NÓ</b>	<b>NÓ</b>	<b>NÓ</b>
	b) Tratamiento solamente físico y desinfección.	<b>NÓ</b>	<b>SÍ</b>	<b>NÓ</b>	<b>NÓ</b>
	c) Tratamiento físico-químico completo: coagulación, floculación, filtración y desinfección.	<b>NÓ</b>	<b>NÓ</b>	<b>SÍ</b>	<b>NÓ</b>
	d) Almacenamiento prolongado o pre sedimentación, seguidos de tratamiento al igual que c).	<b>NÓ</b>	<b>NÓ</b>	<b>NÓ</b>	<b>NÓ</b>
		<b>necesario</b>	<b>necesario</b>	<b>necesario</b>	<b>necesario</b>
<b>2</b>	Para recreación de contacto primario natación, esquí, inmersión.	<b>SÍ</b>	<b>SÍ</b>	<b>SÍ</b>	<b>NÓ</b>
<b>3</b>	Para protección de los recursos hidrológicos.	<b>SÍ</b>	<b>SÍ</b>	<b>SÍ</b>	<b>NÓ</b>
<b>4</b>	Para riego de hortalizas consumidas crudas y frutas de cáscara delgada, que sean ingeridas crudas sin remoción de ella.	<b>SÍ</b>	<b>SÍ</b>	<b>NÓ</b>	<b>NÓ</b>
<b>5</b>	Para abastecimiento industrial.	<b>SÍ</b>	<b>SÍ</b>	<b>SÍ</b>	<b>SI</b>
<b>6</b>	Para la cría natural y/o (acuicultura) de especies destinadas a la alimentación humana.	<b>SÍ</b>	<b>SÍ</b>	<b>SÍ</b>	<b>NÓ</b>
<b>7</b>	Para abrevadores de animales.	<b>NÓ</b>	<b>SÍ</b>	<b>SÍ</b>	<b>NÓ</b>
<b>8</b>	Para la navegación.	<b>NÓ</b>	<b>SÍ</b>	<b>SÍ</b>	<b>SÍ</b>

Fuente: Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, 1995.

**Tabla 6. Valores máximos aceptables según RMCH**

PARÁMETROS	VALORES MÁXIMOS ADMISIBLES			
	CLASE "A"	CLASE "B"	CLASE "C"	CLASE "D"
pH	6,0 a 8,5	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0
Sólidos Totales Disueltos	1000 mg/l	1000 mg/l	15.000 mg/l	15.000 mg/l
Calcio	200 mg/l	300 mg/l	300 mg/l	400 mg/l
Magnesio	100 mg/l	100 mg/l	150 mg/l	150 mg/l
Sodio	200 mg/l	200 mg/l	200 mg/l	200 mg/l
Sulfatos	300 mg/l	400 mg/l	400 mg/l	400 mg/l
Cloruros	250 mg/l	300 mg/l	400 mg/l	500 mg/l
Nitratos	20 mg/l	50 mg/l	50 mg/l	50 mg/l

Fuente: Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, 1995.

## 2.8.2 Reglamento Nacional para el control de Calidad de agua para Consumo Humano (NB 512)

### ❖ Introducción.

La calidad del agua con destino a consumo humano tiene implicaciones importantes sobre los aspectos sociales y económicos que actúan indirectamente sobre el desarrollo del país. Caracterizar la calidad de agua a través de la definición de los valores máximos de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos es fundamental para proteger la salud pública.

La estructura de la norma toma en consideración la importancia sanitaria de los parámetros a analizar; la calidad y la sensibilidad de las fuentes utilizadas para la producción de agua para consumo humano son:

a) Proteger la salud de la población, definiendo y determinando parámetros de calidad del agua, con sus respectivos niveles, basados en principios de gestión de riesgo, con la finalidad de brindar agua apta para consumo humano.

b) Ser factibles en el contexto del país, tomando en cuenta la capacidad analítica de los laboratorios y las condiciones técnico-económicas de las entidades prestadoras de servicios de agua y alcantarillado-EPSA.

c) Establecer parámetros de control de vigilancia de la calidad del agua de consumo humano, de acuerdo con la realidad nacional, sin que ello implique poner en riesgo la salud humana.

❖ **Objeto.**

Esta norma establece valores máximos aceptables de los diferentes parámetros que determinan la calidad de agua abastecida con destino al uso, consumo humano, modalidades de aplicación y control.

❖ **Campo de Aplicación.**

Esta norma se aplica a todas las aguas abastecidas con destino y consumo humano

❖ **Parámetros de control de calidad del agua**

Los parámetros que se empleó para la investigación son de control mínimo, básico y complementario (Ver tabla 6).

**Tabla 7: Parámetros de control mínimo según la NB-512**

Parámetro	Valor máximo aceptable
pH	6,5 – 9,0
Conductividad	1.500 $\mu$ S/cm
Turbiedad	5 UNT
Cloro residual	0,2 – 1,0 mg/l
Coliformes Termo resistentes	0 UFC/100 ml

Fuente: Norma Boliviana de agua potable y Saneamiento (NB-512)

**CAPÍTULO 3**

**CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS,  
GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS**

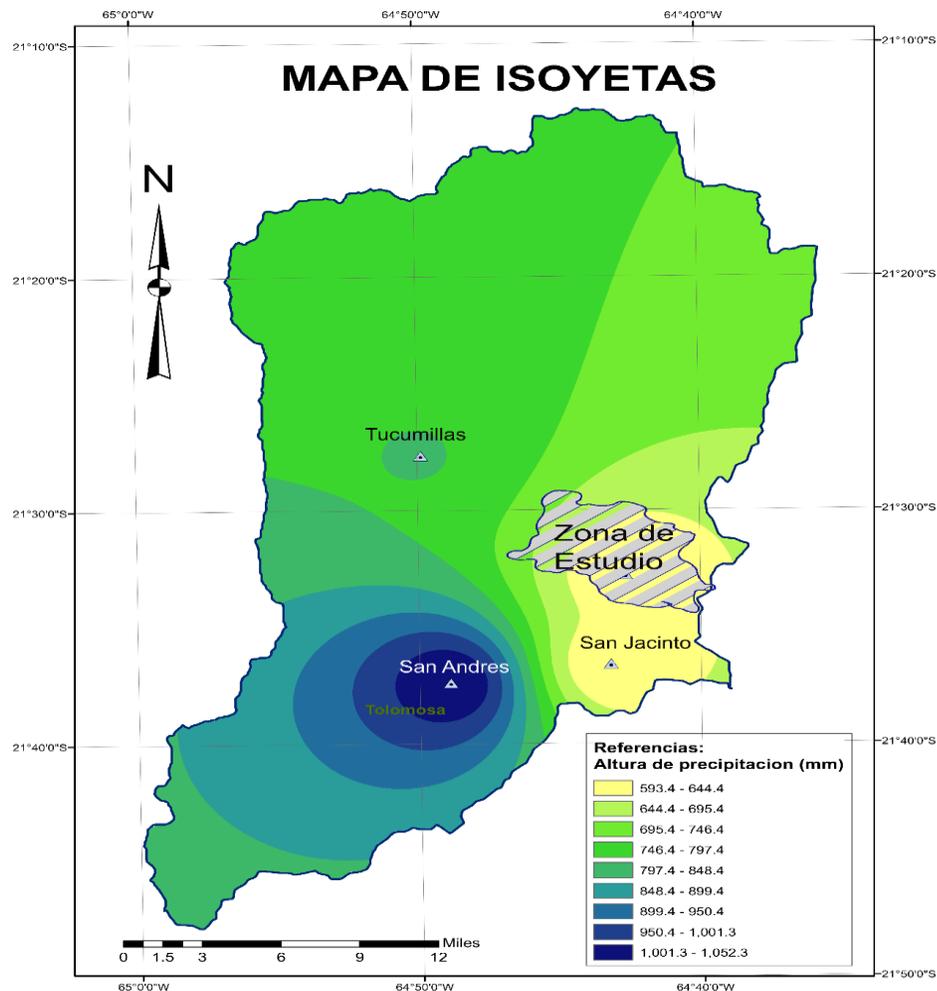
### 3.1 CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS

Con la finalidad de tener un mejor conocimiento previo de las condiciones climatológicas en el área de estudio, se han recopilado datos de diferentes estaciones climatológicas.

#### 3.1.1 Precipitación

La Precipitación del área de estudio se encuentra entre **600 mm/año y 700 mm/año**. Además se puede destacar un aumento de precipitación al acercarse hacia la serranía de Sama. Ver fig. 25.

**Figura 25: Mapa de Isoyetas.**



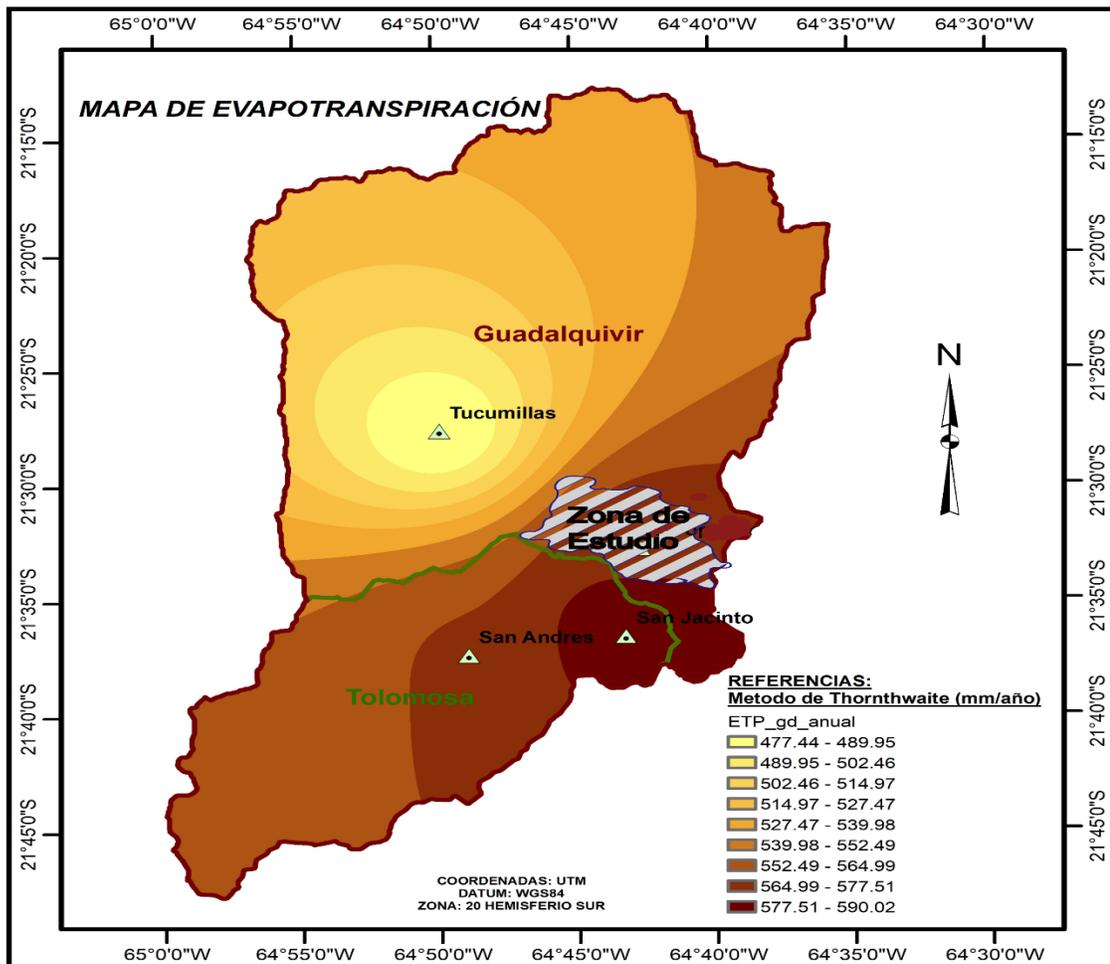
Fuente: Origen y Dinámica del Agua Subterránea en el Valle Central de Tarija, Bolivia (2018).

También se puede observar que en la subcuenca Tolomosa se encuentran las precipitaciones más altas variando desde 1.052 (mm/año) hasta 750 (mm/año). La precipitación del área de estudio se caracteriza por periodos relativamente cortos de lluvias (noviembre-abril), y con un periodo largo de estiaje (mayo-octubre), periodo en el cual es más notorio el déficit de agua.

### 3.1.2 Evapotranspiración Real

La evapotranspiración real del área de estudio varía de **560 mm/año a 580 mm/año**, en las partes altas (Serranía de Sama), disminuye la ETR a 470 mm/año. Ver Fig. 26.

**Figura 26: Mapa de Evapotranspiración Real.**



Fuente: Origen y Dinámica del Agua Subterránea en el Valle Central de Tarija, Bolivia (2018).

### 3.1.3 Temperatura

La temperatura en el área de estudio varía entre 16°C y 17 °C, la máxima media es 25,5°C y la mínima media 9,4°C. La temperatura extrema máxima 39,6 °C, y la temperatura mínima extrema -8,6°C.

## 3.2 GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra en el Valle central de Tarija, que es una depresión tectónica intermontana, dentro de la cordillera oriental de los Andes, limitada al oeste por la serranía de Sama con alturas de hasta 4.600 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), mientras que al este las alturas llegan hasta los 1680 m.s.n.m.

El área de estudio se encuentra cubierto por una sucesión de sedimentos de origen **fluvio-lacustre**, depositados en el Cuaternario y caracterizados por dos formaciones. Una formación basal, constituida por sedimentos finos y donde la ocurrencia de lentes arenosos es escasa y una formación superior, con presencia de algunos horizontes de cenizas volcánicas. (Pasig R. et al, 2018)

Subyacente a estas formaciones se encuentra una secuencia de lentes areno gravosas de origen aluvial. El sector de Piedemonte se caracteriza por una alternancia de sedimentos coluvio-fluviales, con presencia de gravas, arenas y limos. El espesor máximo de estos sedimentos es de unos 500 metros.

En la parte oeste del área de estudio se encuentran rocas Paleozoicas, tales como la **formación Sama y la formación Iscayachi**, con presencia de cuarcitas y areniscas, de colores grises a blanquecinas.

Más hacia el norte se ubica la formación de Cieneguilla, conformada por lutitas y limolitas, intercaladas por areniscas. (Pasig R. et al, 2018)

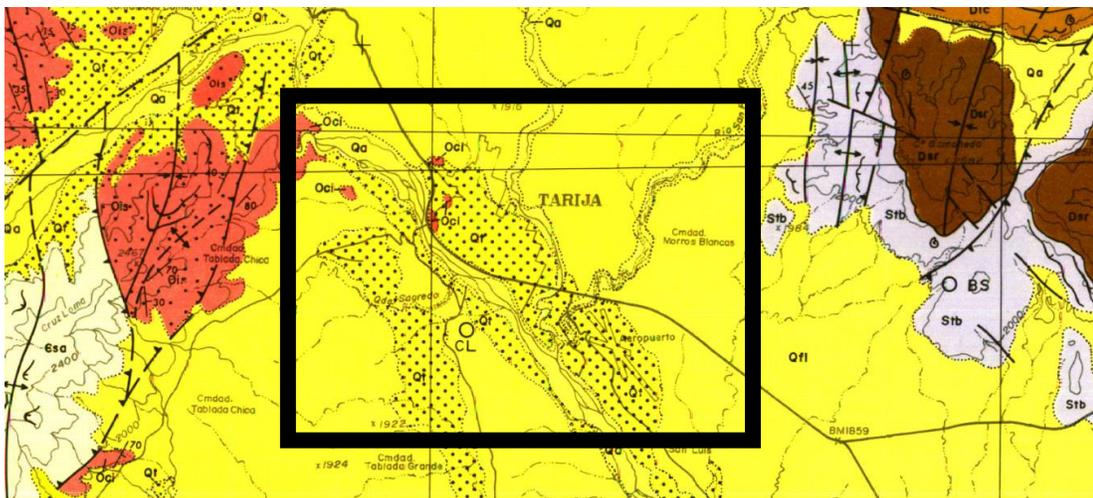
Hacia el este (en una franja que se extiende de norte a sur) se ubican las formaciones Tarabuco y Santa Rosa, con presencia de areniscas intercaladas por lutitas.

