

*Universidad Nacional de Catamarca
Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas
Departamento de Geología*

*“Estudio, caracterización y relación de las aguas
termales del departamento Belén y Andalgalá,
provincia de Catamarca”*



Seminario

Alumna: Noelia Carrizo

Directora: Mgter. Lic. Fátima E. Vilches

Co-director: Mgter. Geol. Gabriel Lopez Vazques

Año: 2013

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer principalmente a mi familia, a mis padres por haberme dado la mejor herencia que uno puede recibir, la posibilidad de estudiar, para poderme construir un mejor futuro; a mi hermana y mi abuela por el apoyo, por siempre estar, por ser parte de mi, abuela gracias por tus palabras, tus enseñanzas, por estar cuando mas necesite un abrazo. A todos gracias por su amor y comprensión, por confiar siempre en mí, si hoy soy lo que soy es gracias a ustedes. Gracias también a todos mis tíos y primos, por ser parte de cada paso que doy.

A todos los compañeros de la carrera Licenciatura en Geología les agradezco por hacerme parte de sus vidas, por dejarme compartir las horas de estudio, las salidas al campo, las guitarreadas y demás.

Gracias “chiquis”, Romina, Jorgelina, Florencia, Patricia, Érica y Eugenia, porque en ustedes encontré la amistad, el compartir, la solidaridad, la oportunidad de conocer hermosas personas que me han ayudado de una u otra forma en estos años para llegar a lo que hoy logre.

Mil gracias a todos los profesores por compartir sus conocimientos y experiencias conmigo, por demostrarme lo que significa la geología, lo que es ser un buen profesional, por ayudarme a llegar hasta este momento. Un especial agradecimiento al Dr. Luis Navarro Garcia, profesor de primer año y hoy mi jefe en el SEGEMAR, gracias por sus conocimientos, por sus enseñanzas, por no negarme nunca los permisos para la realización de este trabajo, por apoyarme en mi formación y por su alegría.

Gracias a los licenciados Martin Varela y Romina Nieto por orientarme y darme sus consejos en la elaboración de este trabajo.

Especialmente quiero agradecer de todo corazón, a la profesora Fátima Vilches con quien eh tenido la posibilidad de compartir mucho más que un cursado, le agradezco porque siempre se preocupo por mí, por aconsejarme como profesional y hasta incluso como una amiga. Es usted junto con su marido el profesor Luis Palomeque, grandes personas, en quienes puedo confiar, quienes siempre me dieron su cariño.

Un especial agradecimiento a los Geólogos Gabriel López Vázquez y Raúl Ceresole, de la empresa Minera Alumbrera, quienes fueron parte fundamental para la elaboración de este trabajo. Gracias por su ayuda, por sus enseñanzas, por darme esta oportunidad.

Y no por ser el último, es el menos importante, ya que con el he vivido los años mas lindos desde mi comienzo en la universidad, te agradezco por ser mi compañero, mi amigo, mi novio, mi todo. Gracias por tu paciencia, tu comprensión, tu respeto, tus alegrías y tu enorme corazón e incluso por tu gran aporte en la elaboración de este trabajo. Mil gracias Gonzalo.

“Gracias a Dios y a la Virgen del Valle porque me ayudaron a no bajar los brazos, a sentirme fuerte en cada instante de mi vida, me dieron las ganas de estudiar, la capacidad de entender, la tranquilidad en un examen”.

A todos ustedes, simplemente, gracias.

RESUMEN

El presente trabajo de seminario se realizó para cumplimentar con el plan de estudio de la carrera Licenciatura en Geología cursada en la Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas de la Universidad Nacional de Catamarca.

La potencialidad de las aguas termales de la Provincia de Catamarca como recurso geotérmico y/o turístico (baños termales) y la falta de estudios de caracterización de algunas de ellas, ha llevado al análisis de las fuentes termales de Villa Vil, Los Nacimientos, Los Baños Grandes de Villa Vil y La Quebrada del departamento Belén y las de Vis Vis y Aguas de Dionisio en el departamento Andalgalá ubicadas en la Provincia geológica de Sierras Pampeanas; a efectos de relacionarlas y redefinir su potencialidad.

El objetivo comprendió la caracterización, clasificación y origen de las fuentes termales, a partir de relevamientos geológicos, relaciones estructurales, toma de parámetros físico-químicos y muestreos *in situ* para análisis de cationes, aniones e isótopos. Se efectuó el procesamiento de datos hidroquímicos con los diagramas de Piper, Stiff, geotermómetros, relación isótopos-SMOW y Euclidean.

Se efectuaron comparaciones y clasificaciones de datos históricos de principios de siglo XX con los actuales para ver su evolución en el tiempo.

Se concluyó que las aguas termales de estudio son el resultado de la percolación profunda de aguas meteóricas, a través de fracturas y fallas en rocas cristalinas y volcánicas, que absorben calor conductivamente en su trayecto además se encontrarían estructuralmente alineadas con un origen en común. Estas podrían ser aprovechadas como recurso energético de baja entalpia y se clasificaron como: Los Nacimientos y Los Baños Grande de Villa Vil: Aguas bicarbonatadas cloruradas sódica-cálcica; La Quebrada y Villa Vil: Aguas cloruradas sulfatadas sódica-cálcica; Vis Vis y Aguas de Dionisio: Aguas sulfatadas bicarbonatadas sódica-cálcica.

El trabajo fue dividido en seis capítulos: Introducción en la que se mencionan la ubicación geográfica y se realiza el planteo del problema, la hipótesis del trabajo y los objetivos del mismo; Fisiografía comprende la descripción fitogeográfica del área de estudio, Marco Geológico, Aguas Termales en el que se tratan los conceptos generales sobre aguas termales, Resultados, donde se describen las tareas en campo, las metodologías de laboratorio y se muestran todos los resultados obtenidos para llegar a las Conclusiones y Recomendaciones en el último capítulo. En un anexo al trabajo se incorpora la cartografía correspondiente al área de estudio.

INDICE

GENERAL

CAPITULO I- INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. Ubicación del área de estudio	10
1.2. Rutas de acceso	12
1.3. Planteo del problema	13
1.4. Hipótesis	14
1.5. Objetivos.....	14
1.5.1. Objetivo General:	14
1.5.2. Objetivos Específicos:	14
1.6. Metodología	15
1.6.1. Primera etapa, gabinete:.....	15
1.6.2. Segunda etapa, campo-laboratorio:	16
1.6.3. Tercera etapa, gabinete:	17
CAPITULO II-FISIOGRAFIA.....	18
2.1. Ubicación geográfica del departamento Belén	18
2.1.1. Superficie y demografía.....	18
2.1.2. Orografía	18
2.2. Ubicación geográfica del departamento Andalgalá	19
2.2.1. Superficie y demografía.....	19
2.2.2. Orografía	20
2.3. Caracterización climática, biogeográfica y biológica	22
2.3.1. Clima.....	22
2.3.2. Fitogeografía, flora	22
2.3.3. Fauna.....	24
2.4. Hidrología	24
2.4.1. Río Belén.....	25
2.4.2. Río Vis Vis-Amanao.....	26
2.4.3. Aguas de Dionisio	27
CAPITULO III - MARCO GEOLOGICO	29
3.1. Geología regional	29
3.2. Geología local	33
3.3. Geomorfología	36
3.3.1. Sector Sierra de Hualfín.....	36
3.3.2. Sector YMAD-Vis Vis.....	41
CAPITULO IV - AGUAS TERMALES.....	45
4.1. Conceptos generales	45
4.1.1. Características físico-químicas.....	46
4.1.2. Clasificación.....	48
4.1.3. Origen	52
4.1.4. Características hidrogeológicas.....	55
4.1.5. Isotopos.....	58
4.1.6. Geotermómetros	62
4.2. El “termalismo” en Catamarca.....	64
CAPITULO V - RESULTADOS	68
5.1. Identificación y ubicación de las fuentes de estudio	68
5.1.1. Sector Sierra de Hualfín.....	70
5.1.1.1. Fuente Los Nacimientos.....	70
5.1.1.2. Fuente La Quebrada.....	78

5.1.1.3. Fuente Los Baños Grandes de Villa Vil.....	81
5.1.1.4. Fuente de Villa Vil.....	87
5.1.1.6. Sistema de estructuras en el sector Sierra de Hualfín	91
5.1.2. Sector YMAD – Vis Vis	93
5.1.2.1. Fuente Aguas de Dionisio	93
5.1.2.2. Fuente de Vis Vis.....	98
5.1.2.3. Sistema de estructuras en el sector Y.M.A.D. - Vis Vis	106
5.2 Metodología de trabajo	113
5.2.1. Trabajo en campo	113
5.2.2 Trabajo en laboratorio.....	117
5.2.3. Trabajo en gabinete: Procesamiento de la información.....	119
5.2.3.1.1. Sector Sierra de Hualfín	122
5.2.3.1.2. Sector YMAD - Vis Vis	134
5.2.3.2. Procesamiento del análisis de elementos mayoritarios e isótopos obtenidos en campaña.....	139
CAPITULO VI – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	149
6.1. Recomendaciones.....	152
6.2. Conclusiones y recomendaciones geotérmicas	153
REFERENCIAS	154

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Ubicación geográfica del área de estudio.....	11
Figura N° 3. Imagen Google Heart, principales sierras y cerros de la región.....	21
Figura N° 4. Vegetación en Aguas de Dionisio.....	23
Figura N° 5. Vegetación en Vis Vis.....	24
Figura N° 6. Mapa Hidrológico de la cuenca del rio Belén-Pipanaco. Tomado del mapa general de la Provincia de Catamarca (Dirección de Hidrología y Evaluación de los Recursos Hídricos de Catamarca 2009).....	28
Figura N° 7. Mapa geológico general de las Sierras Pampeanas.....	32
Figura N° 8. Comparación de la geología según González Bonorino y Muruaga.....	34
Figura N° 9. Referencias estratigráficas.....	35
Figura N° 11. Conos aluviales coalescentes y glacis, vista al Oeste.....	37
Figura N° 12. Primer nivel de terraza en el rio Villa Vil, camino a los Baños Grandes, vista al Norte.....	38
Figura N°13. Efecto del proceso de abrasión en la Formación Los Baños, Los Nacimientos.....	39
Figura N° 10. Mapa Geomorfológico del sector Sierra de Hualfín. Fuente: ESIN.....	40
Figura N° 14. Terraza del rio Jejenes (falla Buenaventura), vista al Norte.....	41
Figura N° 15. Manto de ceniza en la terraza Oeste del rio Vis Vis.....	42
Figura N° 16. Mapa geomorfológico del sector YMAD-Vis Vis.....	44
Figura N° 17. Esquema de un sistema hidrotermal con vapor, tomado de Custodio (op.cit.).....	47
Figura N° 18. Diagrama de Piper.....	51
Figura N° 19. Representación del diagrama de Stiff.....	51
Figura N° 20. Obtención de una fuente termal desde la infiltración de aguas meteóricas...54	
Figura N° 21. Esquema de la formación de aguas mixtas (Custodio op.cit).....	55
Figura N° 22. Esquema de un sistema hidrotermal.....	57
Figura N° 23. Composición Isotópica de la Precipitación a Nivel Global.....	60
Figura N°24. Efecto de la evaporación en la composición isotópica del agua. Fuente: Aquaconsult.....	61

Figura N° 25. Efecto de la altura en la composición isotópica de la precipitación. Fuente: Aquaconsult.....	62
Figura N° 26. Geotermometría de la sílice.....	63
Figura N° 27. Mapa de manifestaciones termales en la Prov. de Catamarca. Fuente: Catalogo de Manifestaciones Termales de la República Argentina.....	65
Figura N° 28. Imagen Google Heart con la ubicación de los sectores y sus respectivas fuentes termales.....	69
Figura N° 29. A la izquierda el camino a las termas, a la derecha la cuestecilla.....	70
Figura N° 30. Hondonada en el granito formando un baño natural.....	71
Figura N° 31. Pórfido granítico con “fantasmas” de feldespatos.....	72
Figura N° 32. Contacto entre el granito de grano fino (a la derecha) y el pórfido (a la izquierda).....	73
Figura N° 33. Manto de granito de grano fino sobre el pórfido.....	73
Figura N° 34. Cataclasita cortando al granito.....	74
Figura N° 35. En primer plano la Fm. Chango Real (A) y en discordancia la Fm. Hualfín (B) suprayacente a esta última los travertinos (C); al fondo la Fm. Chiquimil (D) y Andalhuala (E). Vista al Este.....	75
Figura N° 36. Mb. El Jarilla, Fm. Chiquimil.....	76
Figura N° 37. Panorámica del sector Sur de la Sierra de Hualfín. Vista al Oeste.....	78
Figura N° 38. Contacto entre la Fm. Las Arcas (A) y los Baños (B).....	80
Figura N° 39. Alternancia de areniscas, limolitas y arcillitas del Mb. Los Baños.....	81
Figura N° 40. Unión de los ríos Las Zanjas (a la derecha de la foto) y Aguas Calientes....	82
Figura N° 41. Bloques de piedras caídas (Fm Las Arcas). Vista al Norte.....	83
Figura N° 42. Vista del sitio de toma de parámetros y muestra.....	84
Figura N° 43. Granito alterado y diaclasado de la Fm. Chango Real.....	85
Figura N° 44. Contacto entre Chango Real y la Formación Hualfín.....	85
Figura N° 45. Niveles conglomerádicos en la Fm. Las Arcas.....	86
Figura N° 46. Paredón de conglomerados. Vista al Oeste.....	87
Figura N° 48. Areniscas estratificadas del miembro el Áspero. Vista al Este.....	90
Figura N° 49. Fanglomerados en la cuestecilla de acceso a las termas de Los Nacimientos.....	91
Figura N° 50. Cascada en Aguas de Dionisio.....	94
Figura N° 51. Punto de surgencia y toma de muestra para análisis.....	95
Figura N° 52. Brechas en Aguas de Dionisio.....	96
Figura N° 53. Borde de caldera en Agua de Dionisio. Se distingue la secuencia piroclástica estratificada. Al fondo la Sierra de Hualfín. Vista al Oeste.....	97
Figura N° 54. Diques camino a Aguas de Dionisio.....	97
Figura N° 55. Precaria construcción de un baño.....	99
Figura N° 56. Formación Suncho, pizarras y filitas en Vis Vis.....	101
Figura N° 57. Pizarras, filitas alteradas y craqueladas, posiblemente a causa de la falla de Atajo.....	101
Figura N° 58. Areniscas de la Fm. Morterito.....	103
Figura N° 59. Brechas polimícticas estratificadas.....	104
Figura N° 60. Contacto entre filita (A) y brecha (B).....	105
Figura N° 61. Terraza al frente de la fuente termal.....	106
Figura N° 63. Falla del Cerro Bola del Atajo. El bloque Oeste expone esquistos del basamento con deformación dúctil; el bloque Este expone basamento metamórfico intensamente brechado y cizallado (Varela, 2006). Vista al Norte.....	111
Figura N° 64. Materiales.....	114
Figura N° 65. Toma de muestras y parámetros.....	117
Figura N° 66. Material de trabajo.....	118

Figura N° 67. Resultados analíticos de 1900 para la fuente de Villa Vil.....	121
Figura N° 67. Diagrama Piper, Los Nacimientos.....	123
Figura N° 69. Diagramas de Stiff.....	124
Figura N° 70. Diagrama Piper, La Quebrada.....	126
Figura N° 71. Diagramas de Stiff.....	127
Figura N° 72. Diagrama Piper, Los Baños Grandes de Villa Vil.....	129
Figura N° 73. Diagramas de Stiff.....	130
Figura N° 74. Diagrama Piper, Villa Vil.....	132
Figura N° 75. Diagramas de Stiff.....	133
Figura N° 76. Diagrama Piper, Aguas de Dionisio.....	135
Figura N° 77. Diagramas de Stiff.....	136
Figura N° 78. Diagrama Piper, Vis Vis.....	138
Figura N° 79. Diagramas de Stiff.....	139
Figura N° 80. Grafico Piper para todas las fuentes de estudio.....	140
Figura N° 81. Diagramas Stiff para todas las fuentes de estudio.....	141
Figura N° 82. Grafico Euclidean.....	142
Figura N° 83. Grafico de geotermómetro.....	143
Figura N° 84. Grafico Euclidean.....	146
Figura N° 85. Grafico relación isotopos-SMOW.....	147

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Generación de calor por isotopos radiactivos (Bullard, 1973)	53
Tabla N° 2. Cuadro estratigráfico para las fuentes termales	112
Tabla N° 3. Resultados de los parámetros medidos para cada fuente termal.....	116
Tabla N° 4. Fuente Los Nacimientos.....	122
Tabla N° 5. Fuente La Quebrada	125
Tabla N° 6. Fuente Los Baños Grandes de Villa Vil.....	128
Tabla N° 7. Fuente de Villa Vil.....	131
Tabla N° 8. Fuente Aguas de Dionisio	134
Tabla N° 9. Fuente Vis Vis	137
Tabla N° 10. Geotermómetros, Baños Grandes de Villa Vil	144
Tabla N° 11. Geotermómetros, Los Nacimientos.....	144
Tabla N° 12. Geotermómetros, Villa Vil	144
Tabla N° 13. Geotermómetro, La Quebrada	145
Tabla N° 14. Geotermómetros, Aguas de Dionisio	145
Tabla N° 15. Geotermómetros, Vis Vis	145
Tabla N° 16. Isotopos, Los Baños Grandes de Villa Vil	147
Tabla N° 17. Isotopos, Los Nacimientos	147
Tabla N° 18. Isotopos, La Quebrada.....	148
Tabla N° 19. Isotopos, Villa Vil.....	148
Tabla N° 20. Isotopos, Aguas de Dionisio	148
Tabla N° 21. Isotopos, Vis Vis	148

CAPITULO I- INTRODUCCIÓN

Los primeros escritos que hacen referencia al origen del agua subterránea hoy en día conocidos por los hidrogeólogos corresponden a los griegos.

Estos escritos abogan por la existencia de una o varias enormes cavernas en el interior de la tierra, que unos supusieron inagotables y que otros imaginaron en permanente estado de recarga.

Estos últimos presumieron la existencia de un "ciclo hidrológico" en el cual el agua del mar, a través de una serie de conductos subterráneos, se introduciría en esas enormes cavernas, las cuales alimentarían el caudal de los manantiales y de los ríos retornando de nuevo al mar. Así, Tales De Mileto (aprox. 650 a. de C.), opinaba en sus escritos, que los manantiales y los ríos eran alimentados por las aguas del océano, las cuales se introducían en las entrañas de la tierra y, bajo la acción de las presiones de las rocas, ascendían hasta la superficie, dando lugar a los manantiales.

Aristóteles (384-322 a. de C.), discípulo de Platón, profundizó más que sus antepasados, con su pensamiento racional, en los procesos por los cuales el agua del mar podría llegar a perder su salinidad y aparecer en los manantiales, lo que le llevó a sospechar que el agua de los manantiales no debía proceder probablemente del mar sino de una emanación permanente en forma de vapor procedente del interior de la tierra que al ascender a los niveles superiores se condensaría y, a través de una intrincada red de poros y conductos, alcanzaría la superficie del suelo dando lugar a los manantiales.

Fue la cultura romana -los primeros hidráulicos- la que valoro el agua como hacedor de la “vida”, como lo atestiguan las numerosas obras de captación, conducción y abastecimiento que construyeron, fruto de una depurada técnica.

Ellos llegaron a la primera concepción correcta acerca del ciclo hidrológico y del origen de todas las aguas subterráneas en general.

Descartes en sus *"Principios de la Filosofía"*, escrito en 1644, decía "... Hay grandes cavidades llenas de agua por debajo de las montañas, donde el calor producido por la luz del sol eleva continuamente vapores, los cuales, no siendo otra cosa que diminutas partículas de agua separadas unas de otras y fuertemente agitadas, escapan a través de los poros de la tierra y llegan hasta las más altas llanuras y montañas, se reagrupan en el interior de las fisuras que existen en la proximidad de su superficie, las rellenan y, cuando son recortadas por el terreno, originan los manantiales, los cuales discurren valle abajo, se reagrupan, forman los ríos y llegan hasta el mar...". Recién con el progreso en el

desarrollo de la ciencias geológicas (siglo XVII), comenzó a surgir la Hidrogeología; la cual podemos definir como «*La hidrogeología es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación*» (Mijailov, 1985). En síntesis, es el estudio de todos los fenómenos involucrados en el ciclo hidrológico.

Actualmente los estudios hidrogeológicos son de especial interés no solo para la provisión de agua a las poblaciones y otros usos productivos; sino también para entender la historia geológica.

El abordaje de estas cuestiones abarcan: la evaluación de las condiciones climáticas de una región, su régimen pluviométrico, la composición química del agua, las características de las rocas como permeabilidad, porosidad, fisuración, su composición química, los rasgos geológicos y geotectónicos, es así que la investigación hidrogeológica implica, entre otras, tres temáticas principales:

- Las relaciones entre la geología y las aguas subterráneas.
- Los procesos que rigen los movimientos de las aguas subterráneas en el interior de las rocas y de los sedimentos
- La química de las aguas subterráneas (hidroquímica e hidrogeoquímica).

