

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y AMBIENTALES

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**“COMPARACIÓN DEL QUIMISMO DE LOS SUB – SISTEMAS ACUIFEROS SUR,
CENTRO NORTE Y PIFO – EL QUINCHE DEL DISTRITO METROPOLITANO DE
QUITO”**

Realizado por:

PABLO ANDRES GORDÓN ERAZO

Director del proyecto:

Dr. Miguel Martínez-Fresneda, PhD.

Co – directora del proyecto

Msc. Teresa Muñoz

Como requisito para la obtención del título de:

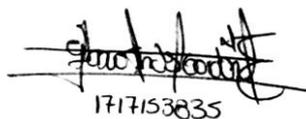
INGENIERO AMBIENTAL

Quito, 25 de julio de 2018

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, PABLO ANDRES GORDÓN ERAZO, con cédula de identidad # 171715383-5, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



1717153835

FIRMA Y CEDULA

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

“COMPARACIÓN DEL QUIMISMO DE LOS SUB – SISTEMAS ACUIFEROS SUR, CENTRO NORTE Y PIFO – EL QUINCHE DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO”

Realizado por:

PABLO ANDRES GORDÓN ERAZO

como Requisito para la Obtención del Título de:

INGENIERO AMBIENTAL

ha sido dirigido por el profesor

MIGUEL MARTINEZ-FRESNEDA

y por la co-directora

TERESA MUÑOZ

quienes consideran que constituye un trabajo original de su autor



FIRMA

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

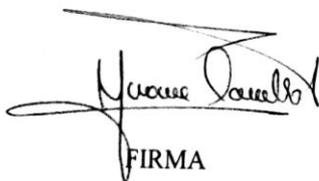
EMMA IVONNE CARRILLO

JOHANNA MEDRANO

Después de revisar el trabajo presentado,

lo han calificado como apto para su defensa oral ante

el tribunal examinador



FIRMA



FIRMA

Quito, 25 de Julio de 2018

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres y hermanos por todo el apoyo que he recibido de ellos en el transcurso de los años pasados en la universidad.

AGRADECIMIENTOS

A todos mis profesores de la Universidad Internacional SEK en especial a Miguel Martínez por todo su apoyo para la elaboración de mi tesis y el conocimiento brindado.

Comparación del Quimismo de los Sub – sistemas acuíferos Sur, Centro Norte y Pifo – El Quinche del Distrito Metropolitano de Quito.

Comparison of the chemistry of the aquifer sub - systems South of Quito, North Center of Quito and Pifo - El Quinche

RESUMEN

El presente estudio forma parte del proyecto “Quimismo y protección del agua invisible del Distrito Metropolitano de Quito” y parte del objetivo de realizar una comparación del comportamiento químico de los sub - sistemas acuíferos Quito Sur, Centro Norte de Quito y Pifo – El Quinche. Para la concreción de este objetivo se realizó la interpretación de la base de datos mediante la caracterización de las facies, y el análisis de la química del agua subterránea con el desarrollo de relaciones iónicas y la elaboración de diagramas de Piper y Stiff que muestren la relación agua – roca que presenta el DMQ, a fin de contribuir al diseño de una línea base para la elaboración de un modelo conceptual del sistema hídrico subterráneo de los sub – sistemas acuíferos que ayuden a determinar los procesos, la evolución y comportamiento de las aguas que se encuentran en las distintas unidades acuíferas. Los resultados muestran que las aguas del área de estudio son de tipo Bicarbonatada cálcica - magnésica y que se genera un intercambio iónico de sodio por el calcio y el magnesio debido a la estructura de grano fino de limo y arcilla y a la presencia de rocas de origen volcánico que presentan los sub – sistemas acuíferos. Se concluye que debido a las características geológicas que presenta el DMQ, los tres sub – sistemas acuíferos tienen una estructura similar y las facies serán las mismas a lo largo de todo el acuífero.

Palabras claves: agua subterránea, evolución hidroquímica, hidrogeología, métodos, relaciones iónicas, Piper.

ABSTRACT

The present study forms part of the project "Quimism and protection of the invisible water of the Metropolitan District of Quito" and part of the objective of making a comparison of the chemical behavior of the aquifer sub - systems Quito Sur, North Center of Quito and Pifo - El Quinche. For the realization of this objective the interpretation of the database was made by characterizing the facies, and the analysis of groundwater chemistry with the development of ionic relationships and the elaboration of Piper and Stiff diagrams that show the water - rock relationship presented by the MDQ, in order to contribute to the design of a baseline for the elaboration of a conceptual model of the underground water system of the aquifer sub - systems that help determine the processes, evolution and behavior of the water found in the different aquifer units. The results show that the waters of the study area are Calcium - Magnesium bicarbonated type and that an ion exchange of sodium is generated by calcium and magnesium due to the fine grain structure of silt and clay and the presence of rocks of origin volcanic that present the aquifer subsystems. It is concluded that due to the geological characteristics that the DMQ presents, the three aquifer sub - systems have a similar structure and the facies will be the same throughout the aquifer.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto tiene la finalidad de realizar una comparación del quimismo de los sub - sistemas acuíferos Sur, Centro Norte y Pifo – El Quinche del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), para un aprovechamiento óptimo de los recursos hídricos subterráneos, pretendiendo por un lado, abordar la caracterización hidrogeoquímica y sus facies mediante la interpretación de los datos hidroquímicos generados por la Empresa Publica Metropolitana del Agua Potable y Saneamiento de Quito (en adelante EPMAPS), la obtención de las relaciones iónicas y la proporción de mezcla de aguas en relación con la geología que presenta el DMQ, junto con las posibles relaciones de flujo mediante el análisis de las condiciones químicas en las que se presenta.

La mineralogía del agua y las facies que presenten estará en relación a las variaciones que se generen por la recarga natural del acuífero o bien por extracciones; para el estudio de las variaciones de la composición química de la misma se elaboró un modelo conceptual de evolución hidroquímica que sirve para describir el flujo subterráneo y caracterizar los procesos químicos más importantes que tienen lugar en el área de estudio y conocer si, debido a las características geológicas que presenta el DMQ, se presupone que el agua será de facies bicarbonatadas cálcicas y magnésicas manteniéndose estas facies a lo largo de todo el acuífero (García et al., 1999).

Por tal motivo es necesario optimizar un modelo hidrogeoquímico que sirva como herramienta para conocer la evolución, el terreno por el cual ha atravesado, los procesos de mezcla y la contaminación que se han producido en este recurso desde el momento que se infiltra hasta la hora de su muestreo.

El estudio del comportamiento químico del agua es de gran interés para conocer los usos que se le puede dar al agua subterránea y para poder explotarlo de forma sostenible debido a la gran demanda que este recurso tiene (Llamas & Custodio, 1999). Las características fisicoquímicas

del agua son la base de la existencia de este recurso en el planeta. No sólo determinan los usos del recurso, sino que también son la mejor forma de expresar su historia. La Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS) señala que:

“Al igual que en un libro lo menos importante es el papel, la química del agua subterránea es el texto que permite conocer los procesos que ha sufrido el agua desde que se infiltró hasta su muestreo, el tipo de terrenos que ha atravesado y los procesos de mezcla y contaminación” (Escuder, R. et al, 2009).

En base a lo mencionado anteriormente se puede decir que al conocer el comportamiento químico que presenta el agua subterránea se tiene información necesaria para observar la evolución y la composición de esta agua y poder establecer un modelo conociendo el flujo subterráneo.

El interés por la protección de los acuíferos nace a partir del conocimiento de la limitación de los recursos de agua, en disponibilidad, y de la importante creciente de la problemática ambiental (Custodio, 1994). De esta forma, aumentan las presiones y esfuerzos para la conservación, protección y restauración de los acuíferos, con el fin que no sólo la generación actual pueda disfrutarlos, sino también las generaciones futuras, a la vez que se intenta asegurar un suministro normal, incluso en situaciones de emergencia.

La presión que se genera sobre el recurso hídrico subterráneo cada vez es más fuerte en cuanto a su disponibilidad, ya que el ser humano ha generado diferentes causas que afectan a esta como lo es la sobreexplotación de los acuíferos, las malas prácticas agrícolas, por efecto de la deforestación se genera cambios en el suelo, el asentamiento de zonas urbanas y rurales en zonas de producción hídrica, la gestión pública inadecuada y los bajos costos que tiene este recurso (Delgado, 2015).

