

11. Detección de la salinidad en el acuífero costero al sur del municipio de San Francisco Menéndez, Departamento de Ahuachapán. El Salvador

R. Mata, Geólogos del Mundo-Departamento de Ciencias Energéticas y Fluidicas-UCA.

Resumen

Con el objetivo de contribuir a la mejora de la calidad de vida de los habitantes de las comunidades ubicadas al sur del municipio de San Francisco Menéndez, departamento de Ahuachapán, a través del conocimiento del estado y la calidad del agua subterránea del acuífero costero sobre el cual se encuentran asentados, se ha realizado este documento, en el cual, se intenta determinar la afectación causada por la invasión de agua salada en el subsuelo por medio de pruebas de prospección eléctrica y análisis físico-químicos del agua de los pozos de la zona.

Los resultados obtenidos, que han sido correlacionados con la litología de los pozos profundos y el nivel freático, han permitido elaborar un modelo conceptual del fenómeno. Este modelo se ha representado por medio de cortes horizontales y verticales del terreno y muestra como la afectación llega hasta 3km tierra adentro y a una profundidad de 175 m bajo el nivel del mar.

Índice de términos

Acuífero, acuitardo, cloruros, conductividad eléctrica, invasión de agua salada, piezometría, resistividad, sondeo eléctrico vertical, vaguada de agua subterránea.

Este estudio fue realizado por Geólogos del Mundo y la Unidad Ecológica Salvadoreña (UNES), como un resultado del proyecto "GESTIÓN DEL AGUA PARA LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO". Esta publicación ha sido realizada con el apoyo financiero del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania. Su contenido es responsabilidad exclusiva de Geólogos del Mundo y UNES y no refleja necesariamente la opinión del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania.

R. Mata trabaja en el Departamento de Ciencias Energéticas y Fluidicas de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, Antiguo Cuscatlán, La Libertad. El Salvador (e-mail: rmata@uca.edu.sv).

I. INTRODUCCIÓN

El presente documento intenta describir el estado del acuífero costero de la cuenca baja del Río Paz, enfocándose principalmente en la detección de la salinidad presente en éste y que afecta la calidad de vida de los habitantes de las distintas comunidades de la zona.

La presencia de agua salobre en pozos ubicados en las casas de los habitantes de las distintas comunidades del sur de San Francisco Menéndez y el interés por determinar la ocurrencia de este fenómeno, ha sido el indicador que ha servido de motivación para la realización de este estudio.

Detección de la salinidad en el acuífero costero al sur del municipio de San Francisco Menéndez, Departamento de Ahuachapán. El Salvador



Para ello, y ante la ausencia de registros hidrogeológicos de la zona, se decidió realizar un levantamiento de información que sirva para establecer un punto de partida de la situación del acuífero, y luego, centrar la atención en la detección y definición de la masa de agua salina, bajo el supuesto que la causa principal de la ocurrencia del fenómeno es la invasión de agua salada proveniente del océano.

Para llevar a cabo se ha recurrido a la aplicación de prospección eléctrica y análisis físico-químicos de agua de pozos.

El documento está estructurado de tal forma que en la primera parte se introduce al lector en las condiciones generales de la zona de estudio a partir de datos históricos: ubicación, clima, geomorfología, patrón de drenaje de aguas superficiales, geología e hidrogeología; para luego describir la metodología de estudio.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis de los datos recogidos en campo. Para el caso de la prospección eléctrica, en base a la variable resistividad y la correlación con perfiles litológicos de pozos perforados de la zona, se definieron perfiles geoelectríficos junto con los materiales que forman los distintos estratos.

Con la altura piezométrica, calculada a partir de la profundidad del agua en los pozos excavados (poca profundidad que son los que predominan) se determinó la dirección del movimiento así como el gradiente hidráulico del agua subterránea.

Por último, con los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio, se verificó la calidad físico-química del agua de los pozos. Determinando la presencia de contaminación de origen natural (salinidad). También, en este apartado, se verificó la calidad del agua para su uso en el riego a través del Índice de Adsorción de Sodio (S.A.R), ya que esta zona es de alta actividad agrícola.

II. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra ubicada a 110 kilómetros al suroeste de la capital del país, San Salvador. Cubre una superficie aproximada de 90 km²., limita al norte con las montañas de Tacuba, al sur con el Océano Pacífico, al oeste con el Río Paz y el Canal Seco y al este con y el río Cara Sucia y la playa Barra de Santiago.

A. Clima

De acuerdo a información del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (MARN) a través de la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA), El Salvador, y por consiguiente, la zona de estudio, se encuentra ubicado en la parte exterior del cinturón climático de los trópicos, durante el transcurso del año los cambios en la temperatura son pequeños en contraste a las lluvias que muestran grandes oscilaciones en el transcurso del año. Se presentan dos estaciones (seca-lluviosa) y dos transiciones (seca-lluviosa y lluviosa-seca). Al final de la estación seca ocurren las máximas temperaturas en los meses de marzo y abril.