Dentro de la hidrogeología, podemos hablar también de las manifestaciones termales. Estas han sido conocidas ya desde tiempos prehistóricos y en nuestro territorio de tiempos prehispánicos; principalmente por sus fines terapéuticos y recreativos.

Muy al contrario, el estudio de su origen y naturaleza ha sido objeto de las más controvertidas opiniones hasta finales del siglo pasado, al suponersele a las aguas termales un origen volcánico y hasta casi milagroso.

Se considera agua termal cuando la temperatura del agua subterránea es igual o superior a la temperatura media anual de la localidad. Cuando poseen concentraciones anormalmente elevadas en algunas de las sustancias químicas disueltas o el residuo seco es muy elevado se habla de agua mineral; si a esto se le suma una alta temperatura entonces se habla de aguas termominerales. Estos dos aspectos, temperatura y composición química, permiten clasificar y distinguir los distintos tipos de aguas termales en una región.

El aumento de temperatura puede provenir de diferentes fuentes de menor o mayor influencia, por ejemplo: el gradiente geotérmico, las reacciones fisicoquímicas asociadas a

la formación de rocas cristalinas, la desintegración radiactiva, esfuerzos mecánicos asociados al movimiento de las placas continentales, etc.

El conjunto de materiales fluidos en movimiento, fracturas, focos calientes, etc. que intervienen en un área geotérmica forman un sistema geotérmico; en el cual puede dominar la fase líquida (manantiales termales) o la fase vapor (fumarolas, geiser, etc.). Las áreas geotérmicas se localizan en zonas de la corteza terrestre con fracturas y actividad volcánica recientes, en zonas de subducción relacionada con la tectónica de placas.

La necesidad mundial por nuevas fuentes de energía naturales y no contaminantes ha provocado el creciente interés en la explotación y en el desarrollo de los recursos geotérmicos, tanto en el ámbito internacional como en nuestro país conllevado a la realización de estudios de investigación en los sectores andino y extra andino de la República Argentina; permitiendo reconocer numerosas áreas con manifestaciones termales y algunos campos geotérmicos importantes.

Las características geológicas que presenta nuestra provincia, propone grandes posibilidades para la investigación y eventual aprovechamiento del calor contenido en el interior de la tierra, aun habiéndose dado prioridad a través de numerosas leyes Nacionales y Provinciales al estudio y aprovechamiento de las energías de baja entalpía, poco se ha avanzado en este campo.

1.1. Ubicación del área de estudio

Los sitios termales de interés para este trabajo de seminario se ubican dentro de los departamentos Belén y Andalgalá en la Provincia de Catamarca (Argentina).

El área está comprendida entre los paralelos 27°05' y 27° 23' latitud Sur y los meridianos 66° 51' y 66° 32' longitud Oeste; comprendiendo la Provincia geológica de Sierras Pampeanas (Figura N° 1).

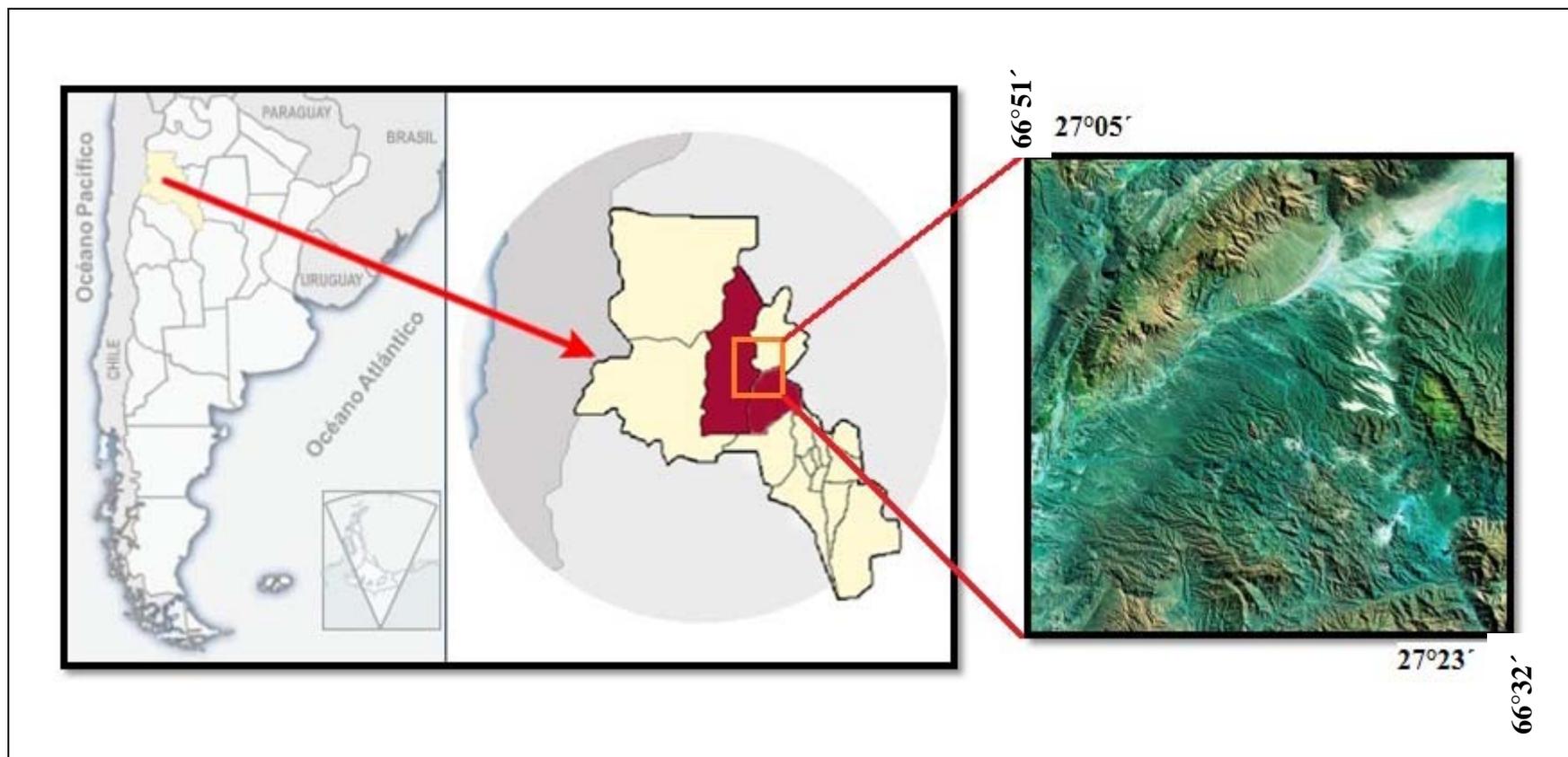


Figura N° 1. Ubicación geográfica del área de estudio

1.2. Rutas de acceso

Para llegar a la ciudad de Belén, se parte desde la ciudad de San Fernando del Valle de Catamarca, por Ruta Nacional (R.N.) N° 38, atravesando el departamento Capayán hasta empalmar con la ruta nacional N° 60 pasando por varias localidades, tales como: Miraflores, Capayán, Huillapima, Chumbicha, etc. Luego de atravesar la Quebrada de la Cébila, se entra en territorio de la provincia de La Rioja pasando por Aimogasta y ya en territorio catamarqueño -en Cerro Negro- se empalma con la R.N. N° 40, la que da acceso al departamento Belén.

Esta ruta lo atraviesa en dirección N-S y de ella se desprenden todas las rutas provinciales (R.P.) del departamento.

Desde la ciudad de Belén y por la R.P. N° 46 se llega en dirección al Este al empalme con la R.P. N° 217 hacia las termas de Vis Vis y continuando, a la ciudad de Andalgalá. Otra alternativa para llegar a este paraje es tomar desde la salida de la Quebrada de La Cébila, la R.P. N° 46 que lleva a Pomán y seguir hasta la ciudad de Andalgalá para luego tomar la ruta 217 hasta las termas.

Existen otras rutas de corto recorrido, que nacen de la ruta N° 40 en Belén y comunican con los pueblos del llamado “Norte Grande de Belén”; algunas de estas para la zona de estudio son: la R.P.N° 35 a Farallón Negro y Minera Alumbreira y la R.P. N° 236 a Villa Vil (Figura N° 2).

características estructurales de las áreas de dichas fuentes a efectos de relacionarlas y redefinir su potencialidad para contribuir al eventual aprovechamiento de las aguas termales como recurso geotérmico y/o turístico (baños termales).

1.4. Hipótesis

El estudio de estas aguas termales, permitirán ver la importancia que tiene la fracturación de las rocas, afectadas por movimientos tectónicos recientes que permiten el ascenso rápido de las aguas profundas, y su relación con fenómenos de infiltración y de origen endógeno, que producen mezclas de aguas superficiales con aguas hipertermales profundas.

Dentro del ciclo hidrológico, las aguas termales se ubican en un lugar muy particular, en las capas profundas del subsuelo, con características físicas y químicas que nos indican el origen y su temperatura; las que serán estudiadas mediante la aplicación de diversos métodos de análisis hidrogeológicos e hidrogeoquímicos

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General:

- ✓ Estudiar y caracterizar las fuentes termales de la zona Oeste de la Provincia de Catamarca, a partir de relevamientos geológicos, relaciones estructurales, análisis hidrogeológicos e hidrogeoquímicos, para identificar su origen y las relaciones que hubiesen entre sí.

1.5.2. Objetivos Específicos:

- ✓ Recopilar y analizar información o estudios sobre geología, geomorfología, geología regional, mapas geológicos y topográficos, fotografías aéreas e imágenes satelitales, datos hidroquímicos, meteorológicos, hidrológicos e hidrogeológicos, sobre manifestaciones termales, a nivel mundial, nacional y provincial,
- ✓ Caracterizar y analizar el control estructural en el área de estudio, mediante datos existentes,
- ✓ Reconocer unidades geológicas y geomorfológicas del área,
- ✓ Realizar muestreos de agua en surgencias,

- ✓ Medir parámetros físico-químicos *in situ* y en laboratorio, de las aguas termales censadas,
- ✓ Determinar la factibilidad de realizar determinaciones isotópicas que permitan ayudar en la caracterización y relación de las distintas fuentes termales,
- ✓ Clasificar las aguas desde el punto de vista químico,
- ✓ Comparar trabajos previos para determinar las posibles modificaciones temporales de los parámetros físico-químicos,
- ✓ Aportar nuevos análisis de parámetros con tecnología actual para su procesamiento,
- ✓ Determinar si existe potencial geotérmico,
- ✓ Confeccionar base de datos con la información relevada,
- ✓ Elaborar informe final, con conclusiones y recomendaciones.

1.6. Metodología

El trabajo fue dividido de acuerdo al cronograma de actividades en tres etapas:

1.6.1. Primera etapa, gabinete:

La recopilación de antecedentes hidrogeológicos, hidroquímicos, geotérmicos geológicos y de aguas termales, se inicio con la obtención de los datos existentes en la bibliografía recopilada.

Se realizo la búsqueda y análisis de textos de principios del siglo XX, como el del Dr. Herrero Ducloux, con bellas descripciones del contexto geográfico para reconocerlas en el campo y censos de organismos nacionales para ubicar sus coordenadas geográficas volcándolas en el Google Earth para su mejor georeferenciación.

Para el reconocimiento de las unidades geológicas y geomorfológicas se utilizo imágenes satelitales (Google Earth y Lansat).

La caracterización y análisis estructural, se realizo a partir de estudios existentes y sobre imágenes satelitales, para obtener la densidad y orientación de fracturas y fallas.

1.6.2. Segunda etapa, campo-laboratorio:

Se realizo, en forma particular, una visita de aproximación al área de estudio de 3 días durante el mes de Septiembre, contando con la colaboración de compañeros de la carrera.

Las posteriores actividades en campo se realizaron en dos campañas, con apoyo logístico de la empresa que explota el yacimiento de Bajo La Alumbreira, con el invaluable aporte de los geólogos Raúl Ceresole y Gabriel López Vázquez.

- a) Primera campaña comprendida entre los días 3 al 9 de Octubre de 2012
- b) Segunda campaña realizada entre los días 10 al 15 de Enero de 2013

En la primera salida al campo se llevo a cabo la toma de muestras y de parámetros físicos-químicos en cada sitio termal, realizándose el reconocimiento preliminar geológico, geomorfológico y estructural de la zona, siguiendo de base la bibliografía del área, describiéndose las características representativas para cada formación.

El levantamiento de rumbo e inclinación de estructuras (fallas, planos de falla, diaclasas, estratos) se realizo con brújula tipo Brunton azimutal.

La toma de muestra de agua para los análisis de elementos mayoritarios e isotopos estables en laboratorio; se realizo empleando técnicas convencionales de muestreo con el uso de recipientes adecuados y conservadoras para su traslado, siguiendo la Norma IRAM 29012.

La medida de parámetros se realizo con los Conductímetro Marca HACH, Peachímetro Marca WTW y Oxímetro Marca: WTW.

Se reubicaron los surgentes termales mediante un equipo GPS Garmin Extrend con los datos de latitud, longitud y altitud.

En laboratorio, las muestra para el análisis de elementos mayoritarios, fueron filtradas y acidificadas mediante kítasato y ácido nítrico respectivamente. Se realizo también alcalinidad mediante titulación con ácido clorhídrico 0.1N (normal) e indicadores como la fenolftaleína y naranja de metilo.

La segunda campaña, consistió en recorrer nuevamente las fuentes termales para la corroboración de la estratigrafía y una observación más detallada de las formaciones.

Todas las actividades descriptas en esta etapa como las herramientas de trabajo, medios de movilidad, análisis químicos, etc. fueron subvencionados y proporcionados por Minera Alumbreira Ltd.

1.6.3. Tercera etapa, gabinete:

Con los resultados de los laboratorios y el relevamiento en campo se realizo el procesamiento de datos hidroquímicos mediante el programa AQUA CHEM 3.7 (proporcionado por la cátedra de Hidrogeología de la Universidad Nacional de Catamarca), mediante el cual se obtuvieron los diagramas de Piper, Stiff, y geotermómetros.

También se empleo el programa PAST 2.16 para la elaboración del diagrama de Clúster para ver la relación entre las aguas termales.

Con Excel se realizaron las fórmulas y los gráficos de dos componentes para el análisis de los isotopos ^{18}O y ^2H .

La confección de la cartografía se realizo mediante el programa AUTOCAD 2011 tomando de base una imagen Lansat proporcionada por la Licenciada Nieto Romina, la cartografía de la zona ya elaborada por diferentes autores y el relevamiento de campo.

Elaboración del presente informe.

CAPITULO II-FISIOGRAFIA

Las aguas termales de estudio, se encuentran en la región Oeste de la provincia de Catamarca, comprendiendo los departamentos Belén y Andalgalá, sobre la cuenca del Salar de Pipanaco.

2.1. Ubicación geográfica del departamento Belén

Esta a una altura promedio de 1500 m.s.n.m. y su cabecera a una distancia de 291 kilómetros de San Fernando del Valle de Catamarca. Limita al Noroeste con Antofagasta de la Sierra, al Nordeste con la provincia de Salta, hacia el Oeste con Tinogasta, hacia el Sur con Pomán, hacia el Este con Andalgalá y Santa María. La cabecera departamental es la ciudad de Belén.

Belén cuenta con 6 distritos catastrales: Belén, Londres, Puerta de San José, La Ciénaga, San Fernando y Hualfín.

2.1.1. Superficie y demografía

Posee una superficie de 13132 km² y una población de 27843 habitantes con una densidad poblacional de 2,120 hab/Km² según el Censo Nacional de Población y Vivienda, INDEC (2010).

2.1.2. Orografía

Dentro del Dpto. Belén, cabe destacar a la principal unidad orográfica, la Sierra de Hualfín, desde el punto de vista del presente trabajo, ya que en sus fracturas se localizan la mayor parte de las fuentes termales.

La Sierra de Hualfín tiene como límite Norte a la Sierra de las Cuevas y del Chango Real; por el Sur la Sierra de Belén y de La Ovejería; al Este el Campo del Arenal y al Oeste la Sierra de Culampajá-Altohuasi; se extiende frente a la localidad homónima hasta el Abra del río Las Cuevas. Esta unidad tiene una longitud de unos 16 Km. y su altura media es de 3300 m.s.n.m. Está separada de la Sierra de Las Cuevas por un portezuelo de origen tectónico y de la Puna por una depresión ocupada por cuchillas bajas, las cuales consisten en capas terciarias inclinadas al Noroeste (González Bonorino, 1950).

Finalmente, al Sureste de Hualfín y al Noreste del complejo montañoso de

Aconquija-Belén, se encuentra un área caracterizada por sierras bajas que contrastan notablemente con las mencionadas anteriormente, de relieve áspero e irregular, elaborado en rocas de origen volcánico, donde la erosión ha actuado con mayor intensidad (Bravo, 1986).

Con respecto a Aguas de Dionisio, concesión de YMAD, esta se ubica en el extremo Sudoeste de la depresión intermontana Campo del Arenal, al Norte de un conjunto de sierras que constituyen la prolongación austral del sistema de Aconquija.

El extremo Sur del sistema de Aconquija separa al complejo volcánico de otra depresión intermontana, el Salar de Pipanaco. El límite oriental del complejo volcánico está definido por las sierras de Aconquija de rumbo general NNE-SSW y las sierras de Ambato de dirección NW-SE. Al Oeste, el extremo Norte de la sierra de Fiambalá y las sierras de Hualfín y las Cuevas se adosan a la Puna, separadas del complejo volcánico por el Valle de Hualfín (Gutiérrez; Kojima; Espinoza).

Internamente el sector Aguas de Dionisio, posee como límites una serie de sierras y cerros como por ejemplo: Cerro Negro, Cerro El Durazno y la Sierra Alumbra por el Este; Las Pampitas y Quebrada del Cajoncito por el Sur, entre otras.

2.2. Ubicación geográfica del departamento Andalgalá

Esta a una altura de 980 m.s.n.m. y a 260 kilómetros de San Fernando del Valle de Catamarca. Limita al Norte con Santa María, al Nordeste con la provincia de Tucumán, al Sureste con Ambato, al Sur con Pomán y al Oeste con Belén. La cabecera departamental es la Ciudad de Andalgalá.

Contiene 14 distritos catastrales: Plaza, Malli 1°, Malli 2°, Villa Vil, Chaquiago, Minas, Cóndor Huasi, Huachaschi, Huaco, Potrero, Choya, Amanao, Aconquija y Espinillo.

2.2.1. Superficie y demografía

Posee una superficie de 4746 km² y una población de 18132 habitantes con una densidad poblacional es de 3,820 hab/Km². Según el Censo Nacional de Población y Vivienda, INDEC (2010).

2.2.2. Orografía

Las sierras aledañas al sector de Vis Vis son la Sierra de La Ovejería, con una altura promedio de 2450 m.s.n.m; los filos del Tolar, punto más alto del sector con 3190 m.s.n.m. en las nacientes de la quebrada del Suncho; el Campo de Ampujaco con 1700 m.s.n.m. y las Juntas-Vis Vis con 1750 m.s.n.m.

Otras elevaciones son el cerro Baño o Punta Alta, que se encuentra al SW de la confluencia de los ríos Jejenes y Vis Vis, los filos de San Lucas que delimitan el bajo del mismo nombre; los filos de El Tolar que, como el anterior, determinan un cambio en la dirección del drenaje. Hacia el Sur, se encuentran los filos de La Orilla y de La Banda, el primero termina en El Vallecito y el segundo culmina en el valle del río Jaci Yaco al Sur del campo Ampujaco; al Norte del poblado homónimo se encuentran los cerros Redondo y La Mesada y al Oeste en dirección N-S El Cerrito (Duran, 1980).

Al Este de la Sierra de La Ovejería, de Norte a Sur se tiene al Cerro Atajo, La Sierra de Santa Bárbara y la Quebrada del Tigre a la altura de Las Juntas (Figura N°3).