### 3.2.1 Estratigrafía.

La formación geológica de la que está compuesta nuestra área de interés, así como de áreas aledañas, se indica en el mapa geológico de Tarija .Ver Fig. 27.

El material y roca de la que se compone nuestra área de interés es de vital importancia, para conocer los fenómenos geoquímicos que se producen dentro del recorrido de las aguas subterráneas. Ver fig. 28 y fig.29.

**Figura 27: Mapa Geológico del Área de Estudio.**



Fuente: Servicio Geológico Minero (SERGEOMIN).

**Tabla 8: Leyenda Geológica.**

ERA	Sistema	Formación	Tipo depósitos o rocas	Características
CENOZOICO	CUATERNARIO		Depósitos Coluvio-fluvio	Material suelto de cantos, gravas, arenas, limos y arcillas.
			Depósitos Fluviales	Gravas, arenas, limos y arcillas.
			Depósitos Fluvio-Lacustre	Gravas, arenas, limos y arcillas.
		Zona de Estudio		Material semiconsolidado de cantos, gravas, arenas, limos y arcillas.
			Depósitos Lacustres	Permeabilidad moderada a buena
			Conos Aluviales	

Fuente: Investigación de aguas subterráneas del Valle Central de Tarija (1979-1980).

Tabla 9: Características Hidrogeológicas de las Rocas del Área de Estudio.

ERA	Sistema	Formación	Tipo depósitos o rocas	Permeabilidad
CENOZOICO	CUATERNARIO	Zona de estudio	Depósitos Coluvio-fluvio	Buena permeabilidad
			Depósitos Fluviales	Buena permeabilidad
			Depósitos Fluvio-Lacustre	Permeabilidad moderada a mala
			Depósitos Lacustres	Permeabilidad mala
			Conos	Permeabilidad moderada a buena
			Aluviales	buena

Fuente: Investigación de aguas subterráneas del Valle Central de Tarija (1979-1980).

### 3.3 HIDROGEOLOGÍA

#### 3.3.1 Descripción de los acuíferos

El área de estudio que forma parte del Valle central de Tarija, está formado por acuíferos del **Paleozoico** y **Cuaternario**.

##### ❖ Acuífero Cuaternario.

Los acuíferos más accesibles ocupan los depósitos cuaternarios de origen fluvio-lacustre, que rellenan la parte **central** de la **cuenca** alta. Constan de un acuífero freático delgado y somero que no recoge un recurso notable y de formaciones acuíferas más potentes, con un espesor de **60 a 120 m**. que se hallan a mayor profundidad; el nivel piezométrico se establece a una profundidad de 30-60 m, que todavía puede ser aceptable para el bombeo. (Pasig R. et al, 2018)

En el área Tarija- San Luís hay pozos surgentes y el nivel piezométrico inicialmente se encontraba 8,00 m sobre el nivel del suelo. Los depósitos sedimentarios en la cuenca de Tarija tienen una extensión aproximada de 435 Km<sup>2</sup>.

Estos sedimentos de origen fluvio-lacustre fueron depositados en varias lagunas que se formaron sucesivamente a lo largo de la cuenca. Por la disposición de estas lagunas los sedimentos se depositaron de distinta manera según la ubicación de las quebradas que confluían en la cuenca. (Pasig R. et al, 2018)

Estos depósitos se caracterizan por presentar dos miembros diferenciales: El primer miembro basal que tiene sedimentos pelíticos y donde la ocurrencia de lentes arenosos es muy escasa. Hacia el tope de este miembro se pueden apreciar algunos horizontes blanquecinos de cenizas volcánicas, supra yaciendo a este miembro se encuentra una secuencia donde los lentes arenosos y gravosos aumentan en espesor.

Estas gravas difieren según la ubicación, puesto que, mientras en los alrededores de San Lorenzo se pueden observar gravas con clastos de cuarcita y matriz arenosa de coloración rojiza, en otras partes como en Tolomosa la composición de estas gravas varía debido a las rocas de las cuales provienen. (Pasig R. et al, 2018)

#### ❖ **Acuífero paleozoico**

El agua subterránea se encuentra en distintos acuíferos. El más importante abarca la ladera occidental de la Alta Cuenca y está constituido por extensas formaciones **paleozoicas** cámbricas de **areniscas** y **cuarcitas**. (Pasig R. et al, 2018)

Pero debido a su profundidad, a la dureza de las rocas y al carácter aleatorio de la figuración, este acuífero si bien no se lo conoce exactamente, actualmente son muy pocos los pozos, que lo explotan con capas por debajo de los **160m de profundidad**.

Este acuífero tiene una permeabilidad secundaria, debido a que está conformado por areniscas y cuarcitas que se encuentran fracturadas, donde se acumula el agua que se infiltra de las precipitaciones pluviales. (Pasig R. et al, 2018)

Los últimos pozos perforados en el “Valle Central de Tarija”, son los que están captando agua de las capas profundas correspondientes al acuífero paleozoico, con buenos caudales y agua de excelente calidad. (Pasig R. et al, 2018)

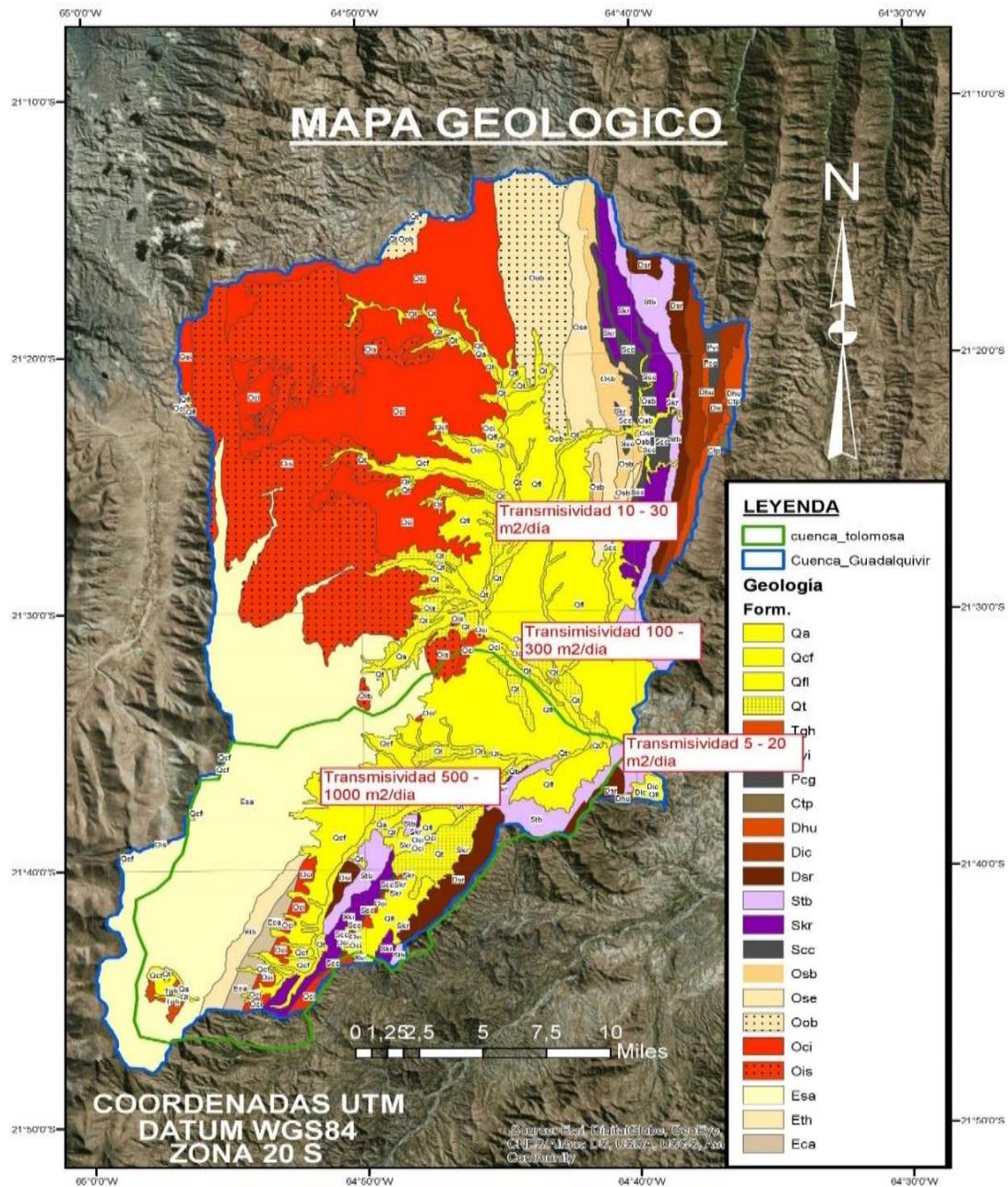
### **3.3.2 Características hidrogeológicas de los acuíferos del área de estudio**

#### **3.3.2.1 Transmisividad**

Parámetro que nos indica la facilidad del agua para circular horizontalmente por una formación geológica es una combinación de la Conductividad Hidráulica (Permeabilidad) y del espesor.

La Investigación preliminar del Origen y Dinámica del agua subterránea en el Valle central de Tarija, elaboró un mapa de transmisividad del Valle Central de Tarija. Ver fig. 28.

**Figura 28: Mapa de Transmisividad en el Valle Central de Tarija.**



Fuente: Origen y Dinámica del Agua Subterránea en el Valle Central de Tarija, Bolivia (2018).

### **Las características hidrogeológicas de los acuíferos cuaternarios:**

Según (Pasig R. et al, 2018) estas características de los acuíferos son:

- ✓ **Regulares:** en el área de la ciudad de Tarija
- ✓ **Desfavorables:** en la parte Norte y Este del valle (**sector Sella-Santa Ana**). Estas dos áreas presentan una transmisividad de **10-50 m<sup>2</sup>/día** y una capacidad específica de **0.05 l/s/m**.
- ✓ Aceptables a buenas: en la zona del viejo cauce del río Guadalquivir, identificado por la geofísica bajo la cuenca del río El Monte. La transmisividad es de **500 m<sup>2</sup>/día** y la capacidad específica de **3.10 l/s/m**.
- ✓ Buenas: en los aluviones de la zona de la Victoria, Bella Vista y Equis.

#### **3.3.2 Áreas de Recargas.**

Una recarga importante ocurre en el lado de la **Cordillera de Sama**, debido a las altas precipitaciones y a una buena permeabilidad de las cuarcitas paleozoicas, esta escorrentía subterránea es el origen de numerosos manantiales y del flujo base en el curso superior de los ríos perennes, además parte de las aguas infiltradas siguen subterráneamente, por conexión hidráulica directa, hacia los acuíferos de los depósitos cuaternarios. (Pasig R. et al, 2018)

Estos acuíferos cuaternarios se benefician también de la infiltración directa de las lluvias, de la escorrentía durante la época lluviosa, infiltración de flujo base y de las pérdidas de agua de los sistemas de riego.

La recarga, estimada en base a las variaciones del nivel freático, alcanza los 45,1 Hm<sup>3</sup>. Los aportes subterráneos en la zona central de Tarija se estiman en 0,50 m<sup>3</sup>/s, o sea, 15,7 Hm<sup>3</sup>/año. Como se puede observar, el flujo de recarga hacia la parte central y baja de la cuenca es bastante bajo; debido a las características hidrogeológicas medianas de los sedimentos, estos datos de cálculo de recarga, fueron calculados en base a los pozos poco profundos; con seguridad que un nuevo proyecto de investigación tomará en cuenta los datos de los nuevos pozos profundos, lo que podrá

hacer cambiar los datos de la disponibilidad del agua subterránea, utilizando los acuíferos multicapas, existentes a mayor profundidad. (Pasig R. et al, 2018)

Efectivamente, mucha agua infiltrada sale de nuevo en los ríos y manantiales después de la época de lluvia. El valor de la recarga de 45,1 Hm<sup>3</sup> es muy inferior a los 71,36 Hm<sup>3</sup> de flujo base calculado en la estación de Obrajes. La diferencia corresponde a la contribución de las formaciones paleozoicas. (Pasig R. et al, 2018)

La zona de recarga se encuentra en los bordes del relleno cuaternario donde la granulometría de los sedimentos es más gruesa y por lo tanto el terreno es favorable para la infiltración de las aguas superficiales que bajan de las serranías circundantes. Esta acumulación de sedimentos gruesos conforma varios conos aluviales en las diferentes quebradas que bajan hacia el centro de la cuenca.

Los conos aluviales de mejor desarrollo y de mayor extensión en la cuenca se encuentran en la subcuenca del río Tolomosa donde se pueden apreciar fácilmente formas muy comunes de abanicos. Aparte de la zona anteriormente mencionada las terrazas que se formaron en los bordes de los ríos y quebradas y el material acumulado en la llanura aluvial de estos, por sus características litológicas, son también zonas de recarga aunque con menor infiltración.

Por las características de la cuenca (predominancia de sedimentos pelíticos) no se encuentran demasiados puntos donde el acuífero descargue, sin embargo, al sur de la ciudad se localizan algunos puntos donde la descarga se produce naturalmente por algunos ojos de agua. Las perforaciones realizadas en las cercanías de San Luis y San Blas dieron como resultado numerosos pozos surgentes.

La Reserva Biológica de Sama, es la principal fuente de recarga de agua subterránea, constituida por cadenas montañosas con alturas que llegan hasta los 4.700m, dando origen a importantes cursos de agua. Desde el punto de vista hidrológico, el territorio de la reserva es parte de la cuenca de Tajzara y la del Guadalquivir, siendo esta última la que abastece de agua para consumo humano y riego a la ciudad de Tarija y las poblaciones rurales menores.

Uno de los principales roles que cumple la Reserva es la provisión de agua para consumo y riego a la ciudad de Tarija y a poblaciones rurales menores, conserva la capacidad productiva de las cuencas y subcuencas hidrográficas de los ríos Tolomosa, Camacho y Guadalquivir.(Pasig R. et al, 2018).

La Reserva cuenta con 24 cursos de agua que alimentan todo el sistema hidrográfico del Valle Central de Tarija. Este aporte cubre las necesidades de agua potable y riego para 160.000 personas y sustenta el desarrollo de la mayor parte de las actividades productivas de la región.

La vegetación de las cabeceras de las cuencas hidrográficas cumple la función de retener la humedad para luego alimentar continuamente a las vertientes de agua, quebradas y ríos. Su deterioro pone en riesgo al preciado recurso hídrico y consecuentemente a la actividad económica y productiva de todo el Valle Central.

**Figura 29: Nacientes del Río San Andrés al Pie de la Serranía de Sama.**



Fuente:[https://www.academia.edu/20100846/RESUMEN\\_EJECUTIVO](https://www.academia.edu/20100846/RESUMEN_EJECUTIVO)

### **3.3.3 Áreas de descargas**

Las descargas de las aguas subterráneas en tanto, se producen, a través de numerosos manantiales que se sitúan en los flancos de las serranías y aportan a sus niveles de base locales.

Dichos manantiales alumbran a la superficie ya sea a través de un estrato portador que ha sido cortado por un proceso erosivo o un disloque tectónico, o a través de permeabilidad secundaria (lineamientos, diaclasas o fallas), que conectarían el acuífero conductor con la superficie libre del terreno, la descarga también se produce a través de varios pozos. (Pasig R. et al, 2018)

En el mismo estudio CODETAR-NACIONES UNIDAS en 1978-80, fueron inventariados 36 manantiales, de los que 24 son utilizados para riego y consumo humano y los 12 restantes tienen caudales despreciables.

