



MARN

Ministerio de Medio Ambiente
y Recursos Naturales

Informe de monitoreo de los Acuíferos de Zapotitán, Santa Ana y San Miguel

Contenido

Resumen Ejecutivo	6
Introducción.....	7
1. Objetivos.....	8
1.1. Objetivo general	8
1.2. Objetivos específicos	8
2. Ubicación de las zonas de estudio	8
3. Metodología.....	8
3.1. Investigación bibliográfica	9
3.2. Trabajo de campo	9
3.3. Etapa de análisis e interpretación de resultados del análisis de laboratorio	9
4. Caracterización del medio físico	9
4.1. Geología	9
4.1.1. Marco geológico.....	9
4.1.2. Geología local área Zapotitán-Opico	10
4.1.2.1. Formación San Salvador.....	10
4.1.2.2. Formación Cuscatlán.....	11
4.1.2.3. Formación Bálsamo.....	11
4.1.3. Geología local área Santa Ana.....	14
4.1.3.1. Formación San Salvador.....	14
4.1.3.2. Formación Cuscatlán.....	15
4.1.3.3. Formación Bálsamo.....	15
4.1.3.4. Formación Morazán	17
4.1.4. Geología local área San Miguel	17
4.1.4.1. Formación San Salvador.....	17
4.1.4.2. Formación Cuscatlán.....	18
4.2. Climatología e hidrografía.....	20
4.2.1. Climatología	20
4.2.2. Hidrografía	21
5. Hidrogeología.....	25
5.1. Marco Hidrogeológico	25
5.1.1. Unidad Acuífero Volcánico Fisurado de Gran Extensión y Posiblemente Alta Producción	25
5.1.2. Unidad Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media	25
5.1.3. Unidad Rocas No Acuíferas	25

5.1.4.	<i>Unidad Acuíferos Locales de Extensión Limitada y de Productividad Mediana a Baja (sólo zona Santa Ana)</i>	25
5.2.	Hidrogeología local	29
5.2.1.	<i>Pozos de monitoreo Zona Zapotitán-Opico</i>	29
5.2.2.	<i>Evolución temporal de la profundidad de los niveles piezométricos en la Zona de Zapotitán</i> 30	
5.2.3.	<i>Pozos de monitoreo Zona Santa Ana</i>	31
5.2.4.	<i>Evolución temporal de los niveles piezométricos zona Santa Ana</i>	33
5.2.5.	<i>Pozos de monitoreo Zona San Miguel</i>	33
5.2.6.	<i>Evolución temporal de los niveles piezométricos</i>	35
6.	Caracterización físico-química de las aguas subterráneas	36
6.1.	Confiabilidad de los resultados obtenidos de concentraciones de iones mayoritarios. .	37
6.2.	Composición y clasificación físico-química del agua subterránea.....	38
6.2.1.	<i>Zona de estudio Zapotitán- Opíco</i>	38
6.2.2.	<i>Zona de estudio Santa Ana</i>	41
6.2.3.	<i>Zona de estudio San Miguel</i>	44
7.	Conclusiones	48
	Bibliografía	49

Índice de figuras

<i>Figura 1 Ubicación de pozos de monitoreo del acuífero de Zapotitán en la cuenca del Río Sucio....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2 Evolución temporal de la profundidad de nivel piezométrico en los diferentes pozos de monitoreo.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3 Ubicación de pozos de monitoreo del acuífero de Santa Ana en la en cuenca del Río Apanchacal.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4 Evolución temporal de la profundidad de nivel piezométrico en los diferentes pozos de monitoreo.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 5 Ubicación de pozos de monitoreo para el acuífero de San Miguel en sub cuencas del Río Grande de San Miguel.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 6 Evolución temporal de la profundidad de nivel piezométrico en los diferentes pozos de monitoreo.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 7 Gráfico representativo de la Conductividad eléctrica vrs. Electroneutralidad de los sitios de monitoreo.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 8 Diagramas de Stiff para la clasificación del tipo de agua subterránea procedente de los pozos de la red de monitoreo para la campaña de Octubre de 2015.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 9 Diagramas de Stiff para la clasificación del tipo de agua subterránea procedente de los pozos de la red de monitoreo para la campaña de Octubre del 2015.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 10 Diagramas de Stiff para la clasificación del tipo de agua subterránea procedente de los pozos de la red de monitoreo para Octubre del 20115.....</i>	<i>47</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla 1 Regiones climáticas según Koppen y Sapper-Lauer.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 2 Ubicación y niveles de los pozos de la red de monitoreo para las campañas de época seca y lluviosa.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 3 Detalle de los pozos de monitoreo en el acuífero de Santa Ana.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 4 Detalle de los pozos de monitoreo en el acuífero de San Miguel.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 5 Resultados físico-químico de la campaña de muestreo de Octubre del 2015.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 6 Clasificación del tipo de agua subterránea en función de la caracterización hidrogeoquímica de los pozos muestreados en las campañas del 2015.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 7 Resultados físico-químico de la campaña de muestreo de época lluviosa (Octubre) del 2015.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 8 Clasificación del tipo de agua subterránea en función de la caracterización hidrogeoquímica de los pozos muestreados en las campañas del 2015.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 9 Resultados físico-químico de la campaña de muestreo de octubre del 2015.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 10 Clasificación del tipo de agua subterránea en función de la caracterización hidrogeoquímica de los pozos muestreados en las campañas del 2015.....</i>	<i>46</i>

Resumen Ejecutivo

El Informe de pozos de monitoreo de los Acuíferos de Zapotitán, Santa Ana y San Miguel es el producto del monitoreo que se tiene en los acuíferos del país y contempla el análisis e interpretación de la información hidrogeológica existente, así como de la información recopilada en las diferentes fases de campo, a través de las campañas de medición de niveles y toma de muestras de agua de pozos para la caracterización físico-química de las aguas subterráneas de la zona de estudio. Complementario a la investigación de campo que se realiza y el respectivo análisis e interpretación de los datos obtenidos; se incluyen secciones, en la estructura de dicho Informe, en las que se establecen los *objetivos* del estudio, la *ubicación de las zonas de estudio*; la *metodología* empleada, la cual está compuesta por tres etapas: una investigación bibliográfica, una etapa de visitas de campo y la etapa final de análisis e interpretación de resultados.

El informe está estructurado de manera que en cada una de las secciones se detallan el análisis, información y resultados para cada uno de los acuíferos en estudio.

En la sección *Hidrogeología*, se estudia la Evolución temporal de los niveles piezométricos, en la que se presentan las mediciones de los niveles del agua subterránea para el 2015 así como el de los registros que se tienen desde el 2012 en los pozos de la red de monitoreo para cada uno de los acuíferos en estudio, así como la hidrogeología local en detalle; Se incluye también una sección para la *caracterización físico-química de las aguas subterráneas*, en la que se detalla la composición físico-química del agua subterránea a través de la concentración y valores de los diferentes parámetros físico-químicos analizados en el Laboratorio y con dichos resultados se establece una clasificación tanto física (en función del pH, conductividad eléctrica, etc) como química (con la ayuda de los diagramas de Piper y Stiff) y por supuesto las respectivas *Conclusiones* del estudio.

Dicho estudio responde y es parte del seguimiento y monitoreo que la Dirección General del Observatorio Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales tiene implantado.

Introducción

Por lo general el agua subterránea presenta una mejor calidad que la superficial, cuando no está sometida a procesos de contaminación directa y por lo tanto se deben establecer mecanismos de gestión que garanticen la protección, calidad y disponibilidad a futuro de este recurso; ya que en comparación con el agua superficial el tratamiento del agua subterránea es por lo general más complejo y por ende más costoso (remediación de acuíferos).

En este sentido es importante generar investigaciones que proporcionen información que sirva de base para la elaboración de políticas encaminadas a la protección del recurso hídrico, tanto subterráneo como superficial.

El presente estudio responde a esta necesidad de generar investigaciones que permitan caracterizar hidrogeológicamente los acuíferos de nuestro país, de manera que se conviertan en herramientas de apoyo a la gestión del recurso hídrico y en particular al subterráneo.

En el año 2015, específicamente durante los meses de marzo, abril y octubre se realizaron campañas de medición de niveles en los pozos de monitoreo excavados en los acuíferos someros de Santa Ana, Zapotitán y San Miguel.

Además de la medición de niveles, en cada uno de los pozos, se tomaron muestras de agua, en el mes de octubre, para hacer análisis fisicoquímicos de las aguas subterráneas de los acuíferos someros, los parámetros analizados fueron los siguientes: pH, Conductividad, Salinidad, Alcalinidad, Bicarbonatos, Boro (sólo para época seca), Calcio, Carbonatos, Cloruros, Dureza total, Flúor, Fosfatos, Hierro, Magnesio, Manganeseo, Nitratos, Nitrógeno amoniacal, Potasio, Sílice, Sólidos disueltos totales, Sodio, Sulfatos entre otros. Con estos resultados se ha podido caracterizar geoquímicamente las aguas subterráneas de los mencionados acuíferos someros. Los pozos identificados y monitoreados corresponden a la red de monitoreo de aguas subterráneas que la Dirección General del Observatorio Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales tiene implantado.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Elaborar una caracterización de las condiciones hidrogeológicas predominantes en los acuíferos de Santa Ana, Zapotitán y San Miguel para contribuir al conocimiento de los mismos.

1.2. Objetivos específicos

- Identificación de unidades hidrogeológicas presentes en cada uno de los acuíferos en estudio
- Identificar la evolución temporal de los niveles piezométricos para cada uno de los acuíferos
- Caracterización físico-química del agua subterránea para los acuíferos en estudio

2. Ubicación de las zonas de estudio

La zona de estudio para Zapotitán, se localiza en la cuenca del Río Sucio, el cual es afluente del Río Lempa. El Río Sucio se localiza en el Centro del Valle que se conoce como San Andrés o Zapotitán. Se estudian específicamente la parte que corresponde a los materiales Piroclásticos.

La zona de estudio para Santa Ana se localiza en la sub cuenca del río del mismo nombre (o Apanchacal), el cual es afluente y da origen al Río Suquiapa que desemboca en el Río Lempa. El Río Apanchacal se localiza inmediatamente al Norte de la Ciudad de Santa Ana: Al igual que la zona de Zapotitán, se estudia específicamente la parte que corresponde a los materiales Piroclásticos.

Finalmente, la zona de estudio de San Miguel se localiza en la cuenca del río Grande de San Miguel, el cual se localiza inmediatamente al Este de la Ciudad de San Miguel. Se estudian específicamente la parte que corresponde a los materiales Piroclásticos, al igual que las dos zonas de estudio anteriores.

3. Metodología

Para el correcto desarrollo de la investigación realizada en la zona de estudio y la elaboración del presente informe, se llevaron a cabo las siguientes tres etapas:

3.1. Investigación bibliográfica

Esta consistió en la recopilación de la información hidrogeológica, geológica, topográfica e hidrológica existente en la zona de estudio, a partir de la cual se diseñaron las campañas de trabajo de campo.

3.2. Trabajo de campo

Se realizaron campañas de reconocimiento e identificación de sitios representativos de las diferentes condiciones hidrogeológicas de la zona de estudio.

Se realizaron, además, 2 campañas de medición de niveles piezométricos (una en época seca y otra en la lluviosa) y una toma de muestras de agua en los pozos de monitoreo, en el mes de octubre.

3.3. Etapa de análisis e interpretación de resultados del análisis de laboratorio

A partir de los resultados obtenidos de las muestras de agua de los pozos de monitoreo, así como de la medición de los niveles estáticos durante las diferentes campañas de investigación, se realizó la integración e interpretación de los mismos y su interrelación con las variables físicas de la zona de estudio.

4. Caracterización del medio físico

4.1. Geología

4.1.1. Marco geológico

La geología de la zona de estudio, al igual que una gran parte del territorio del país, está determinada por mecanismos naturales que pueden clasificarse como:

- Fenómenos tectónicos
- Fenómenos volcánicos
- Procesos erosivos

Gran parte del istmo centroamericano se originó por procesos volcánicos; durante el periodo de volcanismo del plioceno se originaron dislocamientos en los materiales producidos por fallamientos normales e inversos. Estos fallamientos, según el mapa geológico de El Salvador, tienen orientaciones de acuerdo a los rumbos ONO y NNE, siendo los primeros los más importantes, ya que originaron el desarrollo de las unidades geomorfológicas principales del país. Las principales

unidades geomorfológicas identificadas en nuestro país son seis: Planicie Costera, Montaña Costera, Valle Central, Montaña Interior, Valle Interior y Montaña Norteña

4.1.2. Geología local área Zapotitán-Opico

De acuerdo al Mapa Geológico de El Salvador y al Léxico Estratigráfico de El Salvador (Baxter, 1984), en esta zona de estudio se encuentran las siguientes formaciones geológicas: San Salvador, Cuscatlán y Bálsamo, ordenadas de menor a mayor edad geológica.

4.1.2.1. Formación San Salvador

Esta formación se ubica cronológicamente en la época geológica del Pleistoceno, del periodo cuaternario de la era Cenozoica; comprende una amplia secuencia de rocas volcánicas producidas a lo largo del arco volcánico actual de El Salvador, que van desde rocas efusivas básicas e intermedias, hasta piroclastitas de flujo y caída, y algunas rocas ignimbríticas (soldadas y no soldadas), cuya edad va en el rango de Pleistoceno medio hasta el Holoceno (en general, < 1 millón de años, aproximadamente). En el área de estudio, esta formación geológica comprende siete miembros, que se describen brevemente a continuación.

a) Miembro s5´a

Este miembro fue introducido por Weber et al (1978) como una secuencia de rocas volcánicas efusivas de básicas a intermedias, contemporáneas con los miembros s3´b, s4, s5´b y s5´c.

b) Miembro s5´b

En el mapa geológico de la República (Weber et al.,1978), se introduce este miembro y se describe como acumulaciones de escorias, tobas de lapilli y cinder

c) Miembro s5´c

Secuencia volcánica constituida principalmente por cenizas y tobas de lapilli, principalmente de caída, que alcanzan espesores de algunos metros, ocasionalmente 10 m.

d) Miembro s4

La definición como miembro también se debe a Weber et al (1978), que lo definen como una secuencia de piroclastitas ácidas y epiclastitas subordinadas, en parte contemporáneas con los miembros s2, s3´b, s5´a y s5´c. Son tobas pumíceas, de flujo (ignimbritas no soldadas) y caída, conocidas frecuentemente como “Tierra blanca”, producidas durante la formación de la caldera de Ilopango.

e) Miembro s3´a

Este miembro, también descrito por Weber et al. (1978), se resume como una secuencia de piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas, específicamente tobas color café, en parte contemporáneo con los miembros s2 y s3´b. Son el producto de tobas de flujo y caída y en sectores localizados incluye lahares contemporáneos con la erupción que les dio origen, y que formó la caldera de Coatepeque.

f) Depósitos sedimentarios Cuaternarios Q´f

Son depósitos sedimentarios del cuaternario constituidos principalmente por secciones con intercalaciones de rocas piroclásticas, depósitos de estuario, barras costeras, depósitos coluviales, conos de deyección y suelos armor.