El interés del estudio del agua subterránea está orientado hacia la demanda que presenta el recurso hídrico a nivel mundial y al problema de la disponibilidad que existe en el recurso hídrico que cada vez es menor debido a que uno de los principales problemas ambientales que enfrenta la sociedad es la gran demanda en el consumo de sus recursos para lograr su desarrollo y mejorar su calidad de vida. En el caso del recurso hídrico, adquiere una gran importancia en el desarrollo y crecimiento de una población debido a que su agotamiento puede llegar a limitarlos (Pachauri, 2014).

Solo el 2.5% del agua disponible en el mundo es dulce, el 68.7% de esta se encuentra almacenada en los casquetes polares en forma de hielo, el 29.9% se encuentra almacenada en los acuíferos y solamente el 0.26% se encuentran en los lagos ríos y embalses de forma superficial, por esta razón, es de gran importancia seguir estudiando el agua dulce y en especial las aguas subterráneas para que su consumo se lo realice de forma planificada y sostenible (Sahuquillo, Custodio, & Llamas, 2008).

Al ser el agua subterránea la segunda reserva más grande de agua dulce su estudio ha ido tomando mayor importancia a medida que pasa el tiempo (Guárico, Mudarra, Faublack, & Gutiérrez, 2011).

Antecedentes

Ecuador es un país con abundantes recursos hídricos superficiales, razón por la cual en el Distrito Metropolitano de Quito, la (EPMAPS) ha realizado varios estudios sobre el quimismo de las aguas subterráneas del DMQ, debido a la gran demanda que existe del recurso hídrico en la actualidad y el interés de usar este recurso de forma planificada y sostenible para no agotarlo y no generar afectaciones a las generaciones futuras, además de buscar alternativas para poder suministrarse de dicho recurso (Atlas Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito, 2008).

A partir del año 2004, la EPMAPS ha realizado diversos estudios sobre el quimismo de los diferentes sistemas acuíferos del DMQ, tales como: el sistema Quito – San Antonio de Pichincha, sistema Guayllabamba – Los Chillos y sistema Nanegalito – Gualea, los cuales han permitido la elaboración de metodologías hidrogeológicas para llevar a cabo un manejo responsable del recurso hídrico (EPMAPS, 2004). Con base en toda la información recopilada se han podido conocer varios estudios que se han hecho de los diferentes sub – sistemas acuíferos que existen en el DMQ; entre ellos podemos mencionar aquellos que hablan sobre la caracterización hidrogeológica en los sub - sistemas acuíferos Sur de Quito, Centro Norte y Pifo El Quinche (EPMAPS, 2004; EPMAPS, 2007; EPMAPS, 2008).

Estos estudios han aportado información muy valiosa para generar la presente investigación y realizar una comparación entre los resultados que se obtuvieron en dichos estudios y los que se obtuvieron en esta investigación. En la tabla 1, se presenta de forma resumida la información obtenida a partir de los estudios generados anteriormente a los sistemas acuíferos del DMQ.

Tabla 1. Resumen de información de estudios anteriores a los sistemas acuíferos del DMQ

Sub - sistema	Litología	Facies hidroquímicas	Dirección de Flujo	Fuente
Acuífero Sur de Quito	Esta zona es de depósitos lacustres y que está compuesta por granos finos como son los limos, las arenas y las arcillas.	El tipo de agua de este es bicarbonatada cálcica magnésica.	El flujo de agua subterránea va de sureste a noroeste.	(Peñafiel, 2009).

Acuífero Centro Norte	Su litología corresponde a sedimentos permeables en su mayoría de origen volcánico.	El agua es de tipo bicarbonatada cálcica magnésica.	El flujo de agua subterránea va de sureste a noroeste.	(Muñoz, 2005).
Acuífero Pifo – El Quinche	Su litología presenta rocas volcánicas andesíticas y de granos finos como el limo y la arcilla.	El agua de este es de tipo bicarbonatada sódica	El flujo de agua subterránea va de sureste a noroeste	(Delgado, 2008).

A pesar de que existen varios estudios realizados para conocer el comportamiento químicos de los sub – sistemas acuíferos de Quito, el aporte de esta investigación esta direccionada a generar una comparación del quimismo de los sub – sistemas acuíferos Sur, Centro Norte y Pifo – El Quinche la misma que mediante su interpretación; permita generar una línea base para la creación de un modelo conceptual hidrogeoquímico para conocer los procesos, la evolución y la interacción del agua con respecto a la litología que presenta el DMQ, ya que la mayoría de los estudios son realizados para cada sub – sistema acuífero de forma individual.

El análisis de datos y el desarrollo de modelos conceptuales son de suma importancia para entender las interrelaciones entre los diferentes componentes de un sistema. Con base en esta información, el desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual es una herramienta de

mucho valor para la simulación de procesos ambientales y para la toma de decisiones relacionado con la evaluación de programas, proyectos o planes y a la formación de políticas ambientales para coordinar una gestión de aguas subterráneas efectiva, además de plantear alternativas de solución a la presión que ejerce la sociedad sobre la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo (Veliz, 2014).

MATERIALES Y METODOS

Área de Trabajo

El Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) tal como se muestra en la Figura 1 se encuentra rodeado por tres sistemas acuíferos: El Quito – San Antonio de Pichincha en el cual se encuentran los sub – sistemas acuíferos Quito Sur, Centro – Norte de Quito y San Antonio, el sistema Guayllabamba – Los Chillos que abarca el sub – sistema acuífero El Quinche – Pifo y el sistema Noroccidental Gualea – Nanegalito (EPMAPS, 2004).

El estudio fue realizado a partir de una base de datos de 12 pozos los mismos que se encuentran ubicados en los sub - sistemas acuíferos Quito Sur, Centro Norte de Quito y Pifo – El Quinche.

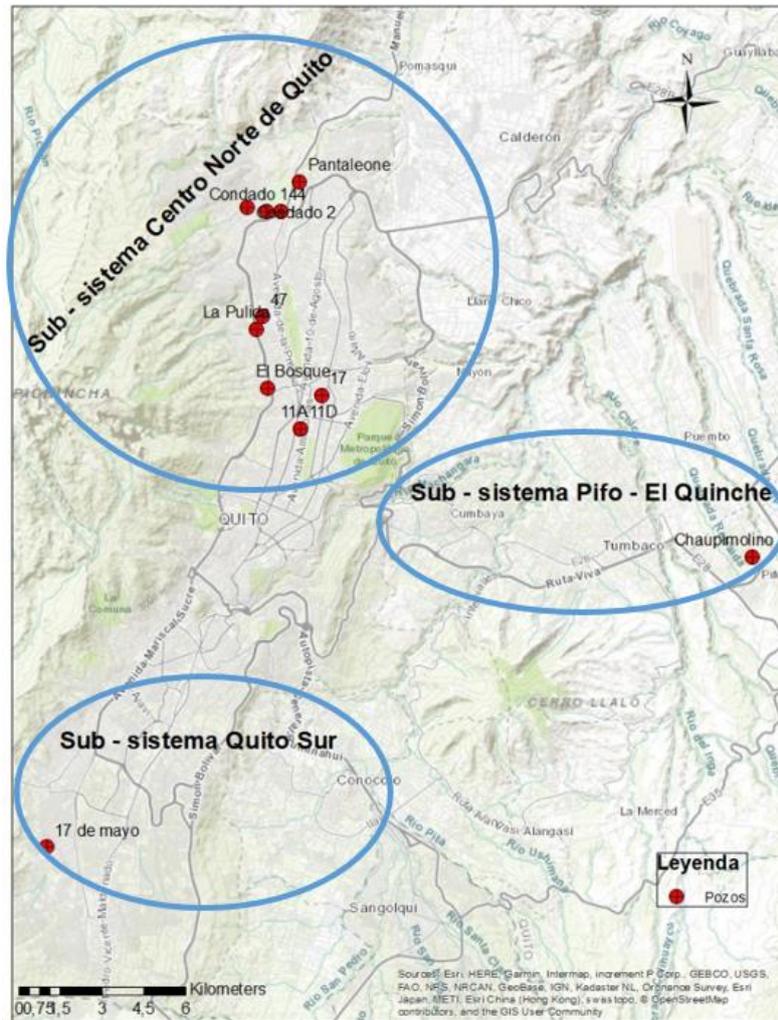


Figura 1. Mapa de Ubicación de pozos

El estudio se realizó mediante dos fases:

En la primera fase se realizó un análisis exploratorio de la base de datos hidroquímica durante los periodos 2010 – 2015.