Casi todos los manantiales están ubicados en el sector derecho del valle y sus caudales acumulados en el periodo de estiaje llegan a los 0,108 m<sup>3</sup>/s que, junto a los 0,53 m<sup>3</sup>/s, del flujo base de Obrajes, están muy lejos del requerimiento de agua para riego que alcanza 1,4 m<sup>3</sup>/s. (Pasig R. et al, 2018)

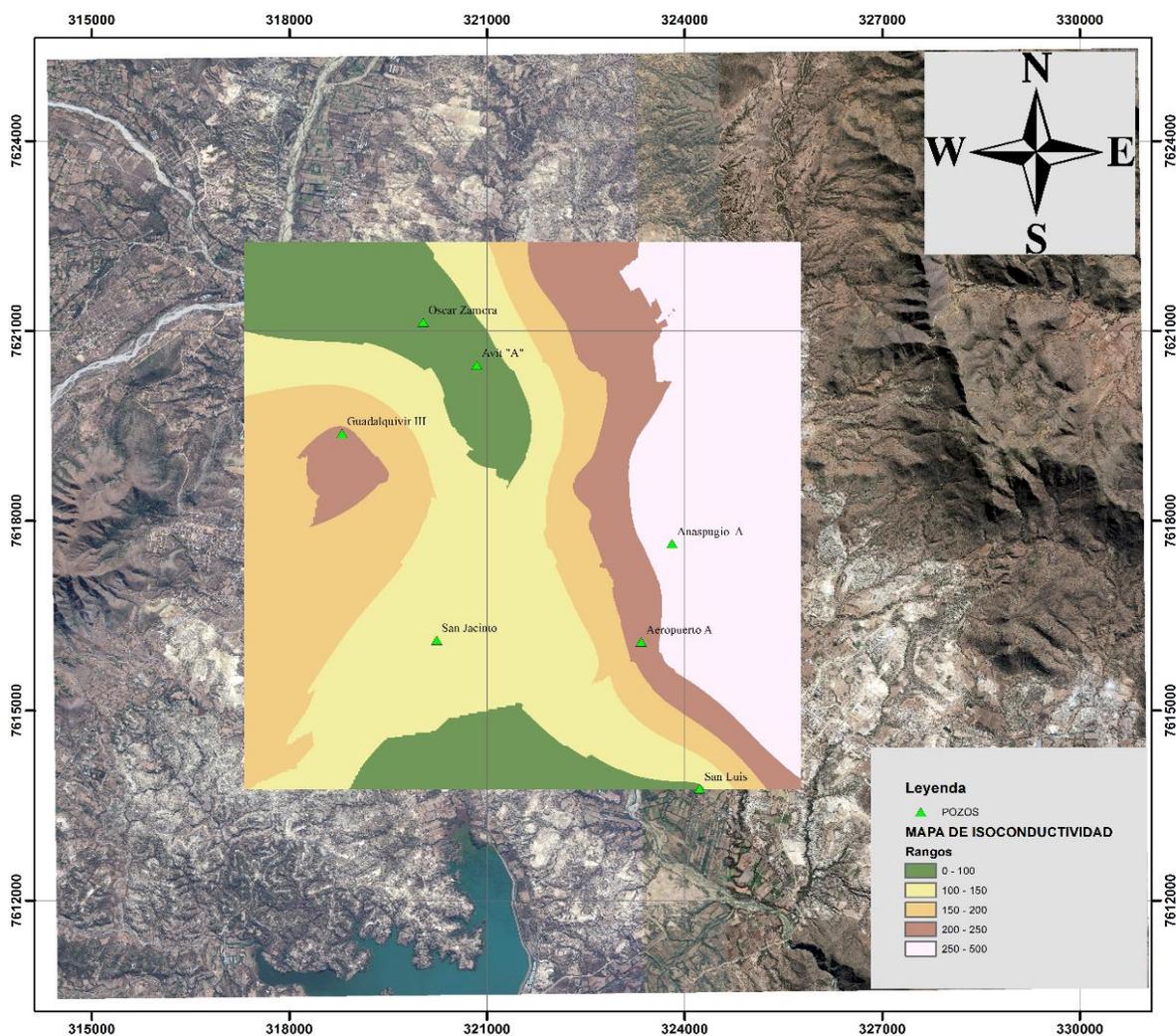
**CAPITULO 4**  
**PARTE EXPERIMENTAL**

## 4.1 PROCESO METODOLÓGICO

### 4.1.1 IDENTIFICACION PARA LA TOMA DE MUESTRAS

Para la elección del sitio y número de muestras se consideró los siguientes factores: Conductividad y profundidad del pozo. (Ver anexos 1). Mediante los informes de Laboratorio de los pozos en funcionamiento de la gestión 2018, se extrajo los datos de conductividad, para elaborar el mapa de isoconductividad con el programa ArcGis 10.3.1. Ver Figura 30.

**Figura 30: Mapa de Iso-Conductividad**



Fuente: Elaboración Propia

El mapa de isoconductividad, mediante su zonificación permitió seleccionar los siguientes pozos. Ver Tabla 10.

**Tabla 10: Pozos Seleccionados**

Pozos Seleccionados		
Guadalquivir III	Anaspugio "A"	San Luis
Oscar Zamora	Aeropuerto "A"	
Avit "A"	San Jacinto	

Fuente: Elaboración propia

**Figura 31: Ubicación espacial de los pozos seleccionados.**



Fuente: Elaboración propia.

Después de la selección de los pozos se procedió a hacer el respectivo plan de muestreo en campo que consiste en realizar caracterización de las aguas subterráneas de los pozos que concesiona COSAALT, mediante mediciones de conductividad, temperatura y pH.

### 4.3 METODOLOGÍA DE MUESTREO

El presente trabajo de investigación se lo realizó en la época de lluvia, y el método aplicado se basó de acuerdo al procedimiento de lo establecido en Norma Boliviana (NB 496) “**Toma de muestras**”.

#### 4.3.1 Envase

Se utilizaron botellas plásticas de 2 litros; previa a la toma de muestra, se enjuago tres veces con el agua de muestrear.

Cinta Masking y Marcador de agua.

#### 4.3.2 Instrumento utilizado para el muestreo en Campo

##### ❖ **Multiparamétrico.**

Aparato que sirve para medir múltiples parámetro **físico-químicos** en **campo**, de fácil transporte y uso.

Mediante el uso del multiparamétrico se pudo determinar parámetros físicos en cada pozo como: Conductividad, pH y temperatura. Ver Figura 32.

**Figura 32: Multiparamétrico.**



Fuente: Elaboración propia

### 4.3.3 Toma de muestras

**Figura 33: Homogeneización del pozo.**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 34: Muestreo.**



Fuente: Elaboración propia.

Finalizado el muestreo se colocaron las muestras en un refrigerador a **temperatura media**, para que al día siguiente se lleven las muestras al **CEANID** (Laboratorio del Centro de Análisis Investigación y Desarrollo), ubicado en el campus universitario de la Universidad Juan Misael Saracho.

#### **4.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE CAMPO EN LOS POZOS.**

##### **❖ 4.3.1 Pozo Guadalquivir**

Este pozo se encuentra ubicado en la zona Nor-Oeste de la ciudad de **Tarija**.

X=319217,78; Y=7619071,7; Z=1933 m.s.n.m.

Su caudal promedio es de **5,1 l/s** de agua. Para la caracterización física del pozo, se visitó su caseta de control, en donde se abrió una de sus válvulas, dejando caer agua hasta su homogenización. Posteriormente se tomó la muestra en un balde, para caracterizarla con el multiparamétrico. Ver Tabla 11.

**Tabla 11: Pozo Guadalquivir.**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor medido</b>
PH	-	7,67
Temperatura	°C	22,1
Conductividad	us/cm	237,1
Profundidad Pozo	m	109

Fuente: Elaboración propia.

##### **❖ Oscar Zamora**

Este pozo se encuentra ubicado en la zona Norte de la ciudad de Tarija

X=320031,44; Y=7621140,15; Z=1922 m.s.n.m.

Su caudal promedio es de **14,3 l/s** de agua. Para la caracterización física del pozo, se visitó su caseta de control, donde se abrió una de sus válvulas, dejando caer agua hasta su homogenización. Posteriormente se tomó la muestra en un balde, para caracterizarla con el multiparamétrico. Ver Tabla 12.

**Tabla 12: Pozo Oscar Zamora.**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor medido</b>
PH	-	7,49
Temperatura	°C	20,2
Conductividad	us/cm	57,32
Profundidad Pozo	m	132

Fuente: Elaboración propia.

#### ❖ **Avit “A”**

Este pozo se encuentra ubicado en la zona noreste de la ciudad de Tarija

X=321035; Y=7620850; Z=1916 m.s.n.m.

Su caudal promedio es de 18,5 l/s de agua. Para la caracterización física del pozo, se visitó su caseta de control, donde se abrió una de sus válvulas, dejando caer agua hasta su homogenización. Posteriormente se tomó la muestra en un balde, para caracterizarla con el multiparamétrico. Ver Tabla 13.

**Tabla 13: Pozo Avit “A”.**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor medido</b>
PH	-	7,78
Temperatura	°C	21,2
Conductividad	us/cm	78,87
Profundidad Pozo	m	121

Fuente: Elaboración propia.

#### ❖ **San Luis**

Este pozo se encuentra ubicado en la zona sureste de la ciudad de Tarija

X=324237.37; Y=7613758.3; Z=1830 m.s.n.m.

Su caudal promedio es de 13 l/s de agua. Para la caracterización física del pozo, se visitó su caseta de control, donde se abrió una de sus válvulas, dejando caer agua hasta su homogenización. Posteriormente se tomó la muestra en un balde, para caracterizarla con el multiparamétrico. Ver Tabla 14.

**Tabla 14: Pozo San Luis.**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor medido</b>
PH	-	7,1
Temperatura	°C	22,2
Conductividad	us/cm	41,78
Profundidad Pozo	m	105,5

Fuente: Elaboración propia.

#### ❖ **Anaspugio “A”**

Este pozo se encuentra ubicado en la zona sureste de la ciudad de Tarija

X=323809,49; Y=7617642.77; Z=1894 m.s.n.m.

Su caudal promedio es de 8,1 l/s de agua. Para la caracterización física del pozo, se visitó su caseta de control, donde se abrió una de sus válvulas, dejando caer agua hasta su homogenización. Posteriormente se tomó la muestra en un balde, para caracterizarla con el multiparamétrico. Ver Tabla 15.

**Tabla 15: Pozo Anaspugio “A”.**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor medido</b>
PH	-	7,74
Temperatura	°C	23,3
Conductividad	us/cm	287,1
Profundidad Pozo	m	220

Fuente: Elaboración propia.

#### ❖ **Aeropuerto “A”**

Este pozo se encuentra ubicado en la zona sureste de la ciudad de Tarija

X=323338.81; Y=7617564.32; Z=1878 m.s.n.m.

Su caudal promedio es de 11,6 l/s de agua. Para la caracterización física del pozo, se visitó su caseta de control, donde se abrió una de sus válvulas, dejando caer agua hasta su homogenización. Posteriormente se tomó la muestra en un balde, para caracterizarla con el multiparamétrico. Ver Tabla 16.

**Tabla 16: Pozo Aeropuerto “A”.**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor medido</b>
PH	-	7,76
Temperatura	°C	23,9
Conductividad	us/cm	242,37
Profundidad Pozo	m	188

Fuente: Elaboración propia.

#### ❖ **San Jacinto**

Este pozo se encuentra ubicado en la zona sur de la ciudad de Tarija

X= 320256,63 ; Y=7616126,51; Z=1890 m.s.n.m.

Su caudal promedio es de 16 l/s de agua. Para la caracterización física del pozo, se visitó su caseta de control, donde se abrió una de sus válvulas, dejando caer agua hasta su homogenización. Posteriormente se tomó la muestra en un balde, para caracterizarla con el multiparamétrico. Ver Tabla 17.

**Tabla 17: Pozo San Jacinto.**

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor medido</b>
PH	-	7,9
Temperatura	°C	23,9
Conductividad	us/cm	109,58
Profundidad Pozo	m	215

Fuente: Elaboración propia, 2019.

#### **4.5 RESULTADOS DEL LABORATORIO (C.E.A.N.I.D.)**

Los informes de los resultados elaborados por el Laboratorio de Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID), se adjunta en Anexos 2.

De los Anexos 2, se realizó un resumen de los resultados de los siete pozos en estudio Ver Tabla 18.

**Tabla 18: Resultados de Parámetros Químicos de los Pozos de Estudio.**

Nombre del Pozo	Parámetros Químicos							
	Bicarbonatos (mg/l)	Calcio (mg/l)	Cloruros (mg/l)	Magnesio (mg/l)	Nitrato (mg/l)	Potasio (mg/l)	Sodio (mg/l)	Sulfato (mg/l)
Oscar Zamora	16.1	7.53	10.97	2.87	0.18	0.45	6.31	15.68
Avit A	17.2	5.27	11.07	2.13	0.13	0.61	12.1	18.3
Anaspugio "A"	51.74	18.83	14.17	6.12	0.38	1.74	33.6	75.13
Aeropuerto "A"	47.57	12.81	13.87	4.09	0.13	1.76	34.7	72.09
Guadalquivir III	69.53	27.07	14.27	9.1	0.06	3.04	40.3	106.16
San Jacinto	35.13	9.23	10.37	3.38	0.05	1.47	25.5	42.24
San Luis	10.25	4.52	7.98	1.24	0.10	0.39	6.22	9.70

Fuente: Elaboración Propia.

#### 4.6 VALIDACIÓN DE RESULTADOS DE LABORATORIO.

Para realizar las tipificaciones y determinar la calidad del agua subterránea, antes se debe realizar la validación de resultados de laboratorio de CEANID (Laboratorio de Centro de Análisis Investigación y Desarrollo).

La validación de resultados, se determina mediante el **balance iónico** y la verificación de **relaciones** entre **algunos iones**, que señalan si la muestra de agua fue analizada correctamente y si los resultados son **confiables**.

##### 4.6.1 Error de Balance de Iónico.

Mide la diferencia entre el total de aniones y cationes expresados en mili equivalentes por litro (meq/L), determinados analíticamente. El **error** del balance iónico, se define según la ecuación 5, y es parte de un requerimiento mínimo que debe hacerse dentro de la evaluación de parámetros químicos.

$$Error(\%) = \frac{(\Sigma cationes - \Sigma aniones)}{(\Sigma cationes + \Sigma aniones)} * 100 \quad \text{Ecuación 5.}$$

✓ Los rangos de error para aceptar o no el análisis de una muestra de agua, dependen del valor de conductividad eléctrica (Custodio y Llamas, 1976). Ver Tabla 19.

**Error Aceptable en Balance Iónico según Conductividad.**

Conductividad eléctrica (us/cm)	50	200	500	2000	>2000
Error aceptable (%)	± 30	± 10	± 8	± 4	± 4

Fuente: Hidrología Subterránea (Custodio y Llamas, 1983)

✓ Según Hem (1985) un porcentaje de error de balance de iónico por debajo del ± 10% es reflejo de que los datos obtenidos son confiables desde el punto de vista geoquímico.

✓ Otras relaciones de evaluación de análisis químicos son las siguientes:

$$\text{Na}^+ (\text{meq/l}) > \text{K}^+ (\text{meq/l})$$

$$\text{Ca}^{2+} (\text{meq/l}) \geq \text{Mg}^{2+} (\text{meq/l})$$

$$\text{Ca}^{2+} (\text{meq/l}) \geq (\text{SO}_4)^{2-} (\text{meq/l})$$

$$\text{Na}^+ (\text{meq/l}) \geq \text{Cl}^- (\text{meq/l})$$

#### 4.6.2 Resultados de Balance Iónico en los Pozos.

En la siguiente tabla se adjunta los resultados de error de balance iónico en las muestras en los pozos de estudio. Ver Tabla 20.

El procedimiento para la determinación del error de balance iónico se encuentra en Anexos 3.

**Tabla 19: Error del Balance Iónico en los Pozos de Estudio.**

Pozo	Error del balance iónico (%)
Avit A	0,148
Oscar Zamora	-0,243
Anaspugio "A"	2,27
Aeropuerto "A"	-2,27
San Jacinto	-1,138
San Luis	0,965
Guadalquivir III	3,099

Fuente: elaboración propia

Mediante la tabla de error de electro iónico (%), se puede afirmar que los resultados determinados por el laboratorio de CEANID son consistentes, además se puede notar que el error de balance de iónico no supera el 3,1 (%), que es un valor muy aceptable en comparación a los valores propuesto (Custodio y llamas 1983 y Hem 1985).

# **CAPÍTULO V**

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## 5.1 TÉCNICAS HIDROGEOQUÍMICAS.

El manejo y estudio de análisis químico, puede simplificarse mediante el empleo de **gráficos** y **diagramas**, en especial cuando se trata de hacer comparaciones entre varios análisis de aguas de un mismo lugar o de diferentes lugares.