4.1.2.2. Formación Cuscatlán

En el Léxico Estratigráfico de El Salvador (Baxter, 1984) se describe como una secuencia volcano-sedimentaria de edad Plioceno-Pleistoceno (entre 1 y 2 millones de años de antigüedad, aproximadamente). Esta Formación está constituida en la base por tobas ácidas, subyacidas por lavas ácidas a intermedias y andesitas basálticas en la parte superior de la secuencia, así como sedimentitas en las cuencas intermontanas. En la zona de estudio afloran solo dos de los tres miembros, los cuales se describen a continuación.

a) Miembro c1

Es el miembro inferior de la Formación Cuscatlán y está constituido por unidades, tanto sedimentarias como volcánicas. Las primeras son fluvio-lacustres y las segundas tobas fundidas

a) Miembro c3

Unidad constituida por rocas volcánicas de tipo andesítica y basáltica. En la se detalla la extensión y la edad de los miembros que se encuentran en la zona de estudio

4.1.2.3. Formación Bálsamo

Algunos autores como Stirton & Gealey (1949) y Dürr (1960) le asignan una edad de Plioceno-Pleistoceno, del período cuaternario, Wiesemann et al (1978) del Mioceno-Plioceno del periodo Neogeno (Terciario), ambos de la era Cenozoica; se extiende en la parte Nor-Este y Nor-Oeste. La formación Bálsamo es anterior a la Cuscatlán y dentro de ella se distinguen los siguientes miembros:

1) Miembro b1

Constituida por epiclastitas volcánicas, piroclastitas e ignimbritas; localmente efusivas básicas-intermedias intercaladas, “facies claro” (con lapilli de pómez) y limo rojo (Rotlehm); alteración hidrotermal localmente. Es en parte contemporáneo con el miembro b2, del cual no hay presencia en la zona de estudio.

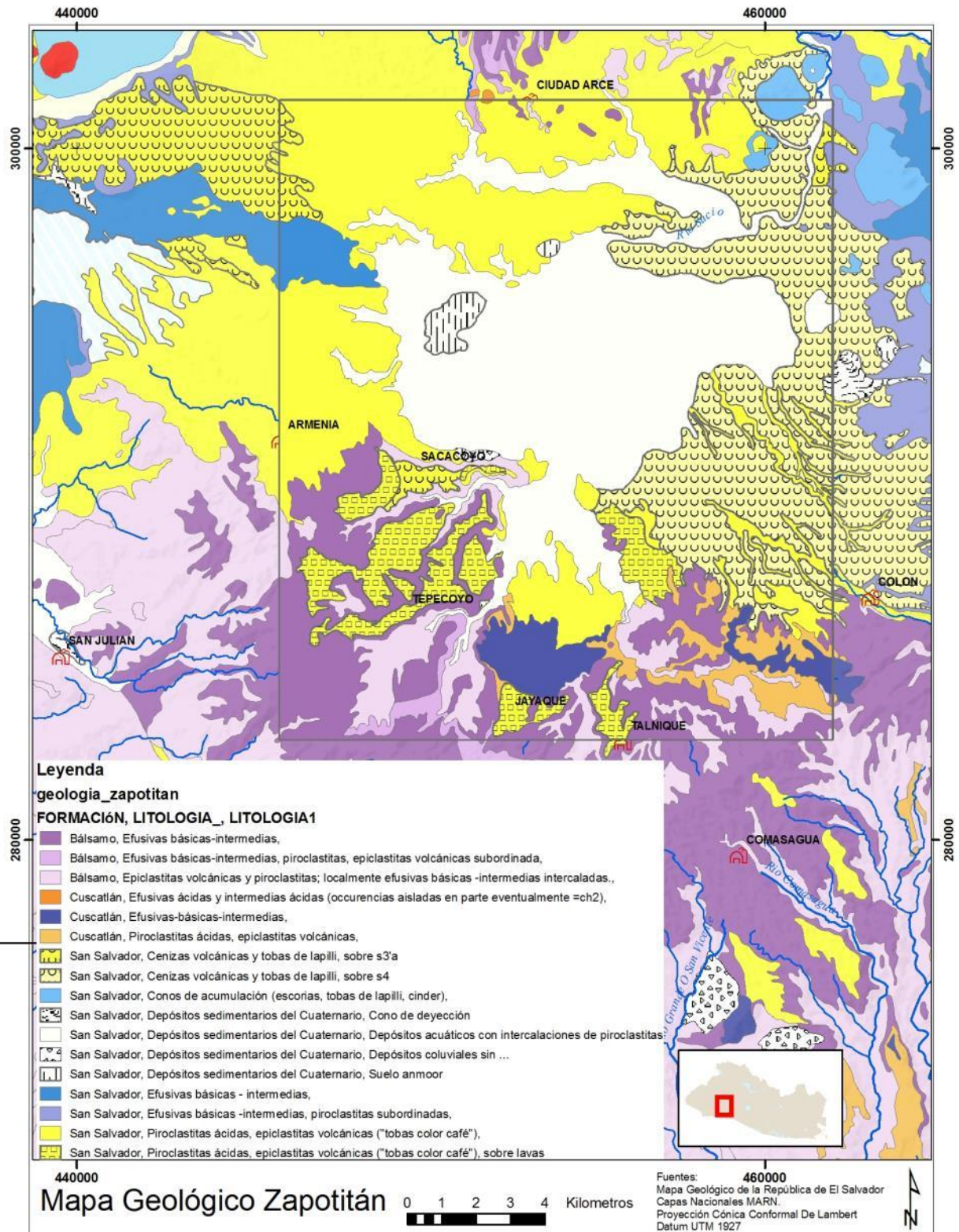
b) Miembro b2

Está constituido por lavas básicas a intermedias, piroclastitas y epiclastitas, localmente con alteración hidrotermal y oxidación.

c) Miembro b3

Es el miembro superior de la Formación Bálsamo, en parte contemporáneo con el miembro b2 y constituido por rocas efusivas básicas-intermedias. Localmente con alteración hidrotermal, silicificación y limos rojos.

A continuación se presenta el Mapa Geológico de la zona del Acuífero de Zapotitán y sus alrededores, en el que se pueden ver esta y las formaciones Cuscatlán y Bálsamo.



4.1.3. Geología local área Santa Ana

Las características geológicas de la zona presentan rocas volcánicas relacionadas con las formaciones Morazán (Oligoceno Superior?), Bálsamo (del Mioceno Medio al Plioceno) y Cuscatlán (Plioceno Superior a Pleistoceno Medio) hacia el norte y noreste, mientras que depósitos volcánicos de la Formación San Salvador, relacionados con el macizo volcánico de Santa Ana, cubren el sector centro y sur. Estas unidades geológicas se describen a continuación de la de menor edad geológica a la más antigua.

4.1.3.1. Formación San Salvador

Como se expuso antes, comprende una amplia secuencia de rocas volcánicas producidas a lo largo del arco volcánico actual de El Salvador, que van desde rocas efusivas básicas e intermedias, hasta piroclastitas de flujo y caída, y algunas rocas ignimbríticas, cuya edad va en el rango de Pleistoceno medio hasta el Holoceno. En el área de estudio, esta formación geológica comprende cuatro miembros, que se describen brevemente a continuación.

a) Miembro s5´b

En el mapa geológico de la República (Weber et al.,1978), este miembro se describe como acumulaciones de escorias, tobas de lapilli y cinder.

b) Miembro s5´a

Este miembro fue introducido por Weber et al (1978) como una secuencia de rocas volcánicas efusivas de básicas a intermedias, contemporáneas con los miembros s3´b, s4, s5´b y s5´c. Meyer-Abich (1956, como se referencia en (Baxter, 1984)) Sugieren que estos materiales de tipo dacítico fueron acumulados previa la formación de la caldera de Coatepeque.

Al norte y noroeste del Lago de Coatepeque la secuencia es; la base lo compone bancos que exceden los 15 m de espesor constituidos por fragmentos de pómez y líticos de hasta 15 cm, y sobreyace una secuencia de cenizas dacíticas de un espesor superior a los 30 m. Los bancos de cascajo de pómez yacen sobre unidades Pliocénicas.

c) Miembro s2

Este miembro ha sido definido por Wiesemann (1975, como se referencia en (Baxter, 1984)) como una secuencia de rocas volcánicas básicas a intermedias, con piroclastitas subordinadas. Aflora en la parte central y hacia los lomeríos que limitan a la ciudad de Santa Ana al suroeste, oeste y norte, y en los cauces profundos que cortan al este de la ciudad.

4.1.3.2. Formación Cuscatlán

En esta zona es una secuencia volcano-sedimentaria de edad Plioceno-Pleistoceno, cuyos tres miembros (c1, c2 y c3) afloran.

a) Miembro c3

Son rocas efusivas básicas a intermedias, definidas por rocas andesítico basálticas, cuya parte principal son coladas de lava, también se han reportado conos de cinder y escoria y escasamente diques.

b) Miembro c2

Son rocas efusivas ácidas que forman domos aislados. Forman el Cerro San Pedro Malacoff, al sureste de Santa Ana.

c) Miembro c1

Es el miembro inferior de la Formación Cuscatlán, y está constituido por unidades volcánicas. En la zona de estudio afloran las piroclastitas ácidas, en el Cerro Santa Adela, al noroeste de Santa Ana, subyaciendo al Miembro c3, y en contacto por falla con la Formación Bálsamo.

4.1.3.3. Formación Bálsamo

Se le ha asignado una edad entre el Mioceno Medio y el Plioceno, y se encuentra integrada por rocas efusivas básicas a intermedias, epiclastitas volcánicas y piroclastitas básicas a intermedias, limitada en parte por fallas del graben central, y subyaciendo a las formaciones Cuscatlán y San Salvador. Está formada por tres miembros, que afloran en el área de estudio. En algunos sectores, forma suelos color café claro a rojizo.

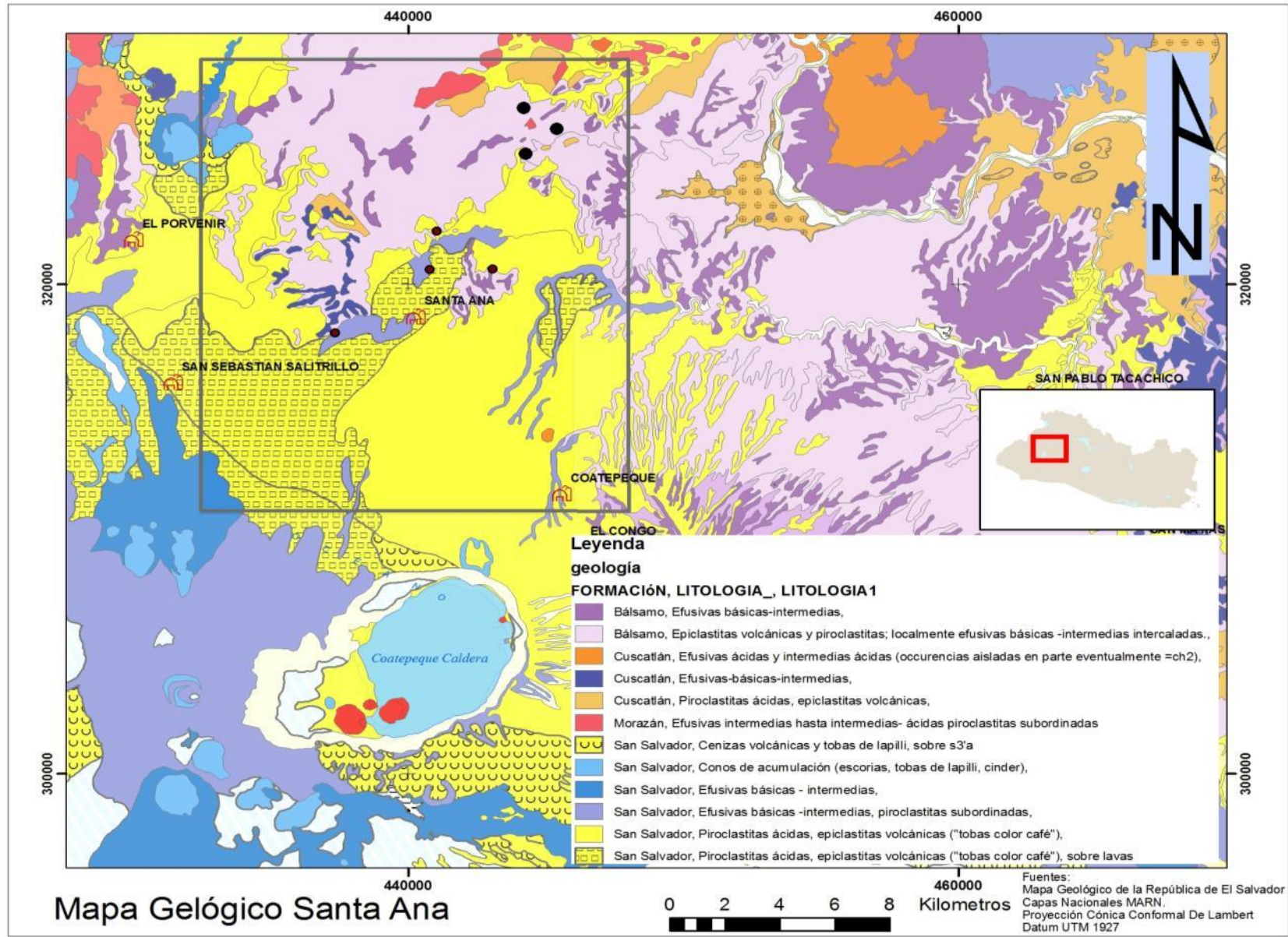
a) Miembro b3

Está constituido por lavas básicas a intermedias, en algunos lugares con alteración hidrotermal, silicificación y limos rojos.

b) Miembro b1

Está constituido por epiclastitas, tobas, ignimbritas, y lavas básicas a intermedias, intercaladas, localmente con alteración hidrotermal. Aflora ampliamente en la mitad norte del área de estudio

A continuación se presenta el Mapa Geológico de la zona del Acuífero de Zapotitán y sus alrededores, en el que se pueden ver esta y las formaciones Cuscatlán y San Salvador, así como la Morazán que es la que se presenta a continuación del mapa.