Debido a que el agua por su forma natural en los procesos de su composición intervienen diferentes factores como lo son ambientales, geológicos, hidrogeológicos y climáticos, la presencia de diferentes sustancias se encuentra en forma de iones, los mismos que pueden ser de forma mayoritaria o minoritaria.

Para el estudio se seleccionaron los iones mayoritarios HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+} ya que su frecuencia de aparición es la más alta en aguas subterráneas y en el caso del NO_3^- y del

K⁺, que a pesar de no pertenecer al grupo de iones mayoritarios fueron seleccionados debido a la información que aportan para la creación de diagramas que ayuden al estudio del quimismo de los acuíferos y la valoración del análisis químico de las aguas subterráneas (Vallejos, Pulido-Bosch, Sánchez Martos, Gisbert, & Molina, 2005).

A partir de la selección de los iones anteriormente mencionados se realizó un análisis estadístico descriptivo, el cual ayudó a entender el comportamiento de los datos y descubrir aquellos valores que se encuentran fuera de rango o son atípicos para eliminarlos del estudio mediante el cálculo de la media, mediana, moda y coeficiente de variación que ayudaran a la selección del método estadístico a utilizar y a tener conclusiones correctas (Borrego del Pino, 2008). Para la eliminación de los valores atípicos se utilizaron cajas de boxplot que muestran la dispersión que existe en un conjunto de datos, este se muestra de forma gráfica a aquellos datos que pueden alterar los resultados del estudio (Borrego del Pino, 2008).

Con el análisis estadístico descriptivo ya realizado se escogió el método estadístico de análisis multivariante de clúster jerárquico para identificar agrupaciones dentro del conjunto de datos de acuerdo a la similitud de ellos, y poder interpretarlos en base a las diferentes variables estadísticas antes mencionadas en forma de dendrogramas (Cloutier, Lefebvre, Therrien, & Savard, 2008).

Para realizar la valoración de análisis químico de las aguas subterráneas se realizó el balance de cationes y aniones para comprobar si el error es aceptable o no, el balance de cationes y aniones se realizó usando la fórmula:

$$\sum \text{Cationes (meq /L)} - \sum \text{aniones (meq/L)}$$

Y para el error

$$\text{Error (\%)} = 200 \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}}$$

(Custodio & Llamas, 1997).

La segunda fase del estudio consistió en la identificación de los procesos hidroquímicos de los sub – sistemas acuíferos Quito Sur, Centro Norte de Quito y Pifo – El Quinche. Durante esta fase se utilizaron las herramientas ArcGis 10.2.1, Surfer 10, Easy Quim y Aquachem 5.1.

Mediante el uso de las herramientas Surfer y Easy Quim se generaron diagramas hidroquímicos de interacción roca - agua tales como los diagramas de Piper y Stiff, que indicaron como se encuentran distribuidos los iones mayoritarios en el área de estudio, además de conocer el tipo de agua presente.

Posteriormente con el uso del programa Aquachem se obtuvieron las relaciones iónicas que se dan en el agua subterránea, las mismas que permitieron el conocimiento de los procesos más importantes de interacción agua-roca que se dan en relación a la litología que presenta el DMQ (Aquachem, 2006).

Finalmente se plantaron las bases para la creación de un modelo conceptual hidrogeoquímico utilizando deltas iónicas; se calcularon las diferentes proporciones de mezcla de agua que existen en los sub – sistemas acuíferos para identificar las similitudes y diferencias que existen entre ellos y con la información obtenida poder realizar la comparación del quimismo de estos. Para generar los deltas iónicos y la mezcla de aguas y balances de masas solo se tomó en cuenta al sub – sistema acuífero Centro Norte, ya que el Sur y Pifo – El Quinche solo tienen un pozo cada uno. Para ello se siguió el siguiente proceso.

En primer lugar se seleccionaron los puntos de agua de recarga, mezcla real y descarga tomando en cuenta criterios como el flujo subterráneo que vaya de sur – este a nor – oeste, las profundidades de los pozos y que las concentraciones de cloruros en el agua de descarga sean mayores a la de recarga y mezcla, ya que se tomó como especie conservativa al cloruro porque este no sufre reacciones que hagan variar sus concentraciones en el medio.

Posteriormente se calcula el porcentaje de mezcla y las fracciones de agua de descarga a partir de las concentraciones de cloruros ya que este es considerado como la especie química conservativa con la siguiente fórmula:

$$\text{Cl}^- \text{ Mezcla} = \text{Cl}^- \text{ agua de descarga (x)} + \text{Cl}^- \text{ agua de recarga (1-x)}$$

$$x = \frac{\text{Cl}^- \text{ mezcla} - \text{Cl}^- \text{ agua de recarga}}{\text{Cl}^- \text{ agua de descarga} - \text{Cl}^- \text{ agua de recarga}} \times 100$$

(FCIHS, 2009).

Donde

$\text{Cl}^- \text{ Mezcla}$ = concentración de Cl^- en el agua de mezcla

$\text{Cl}^- \text{ Descarga}$ = concentración de Cl^- en el agua de descarga

$\text{Cl}^- \text{ Recarga}$ = concentración Cl^- en el agua de recarga

x = fracción de agua de descarga que interviene en la mezcla

1-x = fracción de recarga

Al conocer las fracciones de agua de recarga y descarga se puede calcular la mezcla teórica para cada uno de los iones mayoritarios con la fórmula:

$$\text{Na}^+ \text{ Teórico} = \text{Na}^+ \text{ descarga } x + \text{Na}^+ \text{ recarga } (1-x) \text{ (Escuder, R. et al, 2009).}$$

RESULTADOS

Análisis estadístico descriptivo

Análisis cajas de Boxplot Quito Sur

Mediante el análisis de cajas de boxplot en el sub - sistema acuífero Sur se pudo observar que existen valores atípicos en los sulfatos como puede apreciarse en en la Figura 2 y posteriormente el valor atípico eliminado como lo muestra la Figura 2.1. Además se puede observar que la distribución de los datos son asimétricos y los parámetros que mas abundancia presentan son los bicarbonatos, el magnesio, el calcio y en menor cantidad el potasio.

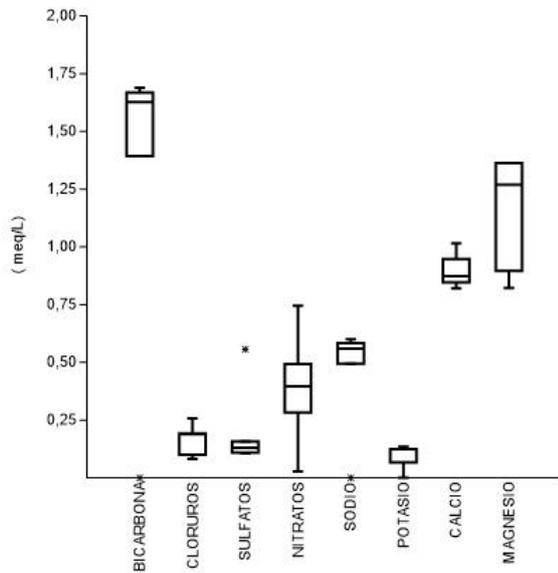


Figura 2. Caja de boxplot con valores atípicos

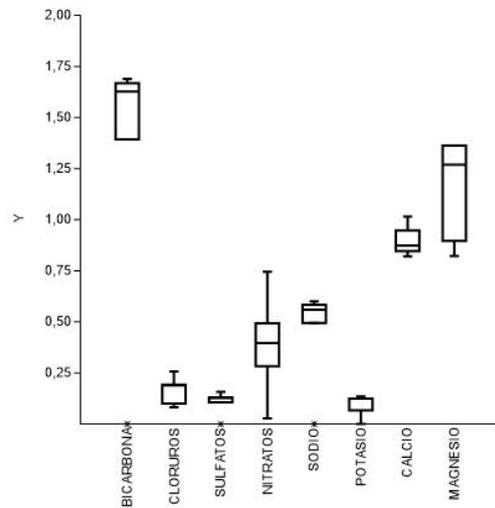


Figura 2.1 Caja de boxplot después de haber eliminado los valores atípicos

Análisis cajas de Boxplot Centro Norte

En el caso del sub – sistema acuífero Centro Norte de Quito no se encontraron valores atípicos como se puede ver en la Figura 2.3. Además se puede observar que la distribución de los datos no es asimétrica ya que la mediana de todos los parámetros se encuentran en la misma posición. En cuanto a la abundancia, hay mayor presencia de bicarbonatos, magnesio, calcio y en menor cantidad el potasio y los nitratos.

