



Exploración de aguas subterráneas en el Arco Seco de Panamá (Sector de Las Tablas) mediante métodos geofísicos

Alberto Caballero

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

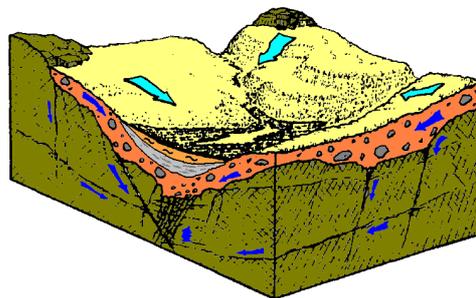
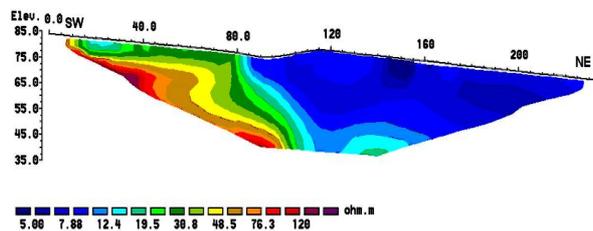
WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

Facultat de Geologia
Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica

TESIS DOCTORAL

**EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN
EL ARCO SECO DE PANAMÁ (SECTOR DE LAS
TABLAS) MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS**

ALBERTO CABALLERO



Barcelona, 2009

Capítulo 3

Hidrogeología

3.1. Introducción

La red de pozos empleados para el suministro de agua potable, se encuentra ubicada principalmente alrededor de las zonas urbanas. Esta es una práctica común, ya que permite conectarlos al sistema de energía eléctrica y a la red de distribución de forma más económica.

Los pozos perforados por el IDAAN (Instituto de Acueductos y Alcantarillados Nacionales) de Panamá, permiten establecer que la estratigrafía de los acuíferos de Las Tablas y las poblaciones circundantes como Santo Domingo, La Palma y San José, están constituidos por secuencias de lutitas, tobas, areniscas tobáceas, calizas, aglomerados y lavas andesíticas, cubiertas por un suelo arcilloso de espesor variable, el cual en algunos casos le sirve de protección.

Un inventario de recursos naturales estableció que las rocas volcánicas y sedimentarias de la región del Arco Seco, de manera general, tienen una matriz de baja porosidad y permeabilidad. Pruebas realizadas en laboratorio, sobre núcleos de rocas piroclásticas de la región, han dado como resultado una porosidad de menos del 5 %; lo que es muy posible debido a la compactación y fusión de los fragmentos volcánicos durante su formación. En este sentido, en las formaciones lávicas del Arco Seco, no se han observado las características hidrológicas como canales y escoria vesicular, que incrementan enormemente la porosidad, en rocas semejantes de otras partes del mundo. Las rocas sedimentarias de la región tienen una matriz compuesta de arcillas, limos y arenas de grano fino, que también poseen una porosidad y permeabilidad baja (CRA, 1968).

De esto se puede establecer que, la conductividad hidráulica de los acuíferos de está controlada principalmente por la permeabilidad secundaria de las fracturas (Sjunnesson & Svendenius, 2004; Piersol, 2005).

3.2. Evolución del abastecimiento de agua

El recurso agua subterránea, tiene un papel importante en la región de Las Tablas, ya que las aguas superficiales son muy escasas en las llanuras costeras circundantes, sobre todo en la época seca. Hasta hace poco, la región urbana de Las Tablas dependió del recurso agua subterránea para satisfacer su necesidad del preciado líquido. La justificación del cambio se debe al trasvase del Río La Villa (30 kilómetros al N) a mediados del 2005 e inicios del 2006, para abastecer la potabilizadora de Las Tablas, la cual solo abastece el núcleo urbano.

Desde el punto de vista histórico, en este sector inicialmente se excavaron pozos de forma manual y luego mediante perforadoras, alcanzando profundidades menores a los 30 metros, para la provisión de agua en toda la zona; en ese sentido, fueron muchas las bombas manuales instaladas (Ver Foto 3.1).

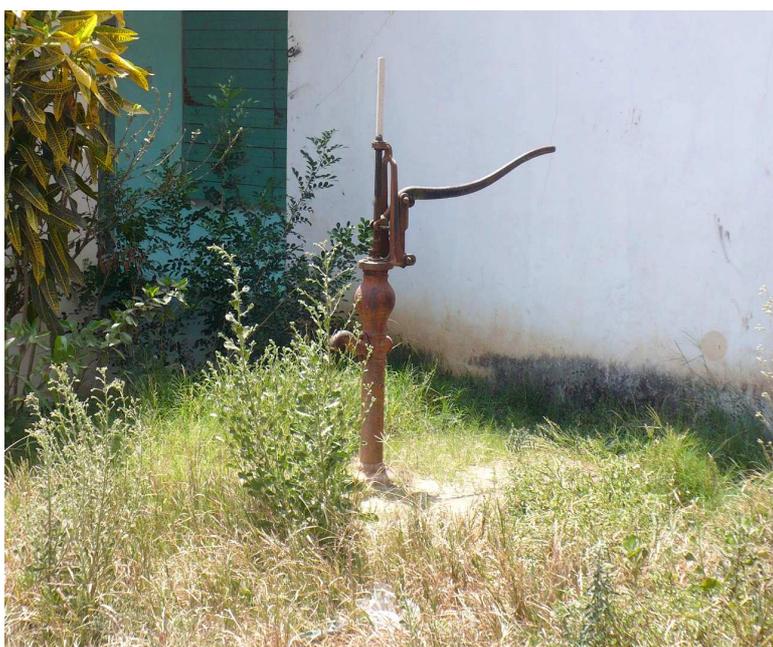


Foto 3.1. Bomba manual instalada en la población de San José.

El sistema municipal de abastecimiento de agua en Las Tablas empezó sus operaciones en la década de 1940-1950 y pasó a la administración del IDAAN en 1961. Este sistema de abastecimiento estaba constituido por una red de pozos de producción con profundidades entre 30 y 100 m.

En 2005, el sistema de provisión de agua constaba de unos 40 pozos que producían un promedio de 7,560.00 m³/día. Con la construcción de la potabilizadora se incrementa la producción a 22,680 m³ /día al 2009. En el presente año (2009), la situación de sequía y pérdidas en el sistema ha requerido la reinstalación de 24 pozos para el abastecimiento de agua. Es por ello que, un estudio de las condiciones hidrogeológicas de la zona, desde la perspectiva hidrogeofísica puede fortalecer la toma de decisiones, con respecto a la perforación de nuevos pozos.

3.3. Características Hidrogeológicas

La primera evaluación hidrogeológica realizada en el Arco Seco, fue hecha en el inventario de recursos naturales, realizado por la Reforma Agraria; en el que se estudiaron de manera general, las propiedades hidráulicas de las rocas en una amplia cobertura regional (CRA, 1968). En 1987, se realizó una evaluación hidrogeofísica en la región del Arco Seco; en la que se establecieron algunas zonas de potenciales acuíferos, esta sin embargo quedo inconclusa ya que no se realizaron comprobaciones en la zonas recomendadas (ECAISA, 1987).

Sjunnesson & Svendenius (2004), realizaron un estudio hidrogeológico en la región de Pesé, en el mismo se investigaron las propiedades del sistema de manera general. Igualmente, se realizó una estimación de los límites horizontales de los acuíferos determinados, así como una evaluación preliminar de la calidad del agua y su vulnerabilidad.

Piersol (2005), realiza un estudio hidrogeológico en la región de Aguadulce, en el que se evalúan las propiedades hidráulicas, el potencial del acuífero y el riesgo a la contaminación salina y ambiental de la zona.

En el marco del Programa Hidrológico Internacional, se desarrolló la primera compilación de la información hidrogeológica a nivel nacional, la cual fue plasmada en el Mapa Hidrogeológico de Panamá, a una escala 1:1,000,000 (ETESA, 1999).

El Mapa Hidrogeológico de Panamá, se fundamenta en la información geológica, geomorfológica, hidroquímica e hidrogeológica de casi todas las regiones del País. Por ello, en esta investigación, para la caracterización del acuífero de Las Tablas, en primera instancia, se considera la clasificación establecida en dicho documento del cual se extrae un resumen.

Las características hidrogeológicas generales de la región de Las Tablas y áreas circunvecinas se subdividen en dos grandes grupos los que se describen de la manera siguiente (ETESA, 1999):

3.3.1. Acuíferos predominantemente fisurados y discontinuos

A este grupo pertenecen dos unidades hidrogeológicas, formadas principalmente por rocas ígneas y sedimentarias; su constitución general es compacta y fisurada. Estas unidades se caracterizan por una permeabilidad variable y en ellas se encuentran acuíferos de productividad moderada a baja ($Q = 72 - 240 \text{ m}^3/\text{día}$).

3.3.1.2. Primera unidad

Esta unidad está constituida por acuíferos locales restringidos a zonas fracturadas pertenecientes a la Formación Macaracas (TO-MAC), conformados por una mezcla de rocas volcánicas y sedimentarias fragmentarias, consolidadas y poco consolidadas, sobrepuestas a rocas ígneas consolidadas. Los pozos más productivos se localizan en las zonas de fracturas.

Estas rocas de heterogeneidad extrema, por los sedimentos que conforman el Oligoceno, se han clasificado como pertenecientes a dos distintos tipos: depósitos marinos y sedimentos terrestres.

El promedio de la productividad de los pozos inventariados en esta formación es de $240 \text{ m}^3/\text{día}$; aunque es posible obtener caudales superiores en pozos perforados en zonas de fracturas.

La calidad química de las aguas es generalmente buena, el promedio del total de sólidos disueltos es de 274 ppm y el de la conductividad eléctrica es de 450 microSiemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$) a 25°C .

3.3.1.2 Segunda unidad

Esta unidad hidrogeológica se describe como acuíferos locales restringidos a zonas fracturadas que comprenden un conjunto de rocas efusivas, en su mayoría básicas y ultrabásicas, cuyas fisuras han sido en muchos casos selladas por la deposición de minerales secundarios. La calidad química de las aguas es generalmente buena.

En esta unidad hidrogeológica encontramos los grupos y formación Playa Venado (K-VE). En la misma se encuentran rocas que van desde el Cretácico hasta el Terciario (Oligoceno-Mioceno), tales como: andesitas, basaltos, aglomerados, pillow lavas, piroclásticos, tobas, brechas y dacitas.