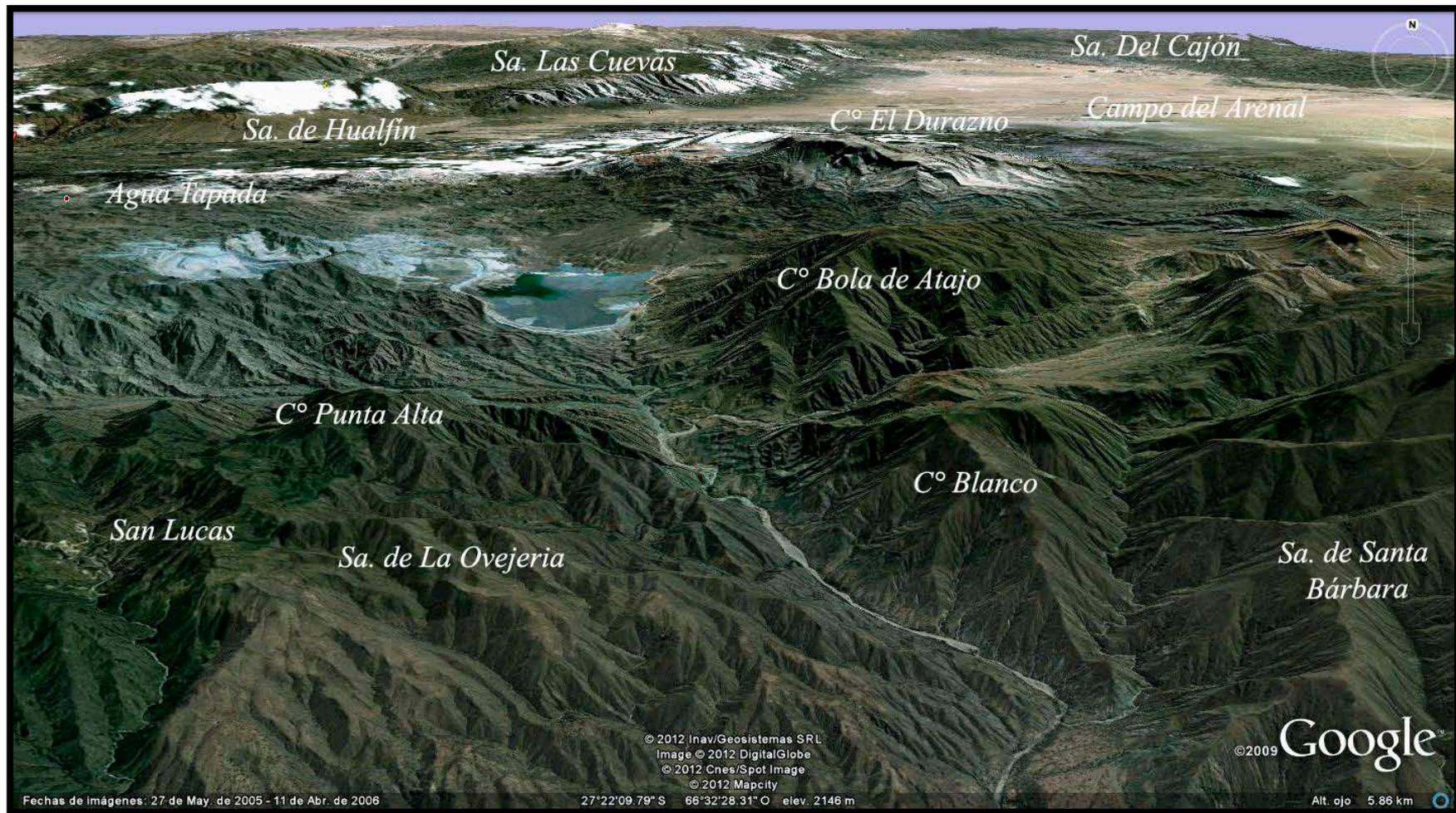


Figura N°3. Imagen Google Heart, principales sierras y cerros de la región

2.3. Caracterización climática, biogeográfica y biológica

Los sectores de estudio están comprendidos dentro de una región amplia que incluye Sierras y Bolsones, con particularidades topográficas y edáficas que confieren un complejo escenario en donde se observan laderas empinadas, cañadones y planicies deprimidas. Las altitudes varían desde los 1900 m.s.n.m. en la Quebrada de Vis Vis hasta los 2600 en las cumbres más altas de la Sierra de Hualfín.

2.3.1. Clima

El clima de la zona es semiárido continental, con precipitaciones estivales principalmente que varían entre 80 mm y 200 mm anuales (Cabrera, 1976); produciéndose en forma torrencial en el verano, durante los meses de Enero y Febrero fundamentalmente.

Las nevadas son frecuentes en los meses de Junio y Julio donde se han registrado temperaturas de hasta -19°C. La temperatura media anual se estima en 27°C durante el día y 10 a 11°C durante la noche lo que muestra una gran amplitud térmica tanto en el día como así también en las estaciones, con inviernos helados y veranos muy calurosos pudiendo llegar a 40°C durante el día. En primavera son frecuentes los vientos que en general soplan desde el Sur, especialmente fuertes durante los meses de Septiembre-Octubre. El promedio de evaporación es de 1385 mm y la evapotranspiración promedio en 6 mm/día (Australasian Groundwater & Environmental Consultants Pty Ltd., 2002).

En el sector occidental, en las localidades de Los Nacimientos, Hualfín, San Fernando y La Ciénaga el período de lluvias se registra en los meses de Diciembre a Marzo. Al sur del distrito YMAD el período de lluvias se extiende de Noviembre a Marzo, registros correspondientes a las localidades de Andalgala, Belén y Londres. En la latitud del distrito YMAD las precipitaciones promedio de los meses de Enero- Febrero son menores a los del sector Norte y sector Sur.

2.3.2. Fitogeografía, flora

Fitogeográficamente, según Morlans, la zona se encuadra dentro de la provincia del Monte de Valles y Bolsones, caracterizada por una vegetación arbustiva xérica, con dominancia de *Zigofiláceas* arbustivas del género *Larrea*, acompañadas por bosques dispersos de Algarrobos (*Prosopis sp.*) y cactáceas columnares (*Trichocereus sp.*).

La fisonomía vegetal corresponde a una estepa arbustiva de entre 1 a 3 metros de altura, muy abierta y con predominancia de jarillas (*Larrea sp.*). En los flancos serranos, la vegetación se hace más baja y dispersa.

Las especies leñosas arbóreas más importantes están representadas por Algarrobos (*Prosopis sp.*) en sus variedades blanco, negro, dulce y panta, además de chañares (*Geoffroea decorticans*), breas (*Cercidium praecox*) y talas (*Celtis tala*).

Se reconocen también algunas comunidades que viven en zonas salinas (*halófitas*) representadas por matorrales de jume (*Allenrolfea sp.*) y pichana (*Suaeda sp.*) (Figura N° 4 y 5).



Figura N° 4. Vegetación en Aguas de Dionisio



Figura N° 5. Vegetación en Vis Vis

2.3.3. Fauna

La caracterización general describe a comunidades de “desierto”, generalmente de hábitos cavadores y nocturnos. La presencia de una u otra especie es a menudo dependiente de la altitud, microclimas y amplitudes térmicas la que a su vez incide sobre la abundancia de recursos alimentarios.

La fauna está caracterizada por numerosos roedores cavadores como la vizcacha, tuco tuco, cuises, ratones de campo; por otro lado, también comadrejas, quirquinchos, puma, guanaco, zorros, zorrinos y hurones entre otros.

Entre las aves se destaca el cóndor, la gaviota andina, el carpintero de los cardones y numerosas especies chaqueñas. Los principales reptiles son lagartijas y serpientes.

2.4. Hidrología

En las provincias Argentinas de la región semiárida, las acumulaciones nivales del Oeste (Cordillera) promueven la formación de ríos alimentados por deshielos. La presencia de sucesivas cadenas montañosas abruptas de dirección Norte-Sur, impiden la llegada de esas aguas a las regiones del Este, más bien tienden a derivarlas hacia el Norte, fuera del

territorio provincial, o hacia cuencas sin salida, generalmente Salinas.

Dentro del Sistema Hidrográfico de la provincia de Catamarca, el área de estudio se ubica en la Cuenca del Río Belén- Pipanaco.

Esta cuenca limita al Oeste con las sierras de Fiambalá y Zapata, al Norte con las de Chango Real y San Buenaventura, al Este con el sistema montañoso del Aconquija y Ambato y en su extremo Sur la sierra de Mazán, que la separa de la cuenca adyacente del Abaucán. Los principales ríos de esta cuenca son: el Belén, el Quimivil y el Andalgalá, y los arroyos que drenan de las serranías del Ambato: Saujil, Siján, Pomán y otros (Figura N° 6). Estos ríos y arroyos son de régimen pluvial, excepto los afluentes del río Andalgalá, que por nacer en el nevado del Aconquija presentan un régimen diferente.

Debido a que se aprovecha la totalidad de los caudales de estiaje de los ríos, el agua alcanza el Salar de Pipanaco sólo cuando se presentan grandes crecidas. Desde el Norte, el bolsón de Andalgalá recibe el aporte de los ríos Choya, Potrero, Andalgalá, Villa Vil entre otros.

Existen otros ríos de escurrimientos no permanentes, que sólo conducen caudales en épocas de lluvias, como el Río Amanao, formado por los Ríos Vis Vis y el Río Yacuchuyo, el que drena hacia el Norte del Salar de Pipanaco sólo en caso que ocurran precipitaciones intensas en su cuenca de aporte (Paoli, 2002).

A continuación se describen los ríos Belén y Vis Vis-Amanao, ya que son los colectores de las aguas termales.

2.4.1. Río Belén

Este río se encuentra limitado por las Sierras de Hombre Muerto, las Sierras de las Cuevas y la Sierras del Cura al Este, y las Sierras de Zapata, Fiambalá, del Culampajá y Laguna Blanca por el Oeste. Se inicia con el nombre de río Chango Real, acorde con la identificación de las sierras en sus nacientes, continuando con el de río de Las Cuevas, para luego tomar el nombre de Nacimientos y uniéndose con el de Villa Vil en la parte austral de la Sierra de Hualfín formar el río Belén.

El río Villa Vil baja de la falda Occidental de Chango Real y sus nacientes, con el nombre de río El Bolsón, bajan del Cerro Campo de 4500m recibiendo en su trayecto el río Los Baños, por su margen izquierda que más arriba se denomina quebrada las Zanjas. A partir de esta confluencia el río Villa Vil sigue hacia el Sur hasta encontrarse en la localidad de El Eje con el río Los Nacimientos para dar lugar al río Belén, que corre en

dirección ligeramente Sur-Suroeste hasta recibir, frente a San Fernando y por su margen derecha, al afluente del río Corral Quemado que a su vez, iniciándose en el río de Papachacra, va engrosando su cauce con el río Vicuña Pampa y las quebradas de Yauquenco, Durazno, La Tranca, La Falda y Altohuasi. Por su margen derecha el río Belén recibe frente al pueblo de Palo Blanco el afluente del río Loconte, que baja del Cerro Durazno de 3700 m en la serranía de Alto Huasi y de los cerros Crucillo de 4300m, Bayo de 4400m, Morado de 4920m, Tolar 4900m y El Mojón. Por su margen izquierda recibe los arroyos Quillay y La Villa, este último frente a la localidad de La Ciénaga. Inmediatamente y por su margen derecha, recibe al río Ishanga y en las inmediaciones de la localidad de La Puerta de San José, aporta sus aguas el río de Las Juntas formado por los arroyos o vertientes Barrancas, Cóndor Huasi y Pata de Guanaco.

A partir de la Puerta de San José y hasta La Toma, el río Belén corre por una angosta quebrada de la sierra de este departamento al Norte de su ciudad, luego más al Sur, su curso se diluye en un extenso desierto conocido con el nombre de Campo de Belén y continua en brazos que toman dirección general ESE hasta caer al Salar de Pipanaco que es el receptáculo final (Lobo; Álvarez; Varela, 2008).

2.4.2. Río Vis Vis-Amanao

En el distrito YMAD la red de drenaje en general descarga hacia el Noroeste, al río Los Nacimientos en el Valle de Hualfín; con pendiente abrupta y drenajes más cortos descarga hacia el SE a la quebrada de Vis Vis-Amanao y hacia el sur al río Los Jejenos que también desagua en la quebrada de Vis Vis-Amanao. Otros afluentes son el Río Seco (situado al Sur, a lo largo de La Quebrada de Buenaventura) y el desagüe de La Quebrada de La Escalera.

El escurrimiento de agua superficial se produce en forma esporádica, torrencial, durante la temporada estival en los meses de verano.

El río Vis Vis-Amanao nace en el faldeo sur del cerro El Durazno. Controlado por la falla Amanao desagua en el borde occidental del Campo de Andalgalá en la cuenca intermontana Salar de Pipanaco recorriendo una distancia aproximada de 45 Km. con dirección NNO-SSE.

Desde el dique de colas de Minera Alumbreira hasta las fuentes termales no escurre agua superficial por el río Vis Vis-Amanao debido a que el agua fluye por el manto aluvial

del río. Los restos del antiguo baño termal se encuentran en la margen derecha del río Vis-Vis-Amanao.

Es observable que desde los baños termales hacia el Sur el agua escurre superficialmente por tramos (debido al escaso espesor del manto aluvial y afloramiento del manto rocoso) y otras veces fluye en el manto aluvial cuando este tiene mayor espesor.

2.4.3. Aguas de Dionisio

En este sector no existen cursos de aguas superficiales permanentes, solo en épocas de lluvias se pueden observar corrientes de agua en las quebradas, las cuales se infiltran en los arenales o aportan su caudal a los arroyos temporarios.

No se cuenta con información que avale la existencia de recursos de aguas subterráneas, a excepción de la fuente termal de Aguas de Dionisio, ubicada a 6.5 Km al Oeste del Campamento central de Mina Farallón Negro.

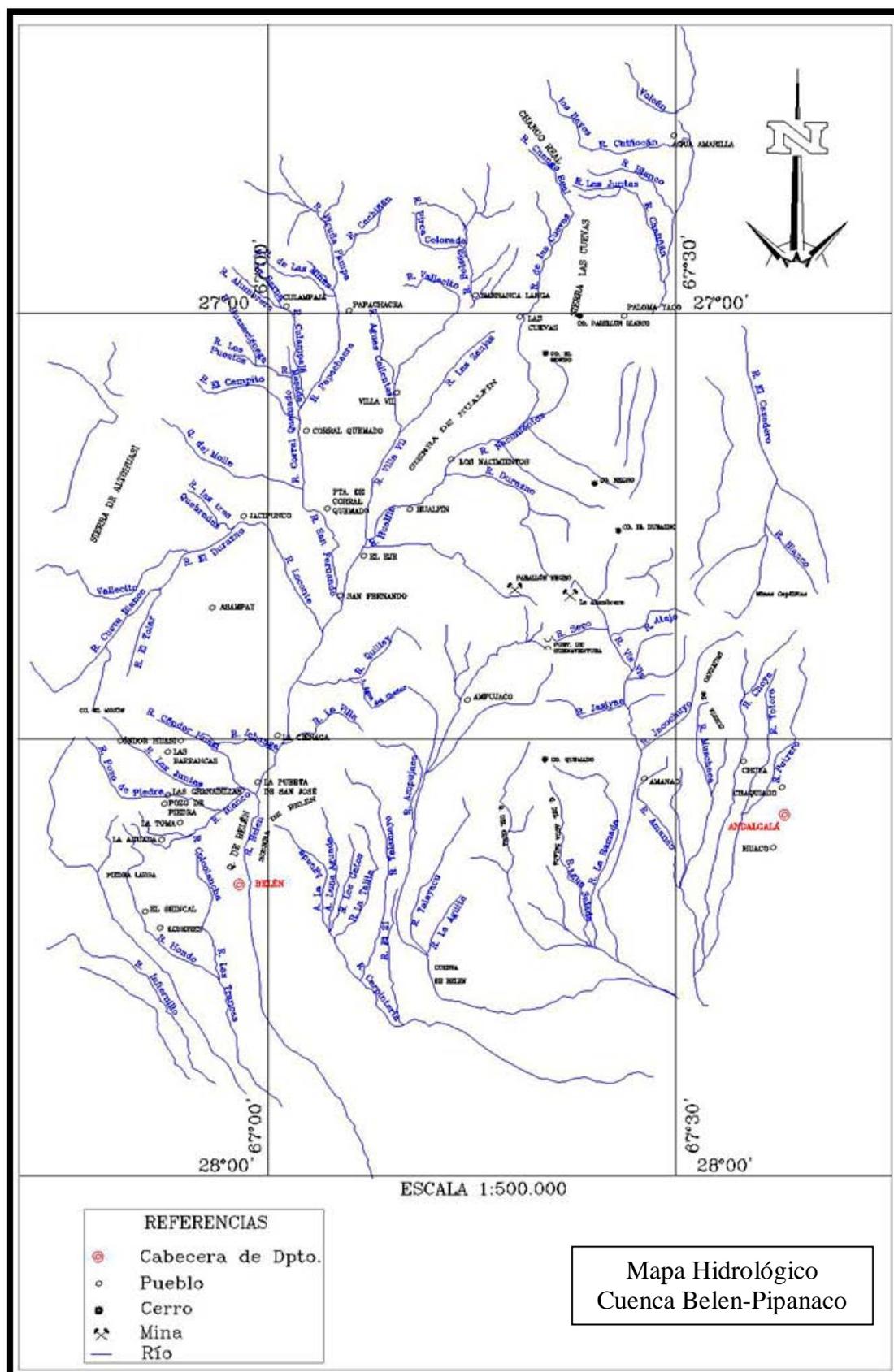


Figura N° 6. Mapa Hidrológico de la cuenca del río Belén-Pipanaco. Tomado del mapa general de la Provincia de Catamarca (Dirección de Hidrología y Evaluación de los Recursos Hídricos de Catamarca 2009)

CAPITULO III - MARCO GEOLOGICO

3.1. Geología regional

La primera descripción de las Sierras Pampeanas como unidad morfoestructural independiente fue efectuada por Stelzner (1875). Posteriores trabajos (Bodenbender, 1895; Beder, 1922; Rasmuss, 1916) ratificaron la presencia de un basamento Precámbrico-Eopaleozoico en las rocas metamórficas de esta unidad. Este basamento forma una serie de dominios litológicos y estructurales con orientación meridiana que han sido interpretados como parte de una faja de movilidad ensálica (Dalla Salda, 1987) o como terrenos que se desarrollaron y acrecieron en el margen occidental convergente del cratón del Río de la Plata (Ramos, 1988).

En conjunto la discusión envuelve a la historia del margen proto-ándico de Gondwana y su interacción con Laurentia. (Miro, en Caminos, 1999). Las edades de sus metamorfitas y granitoides indican que evolucionaron entre el Neoproterozoico y Paleozoico superior; desde este último a nuestros días han sido montañas de bloques de retroarco.

Una importante faja ubicada en la región oeste de las Sierras Pampeanas con características litológicas, patrones estructurales y evolución tectónica propia permitió su separación como Sierras Pampeanas Occidentales y Orientales, por Roberto Caminos (1979) (Dalla Salda; Toselli en Caminos, 1999); abarcando las provincias de Catamarca, Salta, Tucumán, La Rioja, San Juan y el sector occidental de San Luis para las primeras y el Norte de la provincia de Córdoba, Sur de Santiago del Estero, ángulo SE de Tucumán y el Sector Oriental de San Luís para las segundas (Atlas Catamarca) (Figura N° 7).

Las Sierras Pampeanas Occidentales están integradas por dos unidades litoestratigráficas mayores de distinta edad. La primera y más antigua está representada por afloramientos alargados o *inliers* de rocas metamórficas de alto grado de edad Greenville (1000-1100 Ma), (Varela; Dalla Salda, 1993; Mac Donough et. al., 1993; Ramos et al., 1993). La segunda supracortical respecto al Greenville, es un grupo de metamorfitas que comprenden dos conjuntos separables por sus protolitos: la primera derivó de sedimentos y la segunda de rocas ígneas básicas y ultrabásicas. Esta unidad está caracterizada por metamorfitas de bajo a mediano grado y metapelitas aluminosas, con asociaciones de clorita-moscovita-biotita-almandino (Dalla Salda; Toselli op.cit.).

Las rocas precámbricas corresponden con posibles arcos de islas intraoceánicas, que actualmente están preservados en facies de grado medio y representados por anfibolitas y gneis (Vujovich; Kay, 1996); también está caracterizada por la presencia de abundantes derivados metamórficos de calizas, dolomías, rocas calcosilicáticas e ígneas básicas y ultrabásicas, así como por la escasez de granitoides. (Dalla Salda, Toselli op.cit.).

La Sierras Pampeanas Orientales, se diferencia por estar constituida esencialmente por turbiditas metapsamíticas y metapelíticas, polimetamórficas. El metamorfismo de grado más bajo está representado por pizarras y filitas, con escasas y delgadas intercalaciones de concreciones y/o bloques carbonáticos y con el aumento de metamorfismo se forman silicatos cálcicos como clinozoicita, epidoto y a veces titanita; el grado mediano de metamorfismo está representado por esquistos psamopelíticos bandeados con lentes de rocas calcosilicáticas de aspecto félsico a menudo deformadas y boudinadas, compuestas por plagioclasas, cuarzo, clinozoicita, granate, hornblenda, titanita, diópsido y calcita. El alto grado de metamorfismo está representado por gneises y migmatitas metapelíticos con grado variable de deformación conteniendo *boudins* de granulitas subordinadas, caracterizadas por la aparición de hipersteno. (Toselli; Basei; Rossi de Toselli, 2003.)