El país presenta un buen desarrollo del sistema de brisas de mar en las planicies costeras, moviéndose hacia los valles y planicies internas después del mediodía. También son típicos los máximos en la actividad lluviosa unas semanas después del paso del sol por el cenit (Al mediodía el sol brilla perpendicularmente, no proyecta sombra).

El territorio salvadoreño se puede dividir de acuerdo su elevación respecto al nivel del mar según la clasificación climática de Köppen-Geiger (1936). La zona sur del municipio de San Francisco Menéndez se encuentra en una Planicie Costera de la zona denominada de Clima tropical caliente o tierra caliente. Esta denominación agrupa las zonas situadas entre las cotas de 0 a 200 m.s.n.m. y abarca el área comprendida entre el Océano Pacífico y el inicio de las laderas de la

Sierra de Tacuba. Las temperaturas medias anuales oscilan entre 23 y 35°C, con una precipitación media anual de 1400 a 1500 mm [1].

B. Patrón de drenaje superficial

El patrón de drenaje de aguas superficiales es externo, irregular y ramificado, semejante a un árbol, cuyos canales o cauces se caracterizan por ser sinuosos o con meandros. De éstos, son cuatro los que más destacan:

El Río Paz y Canal Seco. Aunque parece que son dos cauces distintos, es uno, y constituye el límite entre El Salvador y Guatemala. El cambio de nombre es debido a que, años atrás, el agua que recorría el Río Paz hasta el Océano Pacífico cambio de curso hacia el oeste (Guatemala) en la zona cercana a las coordenadas N13.7981° y W90.1172°, aproximadamente a 6.5 km al norte de la antigua desembocadura. Esto ha generado que su viejo cauce actualmente se mantenga seco, salvo durante fenómenos hidrometeorológicos que provocan inundaciones en la zona.

El tramo correspondiente al Río Paz es de carácter tortuoso, con un cauce ancho que en algunos tramos posee cauces menores entrelazados que forman pequeñas islas asociadas a la gran capacidad del río de transportar sólidos. Es un cauce inestable que cambia con las crecidas. Históricamente se tiene registros que comprueban el cambio de la desembocadura del Río Paz sobre un trecho de costa de casi 20 km [2].

Los pobladores que viven a lo largo del Canal Seco, se quejan de la degradación de la calidad del agua de los pozos, una de las causas que ellos atribuyen es la falta de flujo de agua a través de éste y que antes provenía del Río Paz.

El segundo cauce de importancia es conocido como elzanjón El Aguacate. Se origina en el sitio con coordenadas N13.8089° y W90.1055°, cerca de la comunidad Rancho San Marcos, desemboca en el Océano Pacífico, en el estero de Garita Palmera. Es una derivación del Río Paz y, según

versiones de los pobladores de la zona, antiguamente transportaba agua dulce que desembocaba en dicho estero; fue a partir de la década de los 70s que, con el objetivo de controlar el flujo de agua que circulaba en el canal, se construyó en la zona de derivación una compuerta que, poco a poco y sumado a la inestabilidad del curso del Río Paz, contribuyó a que el paso de agua dulce hacia El Aguacate se fuera mermando hasta secarse y convertirse en un canal de drenaje de agua dulce solamente durante la estación lluviosa. Durante la época seca se convierte en un canal de entrada de agua salada proveniente del estero en Garita Palmera, afectando el agua de los pozos cercanos a su cauce.

Hidrogeológicamente, existe una hipótesis acerca de la conexión hidráulica entre elzanjón El Aguacate y el acuífero, no estudiada hasta ahora en detalle, pero que se infiere a partir de los comentarios hechos por los pobladores de las comunidades del sur de San Francisco Menéndez: la circulación de agua dulce por elzanjón, unas décadas atrás y proveniente del Río Paz, con una cota superior al nivel freático de los pozos cercanos al cauce, favoreció a que desde elzanjón se transmitiera esta agua a través de la ribera en una franja paralela al cauce y con un ancho hasta ahora desconocido, que no degradaba la calidad del agua de los pozos. Actualmente, durante la época seca, con la entrada de agua salada proveniente del océano, en el estero Garita Palmera, dicha conexión afecta a los pozos de agua cercanos alzanjón. Algunos autores comentan que éste fenómeno es menos trascendente en cuencas superiores a los 2,000 km², pero en microcuencas puede ser un fenómeno importante.

El tercer cauce de importancia en la zona es conocido comozanjón El Chino, recoge las aguas provenientes del noroeste que provienen delzanjón La Danta y de la parte alta del municipio de San Francisco Menéndez, al noreste, que circula por los ríos San Francisco, Santa Rita y Sacramento, entre los principales. Este cauce desemboca en la zona de manglares cercana a la comunidad Las Salinas, coordenadas N13.744343° y W90.036428°. Debido al flujo de agua dulce que drena, proveniente de los ríos antes mencionados, se ve menos afectado por el ingreso de agua salada en la desembocadura en Barra de Santiago.