De las formaciones geológicas que componen esta unidad, se tiene muy poca información de carácter hidrogeológico. Por lo tanto, la interpretación es únicamente cualitativa y está basada en la descripción de las formaciones geológicas.

Las rocas del Cretácico Superior del Grupo Playa Venado afloran en buena parte de la Península de Azuero, se componen de vulcanitas básicas y rocas ultrabásicas compactas y masivas, lo cual le atribuye valores muy bajos de permeabilidad primaria.

Las lavas, que componen esta formación, son masivas con una fisuración poco desarrollada y las pocas diaclasas existentes se encuentran en muchos casos selladas o rellenas, producto de la deposición de minerales secundarios. Estas características le atribuyen, a las rocas que componen esta formación geológica, valores bajos de permeabilidad con una productividad promedio de 132 m³/día.

La calidad química de las aguas en esta unidad hidrogeológica es generalmente buena, los análisis químicos muestran un valor promedio del total de sólidos disueltos de 281 ppm y una conductividad eléctrica promedio de 537 μ S/cm a 25°C.

3.3.2. Acuíferos locales, intergranulares o fisurados, de productividad limitada

En este grupo se ubicaron todas las formaciones intrusivas y sedimentarias que se consideran con permeabilidad desde baja a muy baja. Los acuíferos son de muy baja producción ($Q < 24 \text{ m}^3/\text{día}$).

Esta unidad se describe como acuíferos prácticamente ausentes, constituidos por intrusiones múltiples de composición variable, con una estructura masiva, afectada por una serie de fallas y una fisuración poco desarrollada. La ocurrencia de agua subterránea está limitada a la zona de meteorización o fracturación de las rocas sanas subyacentes. La calidad química de las aguas es buena. En el área de estudio esta unidad hidrogeológica está constituida por la formación Valle Riquito (TEO-RIQ). En la que predominan las rocas siguientes: Granodioritas, dacitas, gabros, cuarzodioritas e intrusivos ultrabásicos.

3.4. Características hidroquímicas y calidad de las aguas subterráneas

La calidad y las características hidroquímicas del sistema de circulación de aguas subterráneas en el área investigada han evaluadas para apoyar el presente estudio y de esta manera establecer un modelo de evolución del comportamiento de las mismas. El IDAAN como entidad responsable de los grandes núcleos de población, realiza periódicamente la revisión de los pozos a su cargo. En ese sentido, lleva a cabo los análisis de calidad de agua básicos. Estos incluyen turbiedad, pH, temperatura, la conductividad eléctrica, inorgánicos y coliformes totales.

Si las muestras analizadas resultan con parámetros cuyos valores están por encima de las normas, el pozo es descartado. Esto ocurre muy ocasionalmente cuando los niveles de sulfato sobrepasan los estándares establecidos (250 mg/L) (MICI, 1999). De manera general los niveles de nitrato se encuentran por debajo del límite considerado para agua potable (10 mg/L). Para protección bacteriológica el IDAAN utiliza un sistema de cloración en la mayoría de los pozos. En el análisis de control de calidad de los pozos administrados por el IDAAN no se han realizado pruebas para identificar sustancias orgánicas, pesticidas o metales traza.

3.4.1. Determinaciones fisicoquímicas y métodos de análisis empleados

En este estudio se emplearon las metodologías de análisis establecidas en el *Standard Methods for the Analysis of Water and Wasted-Water* (2000). Se midieron las propiedades fisicoquímicas (temperatura, conductividad, PH y sólidos disueltos totales (TDS por sus siglas en inglés) y las determinaciones realizadas en el laboratorio son sulfatos, cloruro, alcalinidad, dureza, calcio, magnesio, sodio, potasio, nitratos, bicarbonatos. Los resultados analíticos se han interpretado mediante su presentación en el diagrama de Piper (Martínez et al., 2006).

El control de calidad de estos datos está de acuerdo a la norma establecida en Custodio y Llamas (2001), la cual toma en consideración la conductividad eléctrica de la muestra. En este sentido, se estableció un balance iónico no mayor a 5%; en aquellos casos en que este valor se excedía nunca fue superior a 10%.

3.4.2. Hidroquímica de las aguas subterráneas

Con la finalidad de obtener información y establecer diferencias significativas en el comportamiento hidroquímico se seleccionó, de aquellos que estaban en funcionamiento, un grupo de pozos del sistema de abastecimiento. En este sentido, para su respectivo análisis se establecieron dos sectores, el NE y el SW. Para tal fin se analiza la conductividad como indicadora de la mineralización total y el contenido de cloruros; estos últimos por sus carácter conservativo.

Para el establecimiento de facies dominantes en las aguas muestreadas y el establecimiento de algún proceso geoquímico predominante, los datos hidroquímicos se presentan en un gráfico de conjunto como es el diagrama triangular de Piper.

La selección fue condicionada al hecho de que los pozos del sector NE han estado inactivos durante buena parte del periodo 2005-2009. Por otro lado, la escala de trabajo dificulta el análisis de posibles variaciones ocasionales, ya que el área está caracterizada por aguas dulces con bajo contenido salino.

3.4.2.1. Sector NE

Durante el mes de mayo de 2002 se realizó un muestreo en el sector NE que incluye a la ciudad de Las Tablas. Se seleccionaron 8 puntos de agua y se midieron los parámetros fisicoquímicos. El listado de estos puntos se presenta en la Tabla 3.1 y su ubicación se presenta en el mapa de la Figura 3.1.

Tabla 3.1. Puntos de muestreo durante el periodo seco en mayo del 2002.

Pozos Muestreados	Longitud	Latitud
B-7	579250	859150
B-8	579000	859000
B-10	579935	859895
B-21	579128	857808
B-23	580200	855800
B-26	581078	859048
B-38	581350	858000
B-40	580250	857350

Los parámetros fisicoquímicos obtenidos en este muestreo se presentan en la Tabla 3.2 y los químicos se presentan en la Tabla 3.3.

Los pozos de la zona central no han sido muestreados ya que a la época del muestreo habían sido desconectados o no estaban en servicio, lo cual puede limitar las conclusiones que se puedan obtener en este sector.

El mapa de isoconductividad, de la zona muestreada, se ilustra en la Figura 3.1. Es interesante observar que las aguas subterráneas que circulan por el eje de la quebrada La Ermita, van aumentando su mineralización en la dirección NW, hacia los pozos B-7 y B-8, en dirección a la confluencia de los ríos Perales y Guararé.

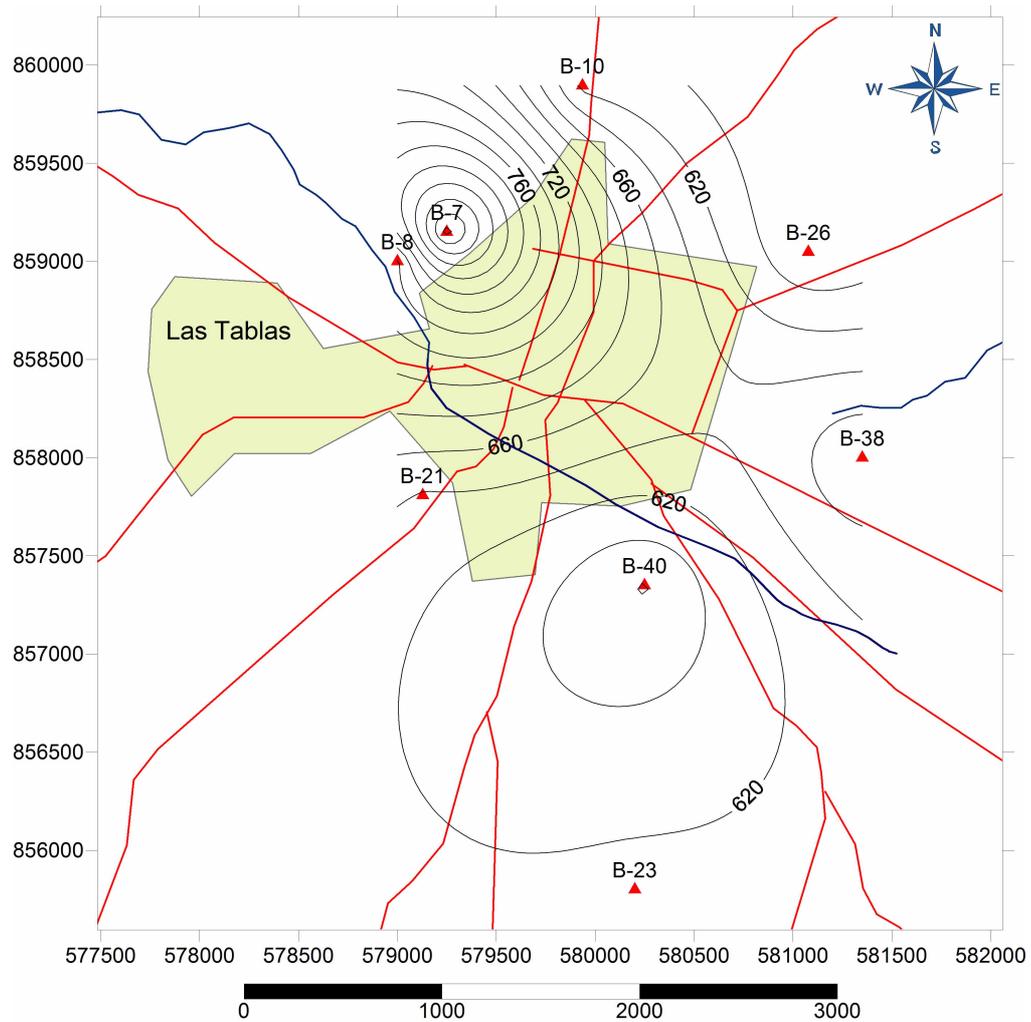


Figura 3.1. Localización de los puntos de muestreo y distribución de la conductividad eléctrica del agua en el sector NE de Las Tablas.

En la Figura 3.2, se ilustra la composición del sistema muestreado mediante un diagrama de Piper. La mayor parte de las aguas muestreadas no presenta un catión dominante y se encuentran en la región intermedia con una composición cálcico-sódico-potásica. Por otro, lado estas muestran una facies bicarbonatada, a excepción de la muestra B7, la cual presenta una ligera influencia del ión sulfato.

En la Figura 3.3 se presenta el mapa de isoconcentración de cloruros, en donde se ilustra la dinámica de las aguas en este sector de Las Tablas, en este mapa se puede observar la correspondencia con el mapa de la conductividad eléctrica.