4.1.3.4. Formación Morazán

De acuerdo al Léxico Estratigráfico de El Salvador (Baxter, 1984), el término “Formación Morazán” fue introducido por Wiesemann(1975), posteriormente Wiesemann et al(1978) lo redefinen subdividiéndolo en cuatro miembros (m1'a, m1'b, m2'a, m2'b), los cuales afloran desde el sector noroccidental hasta el nororiental del país. En el norte de la zona de estudio hay presencia del miembro m2'a.

a) Miembro m2'a

Corresponde a la parte basal del miembro m2 y está constituida por rocas efusivas intermedias hasta intermedias ácidas y piroclásticas subordinadas, en parte silicificadas, con metamorfismo de contacto o con alteración hidrotermal

4.1.4. Geología local área San Miguel

Las características geológicas muestran depósitos volcánicos relacionados con las formaciones Cuscatlán (Plioceno Superior a Pleistoceno Medio) hacia el sureste y noreste, y San Salvador. Estos últimos, relacionados con el macizo volcánico de San Miguel, cubren la casi totalidad del área de estudio, con excepción de los depósitos cuaternarios no consolidados, en parte interdigitados con algunos de los depósitos volcánicos más distales, en las cercanías de la ciudad de San Miguel. Estas unidades geológicas se describen a continuación

Relacionado con la geología de esta área, debe indicarse que con base en el mapeo de campo e inventario de pozos realizado a escala 1:25 000 por la geóloga Sandra Arredondo en el 2004, existe una modificación al mapa geológico de El Salvador, escala 1:100 000, en el sector sureste de la localidad de San Miguel, donde se reportaban depósitos aluviales, en realidad corresponde con la Formación San Salvador, específicamente en las piroclásticas ácidas y epiclastitas volcánicas del Miembro s3'a.

4.1.4.1. Formación San Salvador

Incluye un espectro de rocas volcánicas producidas en el extremo suroriental del arco volcánico actual de El Salvador, desde lavas básicas e intermedias, hasta rocas piroclásticas de caída y flujo (soldadas y no soldadas), cuya edad es Pleistoceno medio a Holoceno. En el área de estudio, esta formación geológica comprende tres miembros, que se describen brevemente a continuación.

a) Depósitos sedimentarios Cuaternarios (Q'f)

Son el producto de la acumulación de materiales volcánicos y sedimentarios, producto de la erosión, transporte y depositación de material arrastrado por los ríos (principalmente aluviales) tributarios del río Grande de San Miguel.

b) Miembro s3'a

Este miembro es una secuencia de piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas, específicamente tobas color café a blancuzcas (Foto N° 3). Son el producto de tobas de flujo y caída y en sectores localizados incluye lahares contemporáneos con la erupción que les dio origen.

c) Miembro s2

Este miembro ha sido definido como una secuencia de rocas volcánicas básicas a intermedias, con piroclastitas subordinadas, producto de los estratovolcanes actuales, en este caso del San Miguel.

4.1.4.2. Formación Cuscatlán

Es una secuencia volcano-sedimentaria de edad Plioceno-Pleistoceno (1 - 2 millones de años, aproximadamente), descrita y dividida en tres miembros (c1, c2 y c3), que afloran en esta zona de estudio.

a) Miembro c3

Son rocas efusivas básicas a intermedias (lavas andesítico basálticas), conos de cinder y escoria y escasamente diques, en parte contemporánea con el miembro c2

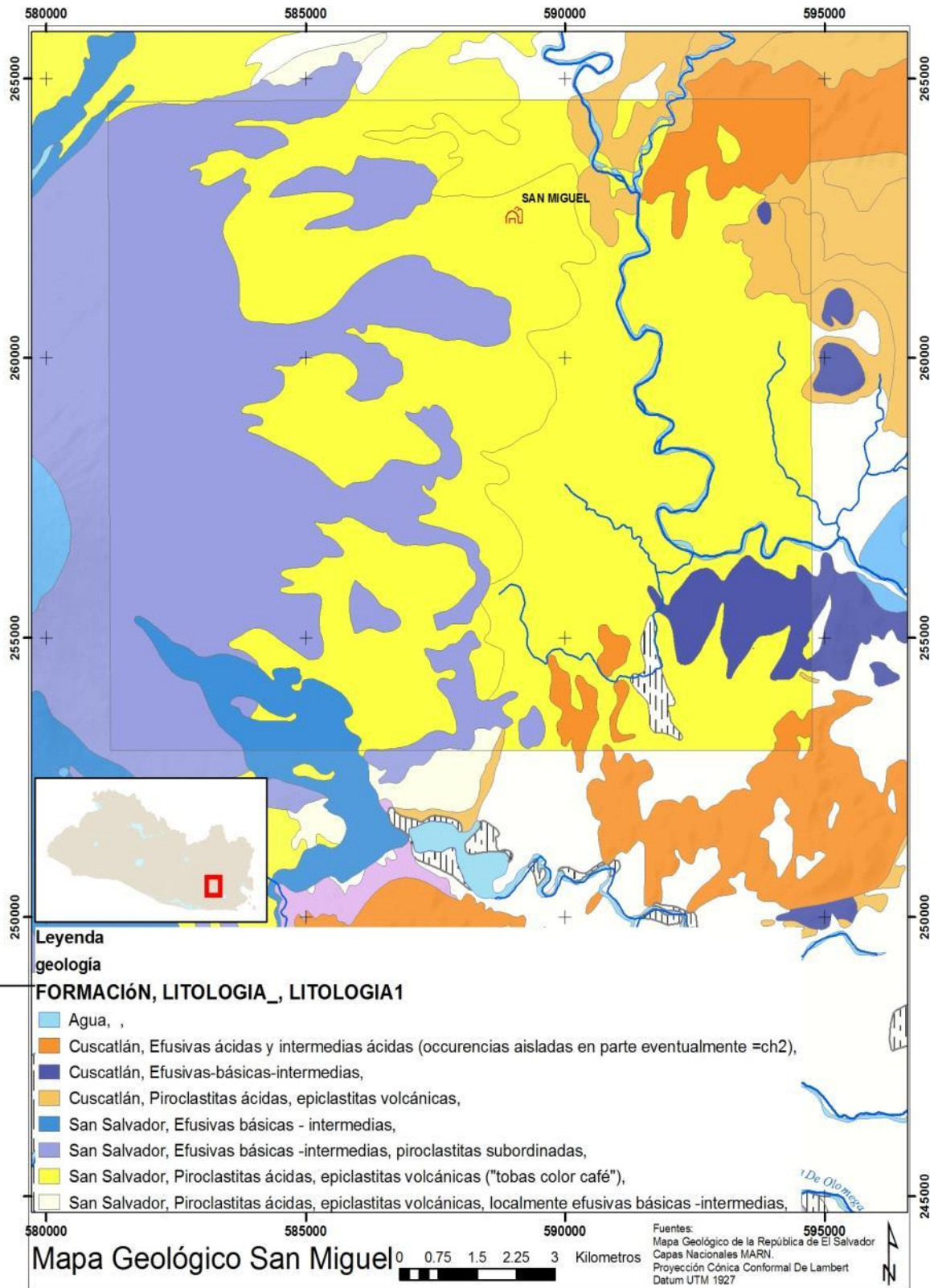
b) Miembro c2

Son rocas efusivas ácidas que forman domos o campos de domos aislados.

c) Miembro c1

Es el miembro inferior de la Formación Cuscatlán, y está constituido por unidades sedimentarias y volcánicas. Las unidades volcánicas son básicamente tobas soldadas. Subyacen al Miembro c3 y son cortadas por el Miembro c2. Representan el basamento en esta zona de estudio.

A continuación se presenta el Mapa Geológico de la zona del Acuífero de San Miguel.



4.2. Climatología e hidrografía

4.2.1. Climatología

El Salvador se localiza entre los trópicos de Cáncer y Capricornio, en el cinturón climático tropical, caracterizado por presentar condiciones térmicas similares a lo largo del año, con variaciones diurnas y nocturnas que son más importantes que las mensuales. Se producen oscilaciones de las precipitaciones a nivel mensual, existiendo dos épocas climáticas marcadas: la época lluviosa y la época seca. Los factores que condicionan el régimen climático del país son (SNET, 2005):

- El relieve del país.
- La Zona de Convergencia Intertropical.
- Los vientos Alisios.
- Las ondas tropicales o del Este.
- La influencia de la brisa marina del océano Pacífico.
- El anticiclón subtropical del Atlántico o de las Islas Bermudas.
- Los frentes fríos desplazados por masas de aire frío y continental de origen polar.
- Los centros térmicos débiles de baja presión atmosférica.
- Los sistemas ciclónicos como tormentas tropicales y huracanes.

Las zonas de estudio, al igual que todo el país, tiene un clima de los trópicos semi-húmedos y de acuerdo a la elevación sobre el nivel del mar, se pueden establecer cuatro regiones climáticas según Koppen y Sapper-Lauer (SNET, 2005), tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Regiones climáticas según Koppen y Sapper-Lauer

Altura (msnm)	Temperatura Media (°C)	Koppen	Sapper-Lauer
0 - 800	22-27°C y 22-28°C, en función de la elevación	Sabanas Tropicales Calientes	Tierra Caliente
800 - 1200	17-21°C	Sabanas Tropicales Calurosas	Tierra Templada
1200 - 1800	Inferior a 22°C en el mes más caluroso.	Clima Tropical de las Alturas	
1800 - 2700	10-16°C		

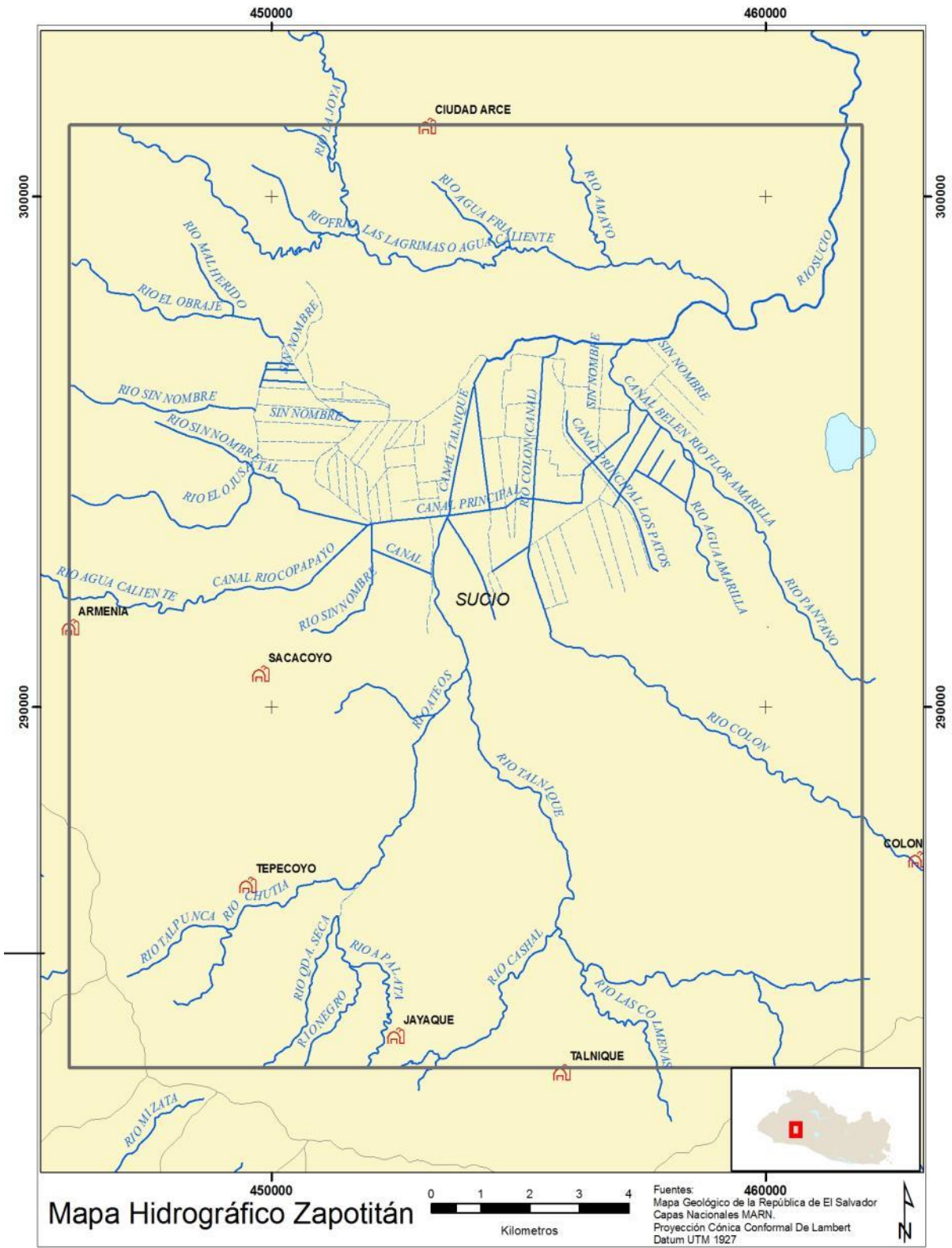
4.2.2. Hidrografía

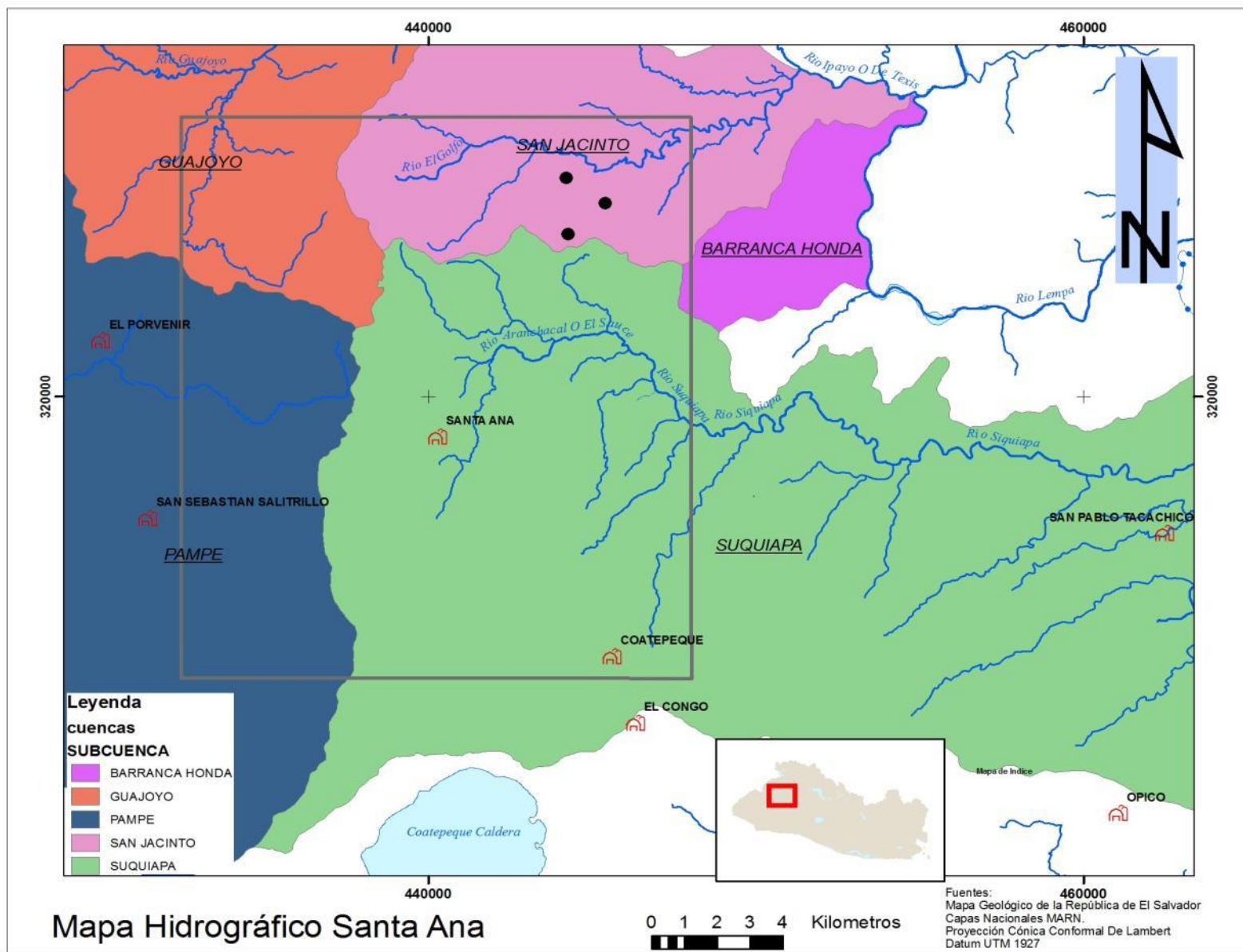
La zona de estudio del acuífero de Zapotitán se encuentra en la subcuenca del río Sudio, la cual pertenece a la Cuenca del río Lempa. La red de drenaje natural de la zona de estudio, está constituida por un sistema de quebradas y ríos que drenan la escorrentía superficial al río Lempa.