Estas gráficas y diagramas pueden poner de relieve las variaciones temporales, variaciones espaciales o bien resaltar las relaciones entre los iones de una misma muestra, (Custodio y Llamas, 1976),

## 5.2 DIRECCIÓN DE LOS FLUJOS SUBTERRÁNEOS (análisis de los sólidos disueltos totales [STD])

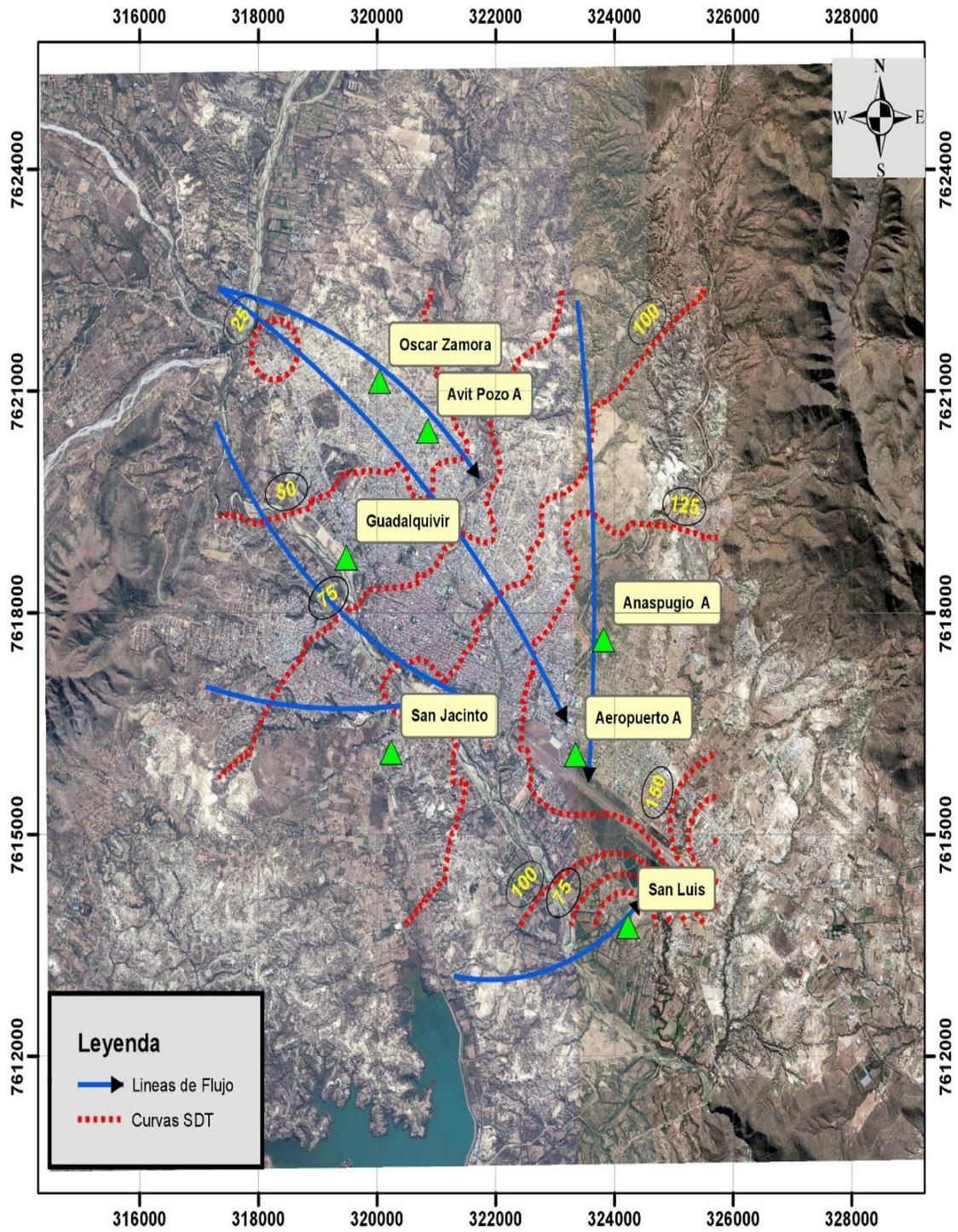
Conocer las direcciones de flujo es de suma importancia, para entender los procesos hidrogeoquímicos que gobiernan en los pozos de estudio de COSAALT.

Estudios importantes señalaron que el análisis de Sólidos disueltos totales (**SDT**) aporta información de la dirección y la extensión de flujos subterráneos.

Además afirman que las aguas con poca cantidad de Sólidos disueltos totales (**STD**) indican una reciente incorporación al sistema acuífero, mientras que una con mayor cantidad de (**STD**) implica un mayor recorrido del agua por el subsuelo y por tanto una mayor salinización.

Mediante lo informes de Laboratorio de COSAALT (**Anexos 1**), y ayuda del programa “**ArcGis 10.3.1**”, se determinó curvas acumuladas de SDT, el cual se unió con una flecha que indica la **dirección del flujo**, y **zona de descargas**.

**Figura 35: Líneas de Flujo Subterráneo.**



Fuente: Elaboración propia.

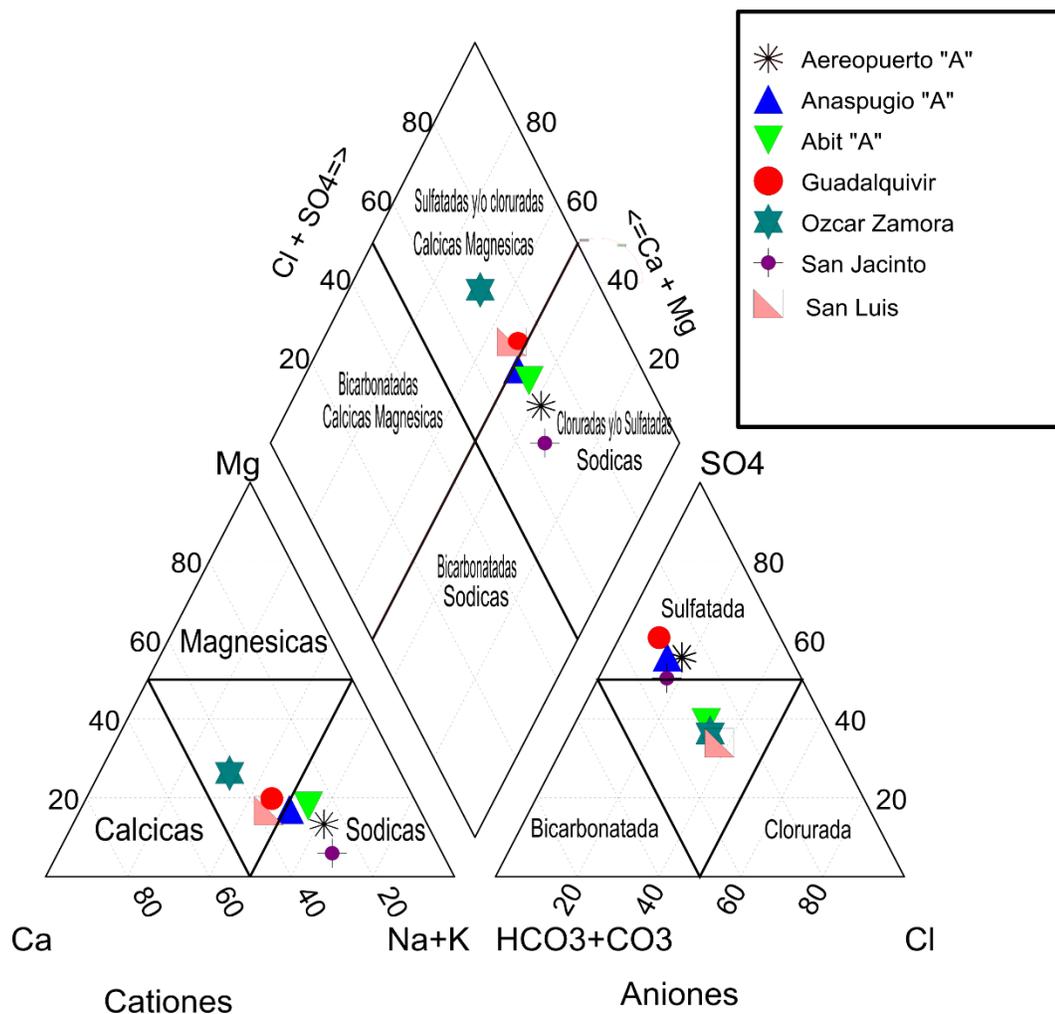
## 5.3 APLICACIÓN DE LOS DIAGRAMAS HIDROGEOQUÍMICOS

### 5.3.1 Aplicación de Piper

Con la idea de clasificar las 7 muestras de aguas subterráneas que están siendo objeto de estudio, se construyó el diagrama de Piper, mediante el programa Aquachem versión 14.2. Ver Fig.36

Mediante la clasificación para aguas agrícolas (SAR), se determinó con exactitud a qué familia de agua subterránea pertenece.

**Figura 36: Piper de los Pozos Seleccionados.**



Fuente: Elaboración propia

La clasificación para aguas agrícolas (**SAR**), determinó que las aguas de los pozos pertenecen a la familia (sulfatas y/o clorurada) y (sódica y/o magnésica), que es general.

Para tipificar con exactitud a qué tipo de agua pertenecen nuestros pozos, se utilizó la clasificación por **iones dominantes** descrita en el Capítulo 2.

Utilizando los resultados de laboratorio Tabla 18, se ordenó sus parámetros en función del (%) en (meq/l). Ver Tabla 21.

**Tabla 20: Clasificación por Iones Dominantes en los pozos de Estudio.**

<b>Pozos</b>	<b>Oscar Zamora</b>	<b>Avit "A"</b>	<b>Anaspugio "A"</b>	<b>Aeropuerto "A"</b>	<b>San Jacinto</b>	<b>San Luis</b>	<b>Guadalquivir III</b>
	% (meq/l)	% (meq/l)	% (meq/l)	% (meq/l)	% (meq/l)	% (meq/l)	% (meq/l)
% Ca <sup>2+</sup>	41,90	26,87	31,91	25,31	26,99	37,14	34,42
% Mg <sup>2+</sup>	26,29	17,88	17,07	13,30	5,97	16,77	19,05
% Na+k	31,81	55,25	51,02	61,39	67,04	46,08	46,53
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	% (meq/l)	% (meq/l)	% (meq/l)	% (meq/l)	% (meq/l)	% (meq/l)	% (meq/l)
(HCO <sub>3</sub> ) <sup>-</sup>	29,23	28,84	30,09	29,15	32,92	28,15	29,24
(SO <sub>4</sub> ) <sup>2-</sup>	36,18	39,00	55,52	56,14	50,31	33,86	59,84
Cl <sup>-</sup>	34,59	32,16	14,40	14,70	16,77	37,99	10,92
(NO <sub>3</sub> ) <sup>-</sup>							
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fuente: Elaboración propia

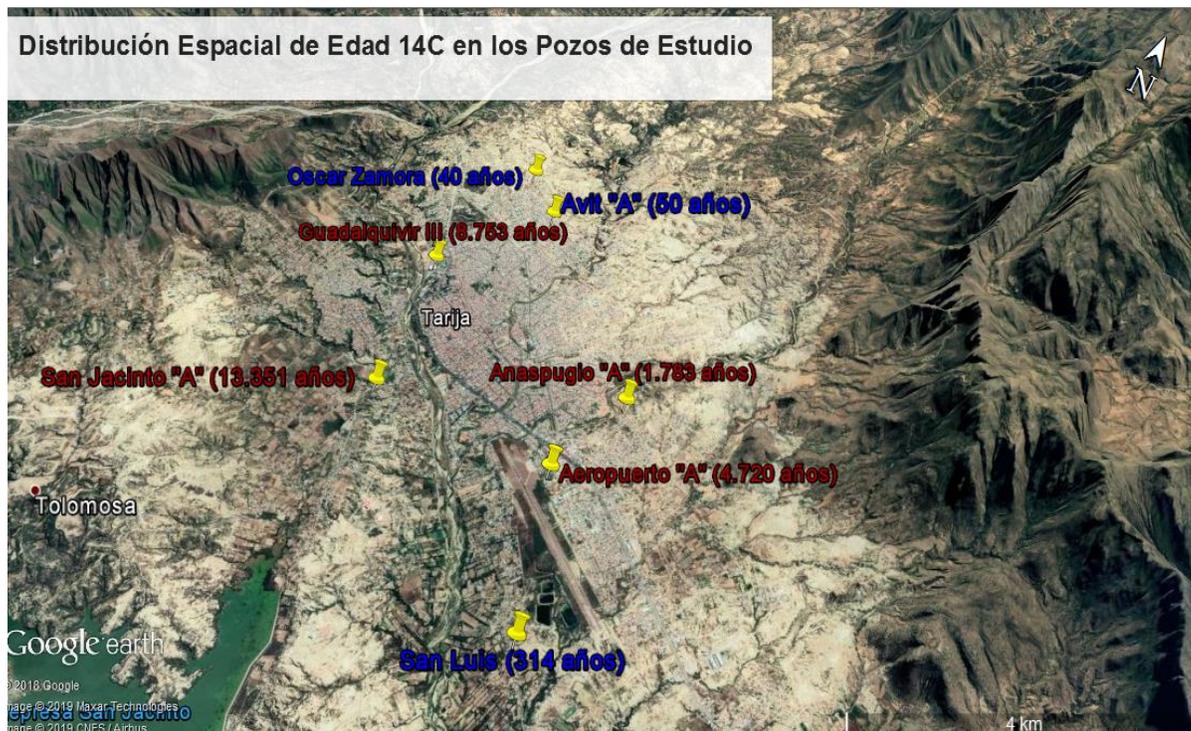
Con la tabla 21, se pudo tipificar los pozos según sus iones dominantes. Se elaboró la Tabla 22 donde indicamos el pozo y su tipo de agua.

**Tabla 21: Tipificación de los pozos de Estudio.**

<b>Pozos</b>	<b>Tipo de agua</b>
Anaspugio "A"	Sulfatada sódica
Aeropuerto "A"	Sulfatada sódica
San Jacinto	Sulfatada sódica
Guadalquivir III	Sulfatada sódica cálcica
Oscar Zamora	Sulfatada clorurada cálcica sódica
Avit "A"	Sulfatada clorurada sódica
San Luis	Clorurada sulfatada sódica cálcica

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 37: Distribución Espacial de Edad de  $^{14}\text{C}$  en los Pozos de Estudio.**



Fuente: Origen y Dinámica del Agua Subterránea en el Valle Central de Tarija, Bolivia, 2018

**Figura 38: Distribución Espacial de los Tipos de Agua en los Pozos de Estudio.**



Fuente: Elaboración propia.