Este resultado refuerza la idea del comportamiento de las aguas subterráneas, ya que el cloruro un ión conservativo. También aporta una idea de la influencia del medio externo sobre el acuífero, ya que el mismo tendría su recarga en la zona de colinas que rodean al sector y en el sistema de fracturas paralelas a la quebrada La Ermita; este sistema tiene una dirección SE-NW. Esto parece corroborar el diagrama de Piper discutido en la Figura 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros fisicoquímicos obtenidos en el sector NE.

Muestra	X	Y	pH	T °C	Cond. (µS/cm)
B-10	579935	859895	7,22	29,7	614,2
B-21	579128	857808	7,31	29,1	638,2
B-23	580200	855800	7,58	29,4	627,1
B-26	581078	859048	7,44	29,9	579,6
B-38	581350	858000	7,39	29,5	680,4
B-40	580250	857350	7,57	29,4	578,1
B-7	579250	859150	7,3	29,6	888,3
B-8	579000	859000	7,34	30,7	735,2

Tabla 3.3. Parámetros químicos obtenidos en los puntos de agua seleccionados.

Muestra	Alcalinidad mg CaCO ₃ /L	Bicarbonatos mg HCO ₃ ⁻ /L	Cloruros mg Cl ⁻ /L	Sulfatos mg SO ₄ ²⁻ /L	Nitratos mg NO ₃ ⁻ /L	Na (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)
B-10	269.1	328.3	32.9	133.5	0.53	89	0,37	22	61
B-21	297.2	362.6	36	95.9	1.67	60	0,62	42	67,5
B-23	313.6	382.6	35.7	78.9	0.46	58	0,47	38	61,6
B-26	296	361.2	24.6	54.2	1.22	61	0,73	26	46
B-38	353.3	431.1	36.3	22.7	2.2	51	1,04	33	61
B-40	311.2	379.7	19.5	6	0.86	45	0,35	21	60,6
B-7	272.6	332.6	64.4	222.9	3.82	38	0,27	44	122,5
B-8	218.8	266.9	75.4	45.81	0.04	60	0,39	14	74,2

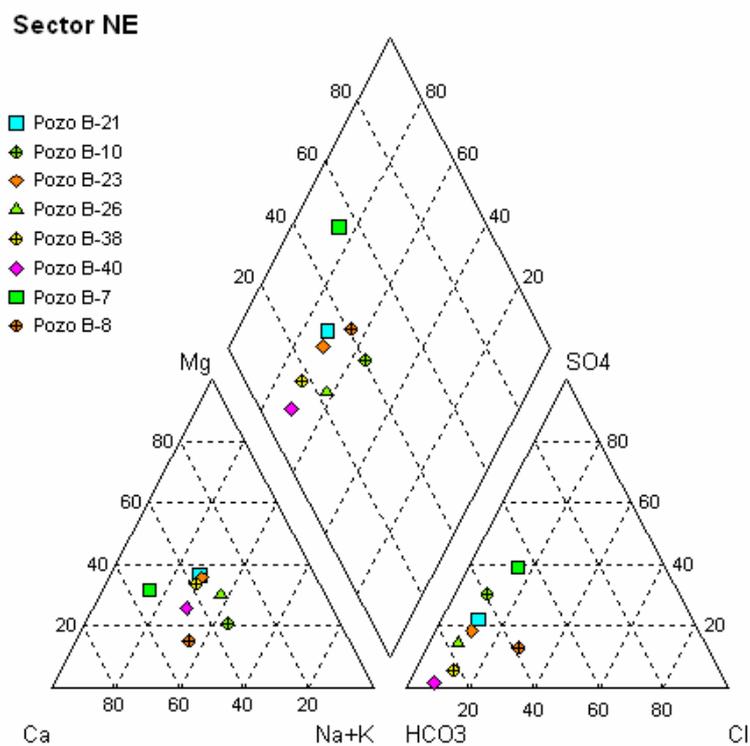


Figura 3.2. Diagrama de Piper de las aguas muestreadas en mayo del 2002.

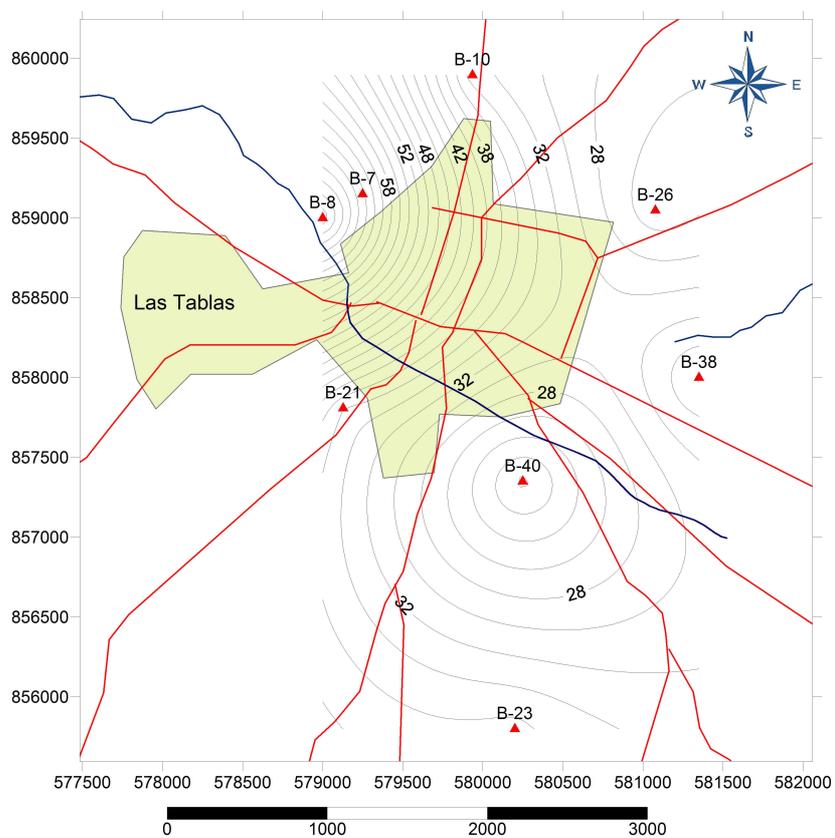


Figura 3.3. Mapa de distribución del ión cloruro en la zona de Las Tablas.

3.4.2.2. Sector Sur-Oeste

Los puntos de agua muestreados al SW de la zona de estudio, se muestran en la Tabla 3.4. Estos parámetros fueron observados durante el periodo seco y su composición química está contenida en la Tabla 3.5 y en el diagrama de Piper de la Figura 3.4 se presenta el conjunto de las muestras.

Tabla 3.4. Parámetros fisicoquímicos obtenidos en el mes de abril de 2006.

Muestra	x	y	pH	T °C	Cond. $\mu S / cm$
SanJ 1	582453	847745	6.61	29.9	878 *
SanJ 2	581994	846659	6.85	26.1	343
SanJ 3	584184	843955	7.44	26.5	340
SanJ 4	583852	844173	7.27	25.9	393
SanJ 5	583549	846279	7.43	25.4	511
SanJ 6	581344	844169	8.14	28.7	338
SanJ 7	582416	851755	7.64	30.1	397
SanJ 9	584480	848176	7.73	27.4	511
SanJ 11	583376	848092	7.43	29.4	800*
SanJ 12	583139	848418	7.52	29.1	657*
SanJ 13	582908	848116	7.33	30.6	800*
SanJ 15	582908	848116	7.91	29.2	602*
SanJ 17	585431	852939	7.67	26.1	408
SanJ 18	588848	858311	7.36	29.8	953*

(* Aguas subterráneas).

Los puntos de agua seleccionados en el sector SW, en el triángulo de los aniones, al igual que en el caso del sector NE, presentan una predominancia de los bicarbonatos, con una ligera tendencia al ión cloruro en las muestras SanJ 11, SanJ 13 y SanJ 18. En el caso de las muestras SanJ 1 y SanJ 9 se observa una tendencia a las aguas sulfatadas.

En el caso del triángulo de los cationes, se observa que a excepción de las muestras de SanJ 1, SanJ 5, SanJ 13 y SanJ 11 que son cálcicas, no existe un catión dominante; el resto de las muestras corresponden a una mezcla de aguas magnésicas, cálcicas y sódicas-potásicas. Este primer análisis muestra que las aguas subterráneas tienen poca evolución e interacción con la roca encajante en su recorrido.

Tabla 3.5. Parámetros químicos obtenidos en el mes de abril de 2006.

Muestra	Cloruro mg Cl ⁻ / L	Bicarbonatos mg HCO ₃ ⁻ / L	Sulfato mg SO ₄ ⁻² / L	Nitrato mg NO ₃ ⁻ /L	Sodio mg/L	Potasio mg/L	Calcio mg/L	Magnesio mg/L	Observación
SanJ 1	24	317.20	110	0.15	28.2	4.45	90	30.7	2
SanJ 2	9	207.60	1.5	0.15	23.4	1.87	26.8	11.9	1
SanJ 3	13	186.00	1.5	0.15	22	1.02	27.3	12.9	1
SanJ 4	17	195.60	1.5	0.15	24.1	1.78	31.9	14.4	1
SanJ 5	8	252.40	10	0.15	20	1.75	55.2	12.8	1
SanJ 6	16	153.60	1.5	0.15	21	0.22	25.6	11.6	1
SanJ 7	16	145.60	1.5	0.15	31.8	1.99	18.6	8.4	1
SanJ 9	14	200.00	36	0.15	33	2.11	36.5	15.7	1
SanJ 11	62	302.40	50	0.15	39.6	0.75	108.3	12.1	2
SanJ 12	21	302.40	18	0.15	57.4	1.64	45.4	11	2
SanJ 13	81	178.00	24	0.15	36.4	1.56	59.1	14.2	2
SanJ 15	36	283.20	14	0.15	119.1	0.25	16.4	3.4	2
SanJ 17	13	237.60	1.5	0.15	33.7	2.88	31.8	15.5	1
SanJ 18	120	220.00	8	10	43.8	2.49	63.9	28.8	2
1 = Aguas superficiales; 2 = Aguas subterráneas									

En este sentido, la presencia del ión cloruro en los puntos SanJ 18 y SanJ 13 se debe a fuentes antropogénicas, en el primer caso el pozo se encuentra a unos doscientos (200) metros del vertedero de la ciudad de Las Tablas y en el segundo caso el pozo esta expuesto a la contaminación externa ya que está en una zona de drenajes que convergen próximos al mismo.