Las Sierras Pampeanas constituyen la mayor unidad ígneo-metamórfica de la Argentina.

El zócalo o basamento formado por metamorfitas, granitos y rocas de mezcla componen la unidad fundamental del sistema, y determina el 90 % de los afloramientos.

En nuestra provincia, este basamento cristalino, está dividido en Faja Oriental y Faja Occidental, la división se basa en las diferencias litológicas, la principal de esta es la presencia de una faja básica y ultrabásica en la faja Occidental, mientras que en la Faja Oriental abunda las rocas de composición granítica.

- Faja Oriental: Sierra de Cajón o Quilmas, Aconquija, Chango Real, Hualfín, Las Cuevas, Narváez, Capillitas, Humaya Ambato, Ancasti, Zapata, Fiambalá (flanco oriental) Belén, Culampajá, etc.
- Faja Occidental: Sierra de Fiambalá (flanco occidental) y un pequeño tramo de la Sierra de San Buenaventura.

El Paleozoico superior representado por el Grupo Paganzo descritos por Bodenbender (1886), aflora solo en Tinogasta a la altura de Chaschuil.

El Cenozoico se conserva en el interior de los valles y en los flancos menos inclinados de las sierras o como relictos preservados de la erosión en las partes más elevadas de las mismas. Los afloramientos se encuentran al Sur del valle de Santa María, en Hualfín, Corral Quemado y Las Cuevas. Estos sedimentos se separan a grandes rasgos en Calchaquense (capas rojas) y en Araucanense (capas grises).

Como el presente trabajo busca plasmar los conceptos más recientes en aspectos tectónicos, estratigráficos, hidrogeológicos, etc. estos términos, Calchaquense y Araucanense, así reconocidos por González Bonorino (1950) en las zonas de estudio y utilizados por numerosos autores como unidades litoestratigráficas; no se ajustan a las indicaciones del Comité Argentino de Estratigrafía y en consecuencia no resultan convenientes seguir empleándose. Es así que en la presente tesis, se seguirán los criterios de Muruaga y Bossi para describir y caracterizar las formaciones.

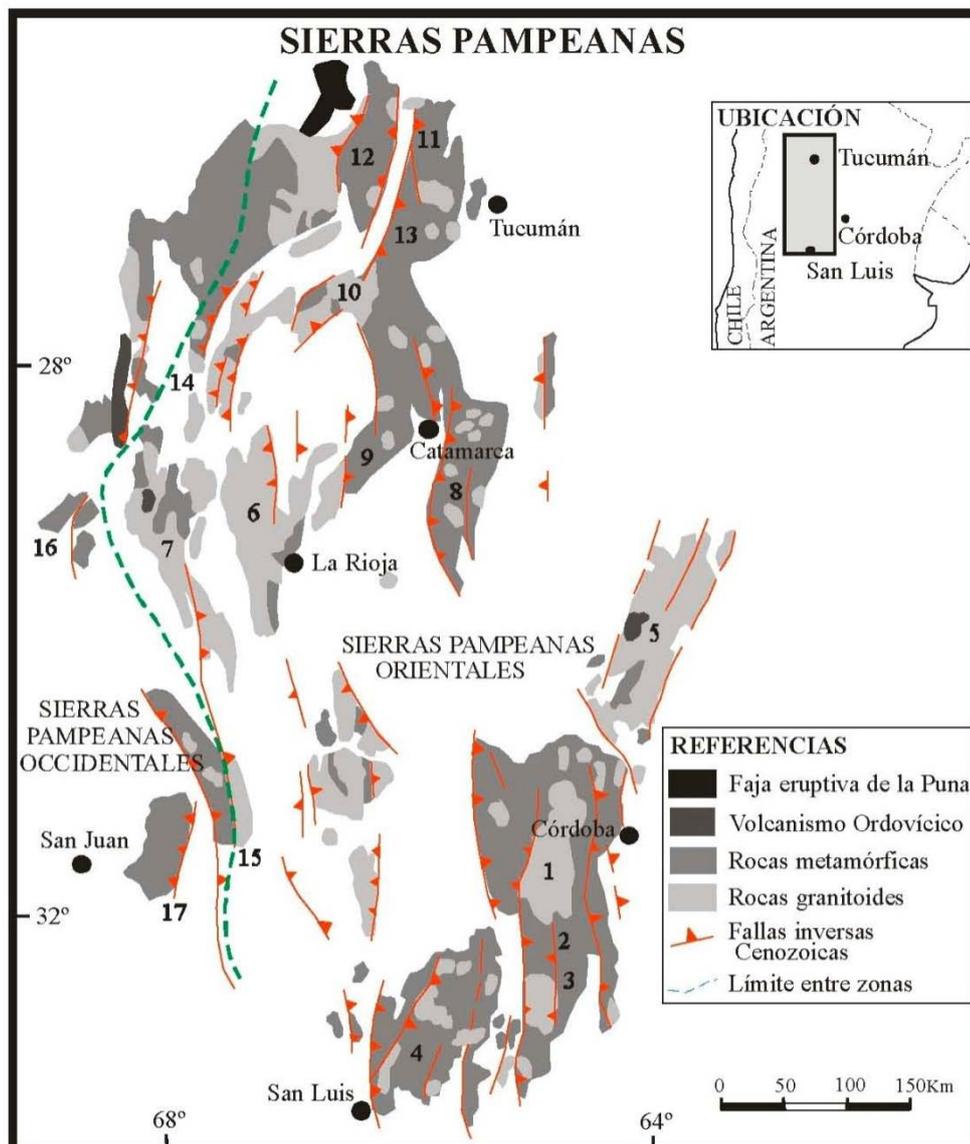


Figura N° 7. Mapa geológico general de las Sierras Pampeanas

Referencias: 1) Batolito de Achala; 2) Sierras de Córdoba; 3) Batolito de Alpa Corral; 4) Sierras de San Luis, Batolito de Las Chacras-Piedras Coloradas; 5) Sierras del Norte de Córdoba; 6) Sierras de Velasco; 7) Sistema de Famatina; 8) Sierras de Ancasti; 9) Sierras de Ambato; 10) Batolito de Capillitas; 11) Cumbres Calchaquíes; 12) Sierras de Quilmas; 13) Sierras de Aconquija; 14) Sierras de Fiambalá; 15) Sierra de Valle Fértil; 16) Sierras de Toro Negro y Cuminchango; 17) Sierra de Pie de Palo. (Modificado del libro de Geología Argentina, ed. 1999).

La estructura de las Sierras Pampeanas ha sido caracterizada magistralmente por González Bonorino (op.cit.), quien las consideró un sistema de montañas en bloque, limitadas por fallas inversas de alto ángulo. Este autor interpretó que las fallas eran lístricas, es decir se horizontalizan en profundidad al encontrar transiciones frágil dúctiles dentro de la corteza. Otro mecanismo no tan común está limitado por fallas que inclinan en sentidos opuestos es decir hacia el interior de la sierra, y al ser elevado muestra un perfil simétrico. Son ejemplos de ellas las Sierras de Hualfín y Fiambalá.

La estructura actual se originó principalmente a partir del Mioceno inferior, según últimos estudios, es decir, fines del Terciario, correspondiente a la última fase del levantamiento andino, cabe aclarar, que si bien las rocas que constituyen las sierras pampeanas son de edad muy antiguas (precámbricas), la edad del levantamiento es muy reciente y se produjo por reactivación de fallas más antiguas (Costa en Caminos, 1999).

3.2. Geología local

La columna estratigráfica en el área de estudio está representada por basamento cristalino compuesto por metamorfitas de bajo grado de la Formación Loma Corral (Precámbrico-Cámbrico inferior), instruidas por ortogneis de la Formación Chango Real (Cámbrico). Mediante una discordancia, representada por la peneplanicie elaborada en estas metamorfitas y ortogneises, las sedimentitas del Terciario se apoyan sobre el basamento, cubiertas a su vez, por sedimentos cuaternarios con depósitos de acarreo (abanicos aluviales, coluviales, terrazas fluviales y dunas eólicas).

El inicio de la sedimentación terciaria estuvo representado por la depositación de la Formación Hualfín (Muruaga, 1998), cuya edad es difícil de acotar pero mediante correlación litoestratigráfica podrían tener una edad mínima cretácica inferior (Rosello et. al., 1999; Muruaga, 2001). En discordancia, apoyan las sedimentitas neógenas del Grupo Santa María, con una edad máxima de 13 Ma (Bossi et. al. 1987; Muruaga, 1998, 1999, 2001), compuesto de base a techo por las Formaciones Las Arcas, Chiquimil (con sus tres miembros, Los Baños, El Áspero y El Jarillal), Andalhuala y Corral Quemado. Los depósitos conglomerádicos cuaternarios del Punaschotter coronan la sucesión.

Los principales lineamientos estructurales están orientados esencialmente NE-SO y ENE-OSO, representados por fallas inversas de alto ángulo (75° a 85°), inclinadas hacia el NO. Una estructura importante es la Falla de Villa Vil de rumbo NO-SE y movimiento transcurrente dextrógiro, probablemente activa desde el inicio de la sedimentación y responsable del diseño diferente que muestran los perfiles a cada lado de esta estructura. (Ver anexo N° 1. Mapa geológico)

A continuación una comparación de la geología para la zona entre González Bonorino (1950) de la Hoja Geológica 12 d Capillitas, escala 1:200.000 y la Geología propuesta por Muruaga y Bossi del Campo del Arenal y alrededores, escala 1:500.000 presentado en el trabajo *Estratigrafía e inversión tectónica del 'rift' neógeno en el Campo del Arenal, Catamarca, NO Argentina* (2006) (Figura N°8 y 9).

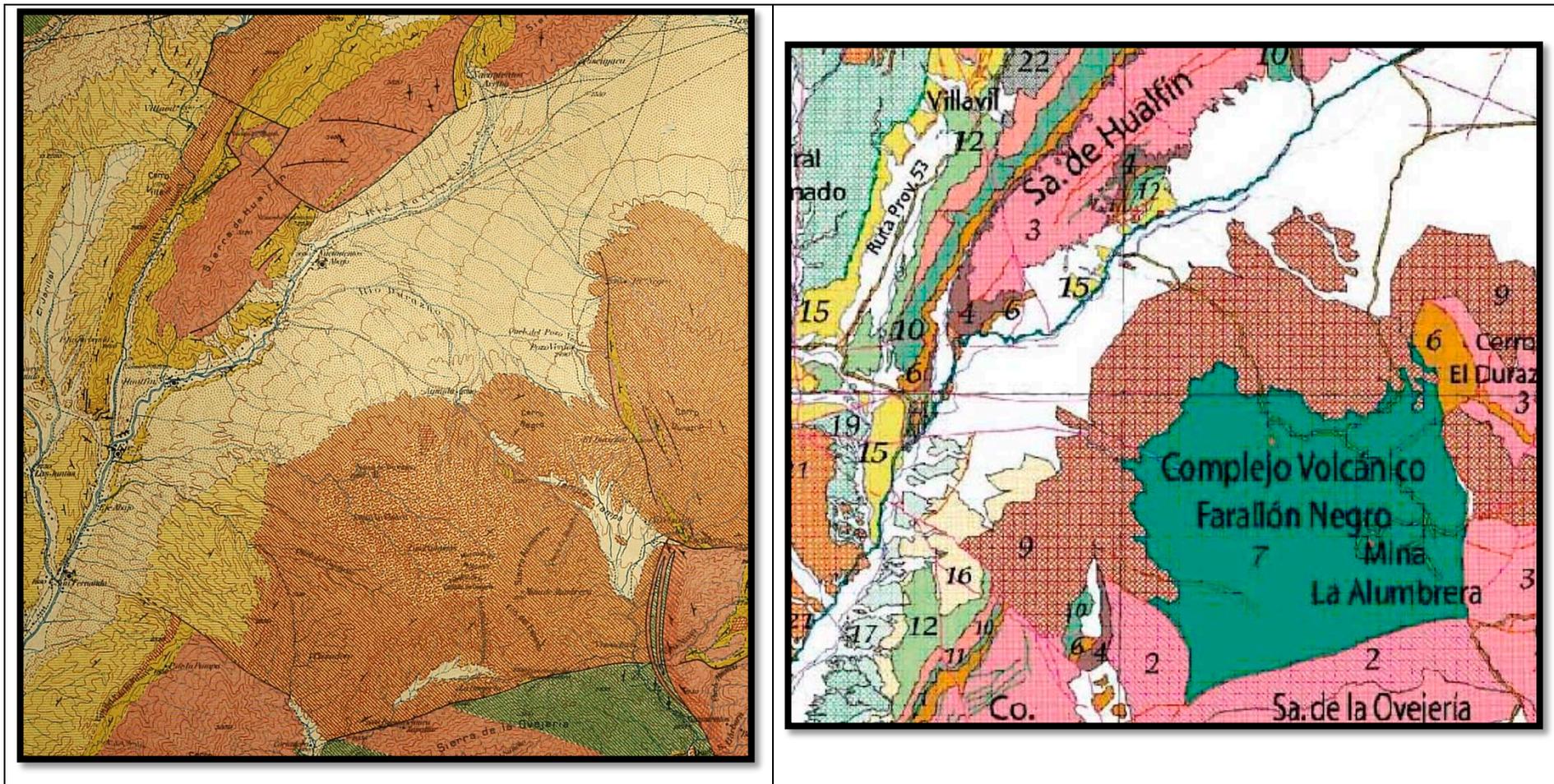


Figura N° 8. Comparación de la geología según González Bonorino (1950) y Muruaga (2006)

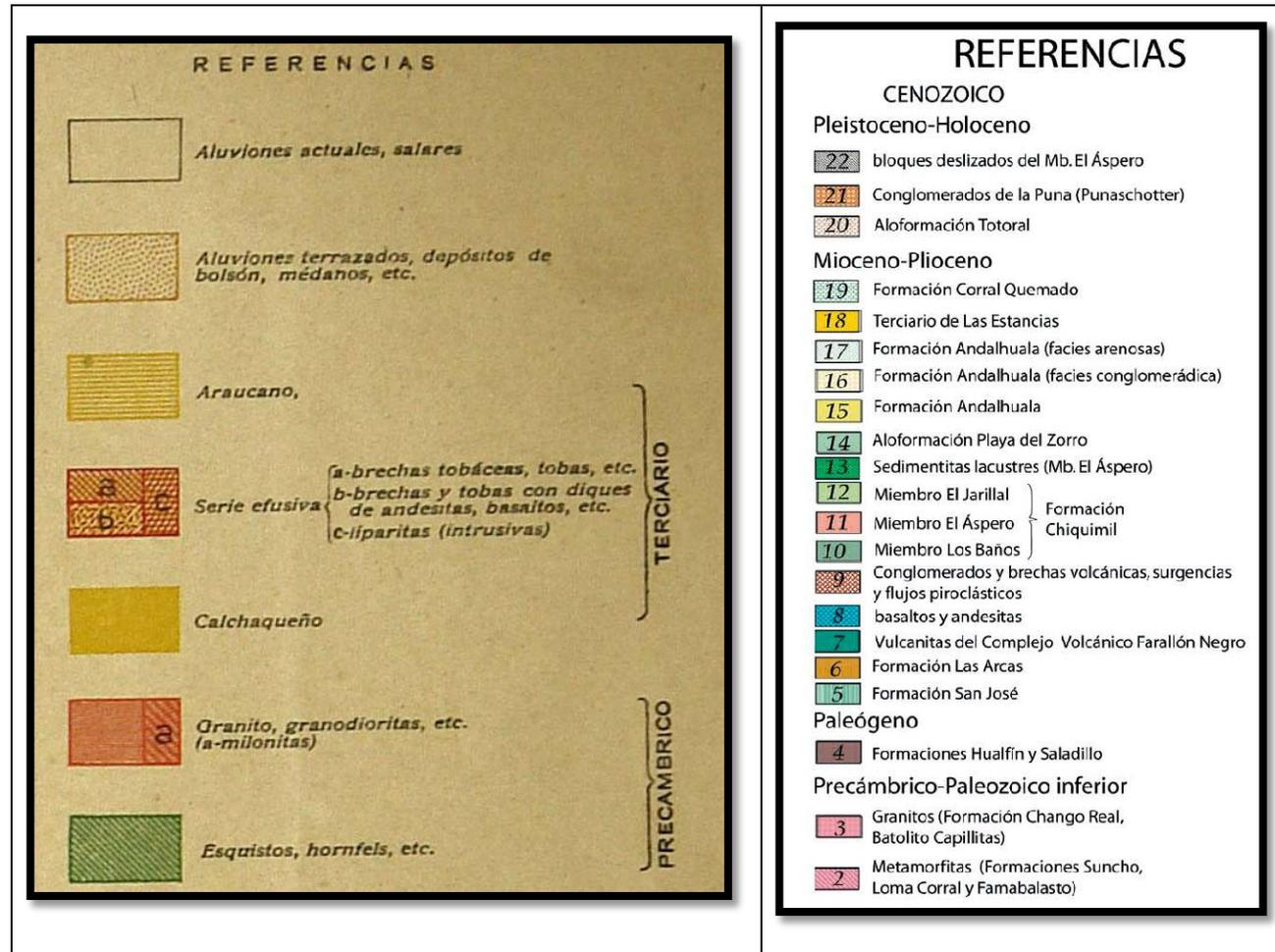


Figura N° 9. Referencias estratigráficas

3.3. Geomorfología

La zona de estudio fue dividida en dos sectores: “Sierra de Hualfín” (Figura N°10) e “YMAD-Vis Vis” (Figura N° 16); en ambos pueden reconocerse tres grandes unidades geomorfológicas: el área montañosa, el área pedemontana y el área de planicie fluvial. La tectónica, por su parte, cumple un papel de importancia en la generación de estas unidades geomorfológicas. Al lado de cordilleras jóvenes predominan formas de relieve en estructuras plegadas y los movimientos del basamento repercuten en los sedimentos terciarios y cuaternarios.

3.3.1. Sector Sierra de Hualfín

El basamento fracturado y sobre elevado determina la presencia de sierras alineadas, separadas por valles tectónicos de estructura general asimétrica. Las características de estas sierras son sus perfiles poco disectados y su sección transversal más o menos asimétrica.

La línea de cumbre se encuentra algo desplazada hacia el lado de la fractura; la erosión ha destruido en parte esa característica. Hay otras sierras como la parte media de la de Hualfín que presenta una estructura más bien simétrica.

Entre el borde de la Puna y la sierra de Hualfín y las Cuevas, el relieve está condicionado por la estructura de capas terciarias monoclinales inclinadas hacia el NW, determinando un paisaje de cuevas, separadas por valles subsecuentes de diverso tamaño (González Bonorino, op.cit.).

El río Nacimientos se encuentra recostado contra la sierra de Hualfín como resultado de la asimetría tectónica de la depresión que el mismo drena.

Dentro de las unidades geomorfológicas mencionadas anteriormente; además de la tectónica, actúan también los siguientes procesos:

- Procesos fluviales: abanicos, glacis y terrazas.
- Procesos eólicos: nidos de abeja y yardang.

El departamento Belén se sitúa en un clima árido de sierras y bolsones, donde la escasa vegetación y suelo le otorga a las estructuras y rocas gran prioridad, las lluvias breves y episódicas caen sobre los suelos desnudos y adquieren rápidamente gran torrencialidad. Como el escurrimiento es ocasional, hay escasos canales y el agua escurre en manto produciendo el lavado y el desmantelamiento de los materiales superficiales,

especialmente en las rocas terciarias menos consolidadas. Estos procesos característicos en regiones áridas a semiáridas dieron lugar a la formación de glaciares, abanicos y terrazas; estando las dos primeras geoformas más ampliamente desarrolladas del lado oriental de la sierra de Hualfín (Figura N° 11).

- ✓ Los abanicos, son una acumulación de materiales originados cuando los ríos o corrientes de alta velocidad reducen repentinamente la misma al penetrar en una región llana; poseen una topografía casi plana y en planta presentan una forma típica de abanico, siendo todos coalescentes encontrándose algunos incluso erosionados.
- ✓ Los depósitos de glaciares se presentan con superficies ligeramente cóncavas, en algunos sectores se encuentran cubiertos en su parte superior por los conos aluviales que proceden del cordón montañoso.

En la excavación de los glaciares predomina la erosión lineal, siendo el principal mecanismo, las arroyadas en manto. Poseen un manto aluvial que cubre totalmente el sustrato rocoso, donde el proceso de cárcavamiento es activo.



Figura N° 11. Conos aluviales coalescentes y glaciares, vista al Oeste

- ✓ Los ríos como Nacimientos y Villa Vil presentan un carácter anastomosado, su cauce es ancho y su flujo se ramifica entre bancos alargados de aluviones. Estas características son propias en una pendiente y caudal elevado. A ambos lados del río se encuentran terrazas fluviales, formadas cuando la corriente llenó el valle con sedimentos y labró después su cauce a un nivel inferior (Figura N°12). En este caso la construcción inicial de la terraza fue por un cambio de nivel de base de la corriente, producto de la tectónica, aunque en algunos casos puede deberse a cambios climáticos.