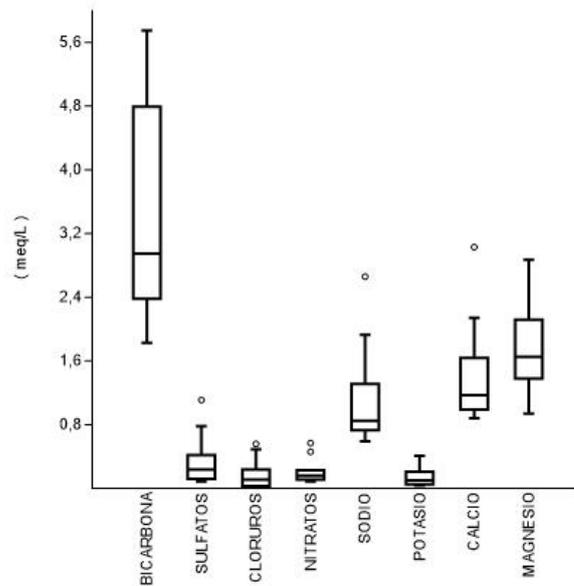


Figura 2.3 Caja de boxplot sub – sistema acuífero Centro Norte

Análisis cajas de Boxplot Pifo – El Quinche

Mediante el análisis de cajas de boxplot en el sub - sistema acuífero Pifo – El Quinche se pudo observar que existen valores atípicos en los nitratos y cloruros como puede apreciarse en la (figura 2.4) y posteriormente el valor atípico eliminado como lo muestra la (figura 2.5). Además se observa que las distribución de los datos es asimétrica y en cuanto a la abundancia existe mayor presencia de bicarbonatos, sodio, magnesio y en comparación con los iones de cloruros y potasio que se encuentran en menor cantidad.

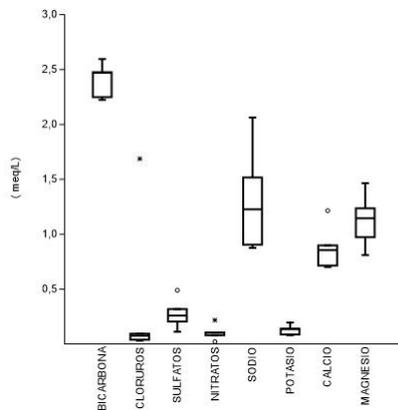


Figura 2.4 Caja de boxplot con valores atípicos

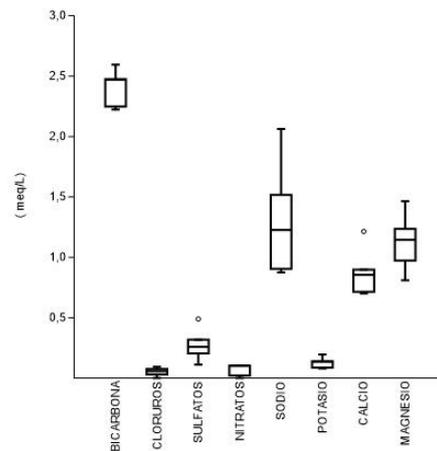


Figura 2.5 Caja de boxplot sin valores atípicos

Valoración de análisis químico de las aguas subterráneas

Se realizó el balance de cationes y aniones para comprobar si el error es aceptable mediante el cálculo de la suma de cationes, suma de aniones y error admisible.

En la tabla 2 se puede observar que en el sub – sistema acuífero Sur de Quito la suma de cationes es de 1.69 meq/L, la suma de aniones es de 2.28 meq/L y existe un error admisible del 9.91%.

Tabla.2 Balance de cationes y aniones del sub – sistema acuífero Sur de Quito

meq/L	BICARBONATOS	CLORUROS	SULFATOS	NITRATOS	SODIO	POTASIO	CALCIO	MAGNESIO
	1,6	0,165	0,13	0,39	0,56	0,11	0,9	1,12
suma cationes	2,69		ERROR %	9,91708211				
suma aniones	2,285							

En la tabla 2.1, se puede observar que en el sub – sistema acuífero Centro Norte la suma de cationes es de 4.47 meq/L, la suma de aniones es de 4.13 meq/L y existe un error admisible del 8.07%.

**Tabla 2.1 Balance de cationes y aniones del
Sub – sistema acuifero Centro Norte**

meq/L	BICARBONATOS	SULFATOS	CLORUROS	NITRATOS	SODIO	POTASIO	CALCIO	MAGNESIO
	3,368	0,362	0,176	0,221	1,138	0,141	1,449	1,746
suma cationes	4,47		ERROR %	8,06882921				
suma aniones	4,13							

En la tabla 2.2, se puede observar que en el sub – sistema acuifero Pifo – El Quinche la suma de cationes es de 3.38 meq/L, la suma de aniones es de 3.34 meq/L y existe un error admisible del 1.19%.

**Tabla 2.2 Balance de cationes y aniones del
Sub – sistema acuifero Pifo – El Quinche**

meq/L	BICARBONATOS	CLORUROS	SULFATOS	NITRATOS	SODIO	POTASIO	CALCIO	MAGNESIO
	2,39	0,6	0,27	0,08	1,27	0,13	0,87	1,11
suma cationes	3,38		ERROR %	1,19047619				
suma aniones	3,34							

Método estadístico de análisis multivariante de clúster

Este método estadístico se aplicó con el objetivo de conocer la similitud que existe entre los tres sub – sistemas acuíferos en forma de dendograma, como se puede observar en la Figura 3, que indica que los sub – sistemas acuíferos que tiene mayor similitud son el Sur y Pifo - El Quinche a pesar de pertenecer a diferentes sistema acuífero esto se da por las concentraciones de los iones mayoritarios presentes (Anexo E), debido a la dirección de flujo sur este – nor oeste se presentan concentraciones más altas en el sub – sistema acuífero Centro Norte.

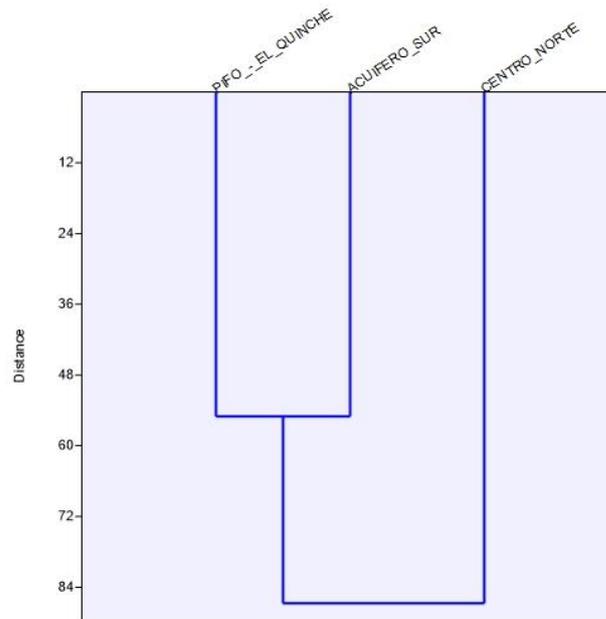


Figura 3. Dendrograma de comparación de similitud de los sub – sistemas acuíferos

Identificación de los procesos hidroquímicos

Los resultados fueron generados a partir de diagramas hidroquímicos de interacción roca - agua como el diagrama de Piper y también mediante relaciones iónicas.

Diagrama de Piper

Los diagramas de Piper indican que los puntos de agua en la Figura 4 y 5, se encuentran en la zona de las aguas bicarbonatadas - cálcica – magnésicas, mientras que en la Figura 6 los puntos se encuentran más esparcidos; en el caso de los aniones, hay una variación geoquímica de bicarbonatos que ligeramente tienden a sulfatos y en los cationes, varia de cálcica magnésica a sódica.