El río Cara Sucia figura como el cuarto cauce o canal de importancia. Se encarga de drenar la zona alta al noreste del municipio de San Francisco Menéndez. Es de carácter perenne y desemboca en el estero El Zapote, después de mezclarse con el agua del bosque de manglar cercano a la comunidad Las Salinas, en donde contribuye a mantener el equilibrio entre agua dulce y salada para la conservación de dicho bosque y favorecer la desalinización del agua de algunos pozos, como el de la comunidad Las Salinas, que se usa para abastecimiento de los habitantes de la zona.

C. Geomorfología

La zona sur de San Francisco Menéndez pertenece a la unidad geomorfológica planicie costera y es una llanura que se inicia, al norte, al pie de las montañas de Tacuba y en la dirección este-oeste, es una porción del extremo oriental de una inmensa llanura costera de más de 600 km de largo que se extiende desde el Golfo de Tehuantepec, en México, hasta la península de Acajutla, incluyendo la costa Pacífica de Guatemala [2].

Predominan las pendientes no superiores al 10%. Las cotas máximas del terreno se encuentran al norte, están entre los 20 y 30 msnm con algunos cerros cuya altura no supera los 60 msnm. Hacia el sur, cuenta con una costa casi rectilínea de orientación noroeste-sureste, con anchas playas de arena que se interrumpen con desembocaduras de los esteros Garita Palmera y El Zapote. Entre ambos esteros, y en una franja paralela a la costa, es notable el aumento de la elevación del terreno con respecto a la llanura continental. Por lo que existen comunidades como Garita Palmera, el Porvenir y el Zapote, que se encuentran asentadas sobre un cordón costero. Lo mismo sucede al oeste del estero de Garita Palmera en la comunidad El Tamarindo, y mucho menos observable en las comunidades Bola de Monte y El Botoncillo.

D. Geología e Hidrogeología

Geológicamente la zona de estudio está categorizada dentro del miembro Q'f perteneciente a la formación San Salvador, el cual corresponde a depósitos sedimentarios del cuaternario [3].

Hidrogeológicamente está definida como una Unidad acuífero poroso de gran extensión y productividad media, en la cual los materiales que predominan son piroclásticos aglomerados y retrabajados teniendo una distribución granulométrica que varía de fina a gruesa. Las conductividades hidráulicas pueden variar de mediana a bajas como consecuencia al grado de cementación o compactación que puedan tener los granos de los materiales que la constituye [4].

III. METODOLOGÍA

Para realizar la prospección hidrogeológica, ha sido necesaria la realización de tres fases que se detallan a continuación:

A. Inventario de puntos de agua y parámetros físico-químicos de campo

Esta etapa sirvió para reconocer el terreno y para obtener una primera aproximación del conocimiento del comportamiento del flujo subterráneo y de la calidad del agua del acuífero. Fue a partir de esta fase, que se definieron los sitios para realizar los sondeos eléctricos verticales (SEV) y para la recolección directa de muestras de agua para análisis físico-químico.

Se visitaron un total de 49 puntos de agua para recolectar datos, intentando obtener una distribución espacial de la zona de estudio. De estos puntos, 38 fueron pozos excavados y de gran diámetro, 5 fueron dispositivos de extracción de agua, muy comunes en la zona, conocidos como "puntas", 4 pozos perforados y 2 cursos de agua superficial.

En cada uno de los puntos se recopiló información referente a su situación, estado del punto y uso del agua. Así como los parámetros de temperatura del agua, pH y conductividad eléctrica.

B. Realización de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

1) Identificación de pozos de calibración:

A partir de la fase de reconocimiento, se pudo observar que en la zona predominan los pozos de poca profundidad cuya agua es para uso doméstico (en la mayoría de los casos sin uso de boca) y solamente se encontraron dos pozos profundos, uno, actualmente abandonado, ubicado en la hacienda La Danta (N13.76376, W90.07584) y el otro, en la hacienda Santa Rita (N13.81124, W90.05851).

Entre la información recopilada se logró obtener el perfil litológico del pozo de la hacienda La Danta, realizado en enero de 2012 y proporcionado por la Unidad de Investigación e Hidrogeología de la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), así como del pozo en Santa Rita, en el informe Geological and Geophysical Surveys for the Miramar and La Ceiba Areas. San Francisco Menéndez. Ahuachapán [5]. Por lo que se definieron estos pozos profundos como guía para calibrar las mediciones de resistividad eléctrica con los horizontes litológicos y acuíferos ahí descritos. Según estos informes, en el pozo de agua dulce de Santa Rita se identificó el nivel freático a 50 m de profundidad alojado dentro de un horizonte de lavas, mientras que el acuífero con problemas de invasión salina se identificó en el pozo de la hacienda La Danta a través de la medición in-situ de la conductividad eléctrica; la cual mostró valores superiores a 18000 $\mu\text{S/cm}$. El perfil litológico de este último revela un subsuelo de piroclastos retrabajados, sedimentos aluviales sanos y alterados a arcillas, sedimentos aluviales y fluviales con fósiles marinos. La zona de alimentación o rejilla del pozo está ubicada en el nivel de los materiales marinos.