Figura N° 12. Primer nivel de terraza en el rio Villa Vil, camino a los Baños Grandes, vista al Norte

La superficie desnuda de los suelos favorece la circulación del viento por ascenso, subsidencia o lateralmente. La dinámica eólica ejerce una acción de deflación sobre las arenas y de corrosión sobre las rocas compactas produciendo efectos de pulido, estriado y facetado de la superficie de las mismas.

Cuando el viento arrastra arena y polvo contra las rocas y el suelo, se denomina a este proceso abrasión eólica o corrosión. La abrasión requiere del transporte de elementos cortantes por el viento y origina orificios, alvéolos, y acanaladuras en la roca (Figura N° 13).

En rocas sedimentarias estas geoformas se denominan “nidos de abeja”, El modelado de ablación típico es el yardang, estas formas son esculpidas por el viento en materiales blandos con alguna compactación, Ruiz Huidobro (1975) menciona estas geoformas como “esculturas”.



Figura N°13. Efecto del proceso de abrasión en la Formación Los Baños, Los Nacimientos

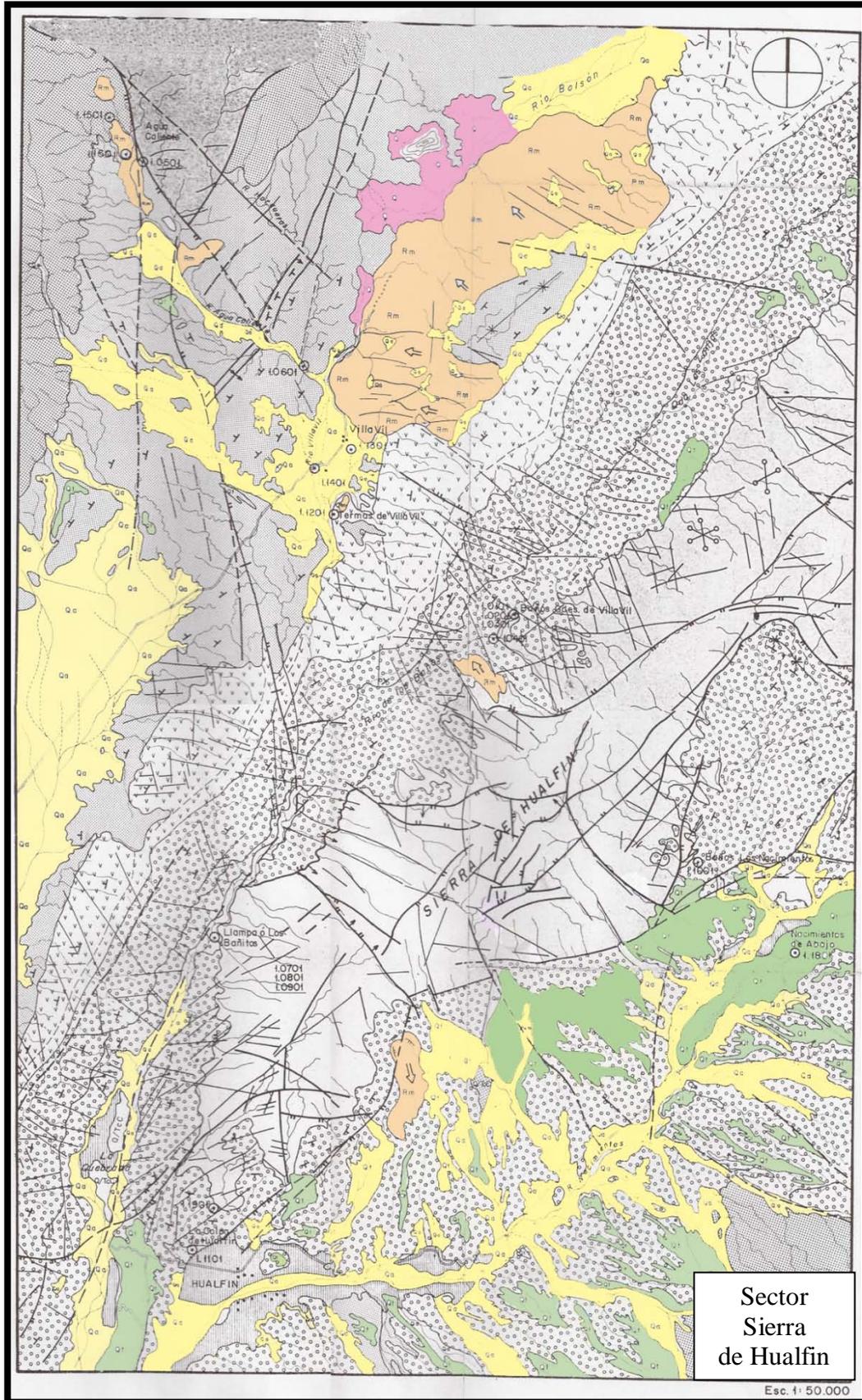


Figura N° 10. Mapa Geomorfológico del sector Sierra de Hualfín. Fuente: ESIN
(Ver referencias en Figura N° 16)

3.3.2. Sector YMAD-Vis Vis

En general en este sector, el relieve hacia el Noroeste (Aguas de Dionisio), está formado por un conjunto de morros y cerros, con predominios de formas cónicas típicos de zonas volcánicas de clima semidesértico, en cambio hacia el sudeste (Vis Vis), predominan algunos filos más elevados y abruptos (Luragui; Turco, 2007).

Los procesos fluviales en la cuenca del río Vis Vis, son los que más han actuado formando abanicos, conos antiguos y terrazas jóvenes (Figura N° 14).

La superficie del antiguo cono de Tampa Tampa, se extiende en las terrazas sobreelevadas del río Vis Vis. Al Este de este río, sobre un cauce que corre al Norte del río Atajo y paralelo a él se encuentran los restos de una elevada terraza desactivada a más de 150 m de altura con respecto a la quebrada de Vis Vis. Este es un indicador de la magnitud de los movimientos verticales recientes que han afectado a esta región, evidenciados también por los conos desactivados como los de Tampa Tampa y otros menores que se manifiestan en el área (Mon; Gutiérrez; Galindo, 2006).

Las terrazas aluviales que se encuentran a lo largo del sector oriental de la Quebrada de Vis Vis, reflejan claramente el levantamiento de la sierra del Este de la del Oeste. Diferentes autores interpretan que el levantamiento contribuyó a la generación de estas terrazas aluviales, las que se encuentran sobre elevadas con respecto al nivel de base de la quebrada, esto indicaría que el levantamiento continuó con posterioridad a la formación de las terrazas.

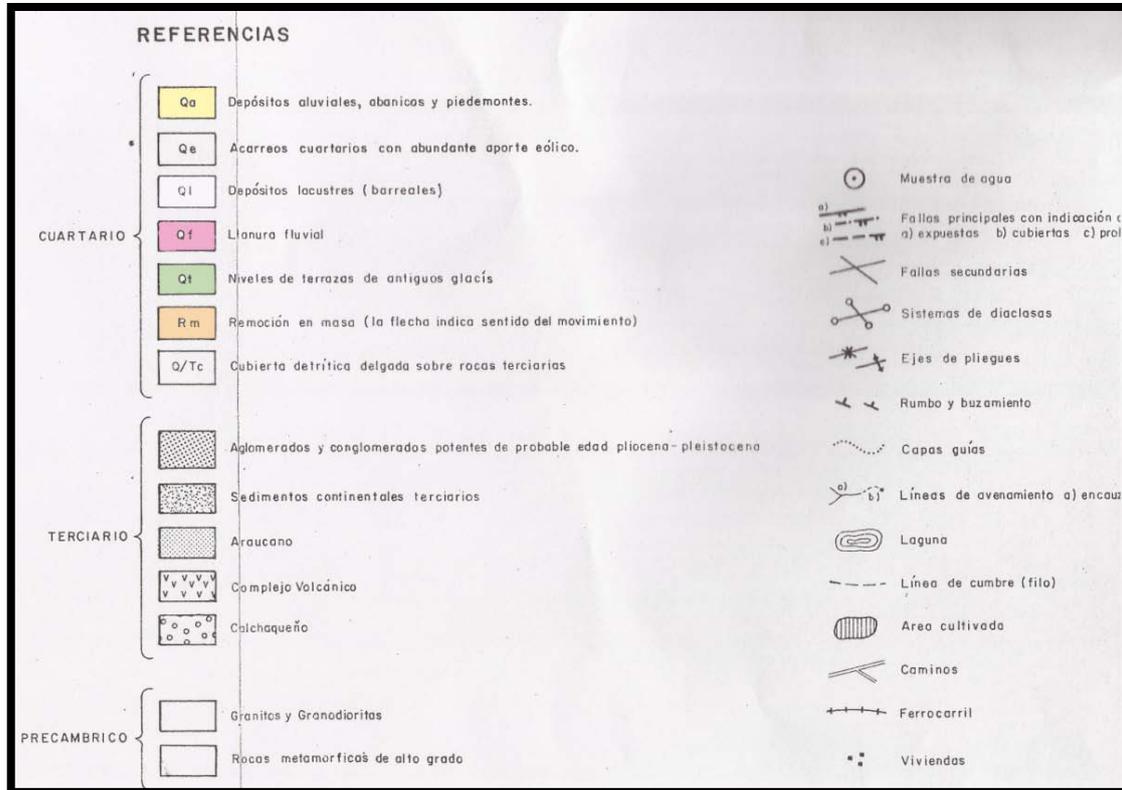
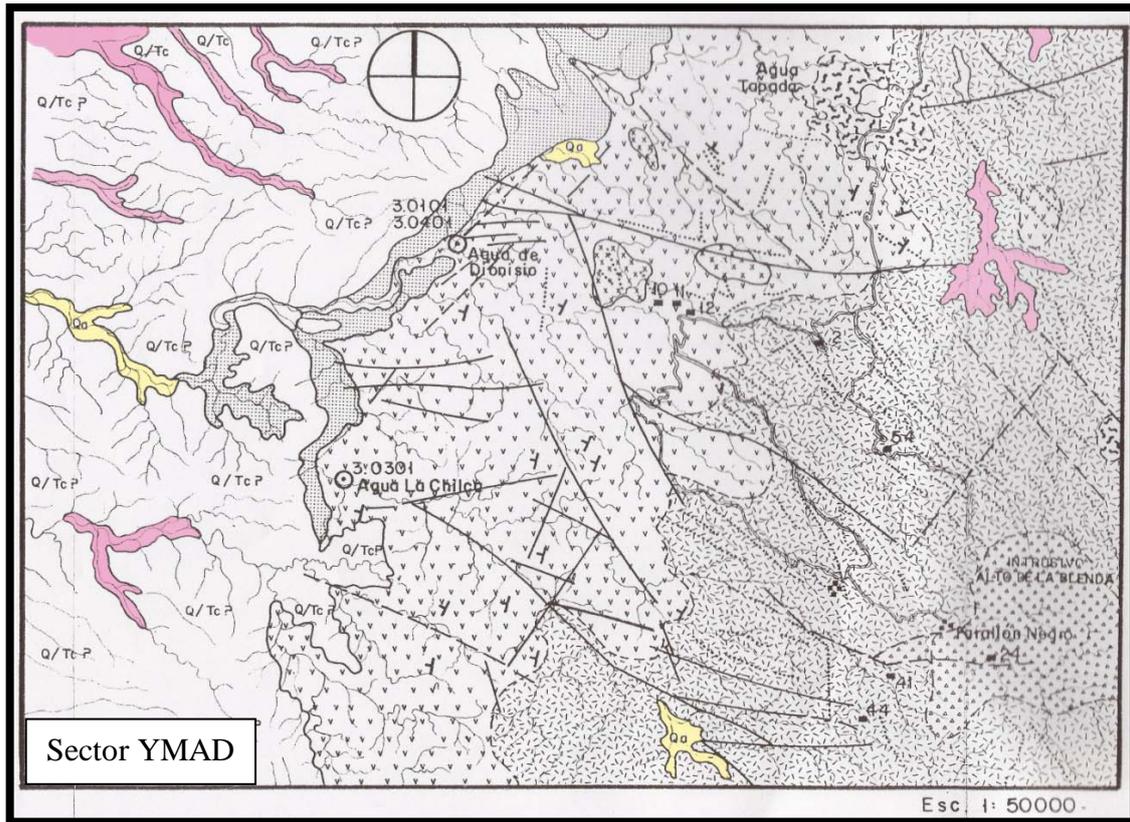


Figura N° 14. Terraza del río Jejenes (falla Buenaventura), vista al Norte

En las terrazas del río Vis Vis, en algunos lugares, se observa un ancho banco color blanco extenso de ceniza fina intercalada con conglomerados cuya potencia media es de un metro (Figura N° 15).



Figura N° 15. Manto de ceniza en la terraza Oeste del río Vis Vis



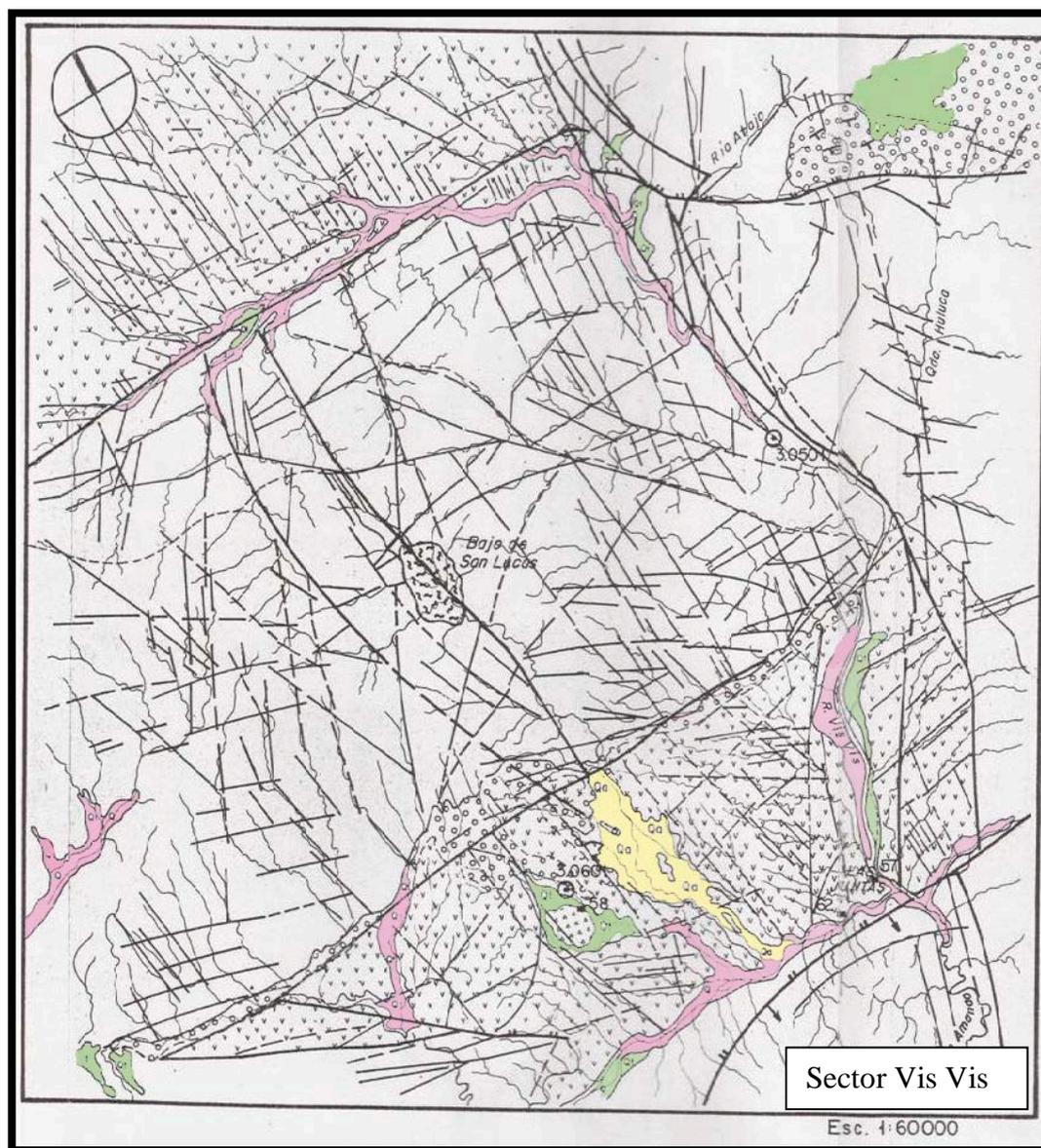


Figura N° 16. Mapa geomorfológico del sector YMAD-Vis Vis

CAPITULO IV - AGUAS TERMALES

4.1. Conceptos generales

Se consideran aguas termales cuando:

- ❖ La temperatura del agua subterránea es igual o superior a la temperatura media anual de la localidad (Custodio, Llamas, 1983);
- ❖ Cuando el agua tiene una temperatura superior en unos 5 ó 6°C a la temperatura media de la zona (Castani, 1971);
- ❖ Cuando emerge de la superficie de la Tierra a una temperatura que supera en 10°C como mínimo, a la temperatura media anual de la comarca en la que se halla situada.

Como aguas minerales:

- ❖ A aquellas que poseen concentraciones anormalmente elevadas en algunas de las sustancias químicas disueltas o el residuo seco es muy elevado;
- ❖ A aquellas con un contenido de sales disueltas superior al de las aguas potables;
- ❖ A las que llevan contenidos anormalmente altos de algunas sustancias disueltas como CO₂, CO₃H⁻, S⁻, Fe⁺⁺. Etc., aunque su salinidad sea inferior al de muchas aguas potables.

Y como aguas termominerales:

- ❖ A aquellas que consideradas minerales, se le suma una alta temperatura (Custodio op.cit.).
- ❖ Al agua natural dotada de propiedades terapéuticas particulares (Castani op.cit.) que para Custodio (op. cit.) serian aguas mineromedicinales.

Los sitios termales del departamento Belén, corresponden a “aguas termominerales” ya que sus temperaturas comprendidas entre los 18.1°C y los 63.2°C como el contenido anormal en sustancias químicas disueltas en comparación con los valores medios de ríos y pozos de la zona, permiten asociarlas a este grupo.

Para hablar de aguas termominerales, se debe tener en cuenta:

- ❖ Las características físico-químicas;
- ❖ La clasificación de las aguas termominerales;
- ❖ El origen de las aguas termominerales y
- ❖ Las características hidrogeológicas;

4.1.1. Características físico-químicas

Los aspectos geoquímicos varían según se trate de un sistema predominantemente acuoso o un sistema predominantemente en fase vapor. En el primero la capacidad de disolución es grande mientras que en el segundo es muy reducida.

Las aguas termales contienen:

- Las sales aportadas por su fracción vadosa,
- Las aportadas por las aguas de origen profundo y
- Las que toma del terreno.

La incorporación de sales del terreno según Custodio (op.cit.) depende en gran manera de la **temperatura**, de la **presión**, del **tiempo de contacto** y del **contenido en sustancias solubles en las rocas involucradas**; para Castani (op.cit.) la concentración de sales y la composición iónica también puede verse modificada por, las **reacciones químicas**, la **acción de microorganismo** y los **cambios de bases**. Por ejemplo, la acción de microorganismos es importante en la reducción de los sulfatos; también es la causa de la producción de azufre nativo por oxidación del sulfuro de hidrogeno. Los cambios de bases por permutación en arcillas, etc.

La **concentración por evaporación** y la **recarga con aguas marinas** son fenómenos que también pueden conducir a notables acumulaciones de sales.

Parte de los aportes externos pueden ser emanaciones profundas de zonas de gran temperatura que suponen volatilización de algunas sales y descomposición de otras. Los haluros son volátiles y esas emanaciones pueden aportar sales alcalinas (ClNa, ClK, ClLi, BrNa, FNa, etc.) si la presión es elevada, o bien ácidos (ClH, FH, etc.) si la presión es baja.

Los aportes de Li^+ , NH_4^+ , Cl^- , B, I, Br^- , CO_2 , SH_3 , As, Sb, pueden también estar asociados a emanaciones profundas y esas sustancias son frecuentes en las aguas termales.

El agua toma con facilidad Na^+ , K^+ y SiO_2 de las rocas pero el Ca^{++} y Mg^{++} son disueltos con más dificultad ya que su solubilidad está limitada. Las aguas poco profundas al calentarse pierden CO_2 , y se precipita CO_3Ca (como se observo en Aguas de Dionisio y Los Nacimientos con la formación de travertinos) y CO_3Mg con la consiguiente disminución en la permeabilidad del medio. En zonas profundas en que el agua está sometida a un ciclo convectivo y la única salida es en forma de vapor las sales permanecen en el sistema parcial y se puede llegar a formar una salmuera, o incluso precipitaciones importantes.