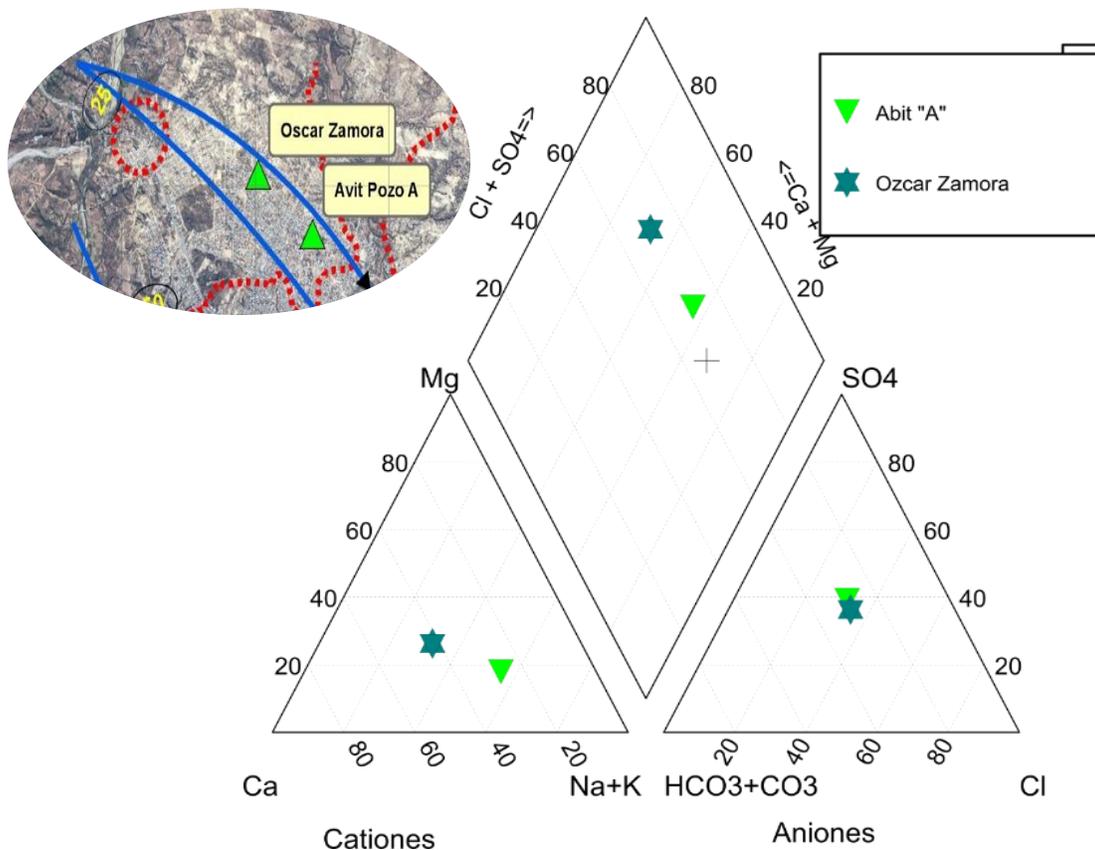
### 5.3.1.1 Análisis de Piper en pozos conectados

En este apartado se hará uso del diagrama de Piper, para determinar los fenómenos geoquímicos que ocurren en los pozos que se encuentran sobre la misma **línea de flujo** y los que **proviene de la misma área de recarga**.

#### ❖ Dirección de flujo del NO hacia SE “aguas provenientes de la cuenca de la Victoria”

En el transcurso del recorrido del flujo subterráneo de Nor-oeste hacia el Sur-este, se encuentran los pozos Oscar Zamora y Avit “A”; se deduce que sus aguas provienen del área de recarga de la cuenca de la Victoria y la formación de Sama. Se construyó un diagrama de Piper, para los pozos mencionados. Ver figura 39.

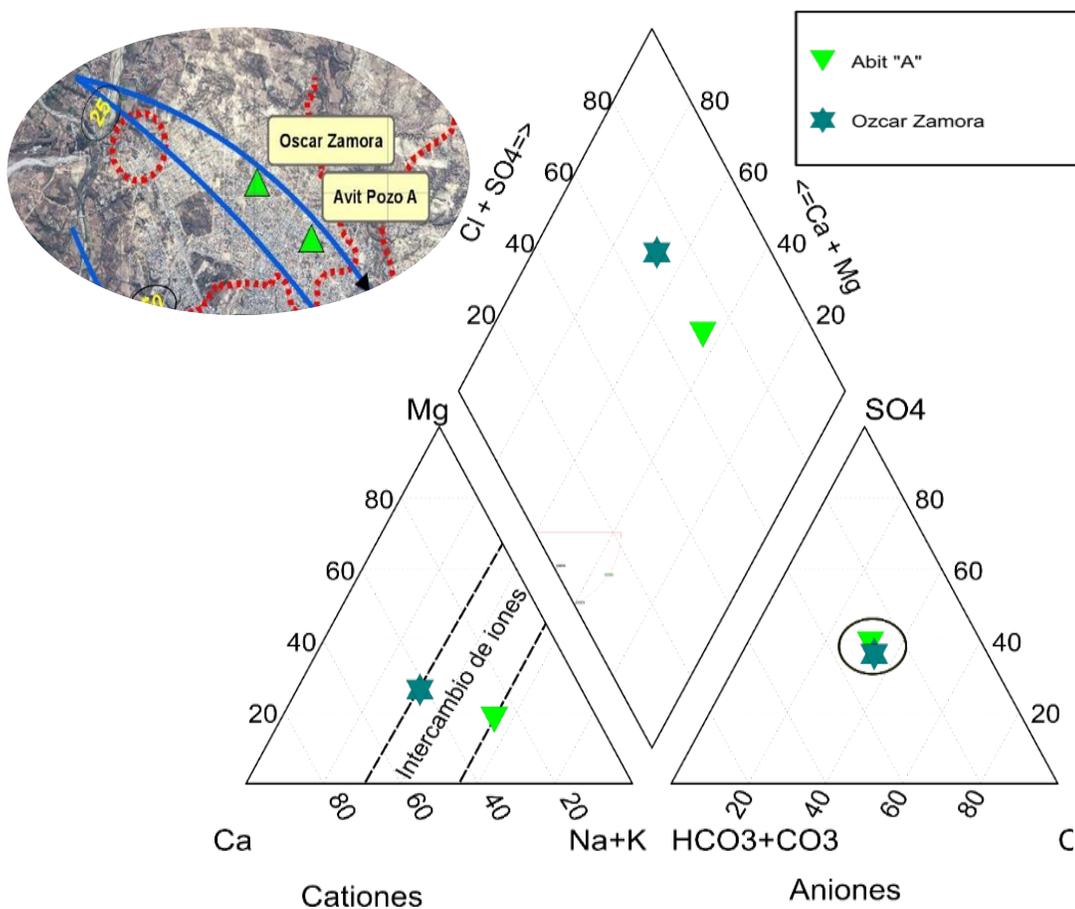
Figura 39: Piper pozo Avit “A” y Oscar Zamora



Fuente: Elaboración propia

Analizando el diagrama de Piper, se pudo observar en el diagrama de **Cationes** un desfase paralelo de los puntos representativos de las aguas de los pozos Oscar Zamora y Avit "A", mientras que en el diagrama de **Aniones** sus puntos representativos casi se sobreponen. Según (Custodio, 1965:1040), cuando se produce un desfase en el diagrama de cationes, y una sobreposición en el diagrama de Aniones; el fenómeno predominante de dichas aguas es un **intercambio iónico**. Ver Figura 40.

**Figura 40: Piper pozo Avit "A" y Oscar Zamora.**

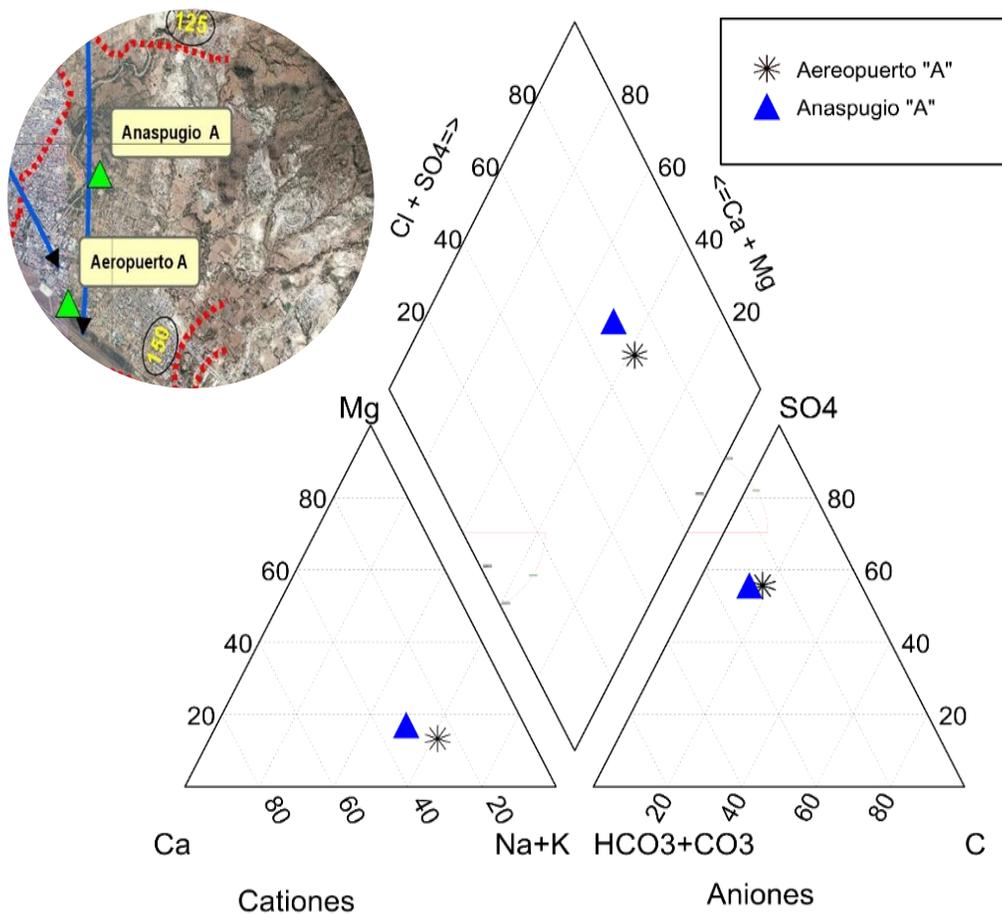


Fuente: Elaboración propia.

❖ **Dirección de flujo de N a S “Agua provenientes formación Santa Rosa, Tarabuco”**

En el transcurso del recorrido del flujo subterráneo Norte a Sur, se encuentran los pozos Anaspugio “A” y Aeropuerto “A”, provenientes de la área de recarga de las formaciones Santa Rosa y Tarabuco. Se construyó un diagrama de Piper, para los pozos mencionados, Ver Figura 41.

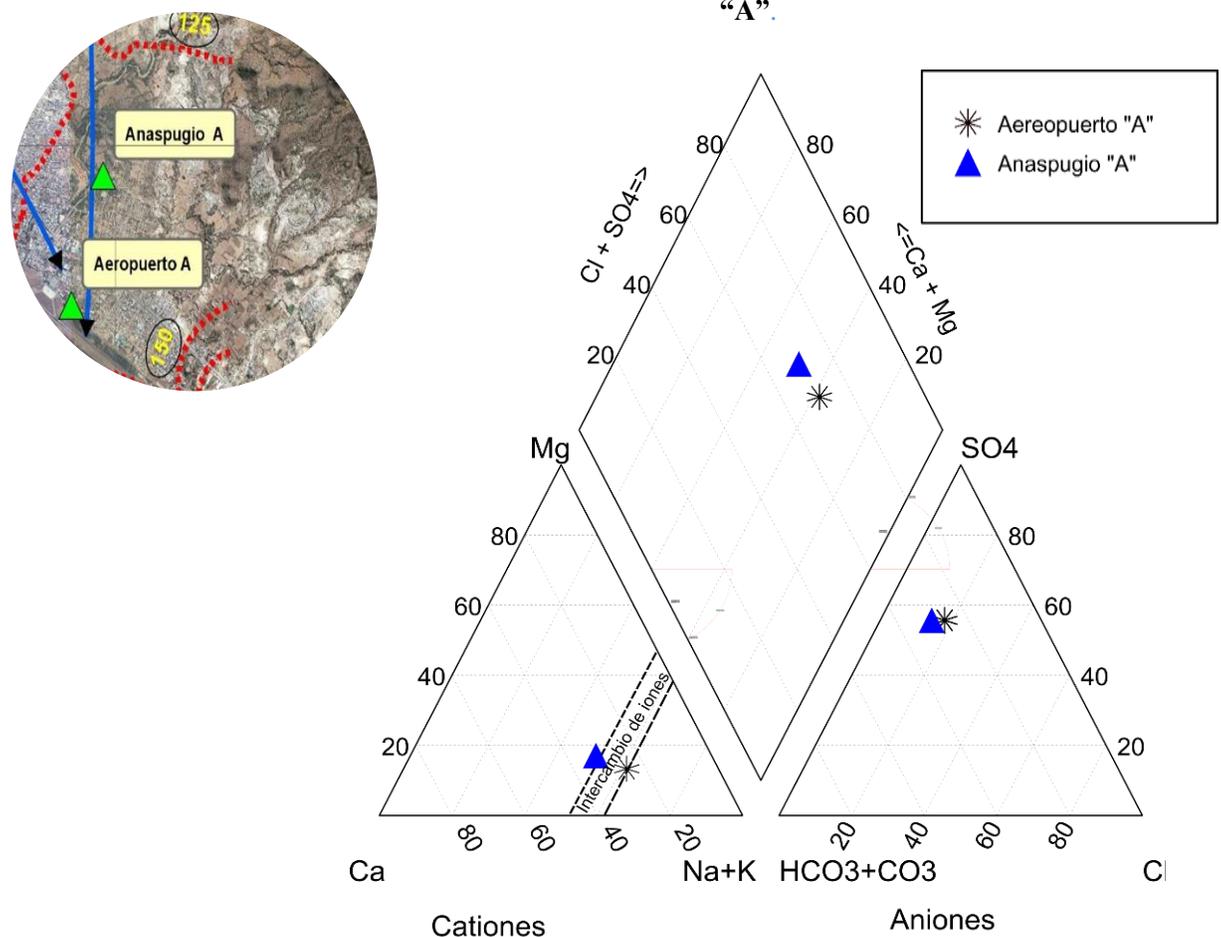
**Figura 41: Piper pozo Anaspugio “A” y Aeropuerto “A”.**



Fuente: Elaboración propia

Analizando el diagrama de Piper, se pudo observar en el diagrama de cationes un desfase paralelo de los puntos representativos de las aguas de los pozos Aeropuerto "A" y Anaspugio "A", mientras que en el diagrama de Aniones sus puntos representativos casi se sobreponen. Según (Custodio, 1965:1040), cuando se produce un desfase en el diagrama de cationes, y una sobreposición en el diagrama de Aniones, el fenómeno predominante es dichas aguas es un **Intercambio iónico**. Ver Figura 42.

Figura 42: Piper pozo Aeropuerto "A" y Anaspugio



Fuente: Elaboración propia

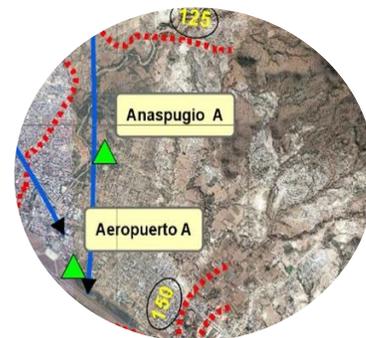
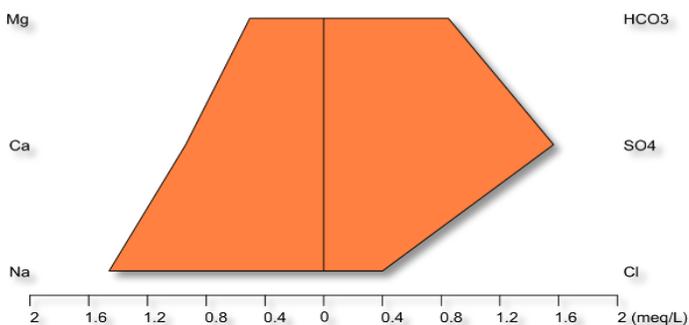
### 5.3.2 Aplicación de Stiff

Este diagrama nos permitirá apreciar rápidamente los valores de las relaciones iónicas, partiendo de punto neutro “cero” y así también podremos notar como varia las relaciones de los cationes y aniones conjuntamente de una o más muestras. Para establecer las variaciones entre dos o más muestras estas deben estar sobre la misma línea de flujo o provenir de la misma área de recarga.