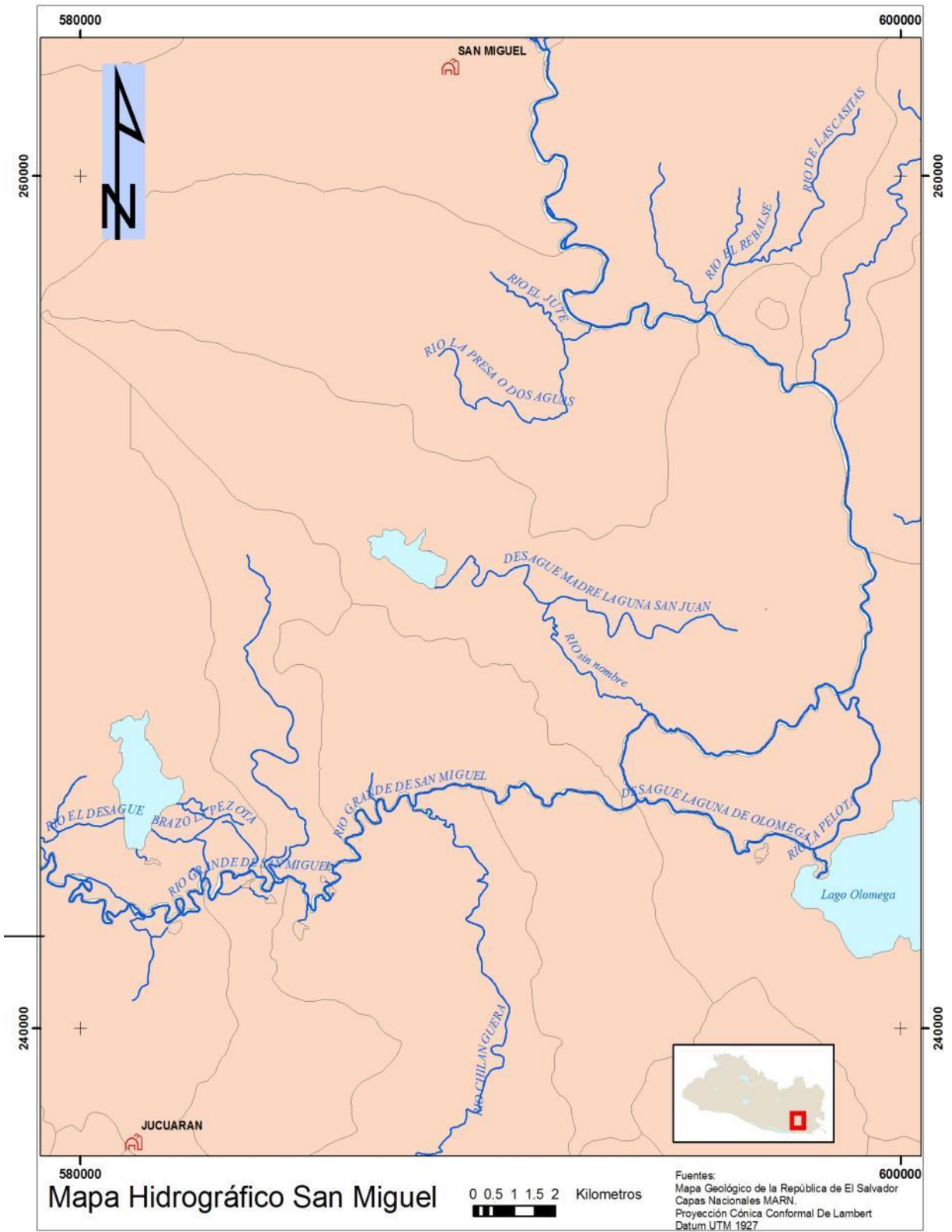
En el caso de la zona de estudio de Santa Ana, la cuenca en la que se tiene los pozos de monitoreo es la del río Suquiapa, drenando al mencionado río. La subcuenca del río Suquiapa está dentro de la Cuenca del río Lempa.

Por otra parte, la zona de estudio de San Miguel, se encuentra en la cuenca del río Grande de San Miguel; la red de drenaje natural de la zona de estudio, está constituida por un sistema de quebradas y ríos que drenan la escorrentía superficial al río Grande de San Miguel, entre estos ríos tributarios se encuentran: La Presa o Dos Aguas, El Jute, El Rebalse, El Nispero o Miraflores, Desagüe Mare Laguna San Juan, El Huiscoyol, El Mono, El Carmen, Desagüe Laguna de Olomega, entre otros.

A continuación se muestran los Mapas Hidrográficos para cada una de las tres zonas de estudio.







5. Hidrogeología

5.1. Marco Hidrogeológico

De acuerdo al Mapa Hidrogeológico de El Salvador a escala 1:100,000 de ANDA-COSUDE del 2008, en la zona de estudio se encuentran identificadas tres unidades hidrogeológicas (ver los Mapas Hidrogeológicos respectivos):

5.1.1. Unidad Acuífero Volcánico Fisurado de Gran Extensión y Posiblemente Alta Producción

Esta unidad la constituyen, principalmente, rocas volcánicas de carácter andesítico y basáltico, con ciertas intercalaciones de materiales piroclásticos. Entre las rocas volcánicas se pueden distinguir flujos y coladas de lavas que provienen de los centros de erupción volcánica. Dichos materiales pueden presentar conductividades hidráulicas de medianas a altas, como consecuencia de su porosidad secundaria (fallamiento existente).

5.1.2. Unidad Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media

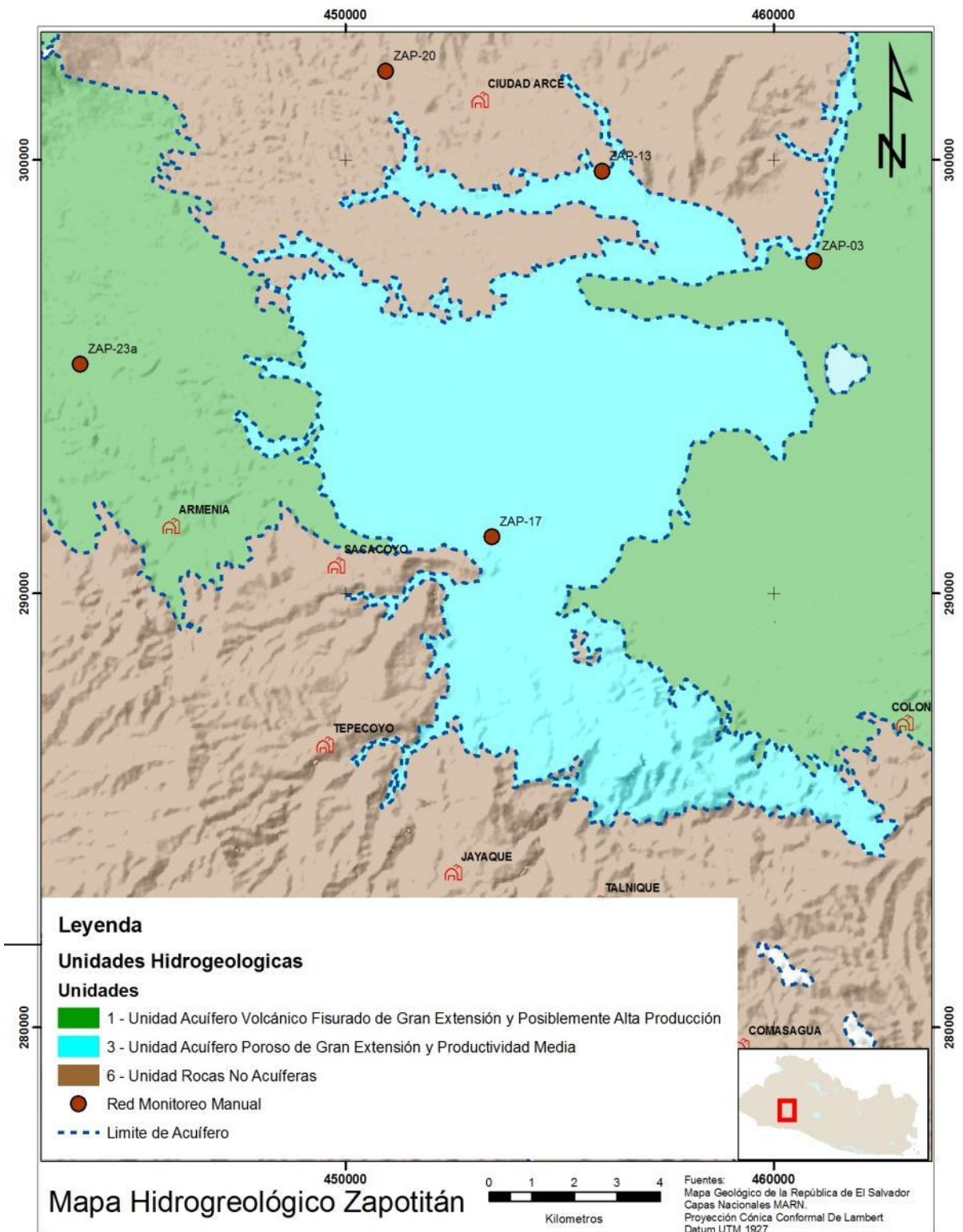
Los materiales de esta unidad consisten principalmente en materiales piroclásticos aglomerados y retrabajados (pómez, lapilli, tobas), teniendo una distribución granulométrica que varía de fina a gruesa. Las conductividades hidráulicas pueden variar de medianas a bajas, como consecuencia al grado de cementación o compactación que pueden tener los granos de los materiales que la constituye. Esta unidad puede tener más de 50 m de espesor.