2) Mediciones geoelectricas:

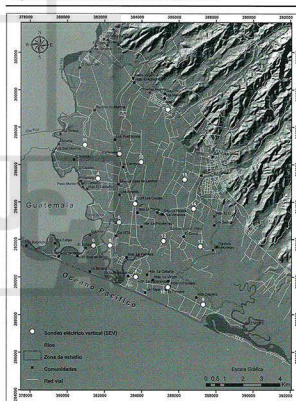
Se ejecutaron un total de 16 sondeos eléctricos verticales (SEV), arreglo Schlumberger cuya distribución se muestra en la Fig.1.

Para las pruebas en campo, la separación media entre electrodos de corriente AB fue de 10, 15, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200, 300, 400, 500 y 600 m. El traslape de segmentos de la curva de campo se definió con valores para MN de 3, 10, 30, 60 y 90 m.

C. Toma de muestra de agua en pozos y análisis físico-químicos en laboratorio

La toma directa de muestras de agua de los pozos se realizó luego de evaluar los resultados obtenidos en la fase de inventario de puntos de agua y parámetros físico químicos de campo. Se recolectaron 17 muestras de agua de pozos para análisis físico-químico.

Fig. 1 Distribución de los SEV en el terreno



Detección de la salinidad en el acuífero costero al sur del municipio de San Francisco Menéndez, Departamento de Ahuachapán. El Salvador

Como el objetivo primero es determinar la salinidad del agua de los pozos, para la elección de los puntos de muestreo se consideró como primer paso, obtener muestras de agua cuyo valor de conductividad eléctrica medida in-situ definieran las condiciones extremas que se podrían encontrar en la zona, es decir, se tomó una muestra de agua del zanjón El Aguacate, cuyo valor de conductividad eléctrica medida in-situ mostraba un comportamiento similar al de agua salada ($C_e=18000 \mu\text{S/cm}$) y se definió como límite salino, y la otra muestra de agua se tomó de un pozo ubicado en la hacienda Santa Rita, donde el valor de la conductividad eléctrica in-situ mostró un comportamiento característico de agua dulce ($C_e=300 \mu\text{S/cm}$) y se definió como límite dulce. Las 15 muestras restantes fueron tomadas tratando de dar cobertura a toda la zona de estudio.

IV. RESULTADOS

A. Características geométricas y composición del suelo a partir de la resistividad

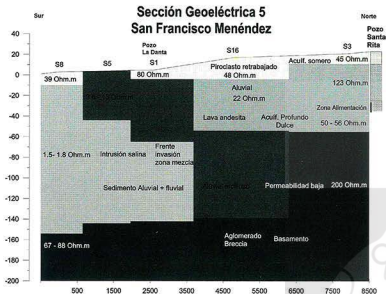
Antes de comentar los resultados obtenidos se hace necesario aclarar que el método utilizado para el cálculo de la resistividad mide, en profundidad, la resistencia eléctrica, u oposición del material presente en el subsuelo, al paso de la corriente eléctrica. La resistividad de las rocas depende directamente de su grado de compactación e inversamente de su porosidad, permeabilidad, saturación y temperatura. Esta propiedad física también depende del contenido electrolítico del fluido que circula entre las rocas y del tipo e intensidad de alteración. Las rocas compactas y sanas se caracterizan por tener valores superiores a 1000 Ohm.m (Ωm), mientras que las rocas alteradas a arcillas ("barros") poseen resistividades desde 5 a 20 Ohm.m . Las arenas de grano grueso saturadas son eléctricamente más conductoras que las arenas de grado fino. En diversos resultados experimentales, publicados en la literatura de los métodos geoelectrónicos, se pueden encontrar arenas gruesas saturadas y limpias con resistividades menores a 100 Ohm.m . Registros eléctricos de algunos pozos de El Salvador muestran resistividad eléctrica con valores

desde 50 Ohm.m para aglomerados. Cuando los estratos rocosos contienen fluidos con alta salinidad, proveniente del océano, se encuentran reportes con resistividades menores a 3 Ohm.m .

De manera general, y a partir del análisis de los SEV, el subsuelo en el área de estudio posee una estructura geoelectrónica, o dicho de otra forma, una estructura que se comporta en profundidad en relación al paso de la corriente eléctrica de la forma: resistiva – conductiva – resistiva. La capa resistiva superior refleja valores $22-133 \text{ Ohm.m}$. La capa conductiva se puede subdividir en una capa conductora superior con valores entre 3 y 15 Ohm.m y otra capa subyacente con resistividades menores a 3 Ohm.m . El horizonte resistivo profundo está impregnado con resistividades desde 60 hasta 200 Ohm.m .