❖ **Dirección de flujo de Norte a Sur “Agua provenientes formación Santa Rosa, Tarabuco”**

**Figura 43: Stiff Anaspugio “A”.**

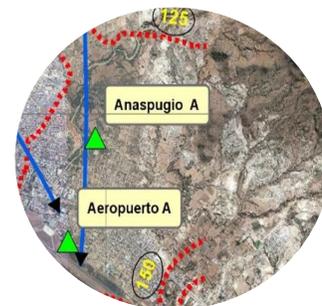
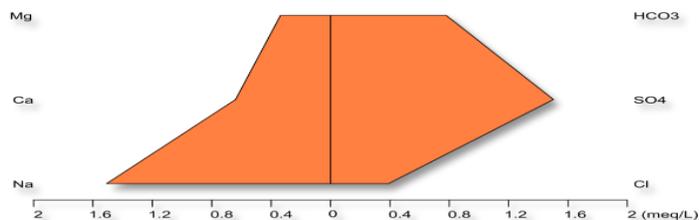
**Anaspugio "A"**



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 44: Stiff Aeropuerto “A”.**

**Aeropuerto "A"**



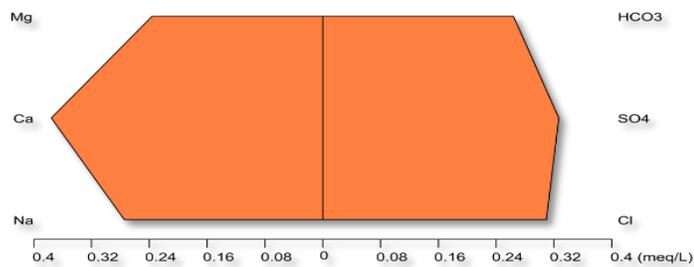
Fuente: Elaboración Propia

En el transcurso del recorrido del flujo subterráneo hacia al sur, se encuentran los pozos Anaspugio “A” y Aeropuerto “A”, provenientes de la área de recarga de las formaciones Santa Rosa y Tarabuco. Ver figuras 43 y 44.

Del pozo Anaspugio “A” a Aeropuerto “A” se nota una disminución de iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y un ligero aumento del ion  $\text{Na}^{1+}$ ; en cuanto a los aniones, existe un ligero aumento del ion  $(\text{SO}_4)^{2-}$ .

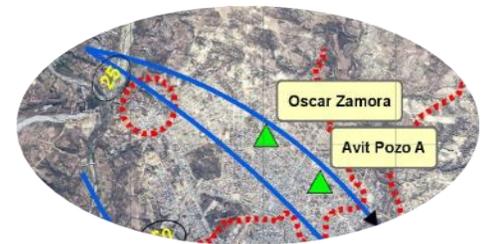
❖ **Dirección de flujo del NO hacia SE “aguas provenientes de la cuenca de la Victoria”**

**Ozcar Zamora**



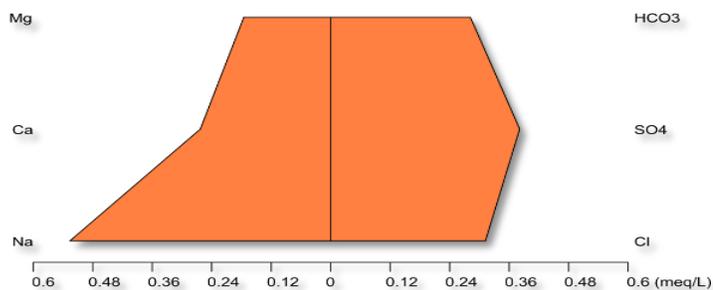
Fuente: Elaboración Propia

**Figura 45: Stiff pozo Oscar Zamora.**

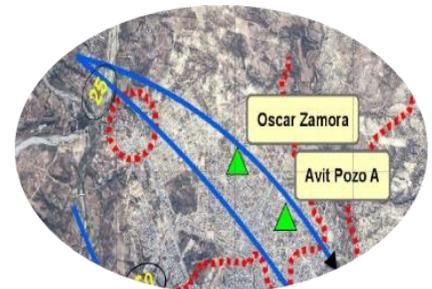


**Figura 46: Stiff Avit “A”.**

**Avit “A”**



Fuente: Elaboración Propia



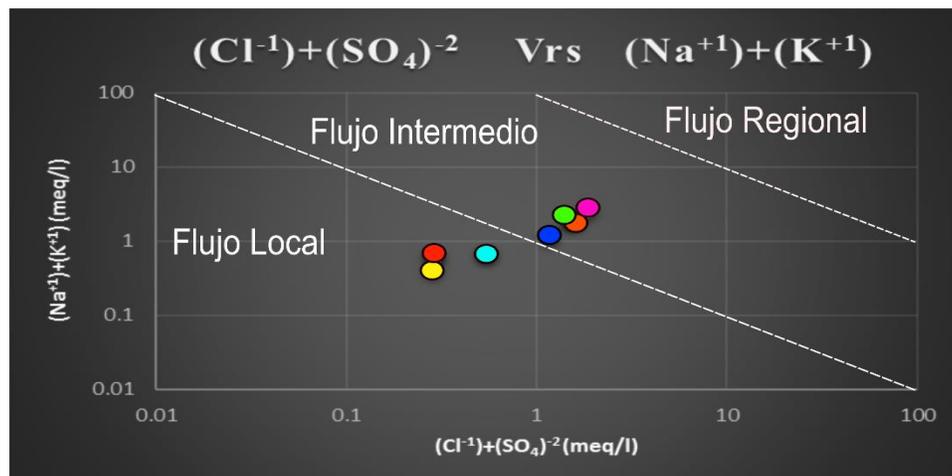
En el transcurso del recorrido del flujo subterráneo de Nor-oeste hacia el Sur-este, se encuentran los pozos Oscar Zamora y Avit "A", se deduce que sus aguas provienen del área de recarga de la cuenca de la Victoria y la formación de Sama. Ver figuras 45 y 46.

Analizando los Stiff de los pozos Oscar Zamora y Avit "A", es notoria una disminución de (meq/l) de los iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^{-1}$  y un aumento de (meq/l) de los iones  $\text{Na}^{1+}$  y  $(\text{SO}_4)^{2-}$ .

### 5.3.3 Aplicación de Mifflin

El diagrama de Mifflin distingue tres tipos de flujos que se presentan en las aguas subterráneas; con la construcción del diagrama pudimos determinar a qué tipo de flujo obedecen los pozos en estudio, Ver figura 47.

**Figura 47: Diagrama Mifflin.**



- Guadalquivir
- Aeropuerto "A"
- Anaspugio "A"
- San Jacinto
- Ozcar Zamora
- Avit "A"
- San Luis

Fuente: Elaboración Propia

Analizando la Fig.47, se clasifico las aguas de los pozos e en dos grupos.

**Grupo a)** Compuesto por los pozos Guadalquivir, Aeropuerto “A”, Anaspugio “A”, y San Jacinto que pertenecen a un flujo intermedio; Mifflin indica que estas aguas tienen una mayor evolución hidrogeoquímica dada así por el tiempo de permanencia con el medio geológico y la profundidad que se infiltraron.

La teoría de Mifflin se refuerza con la secuencia de Chevotareb descrita en el Cap.2 indica que flujos que se encuentren en un zona intermedia con recorridos más largos y tiempos de permanencia de cientos a miles de años, el anión predominante será el **sulfato (SO<sub>4</sub>)<sup>2-</sup>**. Esto corrobora la clasificación por iones dominantes Tabla 22, y con la edad de <sup>14</sup>C (**Carbono 14**) Tabla 1.

Mifflin indica que estas aguas tienen una mayor evolución hidrogeoquímica dada así por el tiempo de permanencia con el medio geológico y la profundidad que se infiltraron.

**Grupo b)** Compuesto por los pozos Oscar Zamora, Avit “A” y San Luis que pertenecen a un flujo local que tiende a intermedio; según Mifflin estas aguas son **poco evolucionadas**, y de reciente **infiltración**. (Ver tabla 23)

**Relación Tipo de Agua, Edad y Mifflin.**

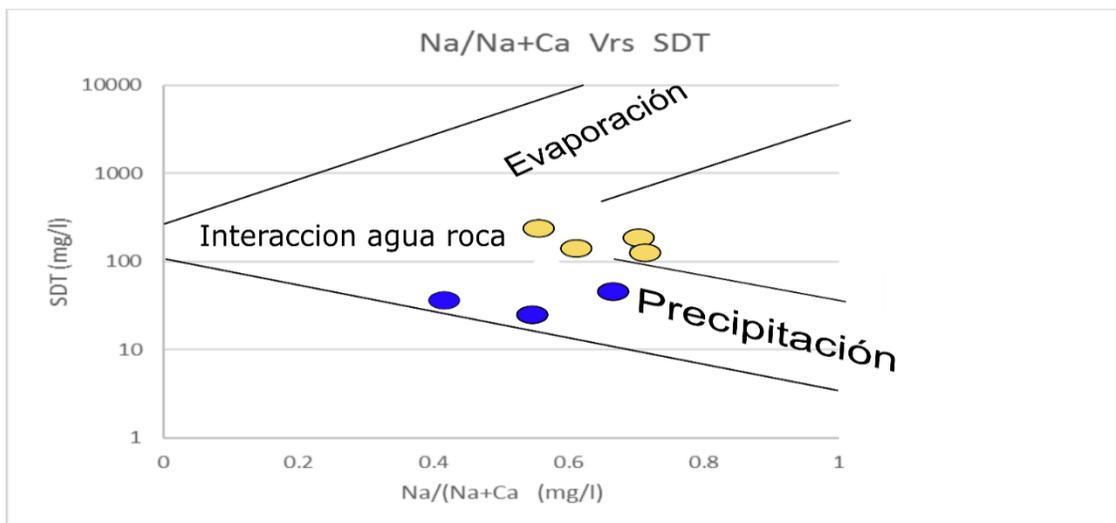
<b>Pozos</b>	<b>Tipo de agua en los pozos</b>	<b>Años de <sup>14</sup>C</b>	<b>Fenómeno de composición.</b>
Anaspugio “A”	Sulfatada sódica	1.783	Evolucionada.
Aeropuerto “A”	Sulfatada sódica	4.720	Evolucionada.
San Jacinto	Sulfatada sódica	13.351	Evolucionada.
Guadalquivir III	Sulfatada sódica cálcica	8.753	Evolucionada.
Oscar Zamora	Sulfatada clorurada cálcica sódica	40	Poco Evolucionada.
Avit "A"	Sulfatada clorurada sódica	50	Poco Evolucionada.
San Luis	Clorurada sulfatada sódica cálcica	314	Poco Evolucionada.

Fuente: Elaboración Propia

### 5.3.4 Aplicación de Gibbs

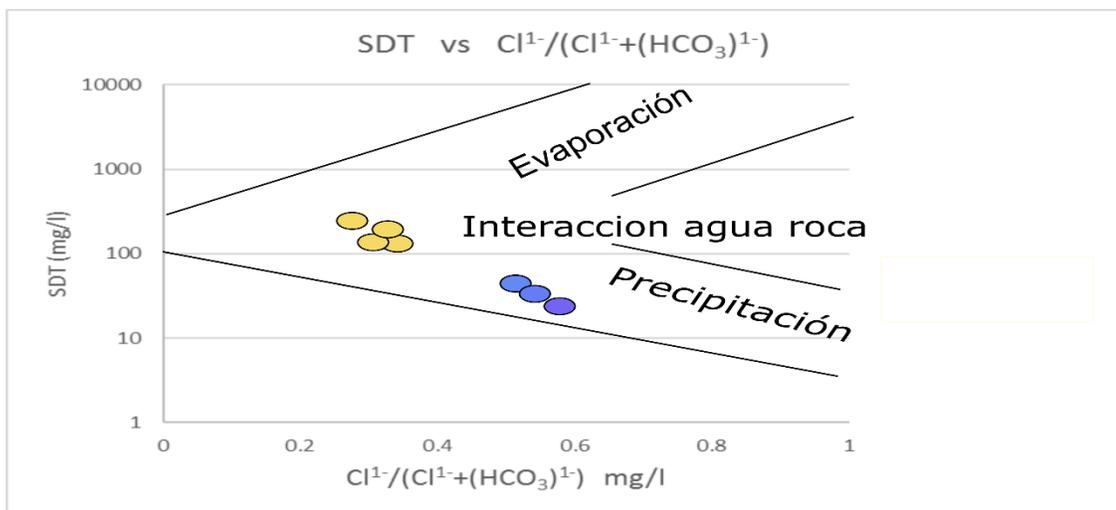
El diagrama de Gibbs determinará los posibles procesos que ocurren en la dinámica de las aguas de nuestros pozos. Tanto para los cationes Ver figura 48 y aniones Ver figura 49.

**Figura 48: Diagrama Gibbs Cationes.**



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 49: Diagrama Gibbs Aniones.**



Fuente: Elaboración Propia.

Según el diagrama Gibbs de Cationes y Aniones existen dos grupos diferenciados:

- **Grupo a:** Está compuesto por los pozos Guadalquivir III, San Jacinto, Anaspugio “A” y Aeropuerto “A”, Según el diagrama de Gibbs la composición química de las muestras de estos pozos se debe al proceso de Interperismo “Interacción agua -roca”
- **Grupo b:** Está compuesto por los pozos Avit “A”, Oscar Zamora y San Luis, Según el diagrama de Gibbs la composición química de las muestras de estos pozos se debe al proceso de Precipitación meteórica “lluvia e infiltración”.

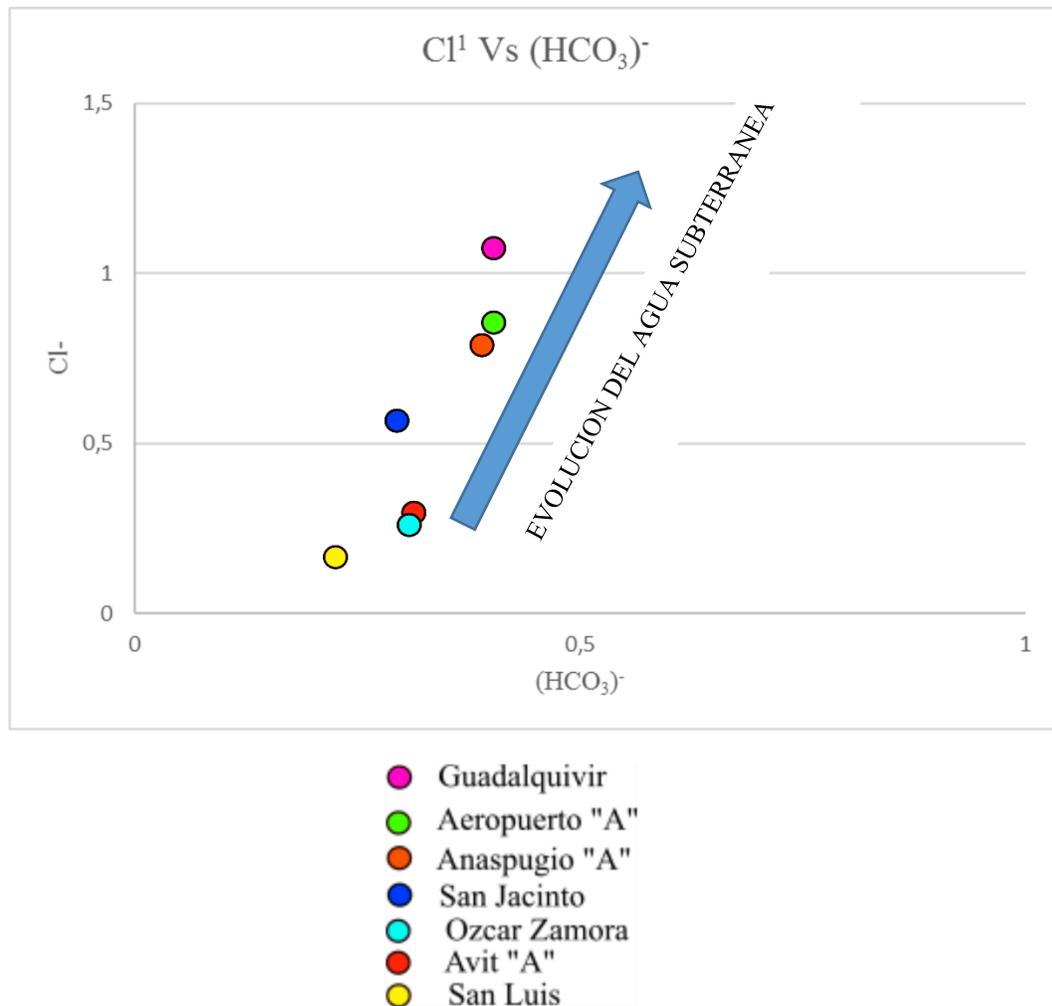
**Tabla 22: Relación Tipo de Agua, Edad y Gibbs.**

<b>Pozos</b>	<b>Tipo de agua</b>	<b>Años de <sup>14</sup>C</b>	<b>Fenómeno de composición.</b>
Anaspugio “A”	Sulfatada sódica	1.783	Interacción agua-roca
Aeropuerto “A”	Sulfatada sódica	4.720	Interacción agua-roca
San Jacinto	Sulfatada sódica	13.351	Interacción agua-roca
Guadalquivir III	Sulfatada sódica cálcica	8.753	Interacción agua-roca
Oscar Zamora	Sulfatada clorurada cálcica sódica	40	Lluvia e infiltración
Avit "A"	Sulfatada clorurada sódica	50	Lluvia e infiltración
San Luis	Clorurada sulfatada sódica cálcica	314	Lluvia e infiltración

Fuente: Elaboración Propia.