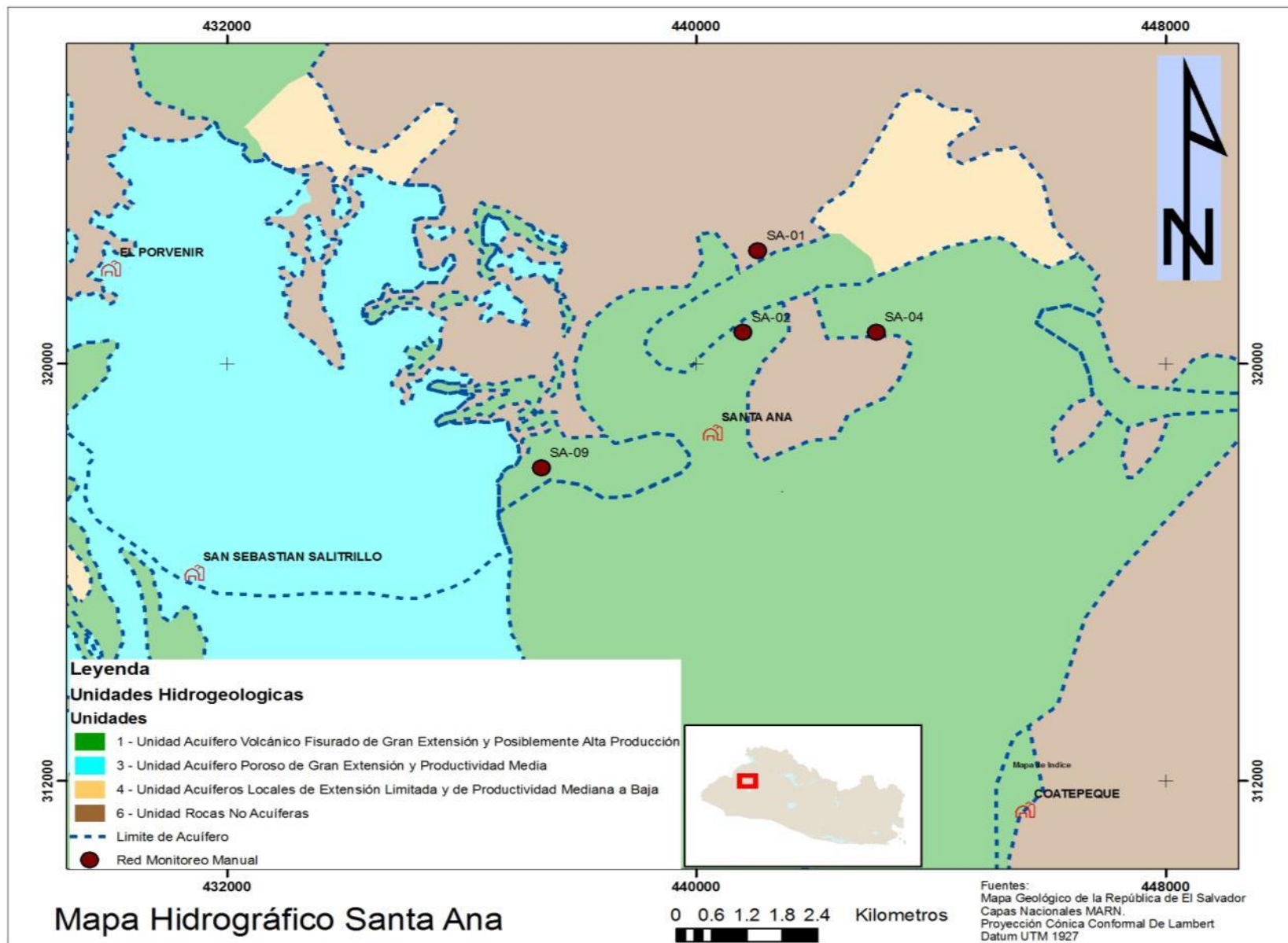
5.1.3. Unidad Rocas No Acuíferas

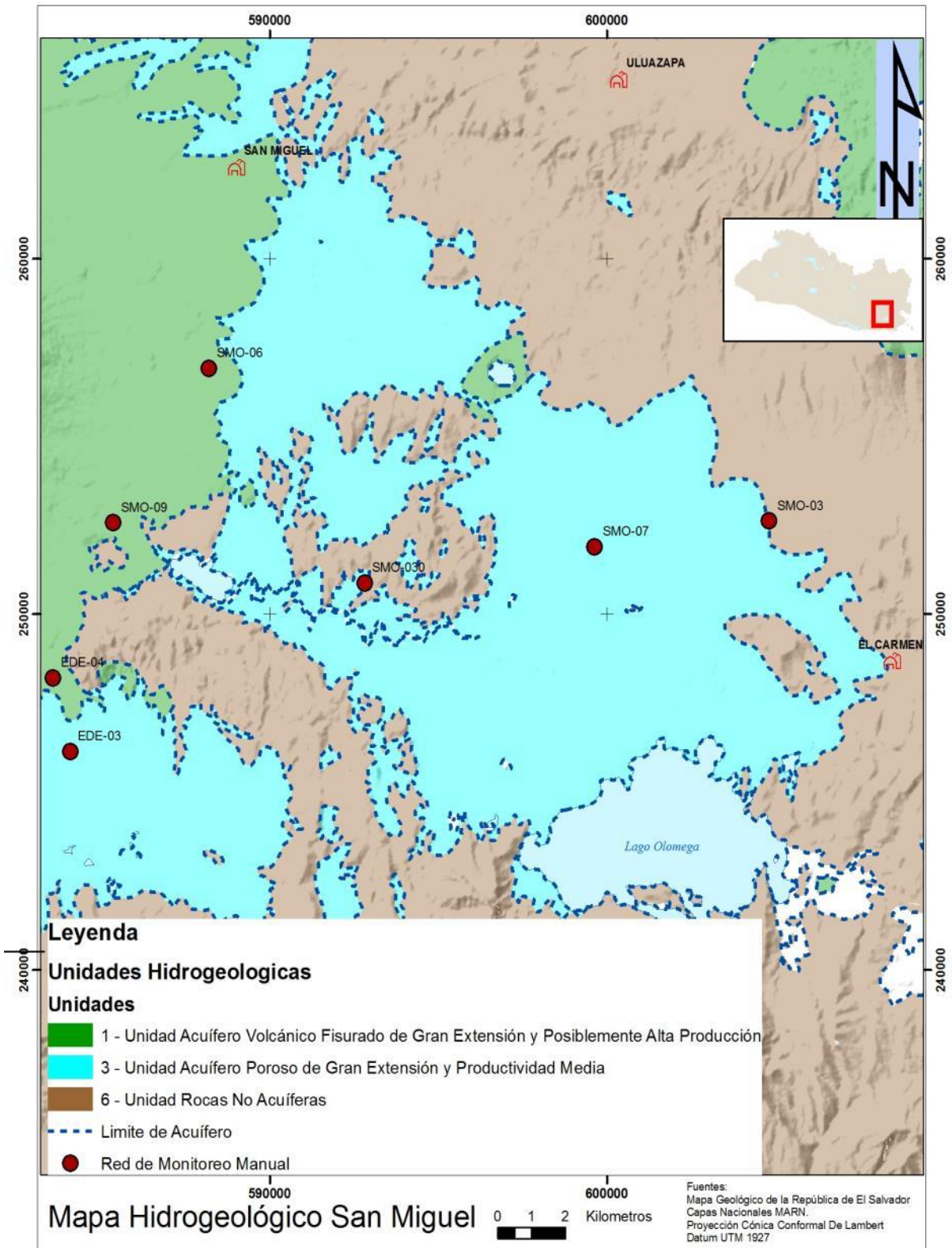
Los materiales de esta unidad están compuestos por flujos macizos de lavas, intercalados con tobas aglomeradas y brechosas, además de lahares cementados, presentando conductividades hidráulicas muy bajas o casi nulas, debido a su baja porosidad o a su alto grado de compactación y cementación. Se considera que constituyen el basamento de los acuíferos identificados en la zona de estudio. La profundidad a la que se encuentra esta unidad puede superar los 100 m.

5.1.4. Unidad Acuíferos Locales de Extensión Limitada y de Productividad Mediana a Baja (sólo zona Santa Ana)

Esta unidad está constituida, básicamente, por sedimentos aluviales (arenas, gravas, etc.) que han sido transportados por los ríos, desde la parte alta de los cerros hasta la planicie. Los materiales de esta unidad presentan una conductividad hidráulica de media a baja, la que depende de la granulometría, del grado de limpieza (contenido de limo y arcilla) y del grado de compactación que presentan los materiales. El espesor de estos materiales puede superar los 15 m.







5.2. Hidrogeología local

La zona específica de estudio para los tres acuíferos se encuentra en la unidad hidrogeológica *Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media*; a continuación se detalla el inventario de pozos y la evolución temporal del nivel piezométrico y de la calidad de agua de dicha parte de estudio para cada uno de los tres acuíferos.

5.2.1. Pozos de monitoreo Zona Zapotitán-Opico

Los pozos de monitoreo de los que se dispone en la zona de estudio, consta de seis (6) pozos de observación excavados por cada uno de los propietarios; en la Tabla 2 se indica el código y las coordenadas de los mismos así como la profundidad del nivel piezométrico, entre otras características.

La piezometría de la zona de estudio Zapotitán-Opico, evidencia un flujo principal de sur a Norte.

Tabla 2 Ubicación y niveles de los pozos de la red de monitoreo para las campañas de época seca y lluviosa

CODIGO	LAT (°)	LON (°)	ELEVACIÓN (msnm)	Cota Nivel Freático Ép. Seca 2015 (msnm)	Cota Nivel Freático Ép. Lluviosa 2015 (msnm)	USO
ZAP-03	13.7999167	89.3610833	445	438.30	438.35	Doméstico
ZAP-13a	13.8184722	89.4069722	467	456.57	456.92	Fuera de Uso
ZAP-17	13.7422778	89.4306389	472	466.46	467.40	Doméstico
ZAP-20	13.8397805	89.4542286	526	507.96	508.35	Doméstico
ZAP-22	13.7524444	89.4756111	491	488.12	491.40	Fuera de uso
ZAP-23a	13.7781111	89.5197222	615	601.20	600.12	Doméstico

En la Figura 1 se muestra una imagen satelital de la distribución espacial de los pozos que conforman la Red de Monitoreo Manual de la zona Zapotitán-Opico



Figura 1 Ubicación de pozos de monitoreo del acuífero de Zapotitán en la cuenca del Río Sucio.

5.2.2. Evolución temporal de la profundidad de los niveles piezométricos en la Zona de Zapotitán

La evolución temporal de los niveles piezométricos de la zona del acuífero de Zapotitán, se monitorea a través de las campañas de campo que se realizan en época seca y lluviosa en pozos tanto excavados como perforados. Hay dos maneras de representar dicha evolución; una es a través del registro de la variación de la profundidad del nivel, medida desde el brocal del pozo en la superficie. La otra es indicando el nivel piezométrico referenciado desde el nivel del mar, es decir indicando la cota, la cual está en función de la cota topográfica menos la profundidad a la que se encuentra el nivel piezométrico.

En la Figura 2 se han graficado la evolución temporal de la variación de la profundidad de los niveles piezométricos (representadas con las barras), registradas en la red de monitoreo para el periodo del 2012 hasta el 2015. Es importante tener presente que un incremento en la profundidad del nivel del agua medido en los pozos representa un descenso en la cota del nivel piezométrico del acuífero, es decir que el nivel del acuífero va descendiendo y por ello el agua se encuentra a mayor profundidad en el pozo.

De la Figura 2 se observa que el nivel del agua, del acuífero somero identificado por los pozos de monitoreo, el cual depende de la cota topográfica del sitio de ubicación del pozo, oscila entre una profundidad que va desde los 4.90 a los 18.31 metros de la superficie del suelo en época lluviosa y entre los 4.89 y 18.70 metros en época seca. Además, la Figura 2 evidencia que los cambios en los niveles para cada uno de los pozos son mínimos en la mayoría de los casos con una tendencia casi constante. A excepción de pozo identificado como ZAP-03 (en color morado), en el que a pesar de ser variaciones pequeñas, se logra identificar un ciclo de recarga en la época lluviosa y el respectivo descenso en la época seca, repitiéndose cada año.

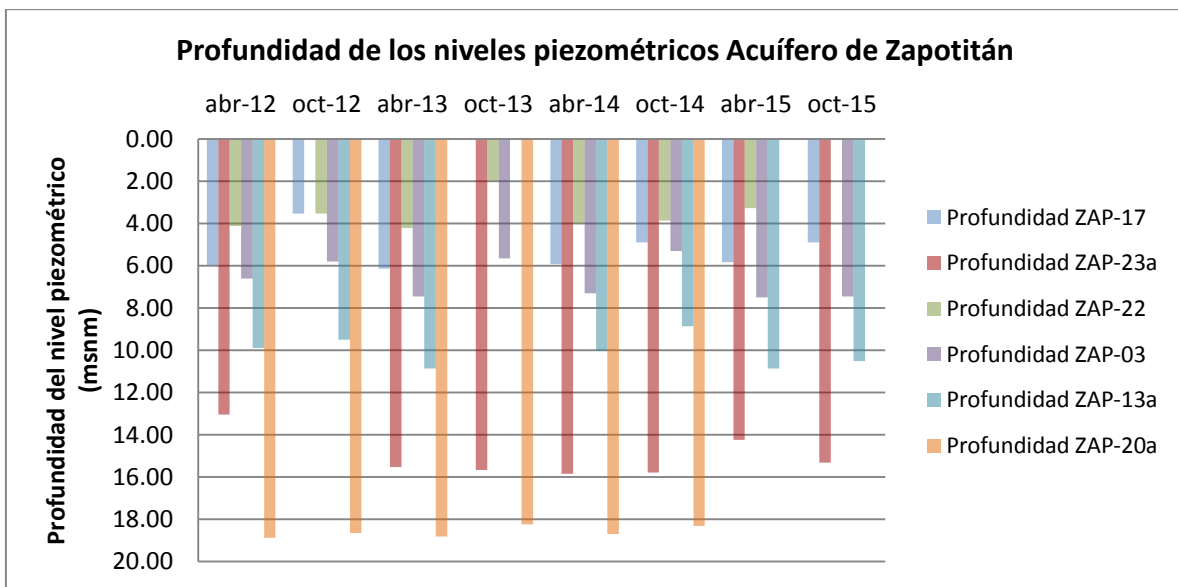


Figura 2 Evolución temporal de la profundidad de nivel piezométrico en los diferentes pozos de monitoreo

Es importante aclarar que en algunas campañas y años, no fue posible medir la profundidad del nivel piezométrico, por diferentes motivos externos de fuerza mayor, por lo que no hay dato.

5.2.3. Pozos de monitoreo Zona Santa Ana

En el acuífero somero de Santa Ana se identificaron cuatro (4) pozos excavados de poca profundidad, para el monitoreo de la calidad del agua de este acuífero, que es el que presenta mayor grado de vulnerabilidad a la contaminación, debido a la profundidad somera del nivel piezométrico. En la Tabla 3 se muestra la ubicación de los pozos de monitoreo en el acuífero de Santa Ana y algunos otros detalles de los mismos.

Tabla 3 Detalle de los pozos de monitoreo en el acuífero de Santa Ana

CODIGO	LAT (°)	LON (°)	ELEVACIÓN (msnm)	Cota Nivel Freático Ép. Seca 2015 (msnm)	Cota Nivel Freático Ép. Lluviosa 2015 (msnm)	Uso
SA-01	14°01'15,7"	- 89°32'44,7"	574	571.00	572.24	Doméstico
SA-02	14°0'24.7"	- 89°32'52.9"	599	589.87	590.49	Doméstico
SA-04	14° 0'25.10"N	-89°31'37.2"	565	539.11	539.13	Doméstico
SA-09a	13°58'59.9"	- 89°34'47.3"	735	720.72	723.63	Doméstico

En la Figura 3 se muestra la imagen satelital de la ubicación de cada uno de los referidos pozos

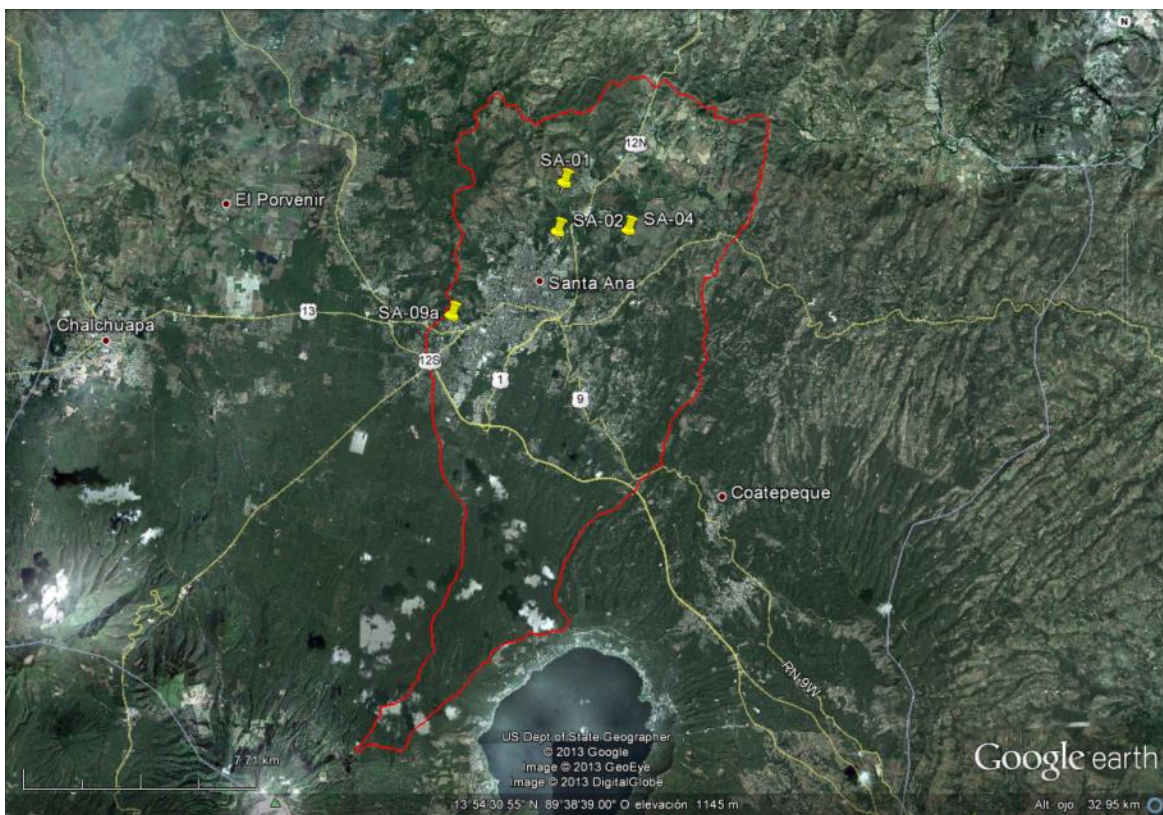


Figura 3 Ubicación de pozos de monitoreo del acuífero de Santa Ana en la cuenca del Río Apanchacal

5.2.4. Evolución temporal de los niveles piezométricos zona Santa Ana

La evolución temporal de los niveles piezométricos de la zona del acuífero de Santa Ana, se monitorea, al igual que el acuífero anterior, a través de las campañas de campo que se realizan en época seca y lluviosa en pozos tanto excavados como perforados. En la Figura 4 se han graficado la evolución temporal de la variación de la profundidad de los niveles piezométricos (representadas con las barras), registradas en la red de monitoreo para el periodo del 2012 hasta el 2015. A pesar que las variaciones son pequeñas se logra identificar un ciclo de recarga en la época lluviosa y el respectivo descenso en la época seca, repitiéndose cada año. Es importante tener presente que un incremento en la profundidad del nivel del agua medido en los pozos representa un descenso en la cota del nivel piezométrico del acuífero, es decir que el nivel del acuífero va descendiendo y por ello el agua se encuentra a mayor profundidad en el pozo.