A partir de lo descrito anteriormente y con el apoyo de la información disponible de los pozos de agua profundos (haciendas La Danta y Santa Rita) se interpreta que existe una capa resistiva superior formada por piroclastos retrabajados y aluviales no consolidados, en cuya base circula un acuífero de agua dulce. La capa conductora superior se interpreta como material aluvial arcilloso y que en principio aísla los acuíferos superiores de un acuífero salino a mayor profundidad, aunque es de hacer notar que con la perforación del pozo en la hacienda La Danta (aproximadamente de 100 m de profundidad) se haya generado una conexión hidráulica entre el acuífero salino y los acuíferos superiores. El horizonte conductivo inferior, que circula en material aluvial fluvial, con depósitos marinos en su base, se correlaciona con una invasión salina observada superficialmente en la zona de manglares y ríos, y a profundidad en el pozo de la hacienda La Danta. Por último, la franja resistiva profunda es una capa impermeable, asociada a un basamento geológico y que puede estar constituida por aglomerados compactos no alterados. (Fig. 2)

Fig. 2 Sección geoelectrónica de los sondeos 8, 5, 16 y 3.



La distribución en planta de la resistividad eléctrica modelada o extraída de las capas eléctricas de cada modelo para profundidades de 0, 25, 50, 75, 100, 150, 175 y 200 m bajo el nivel del mar, se presenta en la Fig. 3. A medida que la profundidad de observación aumenta, es notable el apareamiento, desarrollo y desvanecimiento de cada capa eléctrica. La capa salina (color cyan), altamente conductiva y asociada con rocas de aluviales y fluviales, aparece al nivel del mar como influencia de los manglares alrededor de la comunidad Las Salinas a -25 m, esa misma capa eléctrica aparece cerca de El Botoncillo y su área de cobertura se maximiza hasta -75 m. Posteriormente su extensión decrece y a partir de un valor entre -150 y -175 m desaparece. Los materiales aluviales o arenas (color verde), no necesariamente saturados de agua dulce, se distribuyen en todas las elevaciones mapeadas, denotando la gran influencia de dichos materiales en la zona costera bajo estudio.

Parte de esos materiales aluviales se alteran en arcillas (color rojo), los cuales se exponen como límites o barreras entre las arenas que contienen agua dulce y los materiales aluviales fluviales que alojan el agua salina proveniente del océano.

El horizonte de -200m muestra el apareamiento del basamento geológico de naturaleza eléctrica altamente resistivo (color violeta), subyaciendo a (o en combinación) con materiales aluviales sanos o no alterados a arcillas.

B. Comportamiento del flujo subterráneo a partir de las mediciones del nivel freático en los pozos de la zona

En base a la profundidad del agua medida en los pozos excavados de gran diámetro (se ha excluido los datos de los pozos profundos ya que solo se tienen dos dentro de la zona y uno de ellos, en Santa Rita, se encuentra completamente sellado y sin posibilidad de medir la profundidad del agua) y elaborando las curvas de nivel de agua subterránea (isopiezas) se pudo determinar la dirección de ésta y el gradiente o pendiente del movimiento. De manera general, el flujo subterráneo recorre desde el norte, en la zona de

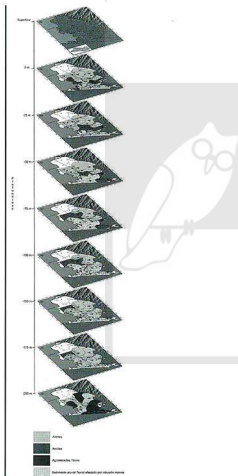
La Hachadura, hacia el sur y desde Cara Sucia, hacia el suroeste, con un gradiente hidráulico o "declive" de 0.004 con lo que se puede estimar que a velocidad de movimiento puede variar desde milímetros a día hasta 1 m/ día dependiendo de la naturaleza del material que atraviese. Luego, ambos flujos convergen en la zona de la hacienda La Danta para moverse en dirección sur aumentando el gradiente hidráulico donde se genera una vaguada de agua subterráneas paralela a la costa con un ancho aproximado de 1.5 km al oeste y 0.5 km al este y subyace a las comunidades de El Limón y El Castaño, colonia ISTA, hacienda La Danta, hacienda La Ponderosa y la comunidad El Chino.

Posteriormente, y en dirección sur, el nivel freático aumenta su nivel formándose una divisoria hidrogeológica, también paralela al mar, desde El Botoncillo, al oeste, hasta El Zapote, al este. Los gradientes



hidráulicos o "declives" varían en ambos extremos, en el caso del tramo que va desde Garita Palmera hasta El Zapote, la presencia del cordón costero con una gran capacidad de infiltración ha generado un acuífero local que podría ser la causa de que los pozos poco profundos sean menos afectados por la invasión de agua salada, cosa que no sucede en el extremo opuesto, en Bola de Monte, en donde el cordón disminuye su cota y el suelo es más fino (arcillas) con poca capacidad de infiltración por lo que se genera poca recarga acuífera.