### 5.3.5 Diagramas Bidimensionales de Dispersión

Figura 50: Relación de Cloruros vs Bicarbonatos.

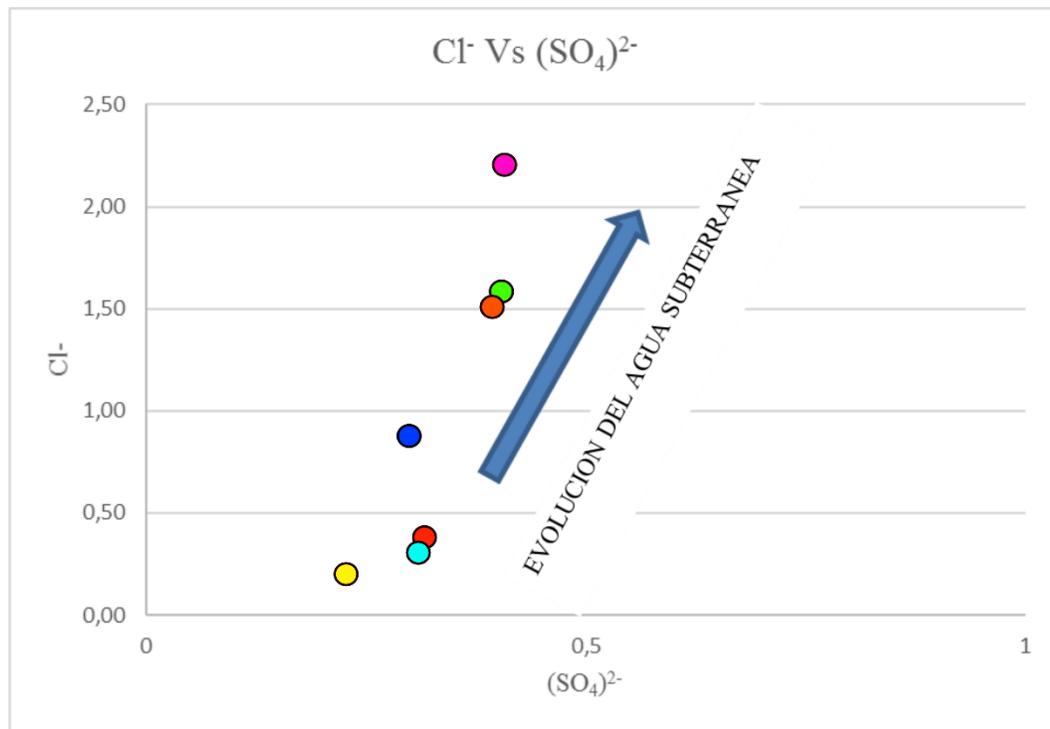


Fuente: Elaboración Propia.

El Cl<sup>-</sup> debido a su característica que no interacciona con el medio geológico ayudó a definir la evolución de la composición química de los pozos en el área de estudio.

Observando la fig.50 los pozos Guadalquivir, San Jacinto, Anaspugio "A" y Aeropuerto "A" son los que presentan mayor evolución en Bicarbonatos, mientras que los pozos Avit "A", Oscar Zamora y San Luis presentan menor evolución en Bicarbonatos.

**Figura 51: Relación de Cloruros vs Sulfatos.**



- Guadalquivir
- Aeropuerto "A"
- Anaspugio "A"
- San Jacinto
- Ozcar Zamora
- Avit "A"
- San Luis

Fuente: Elaboración Propia

El Cl<sup>-</sup> debido a su característica que no interacciona con el medio geológico ayudó a definir la evolución de la composición química de los pozos en el área de estudio.

Observando la fig.51 los pozos Guadalquivir, San Jacinto, Anaspugio "A" y Aeropuerto "A" son los que presentan mayor evolución en Sulfatos, mientras que los pozos Avit "A", Oscar Zamora y San Luis presentan menor evolución química.

## 5.4 APLICACIÓN DE ÍNDICES HIDROGEOQUÍMICOS

### 5.4.1 Índice de cambio de bases (Icb)

$$i_{cb} = \frac{rCl - r(Na + K)}{rCl}$$

**Tabla 23: Resultados de Índice de Cambio de bases.**

Índice cambio de bases	Pozos de estudio						
	Oscar Zamora	Avit "A"	Anaspugio "A"	Aeropuerto A	San Jacinto	San Luis	Guadalquivir III
Icb=	0,08	-0,73	-2,77	-2,97	-2,92	-0,25	-3,55

Fuente: Elaboración Propia

Analizando los resultados de la tabla 25, se deduce que los valores de la mayoría de los pozos es (-) negativo, excepto el pozo Oscar Zamora que su valor tiende a 0.

Según Custodio y Llamas (1.983), cuando los valores de índice de cambio de bases son negativos o tienden a "0", existe un **cambio de bases** fenómeno recurrente en arcillas.

Nuestra área de estudio está compuesta por sedimentos **Fluvio-Lacustres** que son gravas, arenas, limo, y **arcillas** (ver tabla 3-1).

Los perfiles litológicos de (anexos 4), corrobora la predominancia de arcillas en la zona de estudio.

En conclusión, el intercambio iónico es un fenómeno, que podría estar cambiando la composición en los pozos de estudio.

### 5.4.2 RELACIÓN $r(SO_4)^2/r Cl^- * 100$

**Tabla 24: Resultados de Relación  $[r(SO_4)^2/r Cl^-]*100$ .**

	Pozos de estudio						
	Oscar Zamora	Avit "A"	Anaspugio "A"	Aeropuerto A	San Jacinto	San Luis	Guadalquivir III
$[r(SO_4)^2/r Cl^-]*100$ .	105,56	122,1	391,58	383,86	300,83	89,77	549,43

Fuente: Elaboración propia.

Observando los valores la tabla 5-5, y según la tabla 2-1, se clasifican a los pozos Oscar Zamora, Avit “A”, Aeropuerto “A”, San Jacinto “A”, San Luis y Guadalquivir III, como pozos con agua **dulce**.

## 5.7 CALIDAD DE AGUAS SEGÚN NB-512 Y EL RMCH

Para detallar la calidad de agua de los pozos en estudio, se realizara la comparación de los parámetros físicos (medidos en campo) y parámetros químicos (resultados determinados por CEANID), con la norma boliviana (NB512) y el Reglamento de Contaminación Hídrica (RMCH).

### 5.7.1 COMPARACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS CON LA NORMA BOLIVIANA (NB512)

Cuadro comparativo de los parámetros físicos medidos en Campo, con la (NB512)

**Tabla 25: Cuadro comparativo pozo Avit “A”.**

PARÁMETROS	POZO AVIT “A”	VALORES MÁXIMOS ACEPTABLES	
		NB 512	CUMPLIMIENTO
pH	7,49	6,5 9,0	Cumple
Conductividad	78,87	1.500 $\mu$ /cm	Cumple

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 26: Cuadro comparativo pozo Oscar Zamora.**

PARÁMETROS	POZO OSCAR ZAMORA	VALORES MÁXIMOS ACEPTABLES	
		NB 512	CUMPLIMIENTO
pH	7,78	6,5 9,0	Cumple
Conductividad	57,32	1.500 $\mu$ s/cm	Cumple

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 27: Cuadro comparativo pozo Aeropuerto “A”.**

PARÁMETROS	POZO AEROPUERTO “A”	VALORES MÁXIMOS ACEPTABLES	
		NB 512	CUMPLIMIENTO
pH	7,76	6,5 9,0	Cumple
Conductividad	242,37	1.500 $\mu$ s/cm	Cumple

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 28: Cuadro comparativo pozo Anaspugio “A”.**

PARÁMETROS	POZO ANASPUGIO “A”	VALORES MÁXIMOS ACEPTABLES	
		NB 512	CUMPLIMIENTO
pH	7,74	6,5 9,0	Cumple
Conductividad	287,1	1.500 µs/cm	Cumple

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 29: Cuadro comparativo pozo San Jacinto.**

PARÁMETROS	POZO SAN JACINTO	VALORES MÁXIMOS ACEPTABLES	
		NB 512	CUMPLIMIENTO
pH	7,9	6,5 9,0	Cumple
Conductividad	109,58	1.500 µs/cm	Cumple

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 30: Cuadro comparativo pozo Guadalquivir.**

PARÁMETROS	POZO GUADALQUIVIR	VALORES MÁXIMOS ACEPTABLES	
		NB 512	CUMPLIMIENTO
pH	7,95	6,5 9,0	Cumple
Conductividad	237,10	1.500 µs/cm	Cumple

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 31: Cuadro comparativo pozo San Luis.**

PARÁMETROS	POZO SAN LUIS	VALORES MÁXIMOS ACEPTABLES	
		NB 512	CUMPLIMIENTO
pH	7,1	6,5 9,0	Cumple
Conductividad	41,78	1.500 µs/cm	Cumple

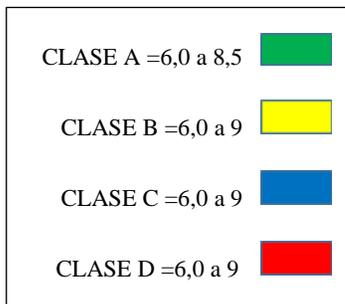
Fuente: Elaboración propia

Observando los valores de las tablas comparativas, se deduce que los pozos Oscar Zamora, Avit “A”, Anaspugio “A”, Aeropuerto “A”, San Jacinto, Guadalquivir III y San Luis cumplen con los parámetros mínimos especificados por la (NB512).

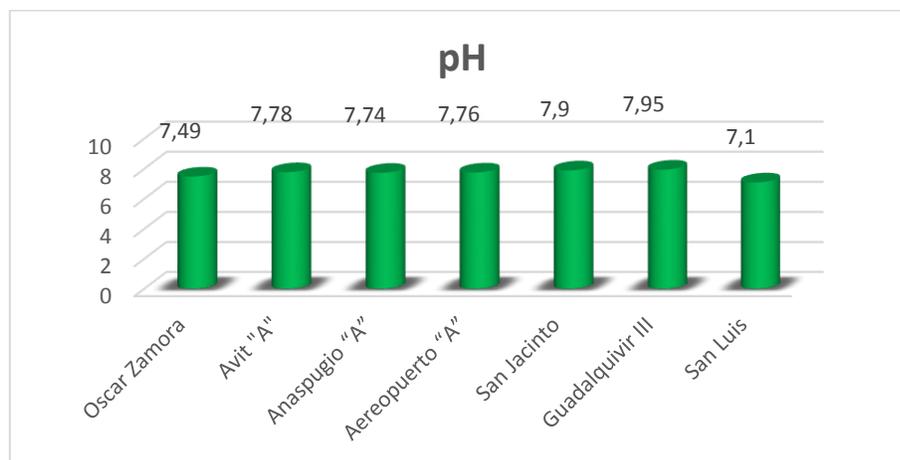
### 5.7.1 COMPARACIÓN DE PARÁMETROS QUÍMICOS CON EL REGLAMENTO DE CONTAMINACIÓN HÍDRICA (RMCH)

Cuadro comparativo de los resultados químicos elaborados por CEANID

#### ❖ pH



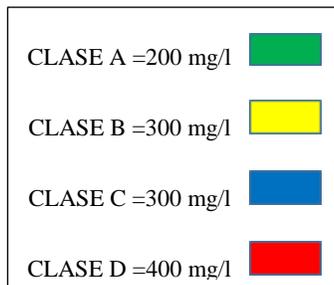
**Figura 52: Variación de ph en los Pozos de Estudio.**



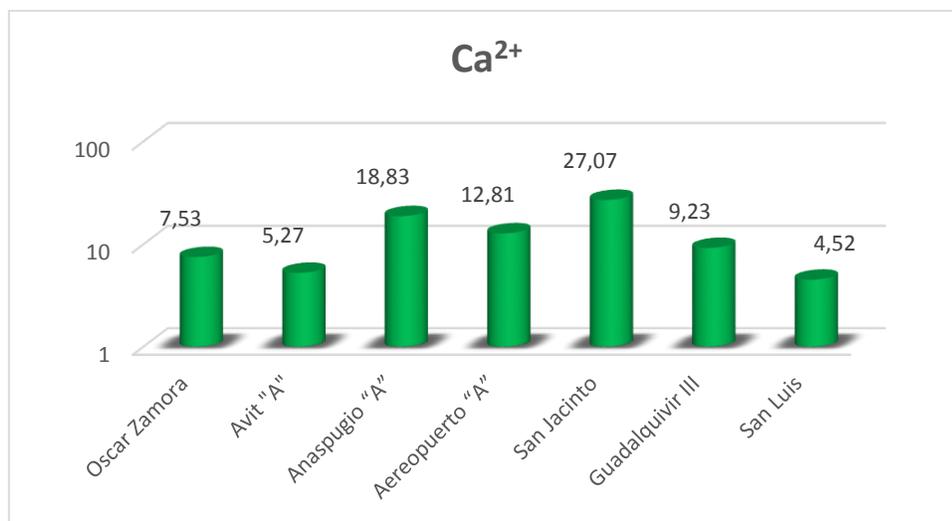
Fuente: Elaboración propia

Observando la fig.52, los pozos Oscar Zamora, Avit "A", Anaspugio "A", Aeropuerto "A", San Jacinto, Guadalquivir III y San Luis, su pH se encuentran en la clase A. Los resultados están dentro de lo establecido en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. Los valores de pH están cercanos a la neutralidad

❖ **Calcio  $\text{Ca}^{2+}$**



**Figura 53: Variación de  $\text{Ca}^{2+}$  en los Pozos de Estudio.**



Fuente: Elaboración propia

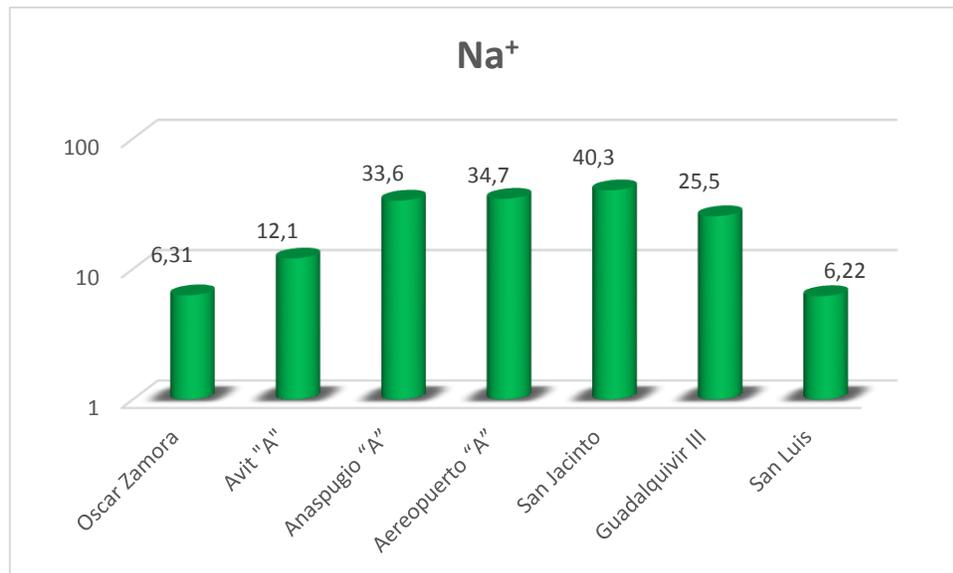
En los pozos Oscar Zamora, Avit "A", Anaspugio "A", Aereopuerto "A", San Jacinto, Guadalquivir III y San Luis sus respectivas concentraciones de Calcio se encuentran en la clase A. Los resultados establecidos están dentro de lo establecido en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. Ver Fig. 53.