En los sistemas hidrotermales acuosos (domina el agua sobre el vapor), los manantiales de mayor temperatura son más ricos en SiO_2 , Cl^- , B , Na^+ , K^+ , Rb^+ , Cs^+ y As , que otros manantiales más fríos. Si existe deposición de SiO_2 en superficie o en zonas de poca profundidad, es señal de un fuerte gradiente geotérmico, mientras que si se deposita travertino (CO_3Ca) es señal de que en profundidad las temperaturas son poco elevadas y es posible la disolución de caliza por el CO_2 , añadido.

En los sistemas hidrotermales con fase vapor dominante (Figura N° 17), en zonas de actividad intensa, se forman manantiales ácidos (si no existe neutralización por NH_3) a partir de SO_4H_2 procedente de oxidación de SH_2 el contenido en SO_4^- es elevado y el contenido en Cl^- suele ser bajo, por debajo de 15 ppm. Si la actividad no es tan intensa, las fuentes manan agua que varía desde ligeramente acida hasta ligeramente alcalina sulfatada-bicarbonatada con un contenido en CO_2 total, B y NH_4^+ que a veces es elevado. Es de esperar la existencia de un nivel de agua hirviente profundo, de salinidad muy elevada (Custodio op.cit.).

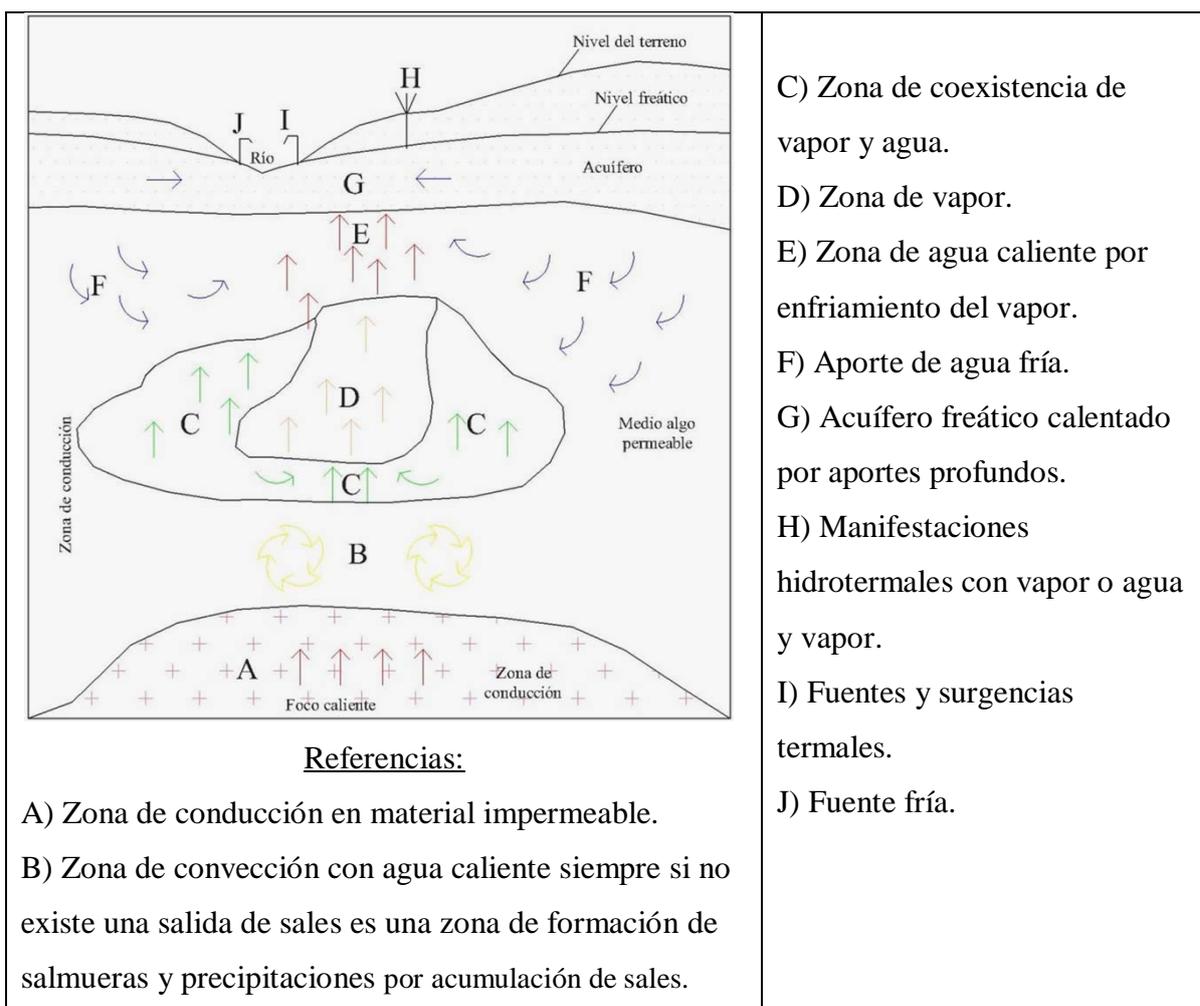


Figura N° 17. Esquema de un sistema hidrotermal con vapor, tomado de Custodio (op.cit.)

4.1.1.1. El gas de las aguas termales

Las aguas termales presentan, además de vapor de agua, otros gases llamados libres, bajo dos estados físicos: disueltos y ocluidos. Pueden desprenderse espontáneamente, a consecuencia de un descenso de la presión, dando gases espontáneos como por ejemplo en las mofetas (fumarolas frías que desprenden dióxido de carbono según w.w.w.terra.es.com)

Los más importantes de estos gases son el gas carbónico y el nitrógeno. Los gases sulfurosos, el metano, el hidrógeno, el oxígeno existen en proporciones variables en las aguas termales. El sulfuro de hidrógeno es característico de las aguas sulfuradas.

El origen de los gases, como de las sales, puede ser exógeno o endógeno, siendo el segundo el más frecuente.

- Origen exógeno: el aire está en el origen de los gases raros, del nitrógeno y de pequeñas cantidades de CO₂. Las reacciones químicas y bioquímicas liberan CO₂ y sulfhídrico.
- Origen endógeno: producto de las acciones volcánicas y magmáticas; por ejemplo el gas carbónico.

4.1.2. Clasificación

Las dos características esenciales de las aguas termales son la **composición química** y la **temperatura**; por lo tanto estos parámetros sirven para clasificarlas.

Con respecto a la temperatura, se puede decir que es la característica más importante ya que esta influye en los efectos fisiológicos e hidrodinámicos; como así también en el aumento de la disolución de las sales disueltas.

4.1.2.1. Según su temperatura

Existen diferentes criterios para clasificar las aguas de acuerdo a su temperatura: aquellos que toman como referencia al clima particular de una región y los que tienen en cuenta la temperatura absoluta.

De acuerdo a la temperatura absoluta, se han adoptado diferentes intervalos y con diferentes criterios; probablemente debido a que dicho parámetro no resulta definitorio por sí sólo en cuanto a la información que brinda.

El Catálogo de Manifestaciones Termales de la República Argentina (2003) considera como requisito para considerarse agua termal un límite mínimo de 22°C, clasificándolas como:

<22°C — Atermales
>22°C — Termales
22°C < hipotermas < 35°C
35°C < mesotermas < 52°C
>52°C hipertermas

Schoeller (1962) las clasifica como:

Aguas hipertermas o termales Si es $t > t_m + 4^\circ\text{C}$
Aguas ortotermas o normales Si es $t_m \leq t \leq t_m + 4^\circ\text{C}$
Aguas hipotermas o frías Si es $t < t_m$

Siendo t la temperatura del agua y t_m la temperatura media anual en el lugar.

Bogomolov (1966) y Silin-Betchurin establecen lo siguiente:

Muy frías $t < 5^\circ\text{C}$
Frías $5 < t \leq 10^\circ\text{C}$
Moderadamente frías $10 < t \leq 18^\circ\text{C}$
Tibias $18 < t \leq 25^\circ\text{C}$
Moderadamente tibias $25 < t \leq 37^\circ\text{C}$
Calientes $37 < t \leq 42^\circ\text{C}$
Muy calientes $t > 42^\circ\text{C}$

Y Recursos Hidráulicos del Consejo Federal de Inversiones (en Filippin de Patria; Arjona, 1988), propone dividir las en:

Frías: de temperaturas inferior a la media externa y menor de 20°.	
Atermal: de temperatura superior a la media externa menor de 20°.	
Termales	de temperatura superior a la media externa y mayor de 20°
	Hipotermal: temperatura entre 21°C a 30°C.
	Mesotermal: temperatura entre 31°C a 40°C.
	Hipertermal: temperatura mayor a 40°C.

Para este trabajo se seguirá el criterio propuesto por El Catálogo de Manifestaciones Termal de la República Argentina (2003) del SEGEMAR.

4.1.2.2. Según su composición química

Para la clasificación de los tipos de aguas termales de la región, se optó por el criterio propuesto en el diagrama de Piper (Figura N°18). Este consta de dos diagramas triangulares y uno romboidal central. En un triángulo equilátero se representan las concentraciones en meq/l (miliequivalente/litro) de los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ (en ocasiones $\text{Na}^+ + \text{K}^+$) y en otro las concentraciones en meq/l de los aniones HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- (o $\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$). Cada uno de los vértices de los triángulos representa el 100% de un ion, de tal manera que la ubicación de un punto en el interior del triángulo indica el porcentaje presente de cada ion respecto del total de los tres.

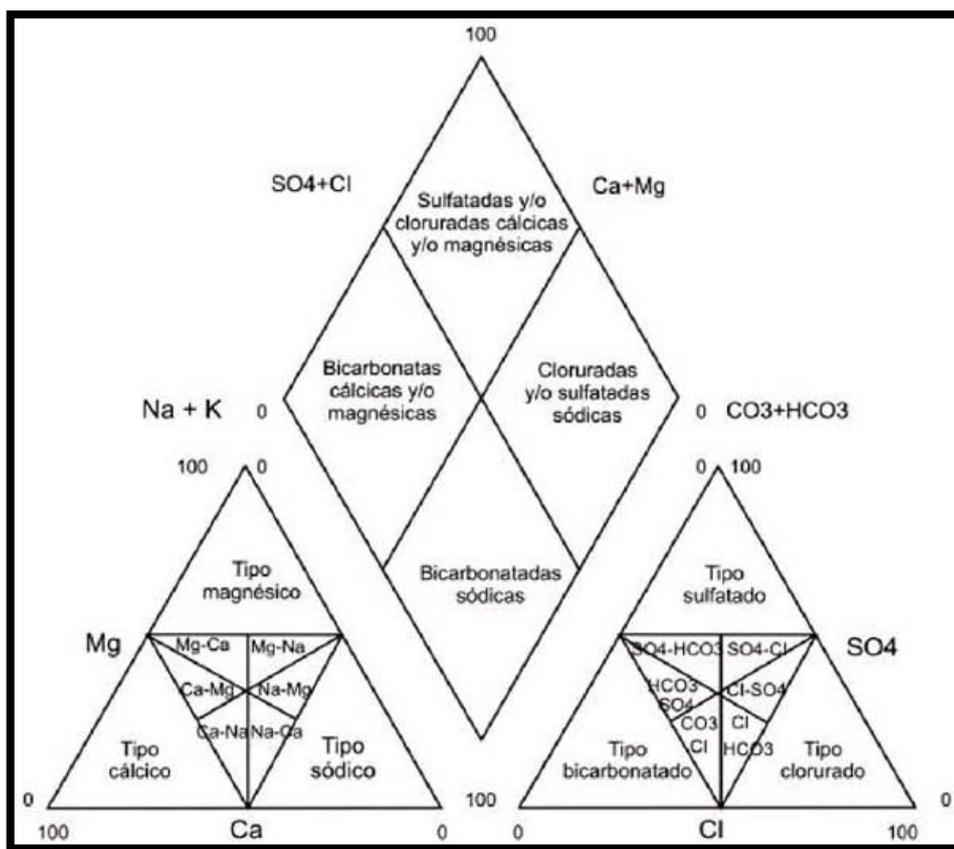


Figura N° 18. Diagrama de Piper

También se utilizó el diagrama de Stiff (Figura N° 19) el cual consiste en tres rectas divididas en seis segmentos por una perpendicular. La longitud de cada segmento es proporcional a la concentración en meq/L de un determinado ion. Los segmentos situados a la izquierda representan, de arriba a abajo, la concentración en Na^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} , y a la derecha Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- . Los extremos de los segmentos se unen dibujando un polígono cuya forma puede asociarse a un determinado tipo de agua.

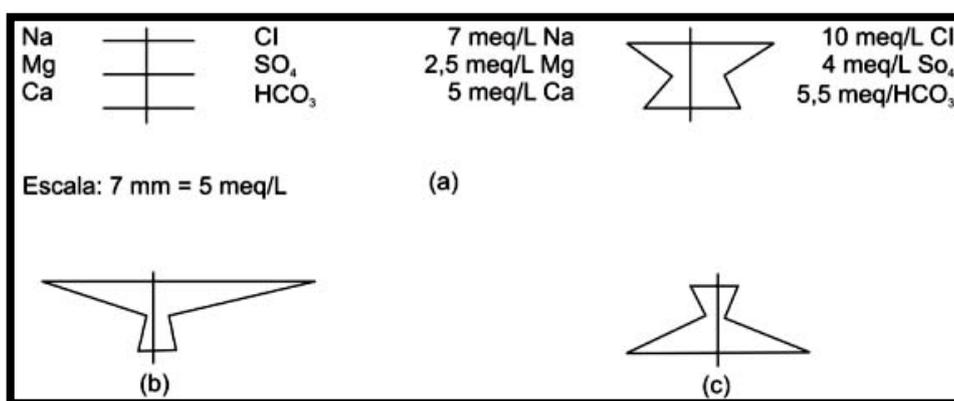


Figura N° 19. Representación del diagrama de Stiff

4.1.3. Origen

Al hablar de origen, se hace referencia tanto a las fuentes que le aportan la anomalía térmica como a la proveniencia del agua.

4.1.3.1. Fuentes de calor

- El gradiente geotérmico;
- Las reacciones físico-químicas;
- El intercambio con el calor del terreno;
- La desintegración de sustancias radiactivas;
- El volcanismo, siendo la actividad volcánica productora de calor por las emisiones de magma y de aguas juveniles hipertermales;
- El enfriamiento y cristalización de magmas y
- Los esfuerzos mecánicos asociados al movimiento de las placas continentales.

Gradiente geotérmico:

Es definido como el aumento de la temperatura interna de la tierra en 1°C cada 33 mts de profundidad, pudiendo variar según el espesor de la corteza, la conductividad térmica de las rocas y el flujo de calor existente desde el interior de la Tierra hacia su superficie. El estudio de la distribución del flujo calorífico en la superficie terrestre demuestra que existen dos tipos de regiones muy diferentes que pueden denominarse zonas normales, que cubren más de un noventa por ciento de la corteza terrestre, con un flujo medio de $1,4 \mu\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{seg}$ y un aumento de la temperatura de 3°C cada 100 metros de profundidad, y zonas anormalmente calientes donde el flujo puede ser de dos y hasta diez veces superior al normal, lo que equivale a gradientes geotérmicos de 15 a 50 °C cada 100 metros.

Las zonas denominadas normales comprenden, por ejemplo, las grandes cuencas sedimentarias, los escudos continentales y las llanuras. Las zonas anormalmente calientes se encuentran en regiones de fracturas con actividad volcánica reciente, de gran actividad sísmica, y/o en zonas de débil espesor de corteza (Pinuaga).

Reacciones físico-químicas y desintegración de sustancias radiactivas:

Se distinguen las reacciones físico-químicas exotérmicas y la desintegración de minerales radiactivos. Las primeras comprenden las reacciones de oxidación y reducción, que por ejemplo para H. Schoeller, la oxidación de las piritas liberarían 0.034 cal/kg por litro de agua, lo que significaría un aumento de temperatura de 0.03°C (Castani op.cit.). Para algunos autores, este proceso no sería el causante principal de la temperatura de las aguas termales; sino que consideran como primordial que el origen de la energía calorífica de nuestro planeta se debe a la desintegración de minerales radiactivos presentes en las rocas. Todas las rocas de la corteza terrestre tienen pequeñas cantidades de elementos radiactivos, entre los que se encuentran: ^{40}K , ^{232}Th , ^{235}U y ^{238}U . Estos elementos se desintegran paulatinamente a través de una serie de reacciones nucleares hasta transformarse en ^{40}Ca el primero y Pb los tres últimos, liberando suficiente energía como para producir el flujo de calor que se observa en la superficie (Pinuaga).

En las siguientes tablas puede observarse la generación de calor por los elementos radiactivos mencionados y la producción media de calor en las rocas (Tabla N°1).

Generación de calor por los isótopos radiactivos y sus productos de desintegración							
Isótopos	Decae a	Vida media (10 ⁹ años)	Proporción de Isótopo %	Generación de calor (1) ¹ cal/gr.año			
^{238}U	Pb^{206}	4,50	99,27	0,70			
^{235}U	Pb^{207}	0,71	0,72	0,03			
^{232}Th	Pb^{208}	13,90	100	0,20			
K^{40}	Ca^{40} A^{40}	1,31	0,012	27.10 ⁻⁶			
Producción media de calor en rocas							
Tipo de roca	Concentración			Producción de calor (u cal/gr.año)			
	U p.p.m.	Th p.p.m.	K %	U	Th	K	TOTAL
Granito	4,7	20	3,4	3,4	4	0,9	8,3
Basalto	0,6	2,7	0,8	0,44	0,54	0,23	1,21
Peridotita	0,016	0,004	0,0012	0,012	0,001	0,0003	0,013

Tabla N° 1. Generación de calor por isótopos radiactivos (Bullard, 1973)

4.1.3.2. Origen del agua

Diferentes autores, con el pasar de los años, le han ido asignado diferentes causas. En 1887 A. Daubree le otorgo al vulcanismo el rol principal; en 1899 A. de Launay, demostró que la mineralización y la temperatura se explican por la circulación de las aguas subterráneas a diferentes profundidades. Otros autores solo admitían a la infiltración de las precipitaciones como única fuente, pero luego siguiendo a E. Suess (1903) y a A. Gautier (1905) se admite un doble origen: **meteórico y juvenil**.

Se llaman aguas meteóricas a aquellas que provienen de las precipitaciones. Estas se infiltran en el terreno y descienden por gravedad hacia las capas profundas, de donde luego ascienden por fisuras y fracturas abiertas (Castani op.cit.) llegando a la superficie producto de su menor densidad y la descompresión (Figura N° 20). De ahí que las características físico-químicas de estas aguas vienen dadas por la de los terrenos de donde provienen. El contenido en sales, la temperatura y sus características hidrológicas son muy variables y a menudo dependen de elementos hidrometeorológicos locales o regionales.

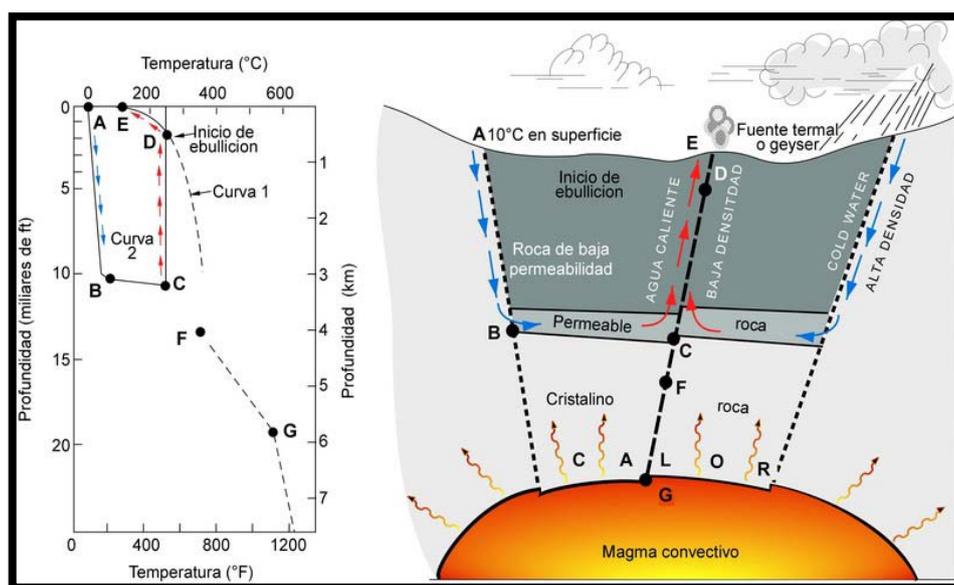


Figura N° 20. Obtención de una fuente termal desde la infiltración de aguas meteóricas

Las aguas juveniles o endógenas pueden ser de origen:

- **Magmático:** la cristalización de los magmas libera constituyentes volátiles que a menudo escapan hacia la superficie, estas aguas tienen una composición química independiente de la de la roca de donde han salido. Su contenido en sales, temperatura y sus características hidrológicas son relativamente constantes.