Fig. 3 Representación en planta de la evolución de la invasión salina en el acuífero costero.



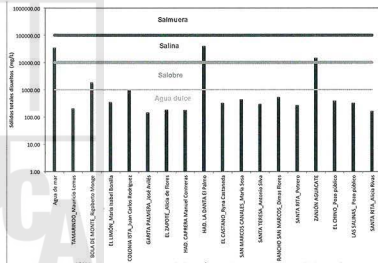
Detección de la salinidad en el acuífero costero al sur del municipio de San Francisco Menéndez, Departamento de Ahuachapán. El Salvador

C. Calidad físico-química del agua de los pozos

Una de las formas de detectar o cuantificar la presencia de invasión de agua salada es a través de indicadores presentes en el agua de los pozos, en este caso se revisarán la cantidad de sólidos totales disueltos, el ión cloruro

Para el caso de las muestras analizadas, los resultados de los sólidos totales disueltos (STD) se muestran en la Fig. 4.

Fig. 4 Clasificación del agua subterránea en base al Total de Sólidos Disueltos (STD)



La Norma Salvadoreña Obligatoria NSO 13.07.01:08. Agua potable (segunda revisión) declara como límite máximo admisible para consumo humano 1000 mg/l.

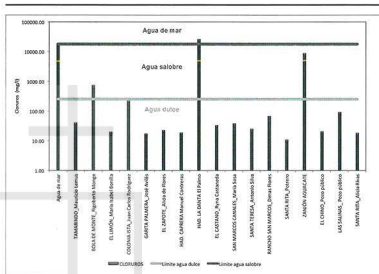
Se ha representado el valor típico de SDT en agua de mar como referencia, y a la vez de validez de los criterios de clasificación utilizados, para el resto de valores determinados en agua de los pozos. Nótese que el agua del pozo de la hacienda La Danta y El Zanjón El Aguacate tienen características similares a las del agua salada. Las causas, en el caso del primero, la intersección durante la perforación del pozo con el estrato fluvial aluvial contaminado con agua salada descrito en apartados anteriores. Y el caso del zanjón El Aguacate, el aumento de las mareas provoca el ingreso de agua salada desde el estero en Garita Palmera, tierra adentro, a través del zanjón y que se facilita por la ausencia de una corriente de agua dulce que, años atrás, provenía desde el Río Paz.

En cuanto al resto de resultados, la mayor parte de ellos se encuentran dentro del rango correspondiente a agua dulce. Destacan los valores obtenidos en Bola de Monte (Rigoberto Monge N13.73947, W90.11484) y colonia ISTA (Juan Carlos Rodríguez N13.74442, W90.08507) en donde los STD encontrados en el agua de los pozos corresponden a agua salobre (1840 mg/l y 1010 mg/l respectivamente).

Si nos referimos al ión cloruro, es importante el aporte que hace el agua de mar, y sobre todo, no se ve afectado por las reacciones que se producen durante los procesos de mezcla agua dulce-salada, por lo que un rápido aumento del contenido de este ión en las aguas subterráneas es un indicio de la presencia de invasión de agua salada, aunque no es recomendable restringir a esta especie química la presencia de la contaminación, ya que pueden existir otros procesos que limiten su uso [6]. Los resultados obtenidos en los análisis realizados al agua de los pozos de la zona se reflejan en la Fig. 5

La presencia de altas concentraciones del ión cloruro se generan en el pozo de la hacienda La Danta, el zanjón El Aguacate, en Bola de Monte (Rigoberto Monge) y colonia ISTA (Juan Carlos Rodríguez) repitiéndose el comportamiento observado anteriormente con los Sólidos Totales Disueltos.

Fig. 5 Clasificación del agua subterránea en base al contenido de cloruros



D. Calidad del agua de los pozos para su uso agrícola. Riego

Dado que en la zona una de las actividades es el riego de las distintas plantaciones y, en la gran mayoría de los casos, a través de bombas "achicadoras" que extraen agua del acuífero superficial, se hace necesario revisar la calidad de ésta para dicho uso. La clasificación más general es la que se define a través de la Relación de Absorción de Sodio (S.A.R) y es un parámetro que representa la posible afectación del ión sodio presente en el agua subterránea sobre el suelo, ya que una elevada proporción de este elemento con respecto a los iones calcio y magnesio puede generar una degradación del suelo afectando su estructura y permeabilidad.

La concentración relativa del sodio con respecto al calcio y al magnesio, que se evalúa con la siguiente fórmula:

$$S.A.R. = \frac{rNa}{\sqrt{\frac{rCa + rMg}{2}}} \quad (1)$$

Donde: rNa, rCa y rMg son las concentraciones de los iones Sodio, Calcio y Magnesio expresados en miliequivalentes / l.