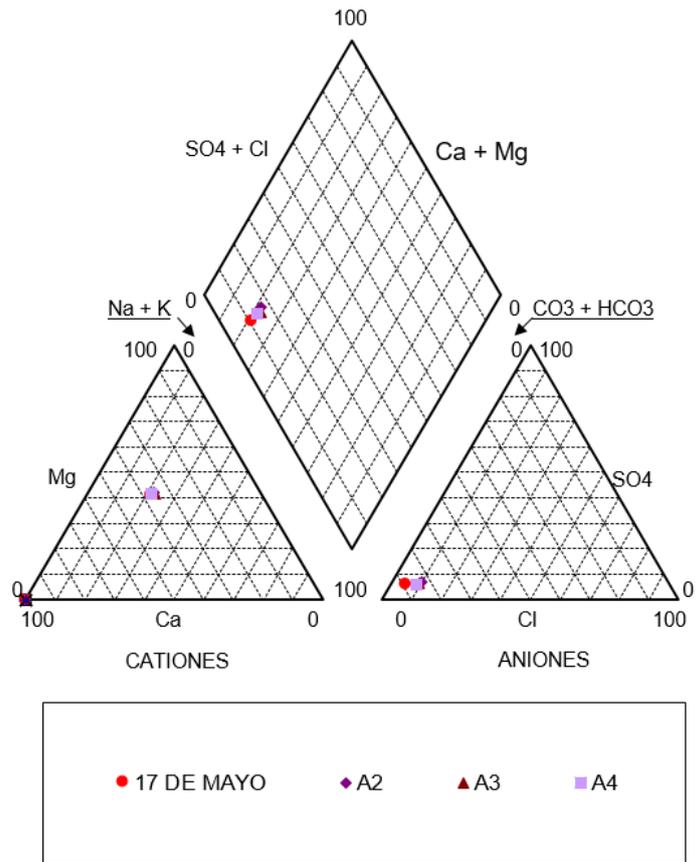


Figura 4. Diagrama de Piper representado del sub – sistema acuífero Sur

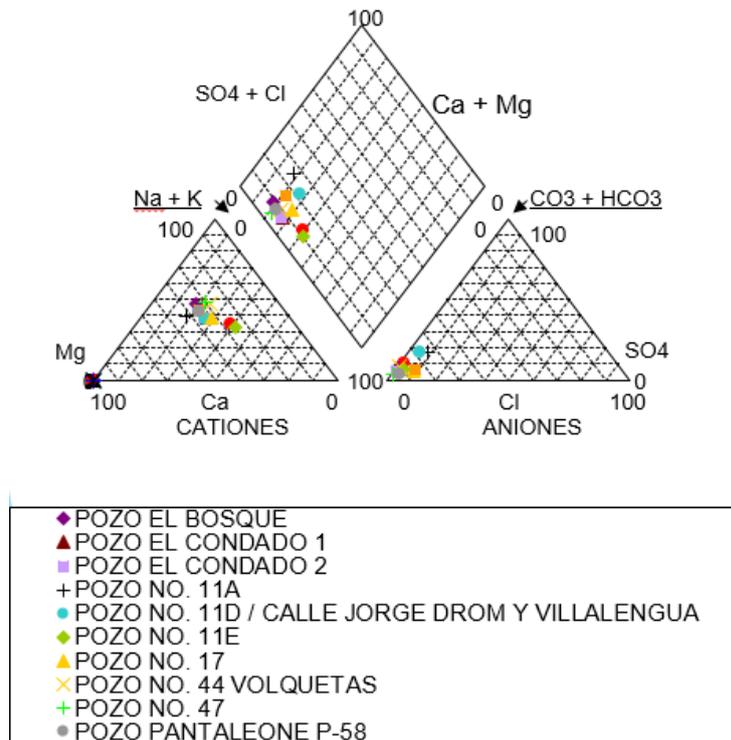


Figura 5. Diagrama de Piper representado del sub – sistema acuífero Centro Norte

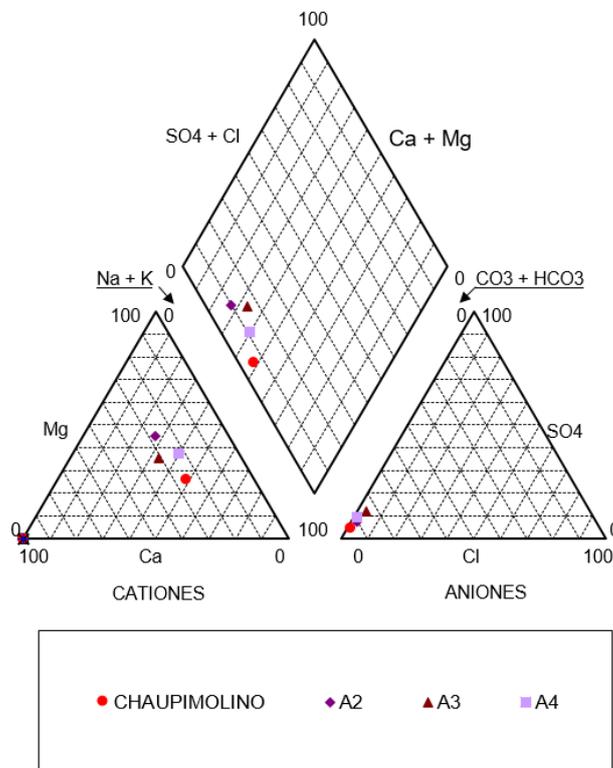


Figura 6. Diagrama de Piper representado del sub – sistema acuífero Pifo – El Quinche

Relaciones iónicas

Los resultados de la relación iónica de los SiO_2 indica que el sub – sistema acuífero Sur tiene una valor de 0.3 mmol/L el Centro Norte un valor de 0.6 mmol/L y el Pifo – El Quinche 0.6 mmol/L como se puede observar en la Figura 7. Estos valores indican la presencia de vidrio volcánico.



Figura 7. Resultados de la relación iónica de SiO_2

Los resultados de la relación iónica de los SiO_2/ HCO_3^- indica que el sub – sistema acuífero Sur tiene una valor de 2 mmol/L, el Centro Norte un valor de 4 mmol/L y el Pifo – El Quinche 3.5 mmol/L como se puede observar en la Figura 7.1, por tener valores bajos a 5 mmol/L se genera meteorización de silicatos.

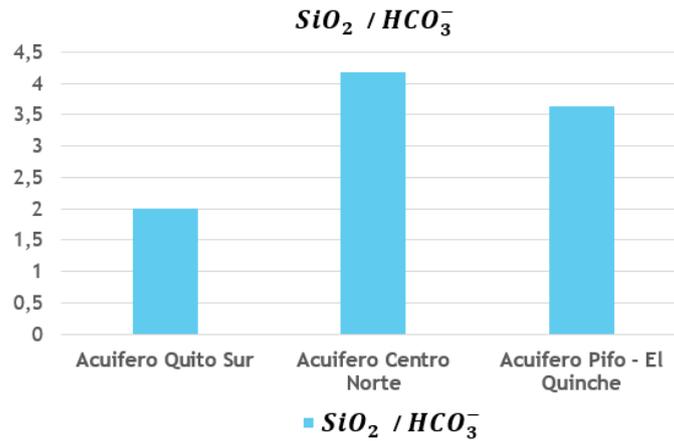


Figura 7.1 Resultados de la relación iónica de SiO_2

Los resultados de la relación iónica de los SiO_2 / HCO_3^- indica que el sub – sistema acuífero Sur tiene un valor de 2.8 mmol/L, el Centro Norte un valor de 2.3 mmol/L y el Pifo – El Quinche 1.7 mmol/L como se puede observar en la Figura 7.2. Al ser los valores mayores a 1 mmol/L hay la presencia de minerales ferromagnesianos.

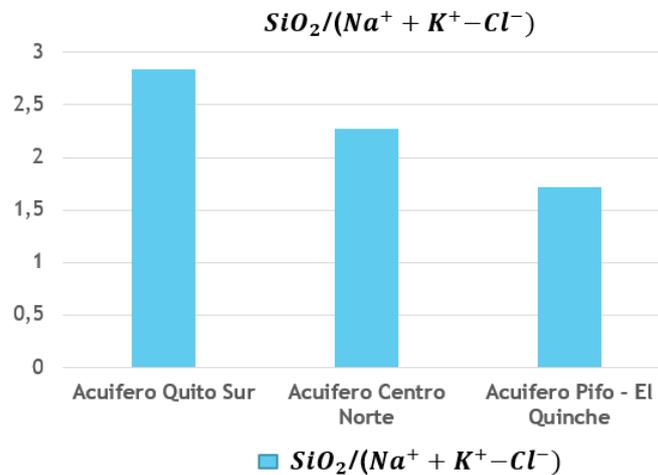


Figura 7.2 Resultados de la relación iónica de SiO_2

Deltas iónicos

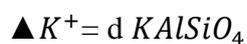
Cálculo del porcentaje de mezcla y las fracciones de agua de descarga, recarga a partir de las concentraciones de cloruros

Los resultados de los porcentajes a partir de las fracciones de agua fueron en la de descarga 33.33% y recarga 66.67%. Conocidas las fracciones de agua que intervienen, se calculó la mezcla teórica para el resto de iones, de la diferencia de ésta con la mezcla real reflejada como se puede ver en la tabla 3.