- Volcánico: producto de la solidificación de lavas y del vapor de agua de origen volcánico.
- Por reacciones químicas

Otros tipos de aguas pueden ser:

- Aguas fósiles: son las que quedan aprisionadas en los sedimentos cuando se depositan en los fondos marinos, los cuales posteriormente se transforman en rocas.
- Mixtas: es cuando se produce la mezcla de aguas juveniles o fósiles y meteóricas (Figura N° 21).

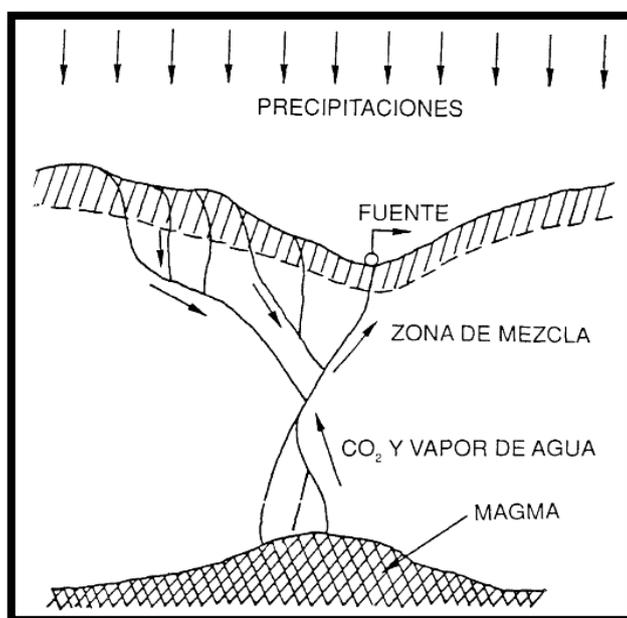


Figura N° 21. Esquema de la formación de aguas mixtas (Custodio op.cit)

4.1.4. Características hidrogeológicas

Para que se produzca la emergencia, más comúnmente surgencia, de las aguas termales, lo más frecuente es que el ascenso a la superficie sea a través de fracturas y fisuras activas; es decir, abiertas y en intersección de diferentes direcciones orogénicas como en una zona de neotectónica o de reactivación de fallas antiguas o de actividad volcánica.

Otros “accidentes” favorable a la permeabilidad por fisuración, pueden ser:

- Diaclasas y fisuras finas;
- Fallas y zonas de milonitización;

- Contactos geológicos y
- Filones y diques.

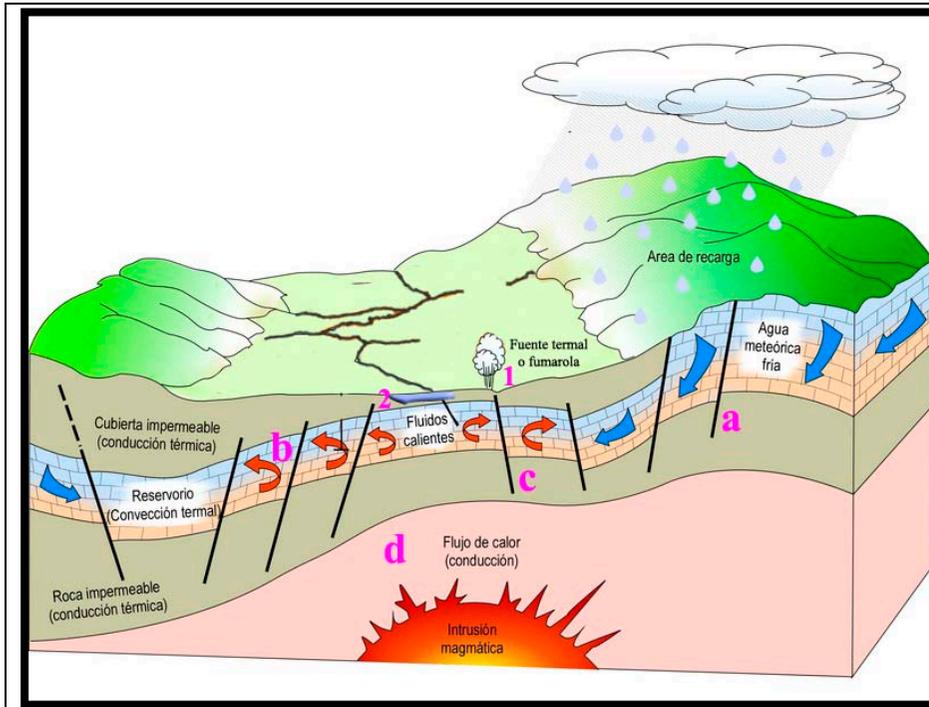
Estos “accidentes”, pueden originar que las emergencias se localicen y se alineen sobre las grandes fracturas del zócalo, en los puntos de cruce de accidentes jóvenes, Cuaternarios, Pliocénicos, Oligocénicos o Eocénicos, en los contactos de rocas de basamento y rocas sedimentarias, o en filones y diques que corten capas sedimentarias (Castani op.cit).

El mecanismo que da lugar a la surgencia, puede tener un origen hidrológico y físico. Hidrológico como la presión piezométrica y físico como la expansión del vapor de agua por vaporización y la acción de los gases ocluidos o disueltos por la presión del gas que emulsiona el agua provocando su ascenso.

4.1.4.1. Sistemas geotérmicos e hidrotermales

El conjunto de materiales, fluidos en movimiento, fracturas, foco caliente, etc., que intervienen en un área geotérmica forman un **sistema geotérmico**. Si el sistema geotérmico incluye agua en movimiento se llama también **sistema hidrotermal**, y debe incluir el flujo convectivo de agua fría descendente necesario para mantener la cantidad de agua existente en el sistema. Las áreas con manantiales termales, fumarolas, etc., son la manifestación externa de un sistema hidrotermal, aunque no siempre aparecen estas manifestaciones exteriores (Custodio op.cit.).

El esquema de un sistema geotérmico e hidrotermal puede ser el que se presenta en la figura N° 22 en el que además de existir una fuente de calor interna renovada por convección del magma, existe un flujo de agua que produce las fuentes termales y otras manifestaciones de calor interno. Las manifestaciones termales pueden ser directamente a través de grietas de circulación ascensional rápida o bien por calentamiento de un acuífero que recibe por ascenso rápido un pequeño aporte de aguas y vapores termales profundos.



Referencias:

Las flechas indican el movimiento del agua,

- a) Zonas de fractura y grietas con alguna permeabilidad,
- b) Acuífero calentado desde la cámara magmática.
- c) Grieta que permite la ascensión rápida del agua caliente,
- d) Material entre la cámara magmática y el acuífero a través de la que se conduce el calor y en la que se efectúa una posible convección de agua caliente y vapor por grietas.

- 1) fuente termal, agua o vapor.
- 2) acuífero calentado por aportes del acuífero b

Figura N° 22. Esquema de un sistema hidrotermal

4.1.5. Isotopos

La hidrología a base de isótopos ambientales constituye un campo de investigación relativamente nuevo, fundado en las variaciones observadas del contenido isotópico de las aguas naturales. La interpretación de las características isotópicas permite obtener valiosa información de alcance regional acerca del origen, la renovación y el tiempo de tránsito del agua en el sistema considerado.

Los isótopos ambientales de mayor interés hidrológico son los isótopos estables deuterio (hidrógeno 2), oxígeno 18 y los isótopos radiactivos tritio (hidrógeno 3) (este proporcionan información sobre el tiempo de tránsito o de renovación del agua de un sistema; las concentraciones inferiores a 2 o 3 UT (Unidades de Tritio) en un lugar continental del hemisferio boreal indican que la recarga de agua tuvo lugar antes de las dispersiones de tritio termonuclear, es decir, antes de 1953, mientras que las concentraciones superiores a 20 UT indican un flujo mucho más rápido del agua del sistema) y carbono 14 (útil para estudiar sistemas de aguas subterráneas en los que los tiempos de tránsito puedan ser muy prolongados; el contenido en ^{14}C disminuye por decaimiento radiactivo, y la fracción que queda del contenido original indica el tiempo transcurrido desde que salió de la zona del suelo, es decir, el tiempo transcurrido desde que se infiltró con el agua).

Los isótopos del hidrógeno y del oxígeno constituyen trazadores geoquímicos ideales de las aguas, pues sus concentraciones no suelen alterarse por interacción con las materias de los acuíferos. En cambio, los compuestos del carbono en las aguas subterráneas pueden tener interacciones con dichas materias, lo que complica la interpretación de los datos obtenidos con el carbón 14.

4.1.5.1. Isotopos estables del hidrogeno y del oxigeno en el ciclo hidrológico

En 1961, Harmon Craig encuentra una relación lineal entre el ^{18}O y ^2H para las aguas superficiales a escala global y la denomina “Craig’s Global Meteoric Water Line” (Línea de Agua Meteorológica Global de Craig), representada por la siguiente ecuación:

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10 \text{‰ smow}$$

Donde $\delta^2\text{H}$ es la relación isotópica de Deuterio δ y ^{18}O es la relación isotópica de Oxígeno.

Siendo el estado líquido del agua de mar uno de los pasos del ciclo hidrológico, ya que este contiene el 98% del agua líquida presente en la Tierra, su composición promedio se ha tomado como el estándar o patrón internacional (SMOW, Estándar Mean Ocean Water) para el análisis de información isotópica. Toda concentración de isótopos estables en la molécula de agua se presenta entonces como la desviación delta (δ) con referencia al patrón antes mencionado, de la siguiente manera:

$$\delta = \frac{R - R_{SMOW}}{R_{SMOW}}$$

Donde R es la llamada relación isotópica y representa el cociente entre los isótopos estables, ya sea del hidrogeno ($^2\text{H}/^1\text{H}$) o del oxígeno ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$).

Una década más tarde es introducido el patrón VSMOW (Viena Standard Mean Ocean Water) que es utilizado actualmente. El subsiguiente monitoreo isotópico de la precipitación mundial organizado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), a través de la red mundial para isótopos en la precipitación GNIP ha refinado esta relación obteniendo la siguiente expresión (Clark; Fritz, 1997):

$$\delta^2\text{H} = 8.13 \delta^{18}\text{O} + 10.8 \text{‰ vsmow}$$

Las variaciones de las razones isotópicas D/H y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de muestras de agua se expresan en forma de desviación por mil (δ ‰) con respecto a las razones isotópicas del agua oceánica media, que constituye el patrón de referencia SMOW (Standard Mean Ocean Water) (Figura N° 23).

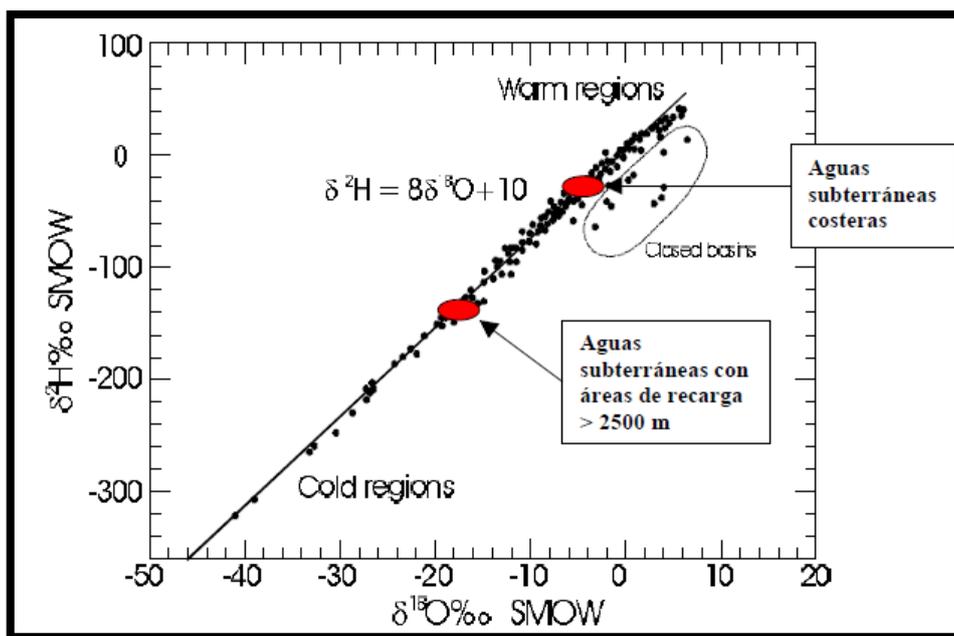


Figura N° 23. Composición Isotópica de la Precipitación a Nivel Global.

La razón isotópica R se determina con un espectrómetro de masas especial.

El principio básico de la aplicación de isótopos estables para evaluar el origen del agua subterránea, y el área de recarga, es que la composición isotópica del agua subterránea es un reflejo de la composición isotópica (ponderada por la cantidad de precipitación) de la precipitación en las áreas de recarga. La otra razón es que la composición isotópica del agua subterránea se conserva a lo largo de la dirección de flujo del agua subterránea. Otro fenómeno que puede afectar la composición isotópica de aguas superficiales es la **evaporación**. Durante este proceso, el fraccionamiento es mayor para el ^{18}O que el ^2H , luego las aguas afectadas por evaporación tienden a seguir una relación lineal que se aparta de la línea meteórica y que se llama línea de evaporación. Esto se puede ver en la figura N° 23, la que muestra que a medida que la evaporación aumenta, el agua residual se va enriqueciendo isotópicamente a lo largo de una pendiente diferente que la línea meteórica. Las aguas que se han evaporado en un 80% son mucho más enriquecidas en ^{18}O y ^2H que las aguas que se han evaporado en un 20%.

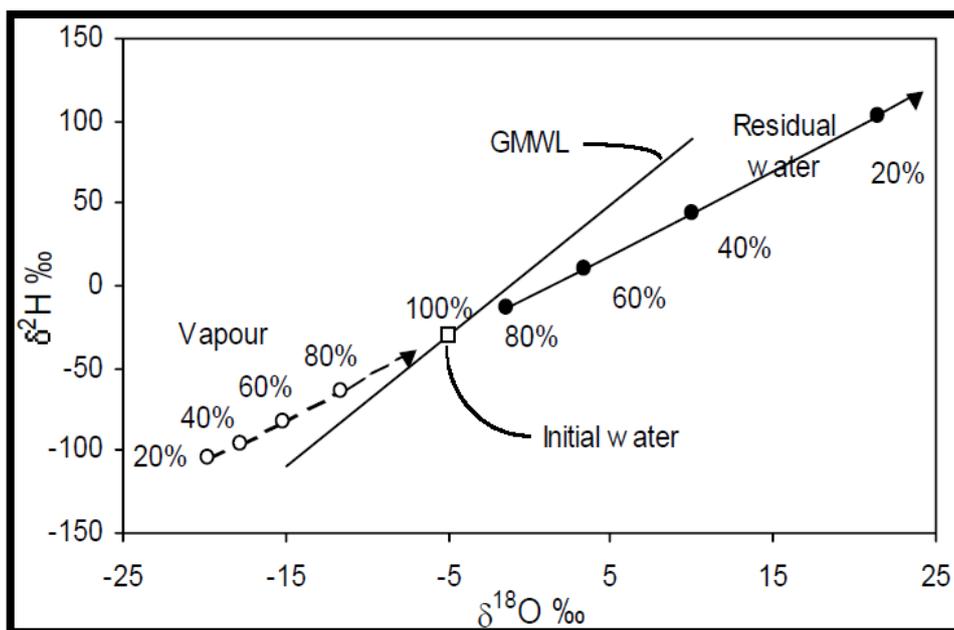


Figura N°24. Efecto de la evaporación en la composición isotópica del agua. Fuente: Aquaconsult

Como el vapor residual requiere temperaturas cada vez más bajas para condensarse, se observa una relación entre la temperatura de condensación y la composición isotópica de las precipitaciones conforme disminuye la temperatura de condensación se reduce el contenido en isótopos pesados de las precipitaciones.

Esta dependencia con respecto a la temperatura da lugar a:

- 1) Variaciones estacionales del contenido isotópico de las precipitaciones (las precipitaciones invernales contienen menos isótopos pesados que las estivales);
- 2) Variaciones con la latitud (las precipitaciones en latitudes altas son más pobres en isótopos pesados que las precipitaciones en latitudes bajas);
- 3) Variaciones con la altitud (el contenido en isótopos pesados de las precipitaciones disminuye al aumentar la altitud) (Figura N° 25). Este último efecto tiene especial importancia en los estudios hidrológicos regionales, ya que, por ejemplo, permite diferenciar las aguas subterráneas procedentes de áreas de recarga situadas a alturas distintas (www.iaea.org).

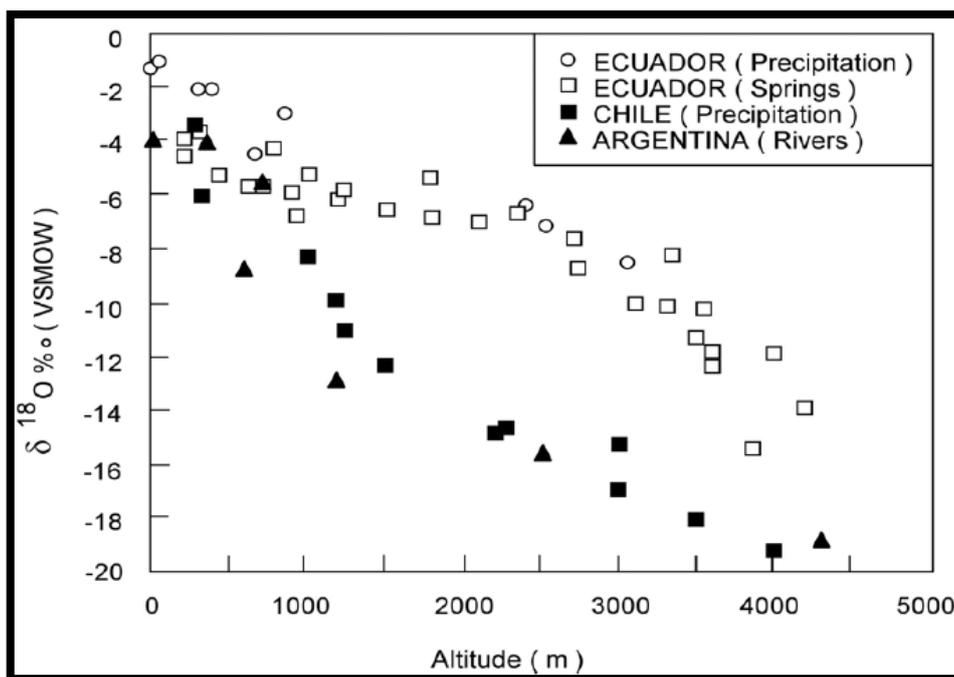


Figura N° 25. Efecto de la altura en la composición isotópica de la precipitación. Fuente: Aquaconsult

4.1.6. Geotermómetros

Un geotermómetro es un algoritmo que relaciona la temperatura de aguas termales con alguna combinación lineal de los logaritmos de las concentraciones de ciertos solutos presentes en el fluido (Fournier, 1979, 1981; Fouillac; Michard, 1981).

Existen diversos tipos de geotermómetros dependiendo de la naturaleza de los componentes seleccionados, entre ellos: geotermómetros químicos, geotermómetros de gases y geotermómetros isotópicos. (Para este trabajo sólo se consideraron los primeros).

El argumento fundamental para la proposición de un geotermómetro químico, es el que algunas de las reacciones que ocurren entre la roca y el fluido térmico alcanzan un estado de equilibrio el cual define ciertas condiciones de presión, temperatura y concentración. Bajo estas circunstancias, la combinación lineal de los componentes de la reacción reflejará la dependencia de la temperatura con respecto a la constante de equilibrio de dicho estado particular.

Hay muchos geotermómetros propuestos como por ejemplo, el Na/K (Fournier, 1981), SiO₂ (Truesdell, 1976), Na-K-Ca (Truesdell y Fournier, 1973), etc.

4.1.6.1. Geotermómetro SiO₂

Es el que se utilizó para este trabajo porque tiene su base en la variación de la solubilidad del cuarzo con respecto a la temperatura (Figura N° 26). El algoritmo propuesto por Truesdell (1976) para un intervalo de aplicación entre 0 y 250°C es:

$$T(\text{SiO}_2) = [1309 / (5.19 - \log(\text{SiO}_2))] - 273.15$$

Donde SiO₂ está expresado en mg/kg.

Esta ecuación proporciona la temperatura de equilibrio del agua termal asumiendo que no existe precipitación de sílice, no hay pérdida de vapor y no se presentan mezclas de aguas.