Para el agua de los pozos analizados en la zona, los resultados muestran en la Fig.6 que la mayor parte de éstos se encuentran en el campo C2-S1, lo cual quiere decir que según la conductividad eléctrica de las aguas (C2), estas contienen una salinidad media y que pueden utilizarse con un grado moderado para cultivos y, sin un excesivo control de la salinidad, se pueden cultivar en la mayoría de los casos las plantas moderadamente tolerantes a las sales. El término S1 indica que se tiene un agua baja en contenido de sodio y puede utilizarse en la gran mayoría de suelos. Por lo tanto, todas las aguas que se encuentran en este grupo representan un peligro bajo de alcalinizar el suelo.

Los pozos de María Sosa, en San Marcos Cañales, y el pozo público de la comunidad El Chino, que caen dentro del grupo C3-S1, lo cual indica que a partir de la conductividad eléctrica (C3) se consideran aguas altamente salinas que no pueden utilizarse en suelos de drenaje deficiente (finos), tendrán que ser utilizados en plantas muy tolerantes a las sales y se tendrá que tener un control adecuado de la salinidad. La ventaja es que el factor S1 indica un agua baja en sodio, por lo que el peligro de alcalinización del suelo se considera bajo. Aunque habrá que tomar precauciones [7].

El pozo de Juan Carlos Rodríguez en colonia ISTA, cae dentro del grupo C3-S3, por lo que según la conductividad eléctrica es un agua altamente

salina que no puede utilizarse en suelos de drenaje deficiente (finos) ni en plantas que no toleren las sales, además de un control de la salinidad. Con respecto al factor S3, el agua se considera alta en sodio y en la mayor parte de los suelos puede alcanzarse un límite de toxicidad de sodio intercambiable, por lo que es preciso un buen drenaje, lavados intensos y adiciones de materia orgánica. Por lo tanto, el peligro de alcalinizar el suelo se considera alto.

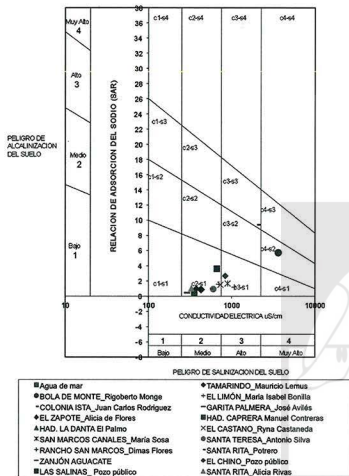
Por último, el pozo de Rigoberto Monge ubicado en Bola de Monte, se encuentra dentro del grupo C4-S2 lo cual se considera, en base a la conductividad eléctrica (C4) en agua muy altamente salina. No es apropiada en condiciones ordinarias para el riego. Puede utilizarse con una selección de cultivos en suelos permeables (no finos), de buen drenaje y con exceso de agua para lograr un buen lavado. El factor S2 indica que es un agua con contenido medio de sodio. Puede representar un peligro en terrenos de textura fina y en condiciones deficientes de lavado. El peligro de alcalinización del suelo es alto (Ver Fig. 6).

De los análisis realizados en este estudio, exceptuando los resultados de el zanjón El Aguacate y la hacienda La Danta, habrá que poner especial atención al agua utilizada en la comunidades El Chino, Colonia ISTA y Rancho San Marcos (sin perder de vista Las Salinas y El Castaño) que, aunque todavía no se refleja su afectación en el suelo, potencialmente puede representar un peligro de degradar la calidad del suelo, y por tanto, su capacidad de producción.

V. CONCLUSIONES

Los resultados de los sondeos eléctricos verticales (SEVs) nos indican de manera general, que el área de estudio posee una estructura geoelectrica resistiva – conductiva – resistiva. La capa resistiva superior refleja valores 22-133 Ohm.m. La capa conductiva se puede repartir en una capa conductora superior con valores entre 3 y 15 Ohm.m, y otra capa subyacente con resistividades menores a 3 Ohm.m., comportamientos que puede ser atribuidos a la existencia de aluviales arcillosos y a la

Fig. 6 Peligro de alcalinización del suelo (Schoeller-Berkaloff)



presencia de agua salada respectivamente. El horizonte resistivo está definido con valores desde 60 hasta 200 Ohm.m.

A partir del perfil litológico de pozos profundos ubicados en la hacienda La Danta y Santa Rita, se ha interpretado que la capa resistiva superior

está formada por piroclastos y aluviales no consolidados, en cuya base circula un acuífero de agua dulce de un espesor que varía entre 5 y 10 metros.

En la base de los piroclastos re trabajados, también circula un acuífero superior de agua dulce con un espesor de más o menos 50 metros.

La capa conductora superior, que se interpreta como material aluvial arcilloso, forma un acuitardo que separa los acuíferos superiores antes mencionados y ubicados al norte de la comunidad La Danta, de la capa conductiva inferior, compuesta por material aluvial fluvial, con existencia con depósitos marinos en su base (caracoles y conchas fosilizadas), y que se infiere, es una zona afectada por la invasión de agua salada. Esta particularidad se correlaciona con una invasión salina observada superficialmente en la zona de manglares y ríos, y a profundidad en el pozo perforado de la hacienda La Danta.