El mapa de isoconductividad de la zona muestreada es presentado en la Figura 3.5. Como es de esperar, los puntos de mayor mineralización correspondientes a los pozos muestreados indican que las aguas subterráneas se mueven de la zona SW en dirección NE, hacia la conjunción de los Ríos Mensabé, Salado y las Quebradas Mensabé y Mariana; estos resultados corroboran el diagrama de Piper discutido en la Figura 3.4.

En la Figura 3.6, al igual que en el caso de la zona NE se presenta el mapa de isoconcentración de cloruros, en donde se ilustra la dinámica de las aguas de este sector; en este mapa, se puede observar la correspondencia con el de la Figura 3.5. A partir del mapa de la Figura 3.6 se infiere que el ión cloruro aporta una idea del flujo de las aguas subterráneas y de la influencia del medio externo.

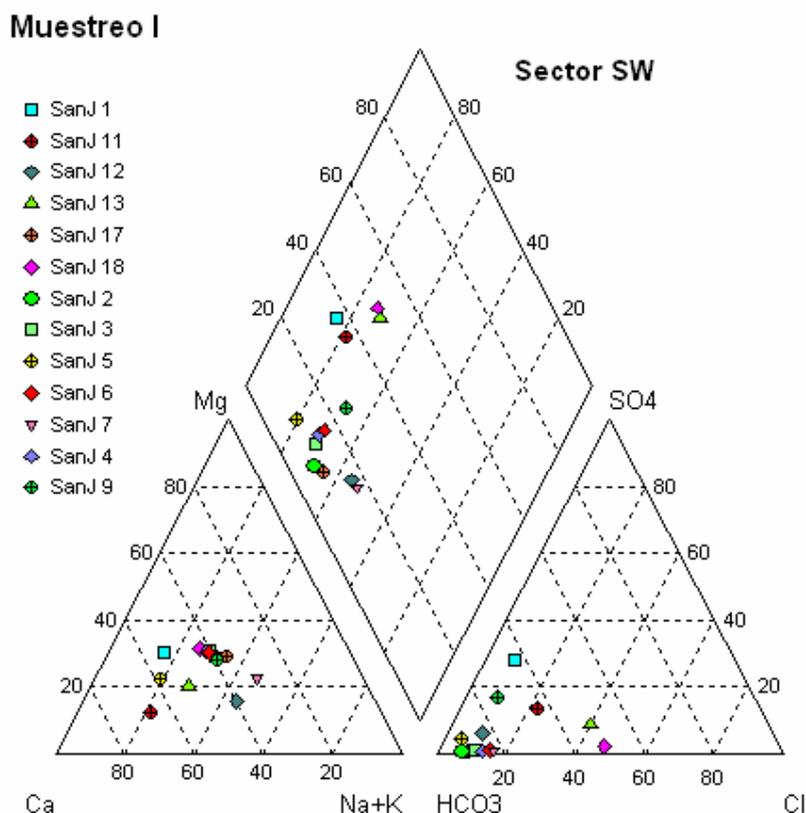


Figura 3.4. Diagrama de Piper de los puntos muestreados durante la estación seca (abril de 2006).

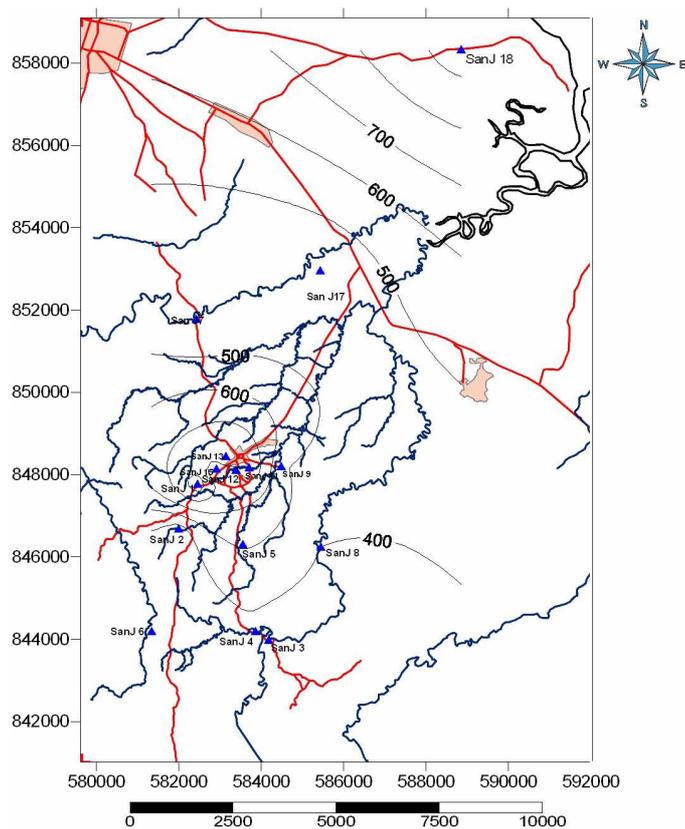


Figura 3.5. Distribución de la conductividad en la estación seca.

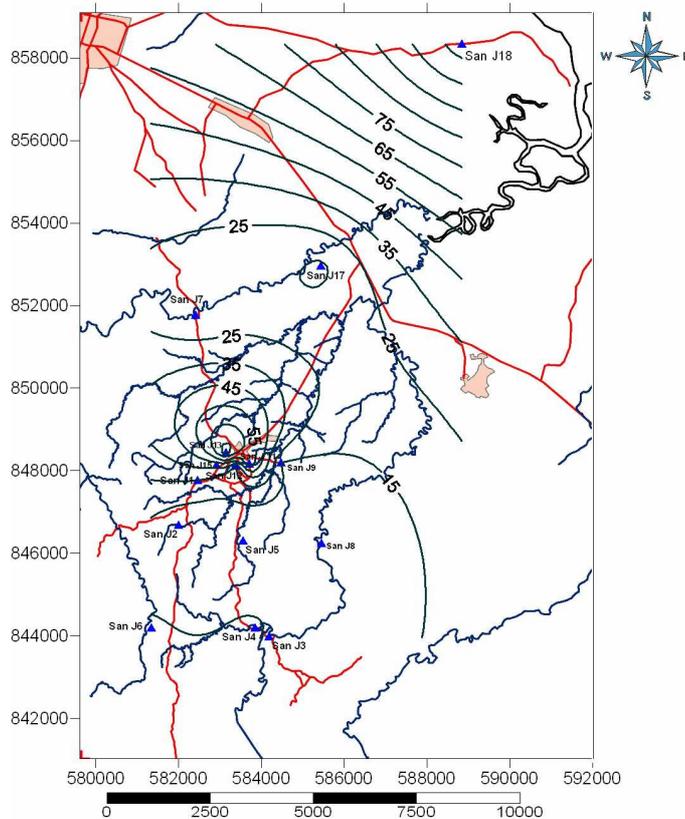


Figura 3.6. Distribución del ión cloruro durante la estación seca.

A finales del mes de noviembre e inicios de diciembre del 2006, se realizó un segundo muestreo de puntos de agua en el sector SW de la zona de estudio, este muestreo correspondería al de la época lluviosa, ya que es el periodo de mayor precipitación en la zona. Los parámetros fisicoquímicos se presentan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Parámetros fisicoquímicos obtenidos en nov-dic. 2006.

Muestra	x	y	pH	T °C	Conductividad $\mu S / cm$
SanJ1	582453	847745	7.03	29.40	462.00
SanJ2	581994	846659	7.50	24.50	285.00
SanJ3	584184	843955	7.61	25.60	410.00
SanJ4	583852	844173	7.55	25.10	322.00
SanJ5	583549	846279	7.60	25.40	264.00
SanJ6	581344	844169	7.50	25.00	285.00
SanJ7	582416	851755	7.65	27.00	336.00
SanJ9	584480	848176	7.57	25.80	457.00
SanJ11	583376	848092	7.23	29.40	826.00
SanJ15	582908	848116	7.30	29.00	508.00
SanJ17	585431	852939	7.62	26.50	352.00
SanJ18	588848	858311	7.25	30.20	1082.00
SanJ21	583909	848941	7.05	28.70	557.00
SanJ23	583440	848337	6.89	29.50	857.00
SanJ24	583221	847715	7.14	31.00	665.00

El análisis del conjunto se realiza mediante el diagrama de Piper, mostrado en la Figura 3.7; los datos químicos que lo constituyen se muestran en la Tabla 3.7. El diagrama de Piper, indica que en el periodo de invierno las aguas conservan su carácter bicarbonatado y se concentran hacia el vértice de los bicarbonatos. Es necesario observar la tendencia clorurada en la muestra SanJ18 y la sulfatada en la muestra SanJ1.

En el triángulo de los cationes se observa que el carácter cálcico de las aguas aumenta y la zona de mezcla se orienta hacia una tendencia de composición cálcico-magnésica.

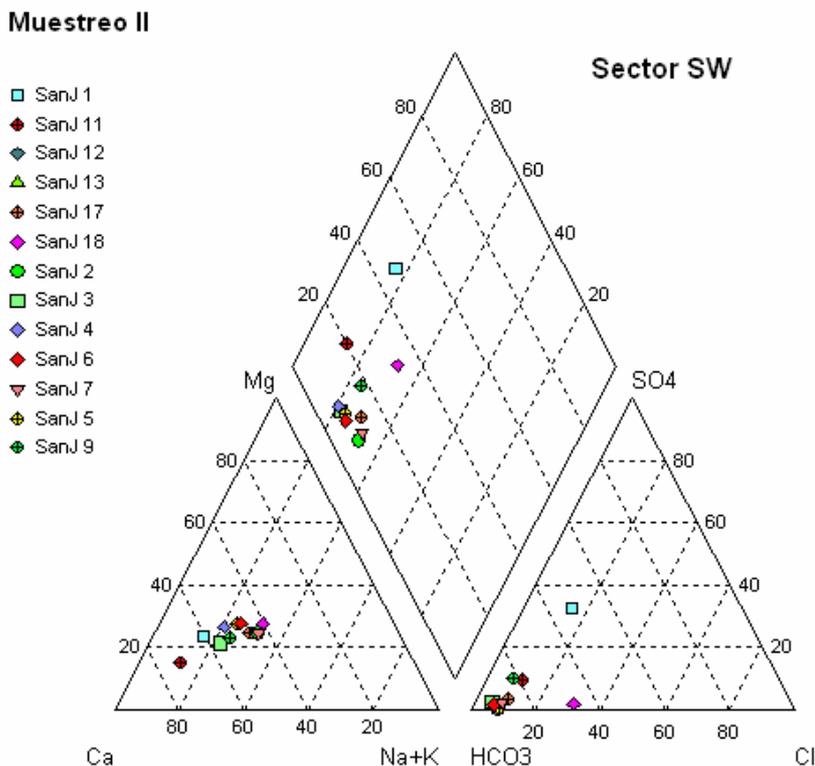


Figura 3.7. Diagrama de Piper de los puntos muestreados en nov-dic. 2006.