Tabla 3. Concentraciones de aguas de recarga, descarga, mezcla teórica y real

meq/L	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺
Agua de recarga	0,028	0,23	2,68	0,59	1,14	1,56	0,1
Agua final	0,031	0,24	2,53	0,73	0,99	1,65	0,05
Agua de mezcla (real)	0,029	0,09	2,38	0,78	1,1	1,75	0,07
Mezcla teórica	0,029	0,23	2,63	0,64	1,09	1,59	0,08
Mezcla real - mezcla teórica	0,00	-0,14	-0,25	0,14	0,01	0,16	-0,01
Mezcla real - mezcla teórica (mmol/L)	0,00	-0,07	-0,25	0,14	0,01	0,08	-0,01

De la diferencia entre la mezcla real y la teórica reflejada en el análisis se deducen las reacciones modificadoras de la composición que han tenido lugar.



Los resultados con base en las reacciones planteadas permitieron elaborar las bases de un modelo conceptual (figura 8) y fueron

a = 0.01 mmol/L de Calcio se disuelven en el agua.

b = 0.08 mmol/L de Magnesio se disuelven en el agua.

d = -0.01 mmol/L de $KAlSi_3O_8$ (feldespatos) se alteran en las arcillas.

e = 0.04 mmol/L de Calcio y 0.04 mmol/L de Magnesio se disuelven en el agua y 0.14 mmol/L de agua se desadsorben.

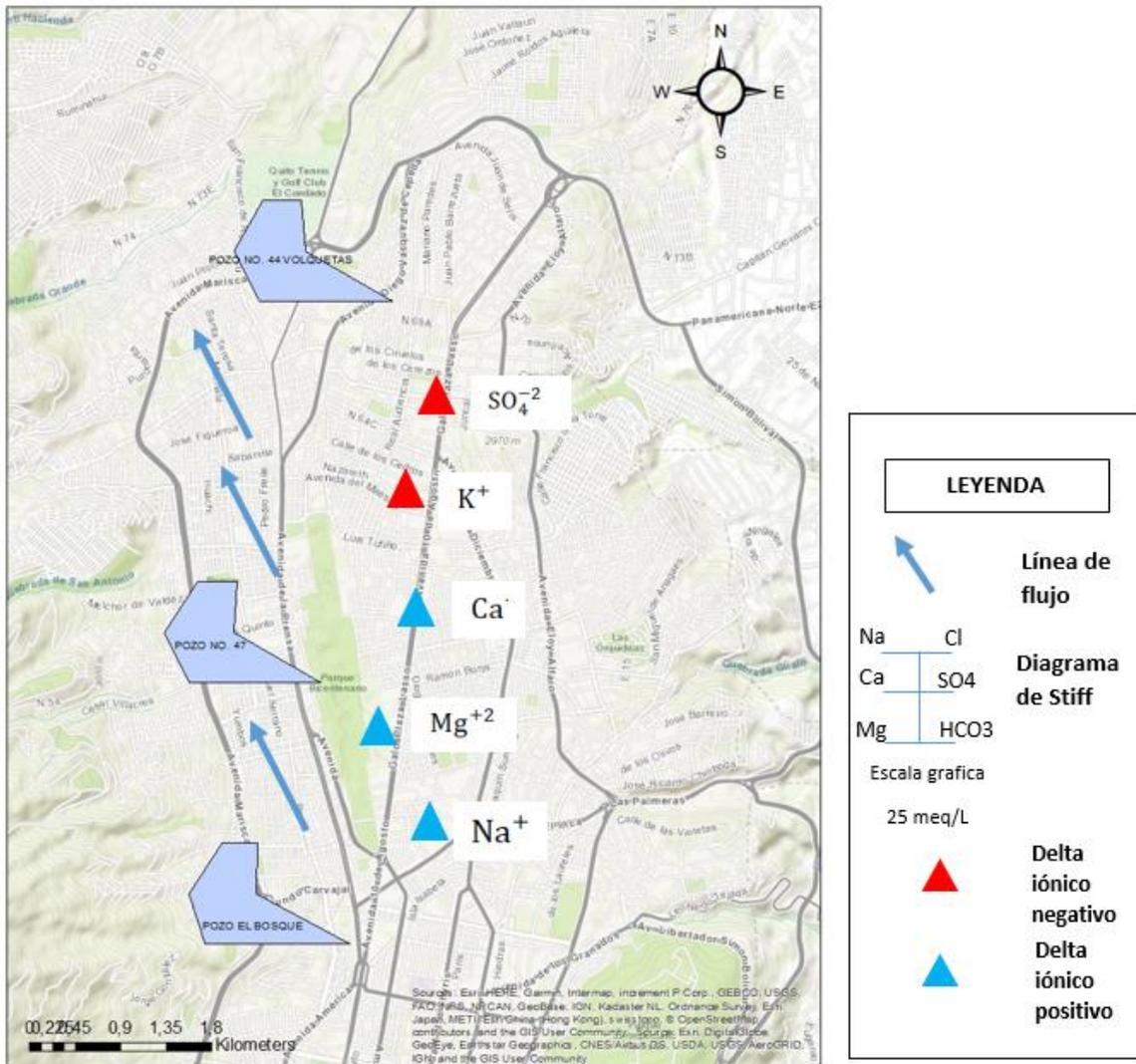


Figura 8. Modelo conceptual basado en los resultados de los deltas ionicos del sub – sistema acuífero Centro Norte

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados del análisis de las cajas de boxplot para eliminar los valores atípicos fueron realizados para poder descartar los valores que se encontraban fuera de rango y que el coeficiente de variación no sea muy alto como se puede ver en el (Anexo A) se encuentran los valores de la media y el coeficiente de variación con los valores atípicos y en el (Anexo B) los resultados sin los valores atípicos, al realizar la comparación entre las dos tablas se ve como al eliminar los valores atípicos el coeficiente de variación es menor; en cuanto a la abundancia en las concentraciones de los parámetros estas coinciden con los estudios realizados anteriormente de acuerdo a las facies que presentan estos de bicarbonatadas cálcicas magnésicas evolucionando a sódicas (Peñañiel, 2009; Muñoz, 2005; Delgado, 2008).

En el caso de los resultados de los balances de cationes y aniones para comprobar si el valor del error es admisible, el porcentaje del error calculado se comparó con los valores de la conductividad eléctrica que presenta el agua (Anexo C). Al ser los porcentajes del error no mayores al 10% según el (Anexo D) se observa que el error es aceptable ya que las conductividades eléctricas del agua oscilan entre 200 y 500 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) (Custodio, 1997; Digat, 2012).

Según los resultados obtenidos a partir de los diagramas de Piper, las aguas presentan mayor concentración de bicarbonatos por la descomposición de materia orgánica, lo cual genera ácidos y generando iones de bicarbonato; la variación que existe entre las aguas bicarbonatadas a sulfatadas (Anexo F) se debe a las profundidades y a la litología que presentan los sub – sistemas acuíferos. Además como se muestra en el (Anexo G) se da intercambio iónico ya que en el triángulo que muestra a los cationes hay una recta paralela entre el calcio y el sodio y en el triángulo de los aniones no existe ninguna variación.

Los resultados de las relaciones iónicas están basados en el texto de (Hounslow, 1995) representado en el (Anexo H); en el primer caso se presenta la relación entre SiO_2 en la cual los

valores de los tres sub – sistemas acuíferos son mayores a 0.3 por lo tanto el tipo de roca con la que ha tenido contacto el agua subterránea es el vidrio volcánico, esto tiene sentido ya que concuerda con (Coello, 2002; Muñoz, 2005) que mencionan que la litología de los acuíferos del DMQ está formada por depósitos volcánicos.