La franja resistiva profunda es una capa impermeable, asociada a un basamento geológico y que puede estar constituida por aglomerados compactos no alterados (base de roca del acuífero).

Lo anteriormente descrito nos lleva a definir la existencia de tres unidades hidrogeológicas principales: la primera, desde el pie de las montañas de Tacuba hasta la hacienda La Danta que forma un acuífero de productividad media y de material permeable (conductividad hidráulica del orden de 10 - 10⁻¹ m/d); la segunda, el acuitardo de baja productividad y materiales poco permeables (conductividad hidráulica del orden 10⁻¹ - 10⁻⁴ m/d); y la tercera, un acuífero profundo que subyace al acuitardo, de productividad media, material permeable, pero, salinizado (conductividad hidráulica del orden de 10 - 10⁻¹ m/d). El cordón costero entre los esteros Garita Palmera y el Zapote, se puede considerar una subunidad que constituye un acuífero superficial compuesto por materiales permeables, pero con muy poco espesor, entre 10 y 15 metros, por lo que no se recomienda las perforaciones mayores a este rango..

La piezometría, basada en los niveles de agua de los pozos, muestra una vaguada de aguas subterráneas. Este fenómeno se encuentra 0 msnm y se concentra en una franja casi paralela a la costa que va desde la comunidad Las Salinas, al este, hasta la comunidad El Castaño, al oeste, y que incluye a la colonia ISTA. Es en esta franja donde se ha detectado los problemas de salinidad en los pozos excavados.

La zona de la vaguada de aguas subterráneas, coincide con una franja de riego intensivo debido a la presencia de cultivos de caña de azúcar, plataneros y bananeras. No se tiene certeza de cuanto el riego puede influir en este fenómeno ya que no se cuenta con datos de explotación de la zona.

En cuanto al agua utilizada para el riego, se ha identificado en el agua de uno de los pozos ubicados en la colonia ISTA con un valor de conductividad eléctrica alto y una relación de adsorción del sodio alto (SAR) lo que causa un riesgo alto de alcalinización del suelo que puede afectar la permeabilidad de éste. Esto puede ser un indicador que el agua subterránea próxima a la zona presente el mismo comportamiento. Llama la atención que el agua de los pozos ubicados en Las Salinas y El Chino, aunque presentan un riesgo menor, tienen la tendencia identificada en colonia ISTA y los pozos se encuentran en la franja donde se ha identificado la depresión del nivel freático.

VI. RECONOCIMIENTO

El autor agradece el apoyo de Salvador Hándal por su valioso aporte en el proceso de realización e interpretación de los resultados de la prospección eléctrica de este documento. Así como a los habitantes de las comunidades del sur de San Francisco Menéndez por la colaboración en la realización de este trabajo.

VII. REFERENCIAS

[1] Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador. (Junio de 2002). Clima en El Salvador. (C. d. Servicio Meteorológico

- Nacional, Producer, & SIG-SNET) Retrieved 12 de Septiembre de 2012 from Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Meteorología: <http://www.snet.gov.sv/ver/meteorologia/clima+en+el+salvador/>
- [2] Ministerio de Cultura y Comunicaciones. (1986). Geografía de El Salvador. San Salvador, San Salvador, El Salvador: Dirección de publicaciones del Ministerio de Cultura y Comunicaciones.
- [3] Misión Geológica Alemana. (1971). Mapa Geológico de la República de El Salvador. Hoja Sonsonate . San Salvador, El Salvador: Centro de Estudios e Investigaciones Geotécnicas.
- [4] Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA). (2008). Mapa hidrogeológico de la República de El Salvador. B1 Sonsonate Hillshade , 6. San Salvador, El Salvador: ANDA.
- [5] Muñoz, A. Q., & Hándal, S. (2009). Geological and Geophysical Surveys for the Miramar and La Ceiba Areas. Drexel University & Rowan University, San Salvador.
- [6] López Geta, J., & Mena Inglés, J. (1988). Aspectos metodológicos en el estudio de la intrusión salina. Documento Básico. España: Instituto Geológico y Minero de España.
- [7] Custodio, E., & Llamas, R. (1983). Hidrología Subterránea (Vol. 1). Barcelona, Cataluña, España: Ediciones Omega S.A.

VIII. BIOGRAFÍAS

Ricardo Mata nació en San Salvador, el 10 de octubre de 1975. Se graduó de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA) y tiene un posgrado en Hidrología Subterránea en la Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Su experiencia laboral incluye a las ONGs Geólogos del Mundo e Ingeniería sin Fronteras, así como la empresa Ibérica de Estudios e Ingeniería S.A (IBERINSA), Barcelona, España. Actualmente labora para el departamento de Ciencias Energéticas y Fluidicas de la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, UCA en el proyecto Desarrollo de Capacidades en Ingeniería del Agua y Gestión Ambiental (CapWEM) financiado por el proyecto ALFA III de la Unión Europea.