En la Figura 3.8, se observa el mapa de isoconductividad del área en el que es evidente la variación de la mineralización en la dirección NE, lo cual resalta en el sector de los pozos seleccionados.

En la Figura 3.9, se observa el mapa de la isoconcentración del ión cloruro, el cual muestra coincidencias, con el muestreo del periodo seco. En el mismo es evidente el efecto de dilución de la época, aunque en realidad la variación no parece ser significativa.

El análisis de los datos indica que muy probablemente existen puntos en los que el agua está contaminada, siendo el origen de esta contaminación antropogénico, sobretudo en el caso de la muestra SanJ18, la que se encuentra muy próxima al vertedero de residuos sólidos urbanos de la ciudad de Las Tablas.

A partir de estos resultados es evidente que la variación espacial en el contenido de los cloruros es coincidente con los máximos de conductividad. La zona de recarga muestra valores del orden de 15 mg/L en tanto que en la zona de la dirección de flujo 70 mg/L.

Tabla 3.7. Parámetros químicos obtenidos en nov-dic. 2006.

Muestra	Cloruro mg Cl ⁻ / L	Bicarbonatos mg HCO ₃ ⁻ / L	Sulfato mg SO ₄ ⁻² / L	Nitrato mg NO ₃ ⁻ /L	Sodio mg/L	Potasio mg/L	Calcio mg/L	Magnesio mg/L	Observación
SanJ1	24.5	148.86	73.60	1.50	16.70	2.59	59.89	14.02	2
SanJ2	9.6	184.24	0.62	1.50	24.60	0.45	29.42	10.15	1
SanJ3	9.6	284.89	6.30	1.50	24.60	0.97	56.39	12.84	1
SanJ4	10.4	214.13	0.62	1.50	17.90	0.95	41.42	12.65	1
SanJ5	9.6	178.75	0.62	1.50	17.10	0.57	30.52	10.62	1
SanJ6	7.1	178.75	2.40	1.50	17.40	0.48	29.12	10.38	1
SanJ7	12.1	214.13	4.17	1.50	26.50	1.47	32.14	11.06	1
SanJ9	14.5	251.97	24.10	1.50	26.20	2.05	52.45	13.87	1
SanJ11	31.4	390.42	38.00	1.50	22.25	0.94	110.56	13.92	2
SanJ15	31.3	249.51	9.10	1.50	24.58	1.15	69.46	12.63	2
SanJ17	14.5	214.13	6.70	1.50	27.20	1.59	38.42	12.40	1
SanJ18	91.5	342.84	7.90	11.10	64.10	2.96	71.79	29.64	2
SanJ21	38.6	214.13	24.85	1.50	26.30	2.18	47.63	18.36	2
SanJ23	28.9	407.50	96.60	1.50	43.00	0.87	122.39	14.07	2
SanJ24	24.1	337.35	54.10	1.50	61.20	1.87	63.76	14.60	2
1= Aguas superficiales 2 = Aguas subterráneas									

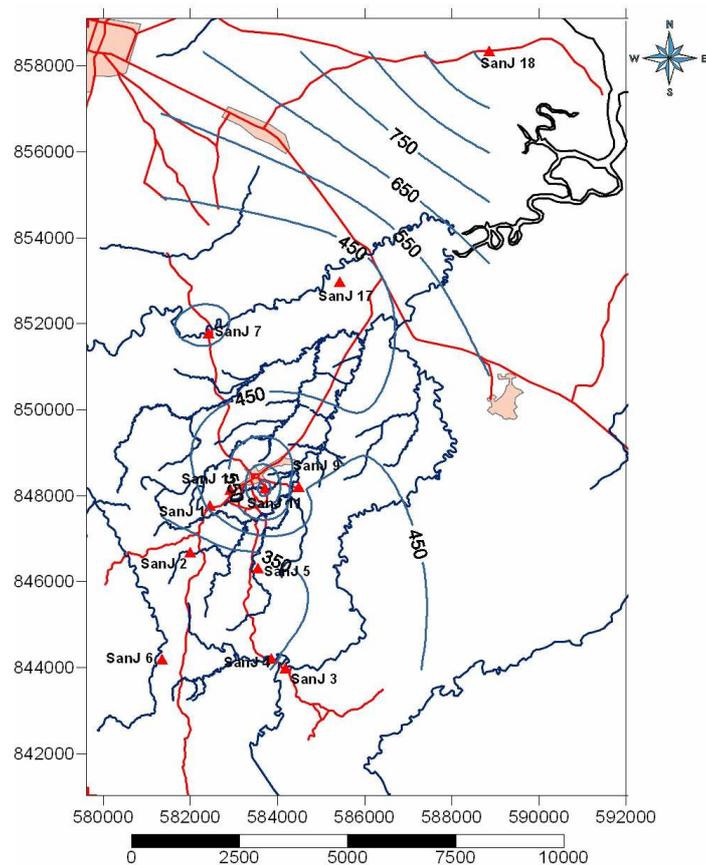


Figura 3.8. Distribución de la conductividad en la estación lluviosa.

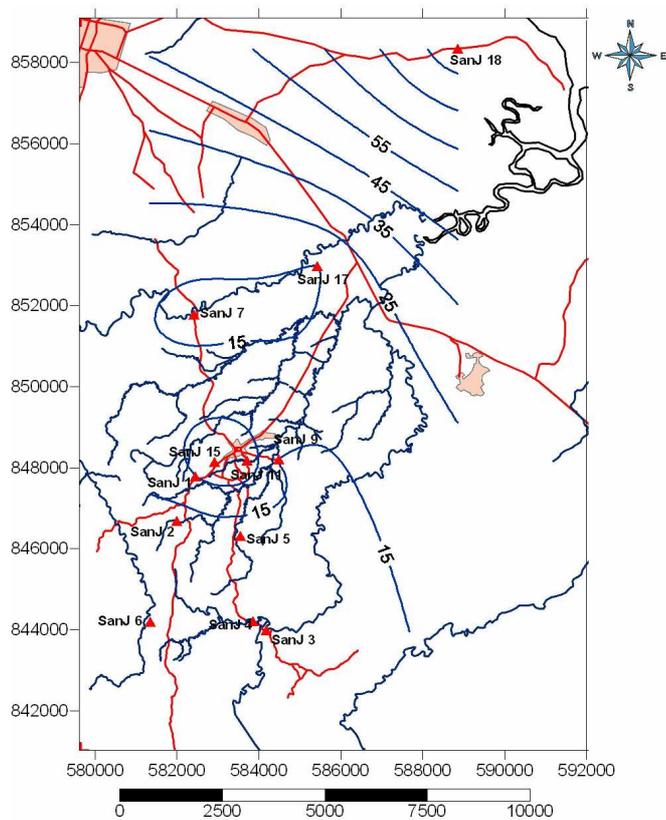


Figura 3.9. Distribución del ión cloruro en la estación lluviosa.

A partir de los resultados obtenidos, se infiere que la composición química del sistema de aguas subterráneas, se ha alcanzado mediante un proceso en el cual han intervenido factores de tipo, geológico, hidrogeológico, geomorfológico, climático, fisicoquímicos y antrópicos. Su composición química es el resultado de interacciones a través de la trayectoria, medianamente prolongada de los flujos y el medio geológico. En su interacción con este último, el agua actúa en procesos de disolución de gases y minerales, precipitación, hidrólisis, hidratación, reacciones de oxido-reducción, mezcla de aguas, intercambio iónico y otros.

Los diagramas hidroquímicos presentados ilustran de manera clara el enriquecimiento en calcio de las aguas correspondientes a los flujos intermedios, de tipo bicarbonatadas sulfatadas cálcicas (posiblemente debido a la oxidación de la pirita presente en la roca caliza o en el sedimento lutítico). Las aguas subterráneas se clasifican, según el diagrama de Piper, como bicarbonatadas cálcicas existiendo una gran cantidad de bicarbonatadas sulfatadas - cálcicas magnésicas.

3.5. Evaluación hidrogeológica

3.5.1. Transmisividad hidráulica

La determinación de las propiedades hidráulicas de un acuífero, es crítica en la comprensión y el desarrollo de modelos de flujo de agua subterránea de una región en particular. Es por ello que, en el estudio de un acuífero, son varias las pruebas hidráulicas que se pueden elaborar; entre las que se tienen la medición del caudal ($m^3/día$), del nivel freático (m) (por ende de los niveles estático y dinámico) y el tiempo de descarga; con los que se pueden determinar los coeficientes o características dinámicas del mismo. Entre las características a determinar está la conductividad hidráulica (K) en m/día, la transmisividad hidráulica (T) en $m^2/día$ y el coeficiente de almacenamiento (S) el cual es adimensional (Martínez et al., 2006).

En esta investigación se determina la transmisividad hidráulica, mediante el método de recuperación de Theis (Theis, 1935; Custodio & Llamas, 2001). Para ello, se aprovecho la información disponible de las pruebas de bombeo que pueden ser analizadas, basándonos en las limitaciones del método.

El principio básico del método supone que si el pozo ha estado bombeando durante un cierto tiempo τ , a un caudal permanente Q y se suspende la extracción, esto equivale a continuar el bombeo con un pozo similar en el mismo sitio, recargando el mismo caudal Q .

La suspensión del bombeo equivaldría a superponer el efecto de un pozo de caudal $-Q$, situado en el mismo lugar, sin parar el bombeo de caudal $+Q$. Ambos pozos, se diferencian en el tiempo de inicio del bombeo (Custodio & Llamas, 2001).

Debido a esto los descensos a una distancia r del pozo referido al nivel del agua antes de iniciarse el bombeo, transcurrido un tiempo t desde la suspensión valen:

$$s' = Q \cdot Z(r, \tau + t) - Q \cdot Z(r, t) \quad (2.1)$$

que es válida para un acuífero cautivo o semiconfinado.