En el segundo caso en el que se presenta la relación entre $\text{HCO}_3^- / \text{SiO}_2$ cuando los valores son menores a 5 se produce meteorización de silicatos y cuando estos son mayores a 5 se produce meteorización de rocas carbonatadas o calizas, el resultado que se obtuvo fue la meteorización de silicatos esto debido a que los sub – sistemas acuíferos están constituidos por sedimentos de grano fino como son el limo y la arcilla (Muñoz, 2005). No puede haber meteorización de calizas ya que este tipo de roca no se presenta en la zona de estudio. En tercer lugar en la relación de $\text{SiO}_2 / \text{Na}^+ \text{K}^+ \text{Cl}^-$ cuando los valores son mayores a 1 se produce intercambio catiónico, en el caso de que los valores sean mayores a 1 y menores a 2 se produce meteorización de albita y en el caso de que los valores sean mayores a 2, existe posible contacto con minerales ferromagnesianos, los resultados mostraron que se da meteorización de albita ya que este es un mineral que pertenece a los silicatos también conocido como plagioclasas que se da en las rocas de origen volcánico (Proce, 2008), en esta relación también se da intercambio iónico debido a la presencia de arcillas que tienen los sub – sistemas acuíferos, también se da contacto con minerales ferromagnesianos posiblemente con biotita ya que este mineral es originado por rocas volcánicas y estructuras de grano fino (EPMAPS, 2009).

Los resultados de los deltas iónicos se muestran de acuerdo a los valores y signos positivos o negativos obtenidos en la diferencia entre la mezcla real y la mezcla teórica (tabla 2), el signo al ser positivo hace referencia a moles formados de dicho ion y al ser el signo negativo hace referencia a moles que han desaparecido y se han transformado en otra especie según las reacciones que se formaron los posibles procesos que se dan en el agua subterránea de la zona de estudio es el intercambio iónico de sodio por calcio y también sodio por magnesio, además

del incremento de sodio y la variación en el potasio esto por la presencia de las arcillas. Posiblemente el calcio y el magnesio se disuelvan en las arcillas y la variación en el potasio sea por la presencia de feldespatos y la posible disolución de vidrio volcánico transformándolo en arcillas, con esto se puede observar que mientras el calcio es liberado de las arcillas el potasio posiblemente es adsorbido por ellas.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos y las discusiones realizadas en este estudio permitieron desarrollar las siguientes conclusiones:

A través de la interpretación de los datos hidroquímicos y la caracterización de las facies se concluye que estas son las mismas a lo largo de todo el acuífero, esto debido a que las características geológicas que presenta el DMQ; en los tres sub – sistemas acuíferos tienen una estructura similar de grano fino como el limo y la arcilla y a la presencia de rocas de origen volcánico.

Mediante la elaboración del modelo conceptual con el uso de los deltas iónicos se pudo llegar a la conclusión de que los procesos que se involucran en la interacción agua –roca a lo largo de su recorrido es el intercambio iónico entre los cationes Ca^{+2} , Mg^{+2} por el Na^{+} desde la zona de recarga hasta la de descarga, esto por la presencia de las arcillas.

Los factores que más influencia tienen en el quimismo de las aguas subterráneas en el área de estudio son la litología que presenta la región y las actividades antrópicas.

REFERENCIAS

- Aquachem v 5.1, Schlumberger Water Service, Water Data Analysis Plotting and Modeling, Copyright 2006, Waterloo Hydrogeologic.Ing.
- Atlas Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito. (2008). Recursos Naturales en el Distrito Metropolitano de Quito: Agua. Ilustre Municipio Del Distrito Metropolitano de Quito, 19.
- Borrego del Pino, S. (2008). Estadística Descriptiva E Inferencial I. *Revista Digital Universitaria*, N° 13, 1–12.
- Coello, X., & Galárraga, H. (2002). Metodologías para el análisis de la vulnerabilidad de acuíferos en medios urbanos, el caso de Quito, Ecuador. *Groundwater and Human Development*, 37-45.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., & Savard, M. M. (2008). Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 353(3–4), 294–313.
- Custodio, E., Llamas, M. R., & Samper, J. (1997). La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Asociación Internacional de Hidrogeólogos.
- Delgado Checa, C. S. (2008). Hidrogeología y modelación preliminar del acuífero Pifo-El Quinche (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2008).
- Delgado Munevar, W. (2015). Gestión y valor económico del recurso hídrico. *Revista Finanzas y Política Económica*, 7 (2), 279-298.
- Digat, G. Y., de Miguel Fernández, C., & Castillo, J. R. F. (2012). Caracterización hidrogeoquímica de la subcuenca Najasa, cuenca Costera Sur de Camagüey. *Revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 33(2), 34-49.
- EMAAP-Q- DAQ, (2004): Estudio Hidrogeológico y Modelación del Acuífero Centro Norte de Quito
- EMAAP-Q- DAQ, (2008): Estudio Hidrogeológico del Acuífero Pifo – El Quinche.
- EMAAP-Q- DAQ, (2009): Mapa hidrogeologico del DMQ.
- Escuder, R., Fraile, J., Jordana, S., Ribera, F., Sánchez-Vila, X., & Vázquez-Suñé, E. (2009). Hidrogeología. Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona.
- García, M., Contreras, C. Y., Sánchez L., F. D., Marín R., R., Guzmán A., H., Wilches S., J. H., Niño R., R. (1999). Sistema de Información Componente Hidrológico Redes, Mediciones, Observaciones y procesos básicos, 321.
- Hounslow, M. W., & Morton, A. C. (1995). Evaluation of sediment provenance using magnetic mineral inclusions in clastic silicates: comparison with heavy mineral analysis. *Sedimentary Geology*, 171(1-4), 13-36.
- Llamas, R., & Custodio, E. (1999). Aguas subterráneas. *Afers Internacionals*, 45–46, 35–57
- Muñoz Martinez, T. (2005). Modelacion del nivel principal del acuífero Centro Norte de

- Quito (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2005).
- Peñafiel Aguilar, L. (2009). Geología y análisis del recurso hídrico subterráneo de la subcuenca del sur de Quito (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2009).
- Procel Guerra, S. (2008). Modelación del acuífero Pusuquí-San Antonio de Pichincha (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2008).
- Sahuquillo, A., Custodio, E., & Llamas Madurga, M. R. (2008). La gestión de las aguas subterráneas. Fundación Nueva Cultura Del Agua, (1), 26
- Vallejos, A., Pulido-Bosch, A., Sánchez Martos, F., Gisbert, J., & Molina, L. (2005). Evolución geoquímica de las aguas subterráneas en el borde meridional de la Sierra de Gádor (Almería). *Geogaceta*, 37(1), 99–102.
- Véliz, Y. Z. (2014). Modelos de evaluación de la importancia del impacto ambiental en contextos complejos bajo incertidumbre (Doctoral dissertation, Universidad de Granada).

ANEXO A. Valores de la media y el coeficiente de variación con valores atípicos

	BICARBONATOS	SULFATOS	CLORUROS	NITRATOS	SODIO	POTASIO	CALCIO	MAGNESIO
N	3	3	3	3	3	3	3	3
Min	97,34	6,09	0	0	12,79	4,4	17,31	13,44
Max	205,504	17,29	7,22	24,27	29,13	5,59	28,98	21,12
Sum	448,484	36,38	13,09	38,03	69,05	14,88	64,26	48,07
Mean	149,4947	12,12667	4,363333	12,67667	23,01667	4,96	21,42	16,02333
Coeff. var	36,24539	46,59849	87,97338	96,01273	38,72337	12,05807	30,6044	27,54721

ANEXO B. Valores de media y coeficiente de variación eliminando los valores atípicos

	BICARBONATOS	SULFATOS	CLORUROS	NITRATOS	SODIO	POTASIO	CALCIO	MAGNESIO
N	3	3	3	3	3	3	3	3
Min	97,34	6,09	2,12	5,12	12,79	4,4	17,31	13,44
Max	205,504	17,29	7,22	24,27	29,13	5,59	28,98	21,12
Mean	149,4947	12,12667	5,07	14,38333	23,01667	4,96	21,42	16,02333
Coeff. var	36,24539	46,59849	52,11917	66,67582	38,72337	12,05807	30,6044	27,54721

ANEXO C. Valores de conductividad eléctrica

SUB - SISTEMA ACUIFERO	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA (uS/cm)
SUR	299,33
CENTRO NORTE	345,31
PIFO - EL QUINCHE	252

ANEXO D. Tabla del valor del error resultante y el valor de la conductividad eléctrica del agua.