Según Custodio y Llamas (1983), entre 10 y 250 (mg/l) en aguas dulces son normales; observando los valores de Calcio de los pozos en estudio, el valor máximo no supera los 28 (mg/l), por consecuencia su concentración se reafirma que es Normal.

❖ Sodio  $\text{Na}^+$

CLASE A =200 mg/l	<span style="color: green;">■</span>
CLASE B =200 mg/l	<span style="color: yellow;">■</span>
CLASE C =200 mg/l	<span style="color: blue;">■</span>
CLASE D =200 mg/l	<span style="color: red;">■</span>

**Figura 54: Variación de  $\text{Na}^+$  en los Pozos de Estudio.**

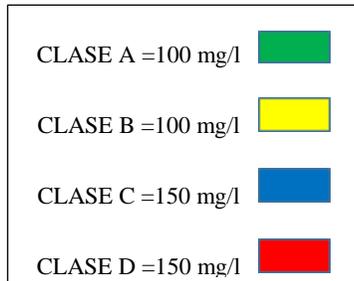


Fuente: Elaboración propia

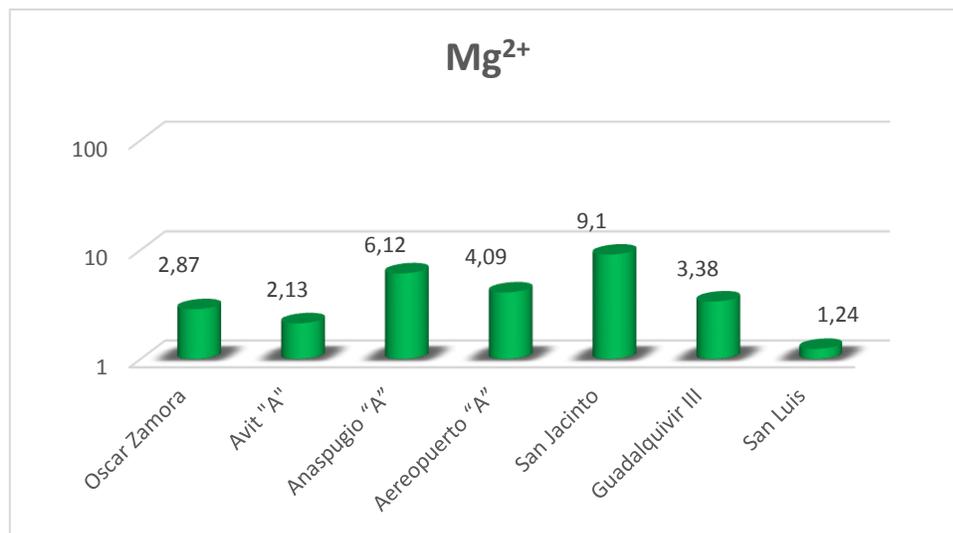
En los pozos Oscar Zamora, Avit "A", Anaspugio "A", Aeropuerto "A", San Jacinto, Guadalquivir III y San Luis sus respectivas concentraciones de Calcio se encuentran en la clase A. Los resultados están dentro de lo establecido en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. Ver Fig. 54.

Según Custodio y Llamas (1983), entre 1 y 150 (mg/l) en aguas dulces son normales; observando los valores de Sodio de los pozos en estudio, el valor máximo no supera los 40 (mg/l), por consecuencia su concentración se reafirma que es Normal.

❖ **Magnesio  $Mg^{2+}$**



**Figura 55: Variación de  $Mg^{2+}$  en los Pozos de Estudio.**



Fuente: Elaboración propia

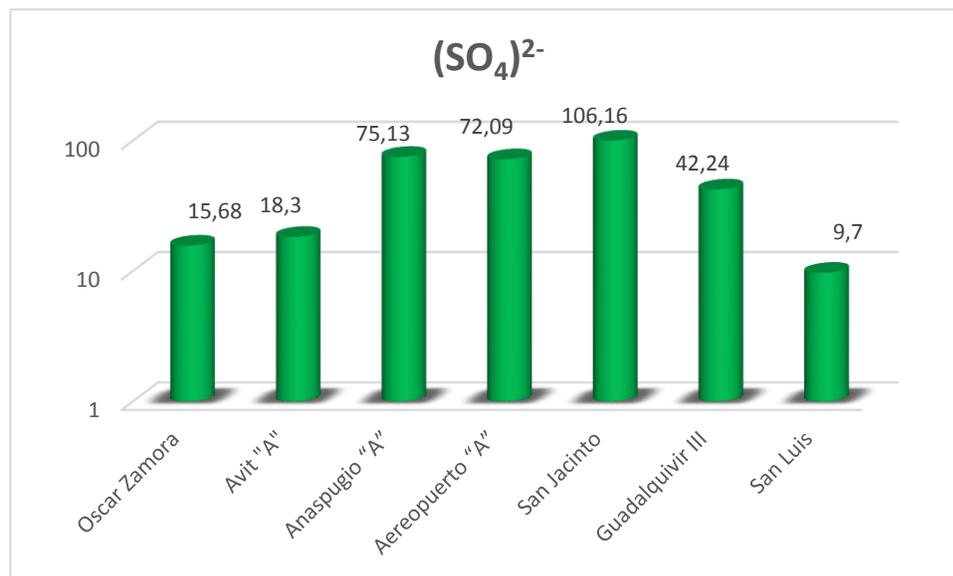
En los pozos Oscar Zamora, Avit "A", Anaspugio "A", Aeropuerto "A", San Jacinto, Guadalquivir III y San Luis se encuentran en la clase A. Como se observa en la gráfica el contenido de Magnesio es relativamente bajo a comparación con el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. Ver Fig.55.

Según Custodio y Llamas (1983), entre 1 y 100 (mg/l) en aguas dulces son normales; observando los valores de Magnesio en los pozos en estudio, el valor máximo no supera los 10 (mg/l), por consecuencia su concentración se reafirma que es Normal.

❖ Sulfatos ( $\text{SO}_4$ )<sup>2-</sup>

CLASE A =300 mg/l	<span style="color: green;">■</span>
CLASE B =400 mg/l	<span style="color: yellow;">■</span>
CLASE C =400 mg/l	<span style="color: blue;">■</span>
CLASE D =400 mg/l	<span style="color: red;">■</span>

**Figura 56: Variación de ( $\text{SO}_4$ )<sup>2-</sup> en los Pozos de Estudio.**



Fuente: Elaboración propia

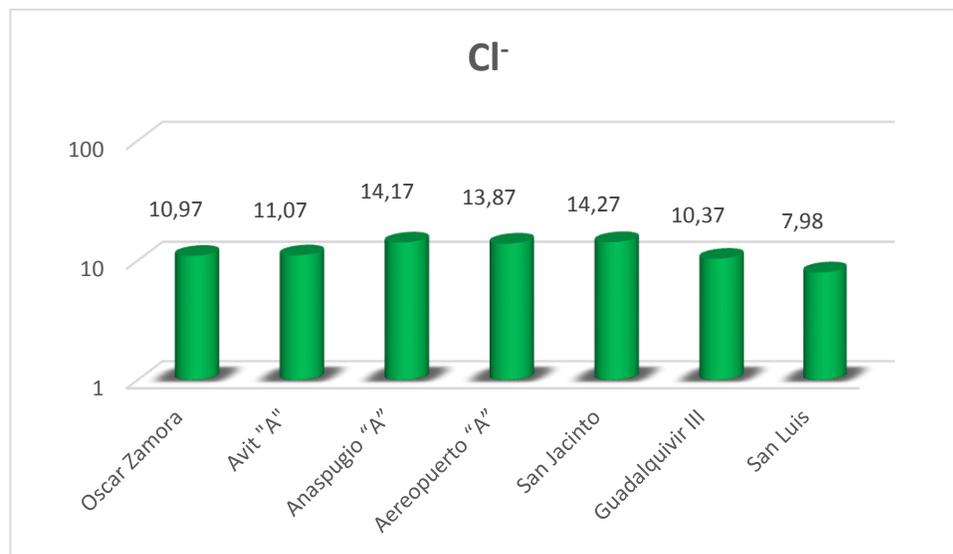
Los pozos Oscar Zamora, Avit "A", Anaspugio "A", Aeropuerto "A", San Jacinto, Guadalquivir III y San Luis se encuentra en la clase A.

Como se observa en la gráfica el contenido de sulfatos es relativamente bajo a comparación con el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. Ver Fig.56.

Según Custodio y Llamas (1983), entre 2 y 150 (mg/l) en aguas dulces son normales; observando los valores de Sulfatos en los pozos en estudio, el valor máximo no supera los 106 (mg/l), por consecuencia su concentración se reafirma que es Normal.

❖ **Cloruros Cl<sup>-</sup>**

CLASE A =250 mg/l	<span style="color: green;">■</span>
CLASE B =300 mg/l	<span style="color: yellow;">■</span>
CLASE C =400 mg/l	<span style="color: blue;">■</span>
CLASE D =500 mg/l	<span style="color: red;">■</span>

**Figura 57: Variación de Cl<sup>-</sup> en los pozos de Estudio.**

Fuente: Elaboración propia

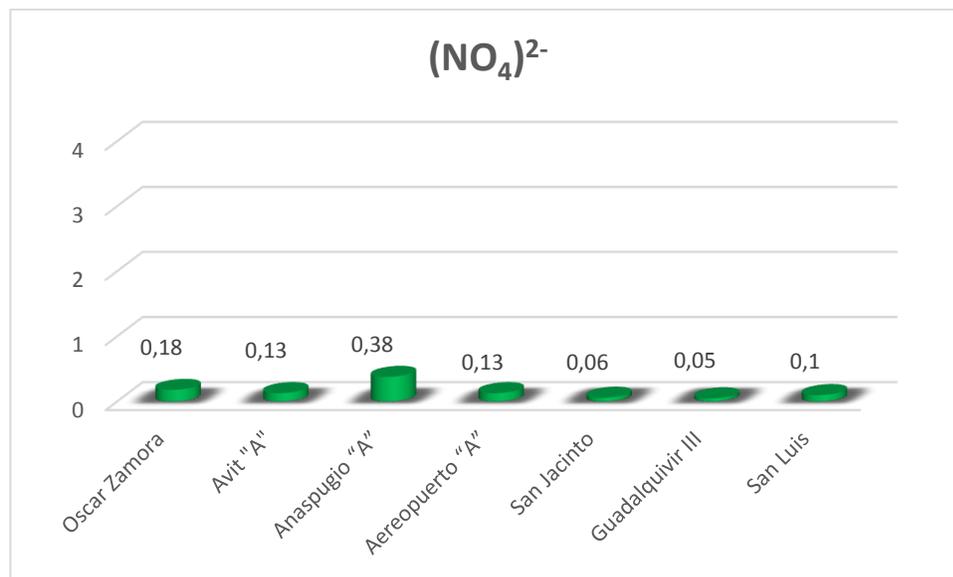
Los pozos Oscar Zamora, Avit "A", Anaspugio "A", Aeropuerto "A", San Jacinto, Guadalquivir III y San Luis sus respectivas concentraciones de Cloruro se encuentran en la clase A. Los resultados están dentro de lo establecido en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. Ver Fig.57.

Según Custodio y Llamas (1983), entre 10 y 250 (mg/l) en aguas dulces son normales; observando los valores de Cloruros de los pozos en estudio, el valor máximo no supera los 14 (mg/l), por consecuencia su concentración se reafirma que es Normal.

❖ Nitratos ( $\text{NO}_4$ )<sup>2-</sup>

CLASE A =20 mg/l	<span style="color: green;">■</span>
CLASE B =50 mg/l	<span style="color: yellow;">■</span>
CLASE C =50 mg/l	<span style="color: blue;">■</span>
CLASE D =50 mg/l	<span style="color: red;">■</span>

**Figura 58: Variación de ( $\text{NO}_4$ )<sup>2-</sup> en los pozos de Estudio.**



Fuente: Elaboración propia

Los pozos Oscar Zamora, Avit "A", Anaspugio "A", Aeropuerto "A", San Jacinto, Guadalquivir III y San Luis sus respectivas concentraciones de Nitrato se encuentran en la clase A. Los resultados están dentro de lo establecido en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. Ver Fig.58.

Según Custodio y Llamas (1983), entre 0,1 y 10 (mg/l) en aguas dulces son normales; observando los valores de Cloruros de los pozos en estudio, el valor máximo no supera los 1 (mg/l), por consecuencia su concentración se reafirma que es Normal.

Todos los parámetros químicos (Calcio, Sodio, Magnesio, Cloruros, Nitratos Sulfatos) de los pozos, comparando con el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, señalan que son de clase A, es decir son de excelente calidad para consumo humano.

**CAPITULO 6**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACION**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

- ❖ La elaboración del mapa de iso-conductividad, permitió seleccionar pozos con distinta característica de salinidad.
- ❖ Mediante el análisis de Sólidos Disueltos Totales (SDT), se pudo marcar las direcciones de los flujos subterráneos.
- ❖ La composición química de las aguas subterráneas en los pozos analizados, puede deberse en gran medida a la predominancia de arcillas, debido al proceso de **Intercambio Iónico**, que se pudo reforzar con los resultados de la aplicación de índice de cambio de bases, que indica existe un **Intercambio Iónico**.
- ❖ Mediante el diagrama de Piper se pudo tipificar los pozos de manera exitosa, donde los pozos Anaspugio “A”, Aeropuerto “A”, San Jacinto, Guadalquivir III responde a la característica Sulfatada Sódica, en cambio los pozos Oscar Zamora, Avit “A” responden a la característica Sulfatada Clorurada Cálcica-Sódica y el pozo San Luis es de Tipo Clorurada Sulfatada Sódica Cálcica.
- ❖ Se pudo definir mediante el diagrama de Piper que el fenómeno geoquímico que incide en la composición de las aguas en el recorrido de Anaspugio a Aeropuerto “A” es el Intercambio Iónico, de igual forma sucede en los pozos Oscar Zamora a Avit “A”.
- ❖ El diagrama de Mifflin señaló que los pozos Anaspugio “A”; Aeropuerto “A”; San Jacinto; Guadalquivir III; pertenecen a un flujo intermedio, que son aguas relativamente evolucionadas, lo cual se pudo corroborar con la edad de  $^{14}\text{C}$  de dichos pozos. Los pozos Oscar Zamora; Avit “A” y San Luis indicaron que pertenecen a un flujo local, que son aguas **poco evolucionadas**; de la misma manera se pudo corroborar con la edad antropológica de los pozos.
- ❖ El diagrama de Gibbs indico que la composición química de los pozos Anaspugio “A”; Aeropuerto “A”; San Jacinto; Guadalquivir III se debe a

interacción agua-roca. En cambio los pozos Oscar Zamora; Avit “A” y San Luis su composición se debe Agua de lluvia e infiltración.

- ❖ La calidad de las aguas subterráneas es **buena**. Ningún análisis reveló que alguna muestra sobrepase los valores máximos de concentración de algún ion respecto a la Norma Boliviana de agua potable 512 y el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- ❖ Para tener un estudio más detallado, usar la mayoría de los métodos para explicar los fenómenos geoquímicos que gobiernan las aguas subterráneas de los pozos que concesiona COSAALT.
- ❖ Realizar estudios geofísicos actuales que permitan caracterizar el funcionamiento de los acuíferos desde el punto de vista hidrogeológico de la zona de estudio. Esto conllevará a conocer la disposición espacial de los sustratos rocosos que conforman el o los acuíferos.
- ❖ Se sugiere realizar el estudio de mayor número de pozos que estén interconectados sobre una misma línea de flujo, que compartan el mismo recorrido, que tendrá como resultados unas ideas de los procesos geoquímicos que gobiernan en los pozos concesiona COSAALT.
- ❖ Para un estudio hidrogeoquímico más certero se sugiere que no solo se considere el estudio de análisis de agua, sino también el estudio de la composición química de la roca.
- ❖ Se sugiere tomar en cuenta el factor económico ya que es un limitante, que define la extensión de la investigación.
- ❖ La investigación hidrogeoquímica se basa en aproximaciones, y no así en determinaciones, ya que está en función al tiempo puede cambiar.
- ❖ La bibliografía limitada fue un parámetro que determinó el alcance de la investigación.

- ❖ Para futuras investigaciones se recomienda tomar en cuenta los pozos estudiados en esta investigación, con el objetivo de realizar un seguimiento de la evolución del agua.