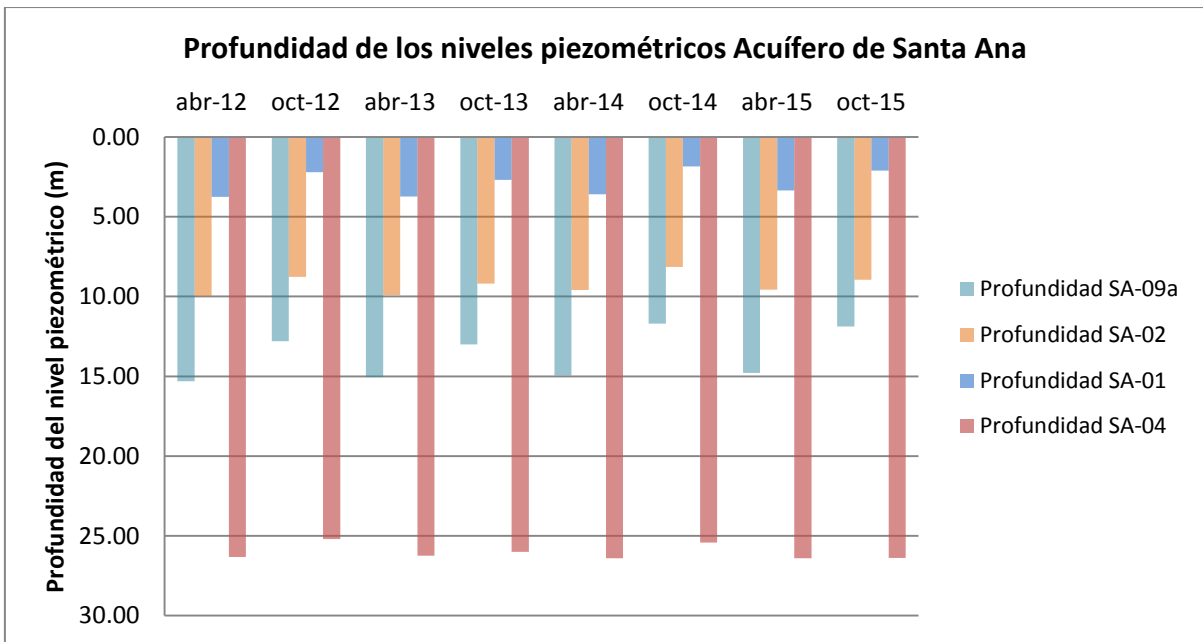


Figura 4 Evolución temporal de la profundidad de nivel piezométrico en los diferentes pozos de monitoreo

5.2.5. Pozos de monitoreo Zona San Miguel

En el acuífero somero de San Miguel se identificaron cinco (5) pozos excavados de poca profundidad, para el monitoreo de la calidad del agua de este acuífero, que es el que presenta mayor grado de vulnerabilidad a la contaminación, debido

a la profundidad somera del nivel piezométrico. En la Tabla 4 se muestra la ubicación de los pozos de monitoreo en el acuífero de San Miguel y algunos otros detalles de los mismos.

Tabla 4 Detalle de los pozos de monitoreo en el acuífero de San Miguel

CODIGO	LAT (°)	LON (°)	ELEVACIÓN (msnm)	Cota Nivel Freático Ép. Seca 2015 (msnm)	Cota Nivel Freático Ép. lluviosa 2015 (msnm)	USO
SMO-03a	13°23'27.4"	- 88°01'56.48"	80	*	*	Doméstico
SMO-06a	13°25'49.1"	- 88°11'7.6"	119	108.34	108.36	Doméstico
SMO-07a	13°23'4.3"	- 88°04'48.4"	72	64.76	64.10	Doméstico
SMO-09	13°23'28.1"	- 88°12'42.3"	114	107.24	*	Doméstico
SMO-030	13°22'32.1"	- 88°08'35"	76	71.26	70.84	Doméstico

***No realizada ya que estaba sellado el pozo**

En Figura 5 se muestra la imagen satelital de la ubicación de cada uno de los referidos pozos

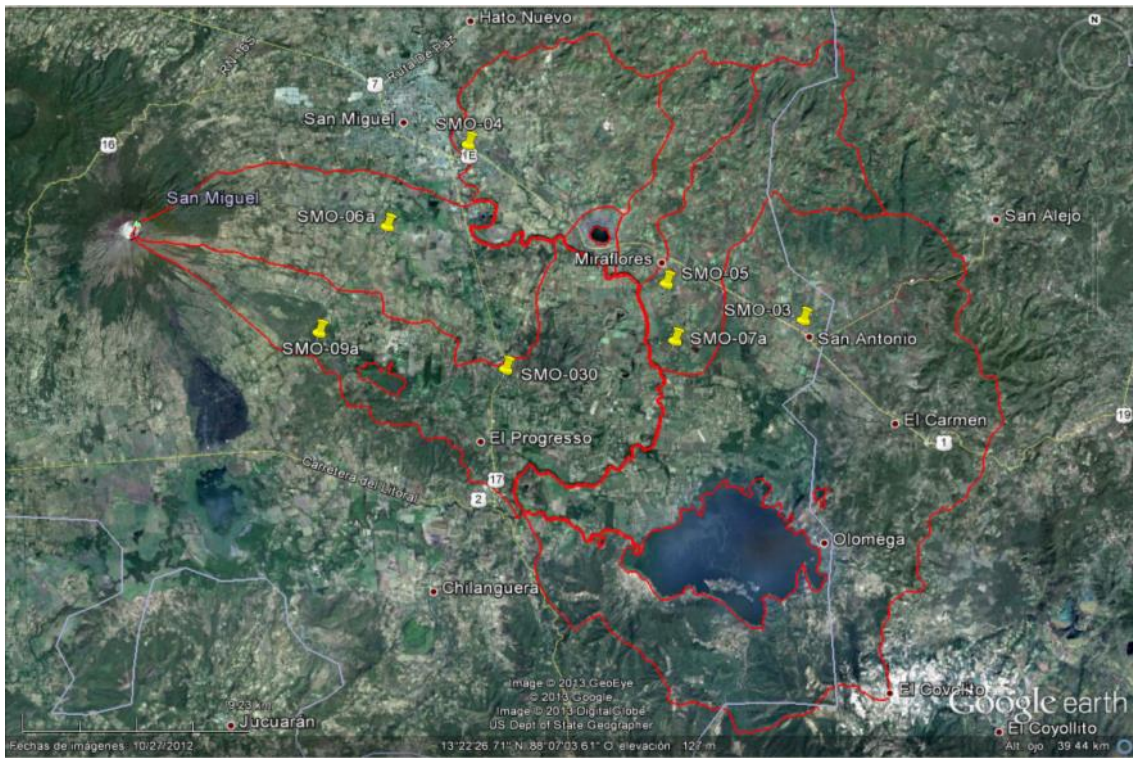


Figura 5 Ubicación de pozos de monitoreo para el acuífero de San Miguel en sub cuencas del Río Grande de San Miguel

5.2.6. Evolución temporal de los niveles piezométricos

La evolución temporal de los niveles piezométricos de la zona del acuífero de San Miguel, se monitorea, al igual que los acuíferos anteriores, a través de las campañas de campo que se realizan en época seca y lluviosa en pozos tanto excavados como perforados; en las que se miden la profundidad del nivel piezométricos en todos los pozos de la red de monitoreo. Para apreciar de una mejor manera esta variación de los niveles En la Figura 6 se han graficado la evolución temporal de la variación de la profundidad de los niveles piezométricos (representadas con las barras), registradas en la red de monitoreo para el periodo del 2012 hasta el 2015. Es importante tener presente que un incremento en la profundidad del nivel del agua medido en los pozos representa un descenso en la cota del nivel piezométrico del acuífero, es decir que el nivel del acuífero va descendiendo y por ello el agua se encuentra a mayor profundidad en el pozo.

De la Figura 6 se observa que el nivel del agua, del acuífero somero identificado por los pozos de monitoreo, el cual depende de la cota topográfica del sitio de ubicación del pozo, oscila entre una profundidad que va desde los 5.86 a los 11.34 metros de la superficie del suelo en época lluviosa y entre los 5.44 a los 11.36 metros en época seca.

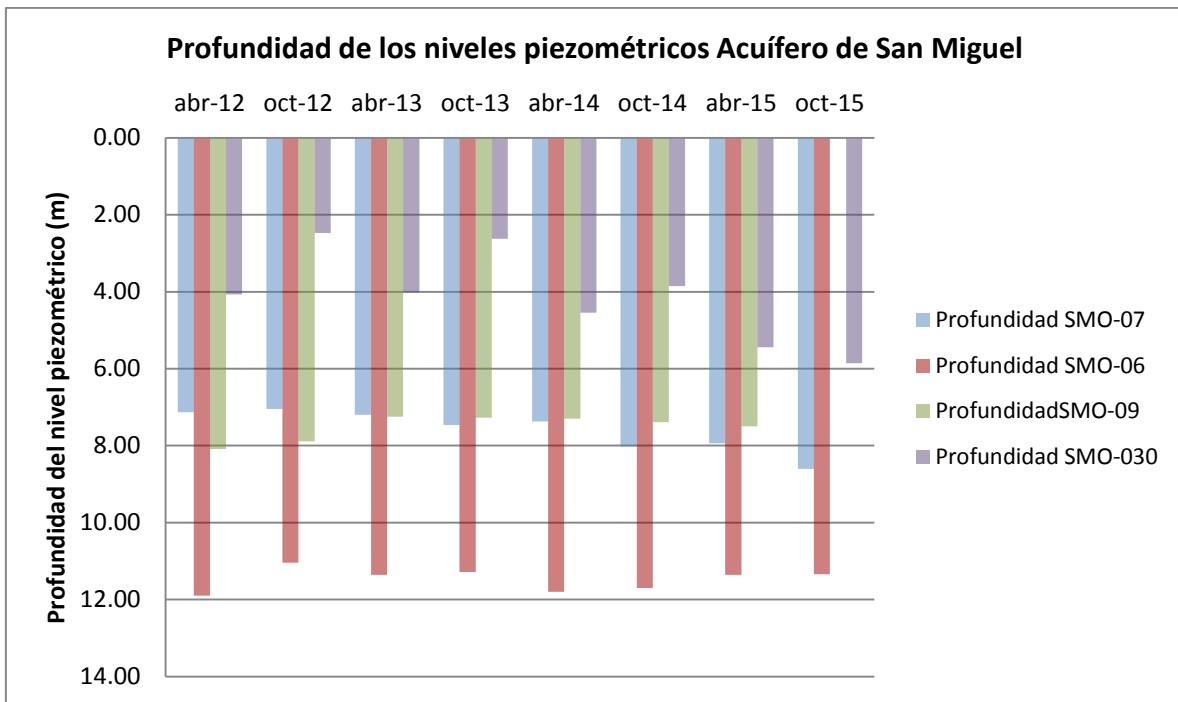


Figura 6 Evolución temporal de la profundidad de nivel piezométrico en los diferentes pozos de monitoreo

Además, la Figura 6 evidencia que los cambios en los niveles para cada uno de los pozos son mínimos, en la mayoría de los casos con una tendencia casi constante. A excepción de pozo identificado como SMO-030 (en color morado), en el que a pesar de ser variaciones pequeñas, se logra identificar un ciclo de recarga en la época lluviosa y el respectivo descenso en la época seca, repitiéndose cada año. Por otra parte el pozo SMO-07, presenta un leve comportamiento al descenso, el cual se visualiza con mayor claridad en el último registro de la época lluviosa del 2015.

Es importante aclarar que en los casos de los pozos en los que no hay dato de cota de nivel, ésta no fue posible medirla debido a que sellaron el acceso al pozo por el cual se introducía la sonda eléctrica y únicamente se logró tomar las muestras de agua a través de la bomba que tenían instaladas los referidos pozos.

6. Caracterización físico-química de las aguas subterráneas

Para la caracterización físico-química del agua subterránea procedente de los pozos de la red de monitoreo, se analiza la composición físico-química de la misma a través de las concentraciones de los iones mayoritarios así como con los valores de pH y los sólidos disueltos totales y posteriormente se utilizan herramientas graficas tales como los diagramas Stiff y Piper para poder clasificar el tipo de agua subterránea que se tiene en cada una de las zonas en estudio.

6.1. Confiabilidad de los resultados obtenidos de concentraciones de iones mayoritarios.

Los resultados obtenidos del análisis de iones mayoritarios de las muestras tomadas en los sitios seleccionados, se evaluaron a partir del balance iónico basado en la ecuación de electroneutralidad.

La confiabilidad de los resultados obtenidos se evaluó a partir de la relación existente entre la conductividad eléctrica y el error admisible mostrado en el cuadro siguiente:

Tabla 1: Error admisible de balance iónico.

ERROR ADMISIBLE DE BALANCE IONICO EN FUNCION DE LA CONDUCTIVIDAD	
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Error admisible %
50	30
200	10
500	8
2000	4
>2000	4

Fuente: Custodio-Llamas 2001

Al realizar el análisis descrito anteriormente, se identificó que los resultados obtenidos durante la campaña de octubre se tiene una confiabilidad promedio del 73% del total de muestras analizadas. (Figura 7).