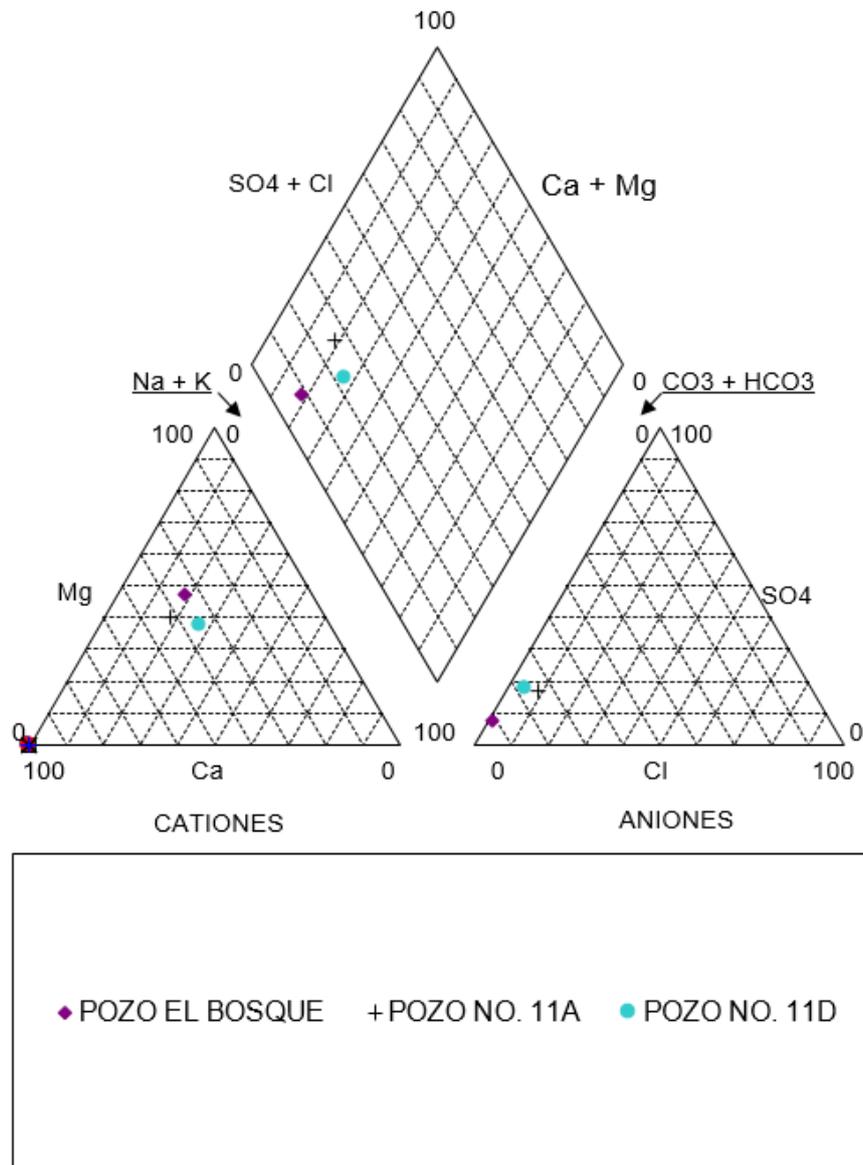
Conductividad eléctrica (µS/cm)	50	200	500	2000	>2000
Error admisible (%)	30	10	8	4	4

Fuente: (Custodio, 1999).

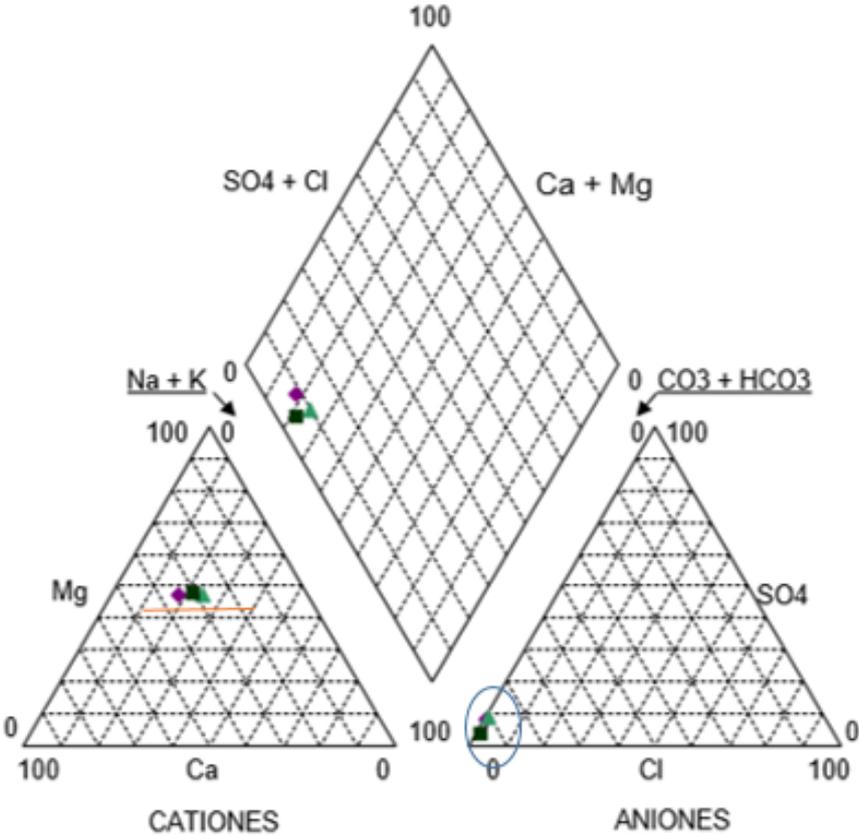
ANEXO E. Concentraciones de iones mayoritarios por sub – sistema acuífero

	ACUIFERO SUR	CENTRO NORTE	PIFO - EL QUINCHE
BICARBONATOS	97,34	205,504	145,64
SULFATOS	6,09	17,29	13
CLORUROS	5,87	7,22	2,12
NITRATOS	24,27	13,76	5,12
SODIO	12,79	27,13	29,13
POTASIO	4,4	5,59	4,89
CALCIO	17,97	28,98	17,31
MAGNESIO	13,51	21,12	13,44

ANEXO F. Diagrama de Piper representado de los pozos 11 A, 11 D Y El Bosque



ANEXO G. Diagrama de Piper representado de los pozos El Bosque, 44 Volquetas y 47



ANEXO H. Relaciones iónicas para conocer el tipo de roca que hace contacto con el agua subterránea

SiO_2	$> 0,3$	Vidrio Volcánico o Agua Termal
$\text{HCO}_3 / \text{SiO}_2$	> 10 $> 5 \text{ y } < 10$ < 5	Intemperismo (Meteorismo) de Caliza Ambiguo Intemperismo de Silicato
$\text{SiO}_2 / (\text{Na} + \text{K} + \text{Cl})$	< 1 $> 1 \text{ y } < 2$ > 2	Cambio Catiónico Intemperismo de Albita Minerales ferromagnesianos
$(\text{Na} + \text{K} + \text{Cl}) / (\text{Na} + \text{K} + \text{Cl} + \text{Ca})$	$> 2 \text{ y } < 0,8$ $< 0,2 \text{ ó } > 0,8$	Posiblemente intemperismo de plagioclasas Improbable intemperismo de plagioclasas
$\text{Na} / (\text{Na} + \text{Cl})$	$> 0,5$ $= 0$	Fuente Na otro que halita (Albita o Cambio iónico) Solución de Halita
$\text{Mg} / (\text{Ca} + \text{Mg})$	$\text{HCO}_3 / \text{SiO}_2 > 10$ $= 50$ $< 0,5$ $> 0,5$ $\text{HCO}_3 / \text{SiO}_2 < 5$ $> 0,5$	Intemperismo de caliza Intemperismo de Dolomita Intemperismo de Dolomita – Caliza Solución de dolomita, precipitación de calcita o agua marina Intemperismo de Silicato Minerales ferromagnesianos
$\text{Ca} / (\text{Ca} + \text{SO}_4)$	$= 0,5$ $< 0,5; \text{pH} < 5,5$ $< 0,5; \text{pH} \text{ neutro}$ $> 0,5 \text{ Ca no de yeso}$	Solución de Yeso Oxidación de pirita Remoción de Ca cambio iónico o precipitación calcita Carbonatos o Silicatos

Fuente: (Hounslow, 1995).