En un acuífero libre, los descensos importantes respecto al espesor saturado, se representan de la manera siguiente:

$$H_0^2 - H^2 = Q \cdot Z'(r, \tau + t) - Q \cdot Z'(r, t) \quad (2.2)$$

s' es el descenso residual y está referido al nivel de agua en el acuífero, anterior al inicio del bombeo.

En el acuífero cautivo se tiene que:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} [W(u_{t+\tau}) - W(u_t)] \quad (2.3)$$

en donde $u_{t+\tau} = \frac{r^2 S}{4T(t+\tau)}$ y $u_t = \frac{r^2 S}{4Tt}$ considerando la aproximación

logarítmica de Jacob (Martínez et al. 2006; Sarmani & Pasandi, 2003); en el caso de la función W , se obtiene:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} \left(\text{Ln} \frac{2.25 \cdot T(t+\tau)}{r^2 S} - \text{Ln} \frac{2.25 \cdot T t}{r^2 S} \right) \quad (2.4)$$

aplicando las propiedades logarítmicas se obtiene:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} \text{Ln} \frac{t+\tau}{t} \quad (2.4a)$$

esta relación es conocida como la ecuación de recuperación de Theis, donde Q es el caudal en m³/día, T es la transmisividad en m²/día, τ es el tiempo total del bombeo en segundos, t el tiempo de recuperación y s' es conocida como el descenso residual en metros.

La interpretación de los ensayos de recuperación se realiza graficando el descenso residual contra la relación $\frac{t+\tau}{t}$ en un gráfico semilogarítmico, la pendiente m de este gráfico es el coeficiente en la ecuación M.4.a, con lo cual se puede estimar la transmisividad. Si se considera la relación entre los logaritmos base 10 y los naturales la ecuación final sería (Willman et al., 2007):

$$T = 0.183 \frac{Q}{m} \quad (2.4b)$$

Los pozos analizados se localizan en el sector NE del área de estudio, lo que corresponde a la zona de Las Tablas y Santo Domingo, la denominación y la localización de los puntos de análisis se presenta en la Tabla 3.8.

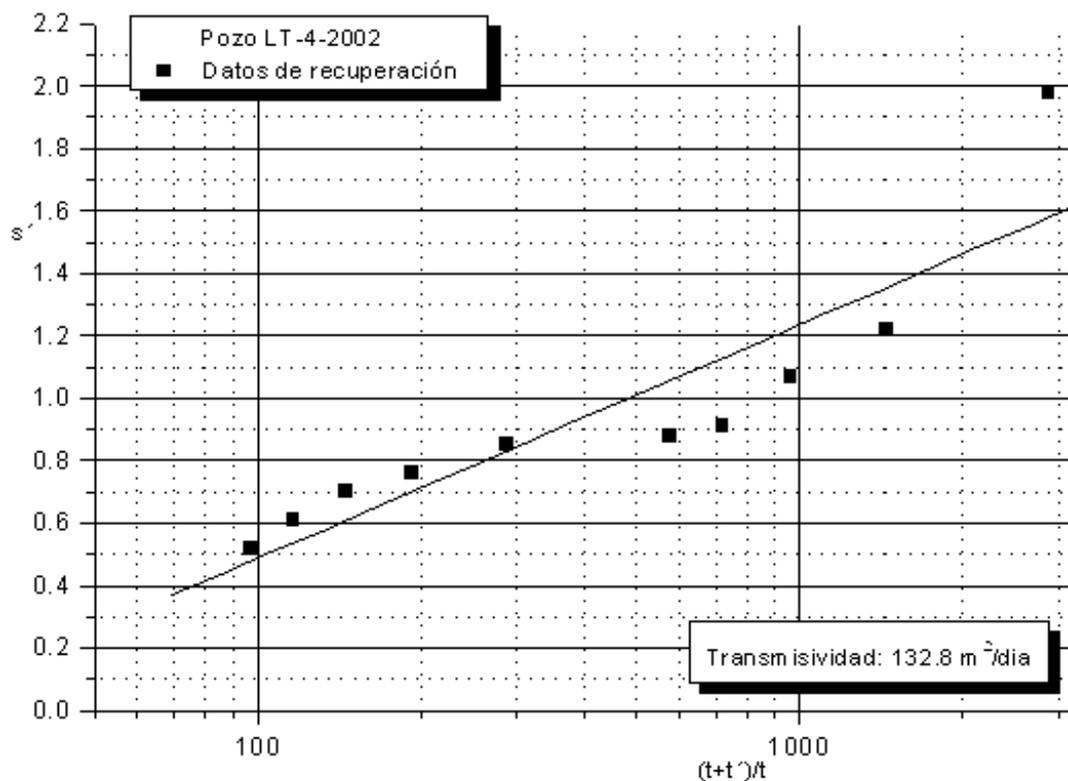
Tabla 3.8. Resumen de las pruebas de recuperación.

Denominación	Localidad	x	y	Transmisividad (m ² /día)
LT-5-2002	Llano Afuera	580100	855800	171.7
LT-4-2002	Santa Rita	583063	858425	132.8
LT-4-2000	Barriada Ana	580285	859250	20.2
LT-3-2002	Santo Domingo	577400	858000	122.4
LT-2-2002	Santo Domingo	583088	857850	228.3
LT-1-2001	Santo Domingo	583812	856787	53.8
LT-2-2000 A	Las Cocobolas	583200	860000	43.1
LT-2-2000	El Cocal	580100	856100	55.1
LT-2-1992	El Cocal	580000	856000	118.9
LT-1-92	El Cocal	580150	856150	30.4
LT-1-2000	El Cocal	579450	856400	71.1
LT-1-1991	El Cocal	579176	854259	15.1
LT-1-86	El Cocal	580092	856070	11.3
LT-1-88	Las Tablas	579128	857808	28.7
LT-1-2002A	Las Tablas	580161	859569	53
LT-1-2002	La Tiza	578776	858014	208.1
LT-1-2000B	Barriada San Antonio	579435	856775	11.6
LT-1-2000A	Las Palmitas	577850	858500	52.2
LT-1-02	Las Palmitas	577513	858188	193.5

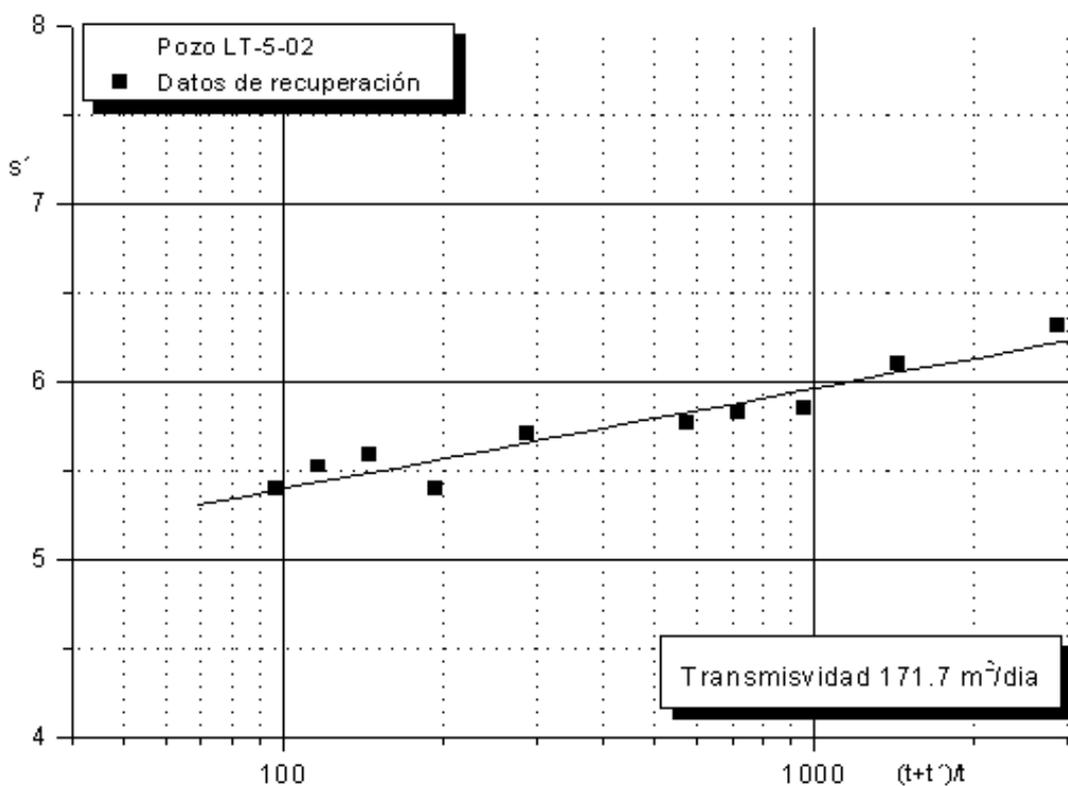
Estas pruebas se pueden analizar conceptualmente considerando que la razón de bombeo es constante a lo largo del periodo de medición. Por otro lado, al término del bombeo, los pozos son desconectados y el acuífero retorna a su nivel original. En las Figuras 3.9 y 3.10 se muestran dos ejemplos de los gráficos de las pruebas de recuperación analizadas en esta investigación; el ajuste lineal se obtiene mediante mínimos cuadrados, tomando en consideración que la línea de ajuste debe pasar por el $s' = 0$ y $\log \frac{t + \tau}{t}$, igual a uno (Custodio & Llamas, 2001).

En la Figura 3.11, se observa la distribución de la transmisividad hidráulica del sector NE del área de estudio. Obsérvese la similitud con el mapa de isocloruros correspondiente al área. En este sentido el resultado indica que el flujo es hacia el sector NW, hacia la zona de drenaje de la Quebrada La Ermita. Otro gradiente se observa en dirección NW, hacia la Quebrada Las Cocobolas.

Estos gradientes se originan porque en la zona central de ambos se observa el dique constituido por el Cerro Paseo Tablado.



Figuras 3.9. Prueba de recuperación del pozo LT-4-2002.



Figuras 3.10. Prueba de recuperación del pozo LT-5-2002.