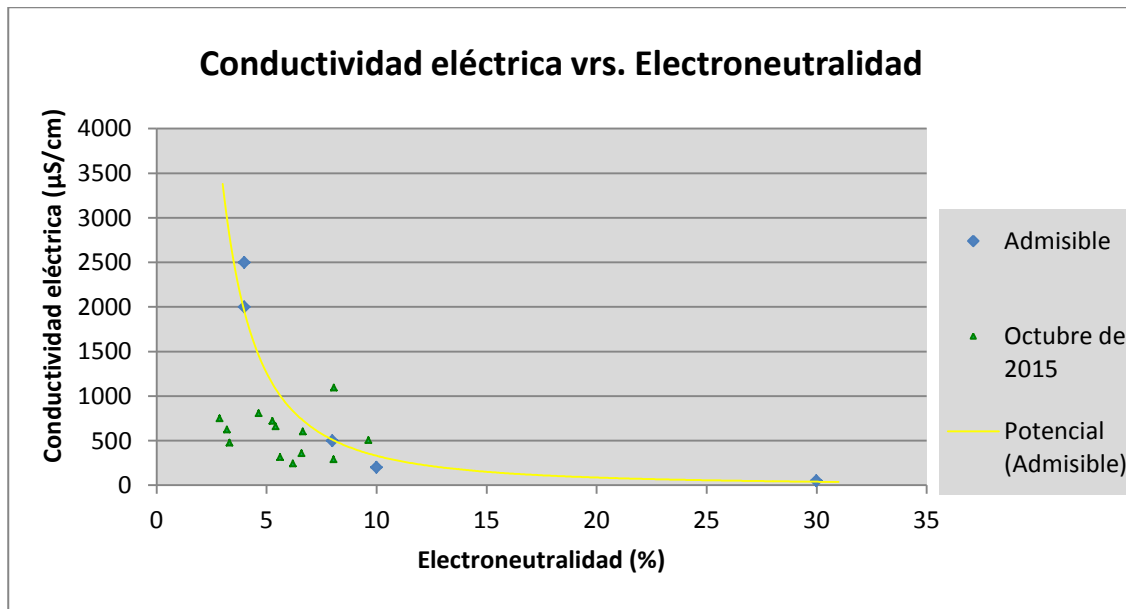


Figura 7 Gráfico representativo de la Conductividad eléctrica vs. Electroneutralidad de los sitios de monitoreo.

En la Figura 7, se muestra con una línea amarilla la curva que delimita la zona de los valores admisibles (bajo la curva), de los no admisibles (sobre la curva).

6.2. Composición y clasificación físico-química del agua subterránea

6.2.1. Zona de estudio Zapotitán- Opico

Los resultados de las concentraciones de las diferentes sustancias químicas analizadas de las muestras que han sido obtenidas durante el monitoreo de agua subterráneas; con el efecto de evaluar dichos resultados se ha tomado como referencia, en los casos que aplica, la Norma Salvadoreña de Agua Potable NSO 13.07.01.08, del Ministerio de Salud la cual establece los requerimientos mínimos que deben cumplir las aguas que se utilicen para consumo humano, ya que se carece de Normas aplicables para Calidad de las aguas subterráneas para su evaluación.

Sin embargo, es importante recalcar que el uso principal de las aguas provenientes de los sitios de monitoreo, corresponde al doméstico, pero no para consumo humano. En la Tabla 5 se muestran los resultados para cada uno de los parámetros físico-químicos analizados para la época seca y la lluviosa respectivamente.

Tabla 5 Resultados físico-químico de la campaña de muestreo de Octubre del 2015

Parámetro	Unidad	NSO 13.07.01.0 8	ZAP-17	ZAP- 23a	ZAP-20	ZAP-03	ZAP-13a
Potencial de Hidrógeno (pH)	-	6 – 8.5	6.605	6.245	6.515	6.87	6.77 18
Conductividad eléctrica (CE)	µsiemens/ cm	-	751.5	289.15	245.15	720.5	506.5
Alcalinidad	mg/l CaCO ₃	-	242.11	104.4	53.31	286.54	144.38
Bicarbonato (HCO ₃)	mg/l CaCO ₃	-	242.11	104.4	53.31	286.54	144.38
Calcio (Ca)	mg/l Ca	-	62.7	30.75	19.92	64.35	49.27
Carbonatos (CaCO ₃)	mg/l CaCO ₃	-	0	0	0	0	0

Informe de pozos de monitoreo de los Acuíferos de Zapotitán, Santa Ana y San Miguel

Parámetro	Unidad	NSO 13.07.01.0 8	ZAP-17	ZAP- 23a	ZAP-20	ZAP-03	ZAP-13a
Cloruros (Cl ⁻)	mg/l Cl -	-	26.51	4.17	17.43	20.13	29.95
Dureza total	mg/l CaCO ₃	500	260.47	123.06	76.92	302.86	194.12
Flúor (F)	mg/l F	-	0.38	0.18	0.19	0.92	0.35
Fosfato (PO ₄)	mg/l PO ₄ - 3	-	0.82	0.8	0.3	0.37	0.39
Hierro (Fe)	mg/l Fe	0.30	<0.009	<0.009	0.201	<0.009	0.799
Magnesio (Mg)	mg/l Mg	-	25.23	11.24	6.6	34.53	17.26
Mn	mg/l Mn	0.10	0.064	0.051	0.045	0.134	0.077
Nitratos (NO ₃)	mg/l NO ₃ -	45.00	46.44	24.72	24.82	1.65	27.56
Nitrógeno Amoniacal (NH ₄)	mg/l NH ₄	-	0.06	0.05	0.41	0.49	0.09
Potasio (K)	mg/l K	-	21.4	2.53	4.35	13.65	4.18
Sílice (SiO ₂)	mg/l SiO ₂	-	90.4	94.74	110.91	71.67	106.1
Sodio (Na)	mg/l Na	200.00	33.65	13.55	19.7	38.55	28.1
Sólidos totales disueltos (STD)	mg/l	1000	368	141.5	120.5	353.5	248
Sulfatos (SO ₄)	mg/l SO ₄ - 2	400.00	64	20	22	94	30
Arsénico (As)	mg/l As	0.01	<0.000177	0.00833	<0.000177	<0.000177	<0.000177
Salinidad	ppt	-	0.4	0.1	0.1	0.35	0.2

*Los números en color azul corresponde a los que exceden el límite de la NSO

De los seis (6) pozos monitoreados dos (2) presentan un parámetro fuera del rango establecido por la normativa (en color azul).

En el caso del ZAP-17, la presencia de nitratos evidencia la vulnerabilidad de este tipo de acuíferos a la contaminación, en este caso por causa de actividades humanas como por ejemplo la mala disposición de excretas. La representación gráfica de los resultados en diagramas de Stiff se muestra a continuación.

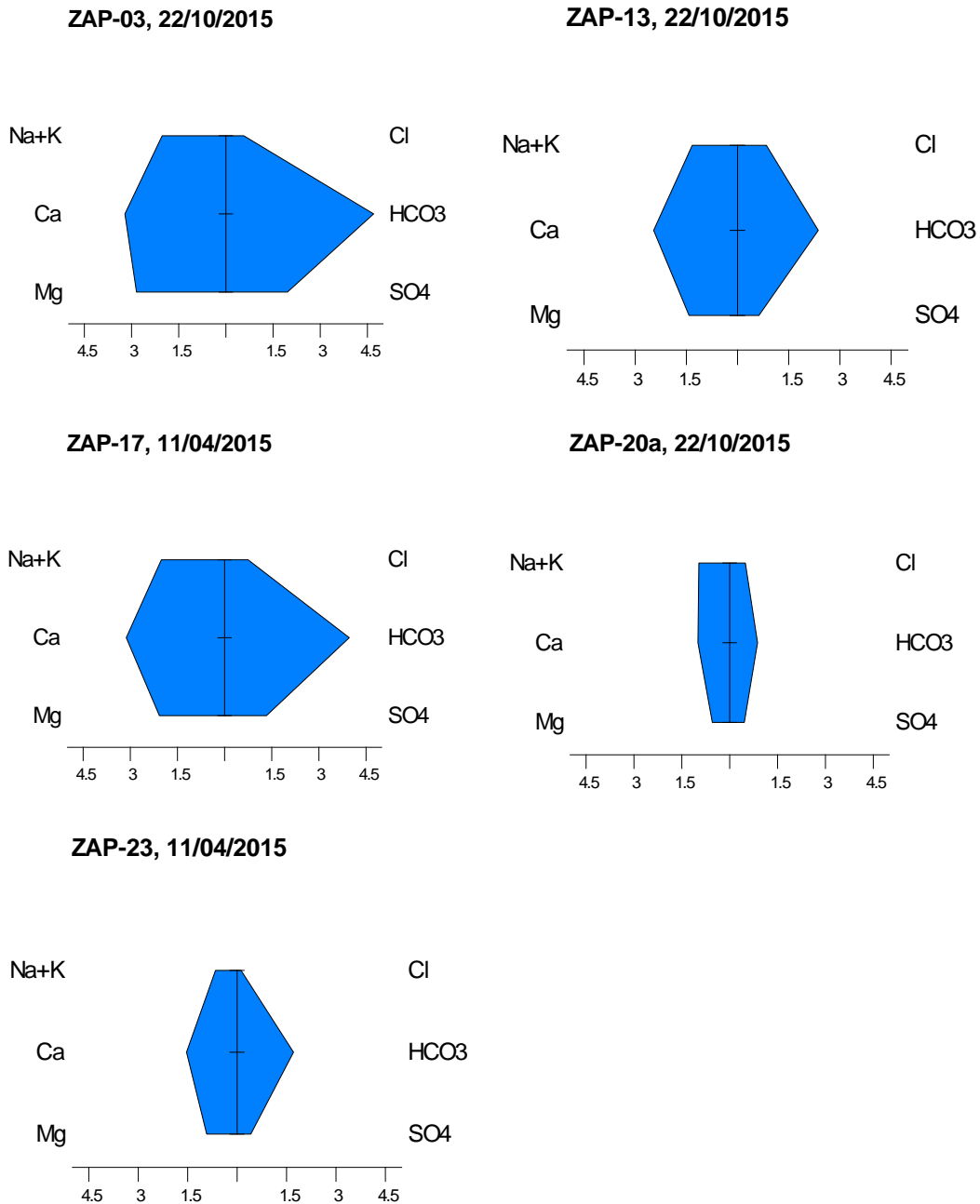


Figura 8 Diagramas de Stiff para la clasificación del tipo de agua subterránea procedente de los pozos de la red de monitoreo para la campaña de Octubre de 2015.

Con los datos de las concentraciones de los iones mayoritarios y su representación gráfica en el diagrama Stiff; se puede clasificar el tipo de agua predominante en los puntos muestreados del acuífero de Zapotitán como del tipo Bicarbonatada Cálctica para Octubre del 2015. En la Tabla 6 se muestra la caracterización físico-química (tipo de agua) para cada una de las muestras de agua de los pozos monitoreados.

Tabla 6 Clasificación del tipo de agua subterránea en función de la caracterización hidrogeoquímica de los pozos muestreados en las campañas del 2015

Sitio (código pozo)	Caracterización físico-química (octubre)
ZAP-03	Bicarbonatada cálcica -magnésica
ZAP-13a	Bicarbonatada cálcica
ZAP-17	Bicarbonatada cálcica
ZAP-20	Bicarbonatada cálcica- sódica
ZAP-22	No se muestreó
ZAP-23a	Bicarbonatada cálcica

6.2.2. Zona de estudio Santa Ana

Los resultados de las concentraciones de las diferentes sustancias químicas de las muestras que han sido obtenidas durante el monitoreo de agua subterráneas; con el efecto de evaluar dichos resultados se ha tomado como referencia, en los casos que aplica, la Norma Salvadoreña de Agua Potable NSO 13.07.01.08, del Ministerio de Salud la cual establece los requerimientos mínimos que deben cumplir las aguas que se utilicen para consumo humano, ya que se carece de Normas aplicables para su evaluación, sin embargo, es importante recalcar que el uso principal de las aguas provenientes de los sitios de monitoreo, corresponde al doméstico, pero no para consumo humano, al igual que los pozos muestreados en Zapotitán.

En la Tabla 7 se muestran los resultados para cada uno de los parámetros físico-químicos analizados para la época seca y en la para la lluviosa.

Es importante aclarar que el monitoreo del pozo SA-09a no fue posible ya que no estaba en funcionamiento la bomba que se utiliza para extraer el agua.

Tabla 7 Resultados físico-químico de la campaña de muestreo de época lluviosa (Octubre) del 2015

Parámetro	Unidad	NSO 13.07.01.0 8	SA-02	SA-01	SA-04
Potencial de Hidrógeno (pH)	-	6 – 8.5	6.66	6.76	6.88
Conductividad eléctrica (CE)	µsiemens/cm	-	478	623.5	316.5
Alcalinidad	mg/l CaCO ₃	-	142.16	202.13	124.39
Bicarbonato (HCO ₃)	mg/l CaCO ₃	-	142.16	202.13	124.39
Calcio (Ca)	mg/l Ca	-	40.64	58.87	36.13
Carbonatos (CaCO ₃)	mg/l CaCO ₃	-	0	0	0
Cloruros (Cl ⁻)	mg/l Cl ⁻	-	26.51	35.84	7.61
Dureza total	mg/l CaCO ₃	500	168.75	216.07	123.44
Flúor (F)	mg/l F	-	0.33	0.29	0.36
Fosfato (PO ₄)	mg/l PO ₄ ⁻³	-	0.49	0.21	0.31
Hierro (Fe)	mg/l Fe	0.30	0.368	<0.009	<0.009
Magnesio (Mg)	mg/l Mg	-	16.33	16.77	8.07
Mn	mg/l Mn	0.10	0.052	0.044	0.036
Nitratos (NO ₃)	mg/l NO ₃ ⁻	45.00	38.1	22.45	11.29
Nitrógeno Amoniacal (NH ₄)	mg/l NH ₄	-	0.14	0.25	0.27
Potasio (K)	mg/l K	-	9.78	11.85	4.03
Sílice (SiO ₂)	mg/l SiO ₂	-	89.9	86.35	99.65
Sodio (Na)	mg/l Na	200.00	26.6	41.85	16.55
Sólidos totales	mg/l	1000	234	305.5	155

Parámetro	Unidad	NSO 13.07.01.0 8	SA-02	SA-01	SA-04
disueltos (STD)					
Sulfatos (SO4)	mg/l SO4 -2	400.00	37	65	24
Arsénico (As)	mg/l As	0.01	<0.000177	<0.000177	<0.000177
Salinidad	ppt	-	0.2	0.3	0.15

***Los números en color azul corresponde a los que exceden el límite de la NSO**

De los tres (3) pozos monitoreados sólo uno (1) presenta un parámetro fuera del rango establecido por la normativa, el SA-02 en el contenido de hierro para Octubre de 2015 (en color azul).

La representación gráfica de los resultados en diagramas de Stiff se muestra a continuación.