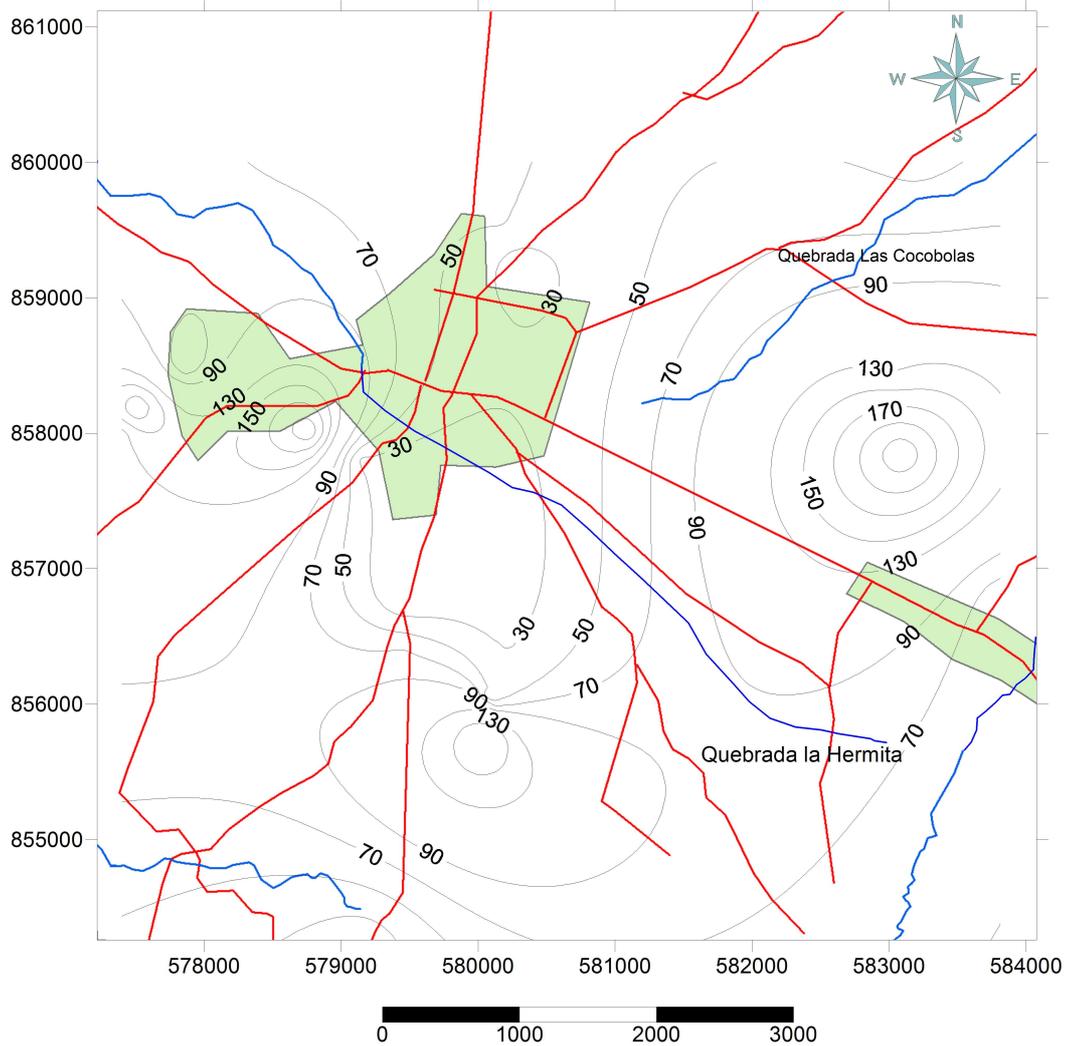


Figura 3.11. Distribución de la transmisividad hidráulica en el sector NE.

A partir de estos resultados se puede establecer que en la zona en la cual la roca es más compacta, la transmisividad es menor que en las zonas de sedimentos no consolidados y en las zonas de fractura. En aquellos casos en los que la granulometría entre los estratos es similar, la transmisividad es mayor en la zona de roca no consolidada.

En el procesado de los datos se pudo establecer que la estimación de la transmisividad hidráulica en zonas de fracturas y áreas no consolidadas, es más adecuada al propósito de esta investigación ya que en muchos casos es difícil determinar el espesor del acuífero en estudio.

3.6. Aplicación de los isótopos estables

En el presente estudio, se han utilizado los isótopos estables del oxígeno (^{18}O) y del hidrógeno (^2H), que como formadores de la molécula del agua, los hace ideales como trazadores para el estudio del comportamiento del agua en el ciclo hidrológico.

La hidrología isotópica suministra información sobre el tipo, origen y edad de las aguas. Si el contenido isotópico no cambia dentro del acuífero esto reflejaría el origen del agua; si el contenido cambia a lo largo del trayecto del agua, este reflejaría la historia del agua (Vallejos et al., 1997).

Uno de los principios básicos en hidrología es que la composición isotópica del agua subterránea es un reflejo de la composición isotópica de la precipitación en la zona de recarga. La composición isotópica de las precipitaciones es controlada por las condiciones en que se forman las masas de vapor en el océano y por los procesos que afectan estas masas a lo largo de su trayectoria, partiendo desde el océano hasta el área de precipitación. En este sentido, el análisis isotópico, se basa en la tendencia de ciertos pares de isótopos estables a ser fraccionados en una fracción liviana y otra pesada; a este proceso se le conoce como *fraccionamiento isotópico*. Este fraccionamiento ocurre durante ciertos procesos geológicos, tal como la evaporación o el calentamiento (Gat, J.R., 1981; Payne, B.R., 1983)

Debido a la diferencia de masa entre las moléculas de agua, asociadas a la presencia de los isótopos más pesados (^{18}O y ^2H), durante el proceso de evaporación, las moléculas de agua más livianas tienden a evaporarse preferencialmente; creando una masa de aire empobrecida en los isótopos más pesados en comparación con el océano. Durante la condensación, las moléculas de agua más pesadas, tienden a precipitar en una proporción mayor que las más livianas. De aquí que, las masas de aire se van empobreciendo en isótopos pesados, a medida que se desplazan en el continente. Esto explica el hecho de que las lluvias en las zonas costeras tengan una composición isotópica más enriquecida en isótopos pesados que las lluvias en zonas interiores (Aravena, 2001).

Debido a que los isótopos estables que se emplean en estudios hidrológicos son fraccionables y en cada caso, los mismos son de masas diferentes, existiendo uno de abundancia relativa mayor es posible definir la razón del isótopo más pesado al más ligero (δ) como:

$$\delta = \frac{R_{muestra} - R_{estandar}}{R_{estandar}} \times 100 \quad (2.5)$$

donde $R_{muestra}$ y $R_{estandar}$ son las razones isotópicas ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) de la muestra y del estándar, respectivamente.

Los resultados obtenidos se expresan como una desviación en partes por millar ‰. Si el valor de δ es positivo, entonces la muestra analizada está enriquecida con el isótopo más pesado en relación con el estándar; una muestra con valores negativos es isotópicamente liviana. La unidad que se usa para reportar el análisis isotópico es el delta por mil (δ) que tiene la siguiente expresión:

$$\delta \text{ ‰} = \left(\frac{R_m}{R_{st}} - 1 \right) \times 1000 \quad (2.6)$$

Si una muestra tiene un valor de δ de -10 ‰ , eso significa que la muestra es empobrecida en 10 por mil en el isótopo más pesado con respecto al estándar. Si la muestra es $+10 \text{ ‰}$, significa que la muestra es enriquecida en 10 por mil en el isótopo más pesado con respecto al estándar.

En la práctica se utilizan dos isótopos estables del Hidrógeno, el ^1H y el ^2H (deuterio), igualmente se utilizan tres isótopos estables del Oxígeno, tal como ^{16}O , ^{17}O y el ^{18}O . De manera que se pueden emplear nueve combinaciones de estos isótopos que producen moléculas estables de agua, cuyas masas oscilan entre 18 y 22 gramos (Payne, B.R., 1983).

3.6.1 Los isótopos en las aguas subterráneas

Es importante recalcar que la composición isotópica del agua subterránea es un reflejo de la composición isotópica de las precipitaciones en la zona de recarga. Por otro lado, la composición isotópica del agua subterránea es

conservativa, o sea no cambia durante el flujo del agua en el acuífero, lo cual es una ventaja para la interpretación de los datos.

Mediante la técnica de la espectrometría de masas, es posible determinar la relación de isótopos en una muestra de agua, siendo las más comunes las del oxígeno ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) y del hidrógeno ($^2\text{H}/^1\text{H}$).

Las razones isotópicas obtenidas de las aguas ambientales, pueden ser comparadas con la razón isotópica del VSMOW (Viena Standard Mean Ocean Water). La comparación se hace a través del parámetro δ , que en este caso se define de esta forma:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = \left[\frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{muestra}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{VSMOW}}} - 1 \right] \times 10^3 \quad (2.7a)$$

$$\delta^2\text{H}(\text{‰}) = \left[\frac{\left(\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}} \right)_{\text{muestra}}}{\left(\frac{^2\text{H}}{^1\text{H}} \right)_{\text{VSMOW}}} - 1 \right] \times 10^3 \quad (2.7b)$$

De manera que si se grafica $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$, para las aguas encontradas a nivel continental, se puede obtener una relación lineal experimental dada por (Martínez et al., 2006):

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10 \quad (2.8)$$

Esta ecuación es conocida como la "Línea Meteórica Mundial", de manera que las muestras de precipitación continental tienden a agruparse alrededor de esta línea. Las precipitaciones ocurridas durante periodos de bajas temperaturas o en latitudes altas, tienden a tener valores bajo de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ (Payne, B.R., 1983).

Estrictamente, en los estudios isotópicos se debería definir la línea meteórica local del área de estudio, pero en general, dada la información isotópica de precipitación, para la interpretación de los datos isotópicos del sector estudiado, se usara la línea meteórica mundial y el ajuste obtenido por las concentraciones isotópicas en la antigua base militar norteamericana de Howard (República de Panamá, 653974, 985315), cuya base de datos fue obtenida

durante más de 30 años, entre 1968 y 1997 (IAEA, 2001). Para establecer la Recta Meteórica Local, con estos datos se ajustó un modelo lineal; que por resultado la ecuación:

$$\delta^2\text{H} = 5.489 + 7.398 \delta^{18}\text{O} \quad (2.9)$$

El resultado de este ajuste se puede apreciar en la gráfica de la Figura 3.12.