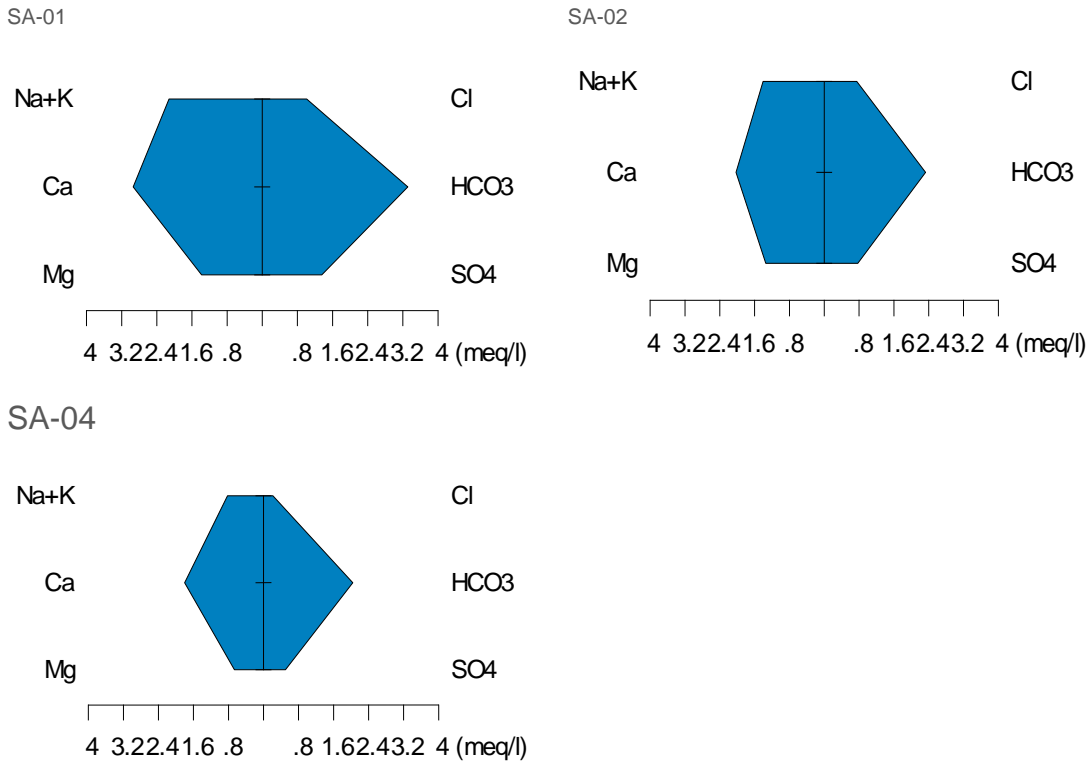


Figura 9 Diagramas de Stiff para la clasificación del tipo de agua subterránea procedente de los pozos de la red de monitoreo para la campaña de Octubre del 2015.

Con los datos de las concentraciones de los iones mayoritarios y su representación gráfica en el diagrama Stiff; se puede clasificar el tipo de agua predominante (en los sitios muestreados) en el acuífero de Santa Ana como del tipo Bicarbonatada Cálctica. En la Tabla 8 se muestra la caracterización físico-química (tipo de agua) para cada una de las muestras de agua de los pozos monitoreados.

Tabla 8 Clasificación del tipo de agua subterránea en función de la caracterización hidrogeoquímica de los pozos muestreados en las campañas del 2015

Sitio (código pozo)	Caracterización físico-química (octubre)
SA-01	Bicarbonatada cálcica
SA-02	Bicarbonatada cálcica
SA-04	Bicarbonatada cálcica
SA-09	N/A

6.2.3. Zona de estudio San Miguel

Los resultados de las concentraciones de las diferentes sustancias químicas analizadas de las muestras que han sido obtenidas durante el monitoreo de agua subterráneas; con el efecto de evaluar dichos resultados se ha tomado como referencia, en los casos que aplica, la Norma Salvadoreña de Agua Potable NSO 13.07.01.08, del Ministerio de Salud la cual establece los requerimientos mínimos que deben cumplir las aguas que se utilicen para consumo humano, ya que se carece de Normas aplicables para su evaluación, sin embargo, es importante recalcar que el uso principal de las aguas provenientes de los sitios de monitoreo, corresponde al doméstico, pero no para consumo humano. En la Tabla 9 se muestran los resultados para cada uno de los parámetros físico-químicos analizados.

Tabla 9 Resultados físico-químico de la campaña de muestreo de octubre del 2015

Parámetro	Unidad	NSO 13.07.01.08	SMO-30	SMO-09	SMO-06a	SMO-07a	SMO-03a
Potencial de Hidrógeno (pH)	-	6 – 8.5	7.02	7.10	6.93	7.075	6.83

Informe de pozos de monitoreo de los Acuíferos de Zapotitán, Santa Ana y San Miguel

Parámetro	Unidad	NSO 13.07.01.0 8	SMO- 30	SMO- 09	SMO- 06a	SMO- 07a	SMO- 03a
Conductividad eléctrica (CE)	µsiemens/cm	-	809	359	659	1094.5	601.5
Alcalinidad	mg/l CaCO ₃	-	306.53	122.17	286.54	262.1	288.76
Bicarbonato (HCO ₃)	mg/l CaCO ₃	-	306.53	122.17	286.54	262.1	288.76
Calcio (Ca)	mg/l Ca	-	95.4	29.76	61.85	130.24	63.39
Carbonatos (CaCO ₃)	mg/l CaCO ₃	-	0	0	0	0	0
Cloruros (Cl ⁻)	mg/l Cl ⁻	-	49.1	14.73	11.54	120.54	18.66
Dureza total	mg/l CaCO ₃	500	313.73	127.87	299.64	514.3	254.13
Flúor (F)	mg/l F	-	0.19	0.24	0.29	0.44	0.19
Fosfato (PO ₄)	mg/l PO ₄ ⁻³	-	0.95	0.28	0.39	0.3	0.38
Hierro (Fe)	mg/l Fe	0.30	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	1.936
Magnesio (Mg)	mg/l Mg	-	18.34	13.01	35.26	45.92	23.28
Mn	mg/l Mn	0.10	<0.024	<0.024	<0.024	0.052	<0.024
Nitratos (NO ₃)	mg/l NO ₃ ⁻	45.00	14.72	13.07	22.09	88.94	10.8
Nitrógeno Amoniacal (NH ₄)	mg/l NH ₄	-	0.38	0.58	0.63	0.35	0.6
Potasio (K)	mg/l K	-	7.93	2.69	1.55	1.23	2.80
Sílice (SiO ₂)	mg/l SiO ₂	-	98.64	84.85	93.48	109.9	112.56
Sodio (Na)	mg/l Na	200.00	42.8	25.15	28.7	31.25	34.2
Sólidos totales disueltos (STD)	mg/l	1000	396	176	323	536	295
Sulfatos (SO ₄)	mg/l SO ₄ ⁻²	400.00	46	31	56	38	19

Parámetro	Unidad	NSO 13.07.01.0 8	SMO- 30	SMO- 09	SMO- 06a	SMO- 07a	SMO- 03a
Arsénico (As)	mg/l As	0.01	0.00096	0.00084	0.00083	0.00042	0.00206
Salinidad	ppt	-	0.4	0.2	0.3	0.5	0.3

***Los números en color azul corresponde a los que exceden el límite de la NSO**

De los cinco (5) pozos monitoreados sólo el pozo SMO-07 presenta la concentración de Nitratos y la dureza total fuera de norma para el mes de Octubre. La presencia de nitratos evidencia la vulnerabilidad de este tipo de acuíferos a la contaminación, en este caso probablemente por causa de actividades humanas como por ejemplo la mala disposición de excretas.

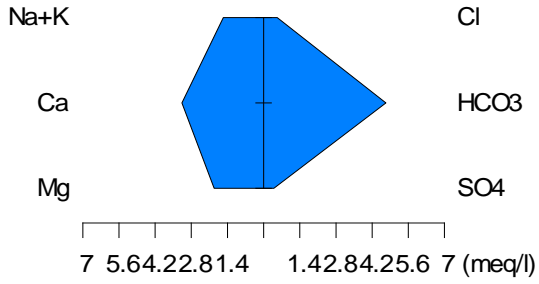
La representación gráfica de los resultados en diagramas de Stiff se muestra a continuación en la

Con los datos de las concentraciones de los iones mayoritarios y su representación gráfica en el diagrama Stiff; se puede clasificar el tipo de agua predominante en el acuífero de San Miguel como Bicarbonatada Cálctica, tanto en época seca como en época lluviosa. No se evidencian diferencias sustanciales que denoten un cambio en a través de los años en los que se ha realizado el muestreo. En la Tabla 10 se muestra la caracterización físico-química (tipo de agua) para cada una de las muestras de agua de los pozos monitoreados.

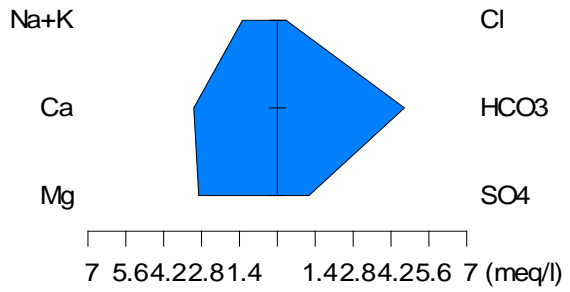
Tabla 10 Clasificación del tipo de agua subterránea en función de la caracterización hidrogeoquímica de los pozos muestreados en las campañas del 2015

Sitio (código pozo)	Caracterización físico-química (octubre)
SMO-03a	N/A
SMO-06a	Bicarbonatada cálcica
SMO-07a	Bicarbonatada cálcica
SMO-09a	Bicarbonatada cálcica
SMO-030	Bicarbonatada cálcica

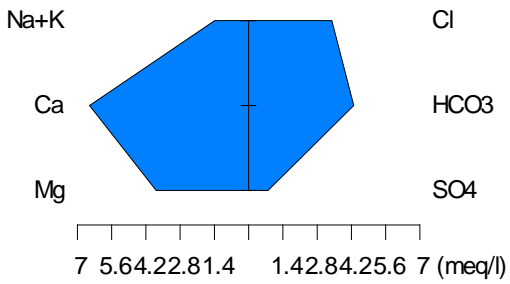
SMO-03a 28/09/2015



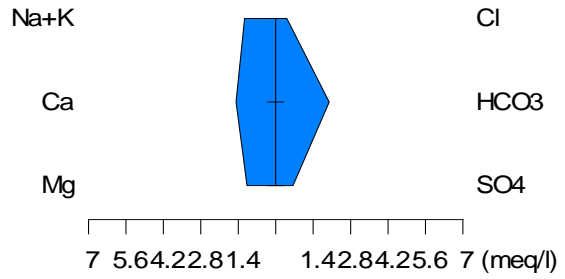
SMO-06a, 28/09/2015



SMO-07, 28/10/2015



SMO-09a, 28/09/2015



SMO-030, 28/09/2015

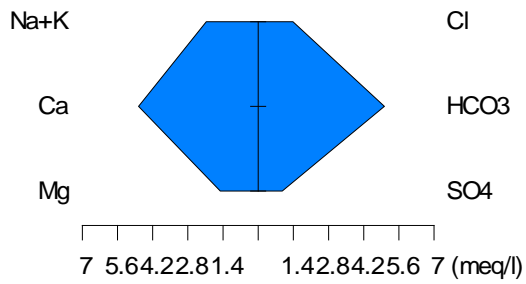


Figura 10 Diagramas de Stiff para la clasificación del tipo de agua subterránea procedente de los pozos de la red de monitoreo para Octubre del 2015.

7. Conclusiones

- Las mínimas variaciones en los niveles piezométricos en los pozos de la red de monitoreo, sugieren una primera apreciación que la recarga es muy lenta en los acuíferos y que además la misma se iguala a la extracciones, generando por ello una línea de tendencia de la evolución de la cota de los niveles piezométricos con una pendiente casi constante en el tiempo.
- De manera general, al revisar con un nivel de escala más detallada las variaciones de los niveles piezométricos, para todas las zonas de estudio, se logra apreciar para la mayoría de los pozos, un ciclo de recarga (lenta como se menciona anteriormente) en la época lluviosa y descarga (tanto la natural como la producida de la actividad humana) en época seca.
- Las variaciones estacionales se reflejan en los niveles piezométricos de los pozos analizados, con diferencias relativas entre las épocas del año en el rango de los 2 cm hasta los 2.91 metros en los tres acuíferos estudiados. En algunos pozos estas diferencias son negativas, lo que indica un descenso del nivel en dichos pozos: SMO-30 y 07 en el sector Sur-Este de San Miguel y el ZAP—23a en el sector Oeste de Zapotitán.
- El tipo de agua predominante en los sitio muestreados del acuífero de Zapotitán es del tipo Bicarbonatada Cálctica para Octubre del 2015.
- Con los datos de las concentraciones de los iones mayoritarios y su representación gráfica en el diagrama Stiff; de los sitios muestreados, se puede clasificar el tipo de agua predominante en el acuífero de Santa Ana como del tipo Bicarbonatada Cálctica para Octubre del 2015.
- El tipo de agua predominante, en los lugares muestreados, en el acuífero de San Miguel se puede clasificar como Bicarbonatada Cálctica para Octubre del 2015.

Bibliografía

- Baxter, S. (1984). *Léxico Estratigráfico de El Salvador*. San Salvador: CEL.
- Comisión Docente CIHS, C. I. (2009). *Hidrogeología*. Barcelona: FCIHS.
- Custodio, E., & Llamas, R. (2001). *Hidrología Subterránea (Tomo I)*. Barcelona: Omega.
- Foster, S. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. En: Van Duijvenbooden W y Van Waegeningh H (ed.), *Vulnerability of soil and groundwater to pollution* 38, 69–86.
- Foster, S., & Hirata, R. (1991). *Determinación del riesgo de contaminación de agua subterránea*. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y.
- Freeze, R., & Cherry, J. (1979). *Groundwater*. United States of America: Prentice Hall, Inc.
- Jiménez Madrid et al., A. (2009). Análisis comparativo de la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos carbonáticos (Sierra de Cañete, provincia. *Boletín Geológico y Minero* , 81-94.
- PRISMA, P. S. (2001). *Estudio de la Intrusión de Aguas Salinas en la Zona Costera de la Bahía de Jiquilisco*. San Salvador: Fundación PRISMA.
- SNET. (2005). *BALANCE HÍDRICO INTEGRADO Y DINAMICO EN EL SALVADOR COMPONENTE EVALUACION DE RECURSOS HIDRICOS*. San Salvador: Servicio Nacional de Estudios Territoriales.
- Zwahlen, F. (2004). *Vulnerability and Risk Mapping for the Protection of Carbonate (Karstic) Aquifers*. Informe final COST Action 620. 297 pp. En Jiménez Madrid et al 2009. Brüssel, Luxembur: Zwahlen, F (ed), European Commissio.