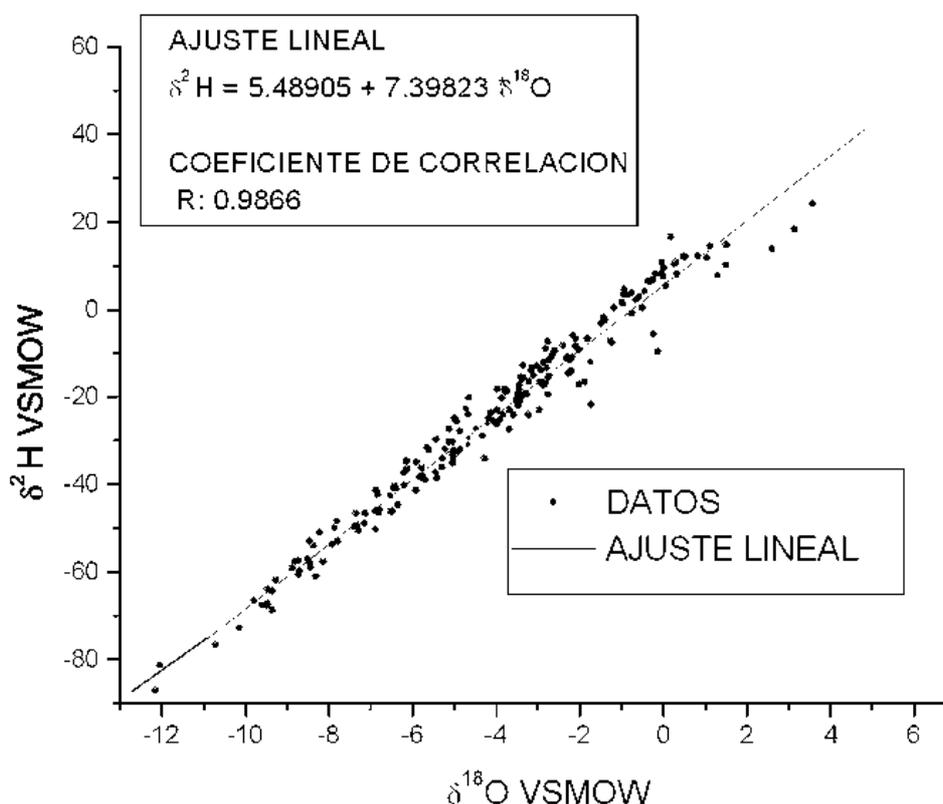


Figura 3.12. Línea meteórica regional $\delta^2\text{H} = 7.398 \delta^{18}\text{O} + 5.489$.

3.6.2. Análisis isotópico las aguas del sector de San José y alrededores

Dado el hecho de que al inicio de este estudio, los pozos del sector de Las Tablas se inhabilitaron en razón de la puesta en marcha del nuevo acueducto y debido a la complejidad geológica del mismo, la caracterización isotópica se enfatizó en el sector de San José y áreas circunvecinas. En las Tablas 3.9 y 3.10, se presenta el contenido isotópico de las aguas muestreadas, estas fueron colectadas en dos periodos, el seco y el lluvioso. Estas muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Isótopos de Lageo en El Salvador y en la Unitat de Medi Ambient del Serveis Científicotècnics de la Universidad de Barcelona.

Siendo que los valores se reportan con un error experimental máximo de 0.1 ‰ para oxígeno-18 y de 1.0 ‰ para deuterio.

Tabla 3.9. Resultados del análisis isotópico del primer muestreo del sector.

Análisis Isotópico de las aguas del Sector					Fecha de Muestreo: abril 2006
Código	Latitud	Longitud	$\delta^{18}\text{O}$	δD	Observación
			‰	‰	Tipo de agua
SanJ 1	582453	847745	-6.7	-46	1
SanJ 2	581994	846659	-45.98	-43.4	2
SanJ 3	584184	843955	-43.415	-34.8	2
SanJ 4	583852	844173	-34.79	-34.8	2
SanJ 5	583549	846279	-34.83	-39.8	2
SanJ 6	581344	844169	-39.79	-43.1	2
SanJ 7	582416	851755	-43.115	-32.2	2
SanJ 8	585450	846218	-32.17	-35.9	2
SanJ 9	584480	848176	-35.885	-30.8	2
SanJ 11	583376	848092	-30.78	-47.6	1
SanJ 12	583376	848092	-47.635	-47.4	1
SanJ 13	583139	848418	-47.385	-48.3	1
SanJ 14	583081	847768	-48.32	-50.1	1
SanJ 15	582908	848116	-50.055	-48.4	1
SanJ 17	585431	852939	-48.375	-27.6	1

1 aguas superficiales, 2 aguas subterráneas.

Tabla 3.10. Análisis Isotópico del segundo muestreo del sector.

Análisis Isotópico de las aguas del Sector					Fecha de Muestreo:
Código	Latitud	Longitud	$\delta^{18}\text{O}$	δD	nov-dic 2006
			‰	‰	Observación
					Tipo de agua
SanJ 1	582453	847745	-6.6	-44.4	1
SanJ 2	581994	846659	-6.7	-47.1	2
SanJ 3	584184	843955	-6.5	-45.5	2
SanJ 4	583852	844173	-6.4	-43.8	2
SanJ 5	583549	846279	-6.6	-45.2	2
SanJ 6	581344	844169	-6.8	-46.3	2
SanJ 7	582416	851755	-6.5	-45.3	2
SanJ 9	584480	848176	-6.2	-44.1	2
SanJ 11	583376	848092	-6.6	-46.8	2
SanJ 15	582908	848116	-6.6	-46.9	1
SanJ 17	585431	852939	-6.5	-46.1	2
SanJ 18	588848	858311	-6.7	-47.5	1 Uverito
SanJ 19	582280	847730	-7.6	-52.0	1*
SanJ 21	583909	848941	-5.6	-38.8	1*
SanJ 22	583956	849196	-6.6	-45.1	1*
SanJ 23	583440	848337	-6.6	-49.3	1*
SanJ 24	583221	847715	-6.9	-49.2	1

1 aguas superficiales, 2 aguas subterráneas. * Pozos de Observación

Estos resultados se muestran en el gráfico de $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ de la Figura 3.13, en donde se presentan los datos obtenidos en las dos temporadas muestreada seca (abril 2006) y lluviosa (Nov-dic. 2006).

Estos datos indican que la concentración isotópica en las aguas superficiales y subterráneas difiere durante la época seca.

De hecho en las aguas superficiales se observa una tendencia a la evaporación con un consiguiente aumento en la concentración de $\delta^{18}\text{O}$.

Esta diferencia indica que las aguas subterráneas y las de las quebradas o ríos, no interactúan durante la época seca, debido a que el nivel freático desciende en las subterráneas.

Durante el periodo de invierno la concentración isotópica de las aguas tiende a ser igual, lo que es indicativo que las aguas superficiales y subterráneas interactúan.

Se analizó una muestra de agua de lluvia en la población de San José, en la que el contenido isotópico es similar a la subterránea y a la superficial, lo que indica acerca del sistema de recarga en la zona y del poco recorrido de la misma.

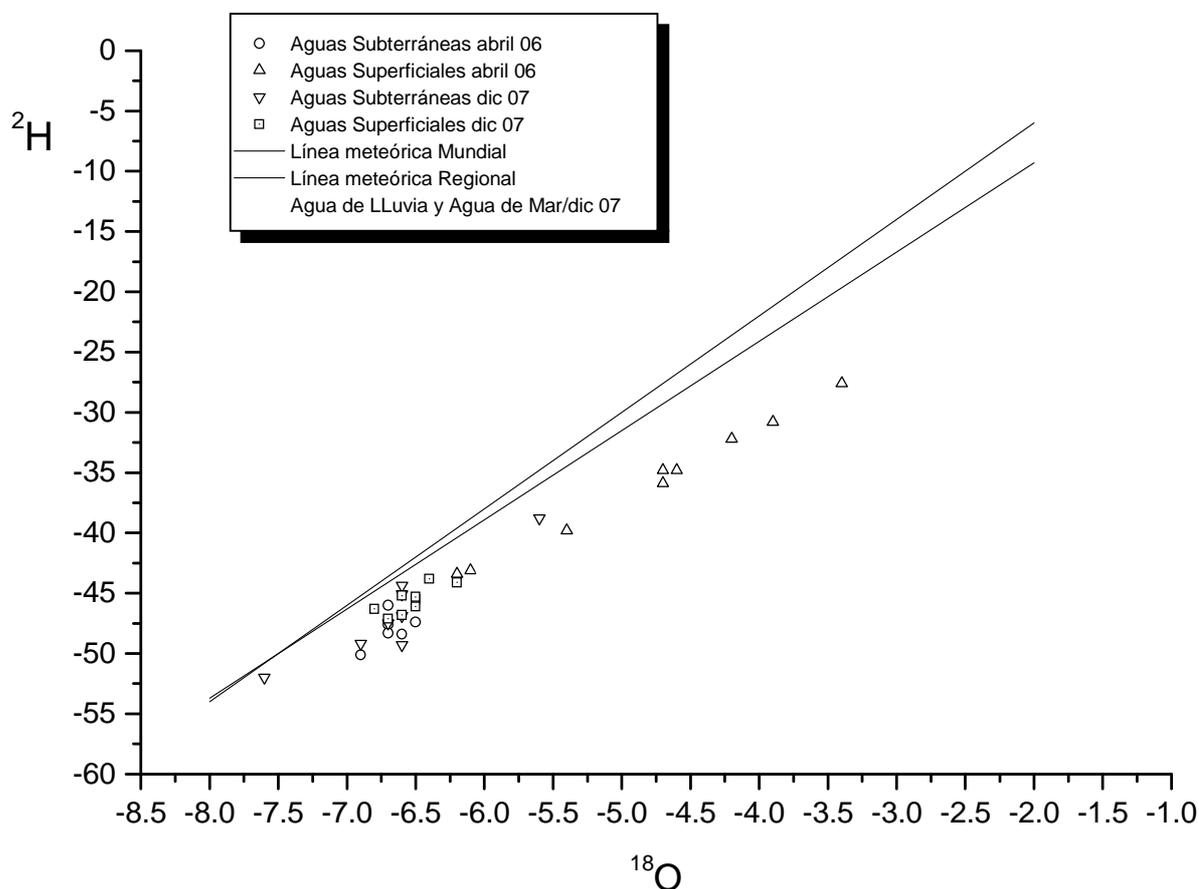


Figura 3.13. Composición isotópica de las aguas.