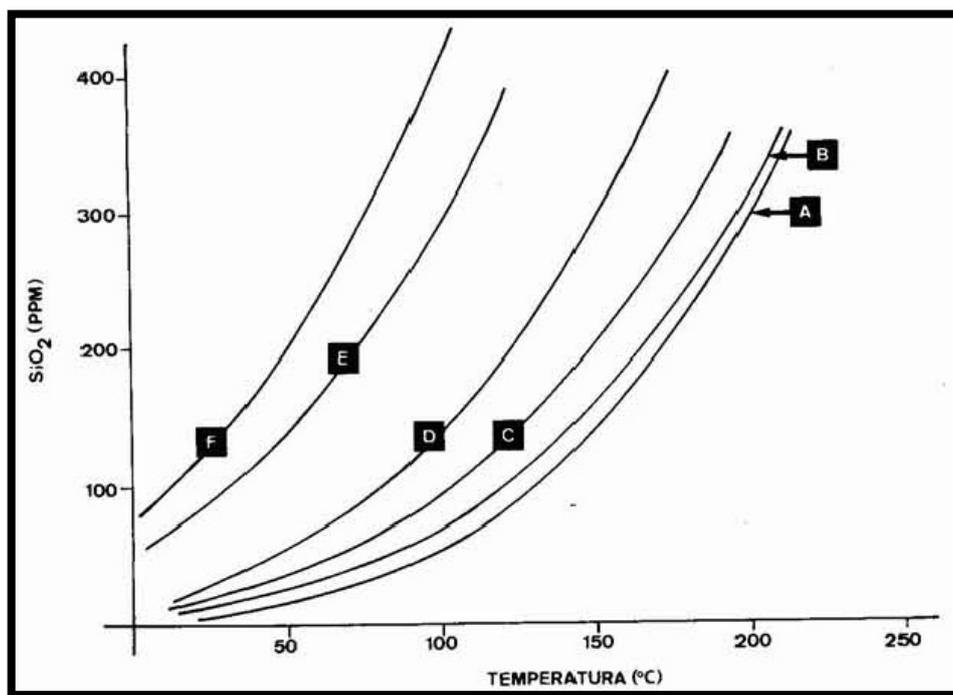


Figura N° 26. Geotermometría de la sílice

Geotermometría de la sílice. Curvas de solubilidad. A) geotermómetro sílice-cuarzo (media de los calibrados de Fournier y Truesdell, 1970; Fournier, 1977 y Michard, 1979). B) geotermómetro sílice-cuarzo (media de los calibrados de Siever, 1962 y Arnorsson *et al.*, 1983). C) geotermómetro sílice-calcedonia (Fournier, 1977). D) geotermómetro sílice- α cristobalita (Fournier, 1977). E) geotermómetro sílice- β cristobalita (Fournier, 1977). F) geotermómetro sílice-sílice amorfa (Fournier, 1977).

4.2. El “termalismo” en Catamarca

Catamarca presenta un importante número de sitios con aguas termales de variadas temperaturas y composiciones químicas distribuidos en casi la totalidad de sus departamentos (Figura N° 27). Algunas, por sus características mineromedicinales son comparadas con importantes fuentes europeas (principalmente las del Dpto. Belén), aunque no son tan reconocidas tanto a nivel provincial como nacional. Los primeros estudios de estas termas fueron realizados por la Comisión Nacional de Climatología y Aguas Minerales, en su volumen correspondiente a la provincia de Catamarca en 1941 magistralmente descriptas por Herrero Ducloux; Sussini; Brandan (et.al.).

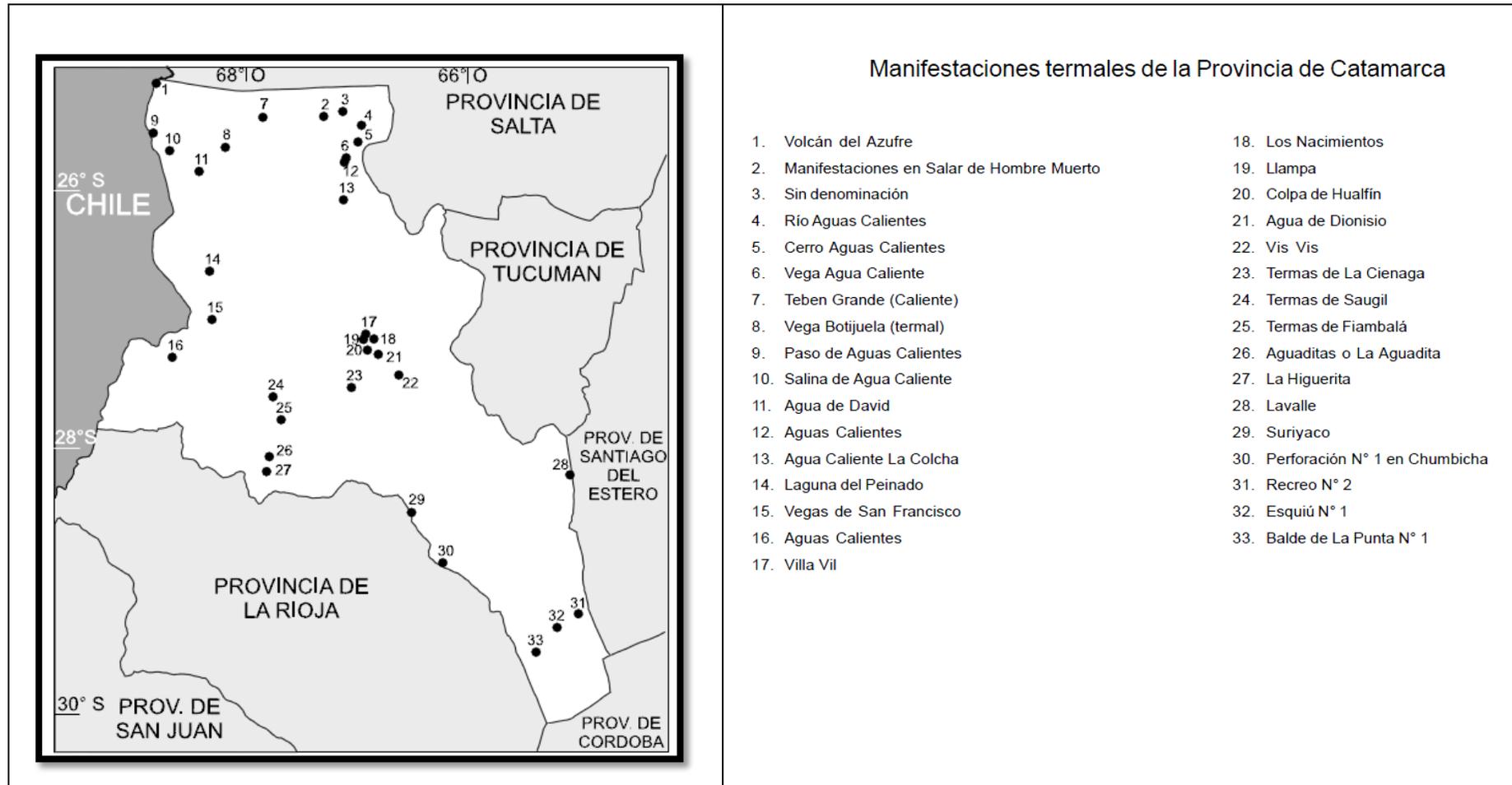


Figura N°27. Mapa de manifestaciones termales en la Prov. de Catamarca. Fuente: Catalogo de Manifestaciones Termales de la República Argentina

Dentro del departamento Belén se encuentran numerosas fuentes termales las cuales tienen un carácter de atermal a hipertermal. Estas son:

- Los Nacimientos;
- La Colpa;
- La Quebrada;
- Llama;
- Cura Fierro;
- Los Baños Grandes de Villa Vil;
- Villa Vil;
- Aguas de Dionisio y
- La Ciénaga.

En el departamento Andalgalá se encuentran:

- Los Nacimientos de Vis Vis y
- Vis Vis.

A continuación una breve descripción, siguiendo los escritos del doctor Herrero Ducloux (op.cit.), de las fuentes que no fueron objeto de estudio pero que merecen su exposición.

Fuente de Cura Fierro:

“Antes de llegar a las termas de Los Baños Grandes de Villa Vil, dentro de la quebrada de las Termas (o los Baños), dos kilómetros antes se pasa por la fuente de Cura Fierro”. La surgente se encuentra sobre la ladera oriental, “a aproximadamente 15 metros de altura, en areniscas rojizas”. Según el autor, el agua es “acidulada alcalina bicarbonatada muy fuerte -ligeramente sulfatada- clorurada y silicatada sódica, de mineralización muy fuerte e hipotónica” con una temperatura de 14°C.

Fuente de Llama:

“Situada en la quebrada de Villa Vil sobre la falda occidental del cerro Hualfín” en las cercanías de la familia Llama. Está formada por una hondonada natural y dos ojos cercanos de aguas con características iguales a la fuente principal. “El agua está clasificada como hipotermal, acidulada alcalina bicarbonatada - silicatada - clorurada, sódica - cálcica, de mineralización fuerte e hipotónica” con una temperatura de 28°C.

Fuente de La Colpa:

Se halla en Hualfín, al Oeste, sobre una lomadita de areniscas rojizas. “Varios son los ojos de agua que contribuyen a formar el colpar, pero el ojo mayor surge en el fondo de un

pozo tapizado con toba calcárea de agua dulce”. El agua corresponde a ser clasificada como “hipotermal, acidulada alcalina bicarbonatada fuerte, silicatada - clorosulfatada sódica - ligeramente cálcica. De mineralización fuerte hipotónica” con una temperatura de 25.8°C.

Fuente de la Ciénaga:

Ubicada “sobre la margen derecha del río Hualfín en el pueblo de la Ciénaga. Sus aguas forman una gran ciénaga llena de cañas y surgen del costado occidental de una hoyo profunda que tiene cerca de cuatro metros de diámetro. Corresponde a un agua hipotermal, sulfatada - alcalina bicarbonatada - silicatada, sódica - cálcica, de mineralización débil e hipotónica” con una temperatura 30°C.

Fuente de Vis Vis:

Se sitúa en la quebrada de Amanao por el camino que va a las Minas de Atajo. Una vez que se pasa el puesto de Vis Vis, donde se ensancha la quebrada, “aparece sobre la playa arenosa un colpar en cuyo principio y entre unos cantos rodados surgen los ojos de agua”. Su clasificación sería: “agua mesotermal sulfatada - clorurada - alcalina bicarbonatada débil - sódica - cálcica, de mineralización media e hipotónica” con 33.8°C.

CAPITULO V - RESULTADOS

Para este estudio fue primordial la información brindada por distintas instituciones públicas y privadas, además de la colaboración en la recopilación de estudios y bibliografía de docentes y egresados de la carrera, con aportes en cartografía, software, herramientas e insumos de trabajo tanto en campo, laboratorio y gabinete; los cuales fueron analizados y procesados en forma detallada para lograr los objetivos planteados.

5.1. Identificación y ubicación de las fuentes de estudio

Los sitios termales en este trabajo se separaron en el contexto geográfico en el que se encuentran (Figura N°28), para su mejor descripción e interpretación en:

- ✓ Sierra de Hualfín: fuentes termales de Los Nacimientos, La Quebrada, Villa Vil y Los Baños Grandes de Villa Vil.
- ✓ YMAD - Vis Vis: fuentes termales de Aguas de Dionisio y de Vis Vis.

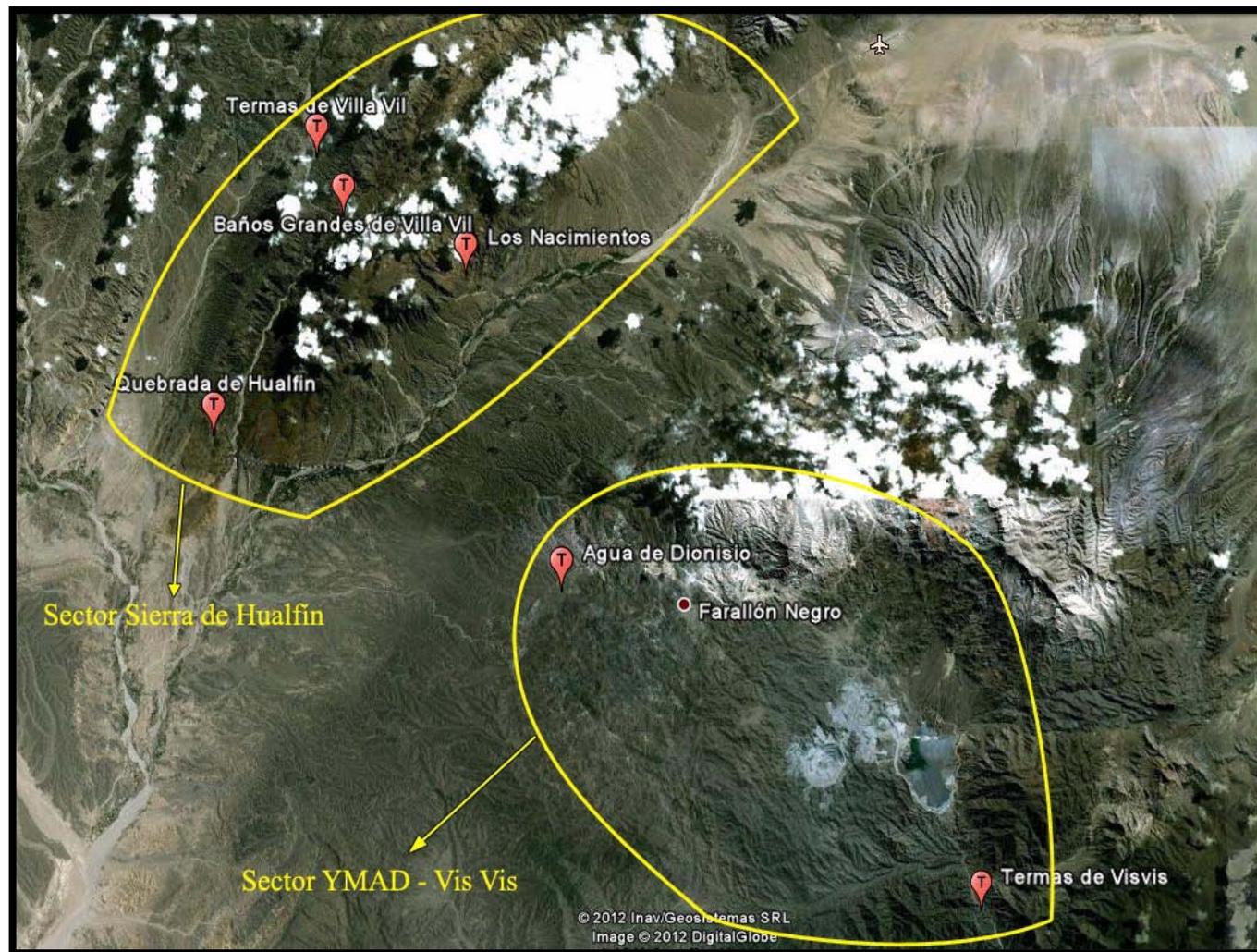


Figura N° 28. Imagen Google Heart con la ubicación de los sectores y sus respectivas fuentes termales

A continuación la descripción de las fuentes termales de estudio siguiendo las maravillosas frases del doctor Herrero Ducloux (op. cit.) pero con el adiciónado de información geológica y estructural correspondiente al trabajo de campo.

5.1.1. Sector Sierra de Hualfín

5.1.1.1. Fuente Los Nacimientos

Denominada por Herrero Ducloux como Fuente de Nacimientos y ubicada en el departamento Santa María. Esta fuente en el presente no corresponde al departamento anteriormente mencionado, sino que es parte del departamento Belén.

5.1.1.1.1. Ubicación:

“Está situada en una quebrada del cerro Hualfín, que se abre sobre el valle del río del mismo nombre hacia el Oeste” a los 27° 09'20,5” de latitud Sur y 66° 45'35,7” de longitud Oeste.

5.1.1.1.2. Acceso:

Para llegar a las termas se sigue por la Ruta Nacional N° 40 saliendo de Belén y subiendo por San Fernando, El Eje y Hualfín. Desde Hualfín hasta los Nacimientos de Abajo, aproximadamente donde se encuentra la entrada a las termas, se recorre una distancia de 13 Km. Desde esta entrada se sigue un camino de tierra de fácil acceso que cruza el río Los Nacimientos para después de 1.5 Km subir por una cuestecilla la cual se la puede hacer a pie o con vehículo a tracción simple (Figura N° 29).



Figura N° 29. A la izquierda el camino a las termas, a la derecha la cuestecilla

“Nacimientos se encuentra a 2300 metros sobre el nivel del mar: pero esta cifra no sería según Brackebusch superior a 1900, en tanto que otros creen que llega a 3100”.

Con G.P.S. esta fuente se encontraría más precisamente a 2119 m.s.n.m.

5.1.1.1.3. Datos de la fuente:

“Si la vegetación fuese más abundante, la quebrada de Nacimientos sería uno de los parajes más hermosos de esta región; la fotografía de la figura N° 29 muestra el curioso aspecto de las barrancas de arenisca roja que la rodean, pero también hace ver la desnudez del paisaje, donde sólo aparecen como más abundantes el *Baccharis glutinosa* (Jarilla) que alcanza a dos metros y algunas gramináceas insignificantes”.

Aparentemente en tiempos pasados (o quizás en épocas de lluvia), en el sitio donde están los baños, el agua formaba saltos y rellenaba hondonadas labradas naturalmente en la roca granítica (Figura N° 30). Hoy el agua brota a 0.5 - 1 metro sobre el nivel del suelo, en distintos ojos, con distintos caudales y temperaturas viéndosela surgir de diaclasas del granito.



Figura N° 30. Hondonada en el granito formando un baño natural

5.1.1.1.4. Estratigrafía del sector:

➤ Formación Chango Real, Paleozoico inferior:

La formación Chango Real tiene una edad incierta, González (1985) lo atribuye al Ordovícico, mientras que Lazarte (1988-1992) le asigna edad Cámbrica.

Esta formación se observa en algunos de los sitios termales presentes en la Sierra de Hualfín. La litología más característica de esta unidad es un batolito tonalítico-granodiorítico, localmente con granitos (Viruel, 1973). En las termas de Los Nacimientos, se presenta como del tipo porfídico de color rosado, gris, de grano grueso a mediano, rico en feldespato potásico esencialmente microclino, alcanzando el tamaño de los cristales hasta unos 10 cm. de longitud de color blanquecino observándose en cantidad (Figura N° 31).



Figura N° 31. Pórfido granítico con “fantasmas” de feldespatos

También se observó otro tipo de granito de grano más fino en contacto con el pórfido (Figura N° 32) que según González Bonorino (1950) se trataría de una facie comagmatica del granito porfídico principal. En observaciones de campo este segundo granito se presenta como en capa sobre el pórfido (Figura N° 33).



Figura N° 32. Contacto entre el granito de grano fino (a la derecha) y el pórfido (a la izquierda)



Figura N° 33. Manto de granito de grano fino sobre el pórfido

En el granito se diferencio en forma de vetas de 20 a 40 cm. de potencia, una roca de matriz roja cristalovitrea con cristales de cuarzo cristalino (Figura N° 34). Según Bravo (op.cit.) corresponderían a cataclasitas con chert en sus hastiales.



Figura N° 34. Cataclasita cortando al granito

➤ Formación Hualfín, Paleógeno:

La Formación Hualfín (Figura N° 35), unidad basal de la sucesión sedimentaria Cenozoica, propuesta por Muruaga (1998, 2001) y Bossi (1999), constituye una sucesión de areniscas rojo ladrillo oscuro a violáceo, finas y medias, estratificadas en capas de 1 a 2 metros, macizas, de base plana, con laminación paralela, inclinada, bien cementadas o con cementación en forma de bochas. La sección inferior de la unidad presenta rodados dispersos y algunas intercalaciones de areniscas conglomerádicas con guijas y sábulo de granitoides, metamorfitas y pocas vulcanitas intermedias. El nivel de diagénesis y litificación es elevado, aunque variable con una cementación carbonática o silíceo importante (Muruaga op.cit.) Se observó que además de coincidir con la descripción litológica de esta formación en este sitio, que hace la autora anteriormente mencionada; también se encontró una capa de travertinos (Figura N° 35) de los cuales no hay mención de ellos en ninguna bibliografía consultada pero son propios de sistemas termales.

Yace en disconformidad sobre el basamento cristalino granítico (Formación Chango Real). La participación volcánica es reducida. En Los Nacimientos, la discordancia con el basamento es de tipo progresiva (Riba, 1976), producida por la actividad de fallas normales que involucraron los bloques de basamento.

La Formación Hualfín no ha brindado restos fósiles hasta el presente ni tiene dataciones radiométricas y su edad es incierta. La relación de yacencia y similitud litológica con la Formación Saladillo, es lo que ha permitido a Bossi (op.cit.) ubicarla tentativamente en el Paleógeno sugiriendo un ambiente de corrientes episódicas someras de alta energía en un clima semiárido, con depósitos de planicie de inundación fuertemente oxidados.

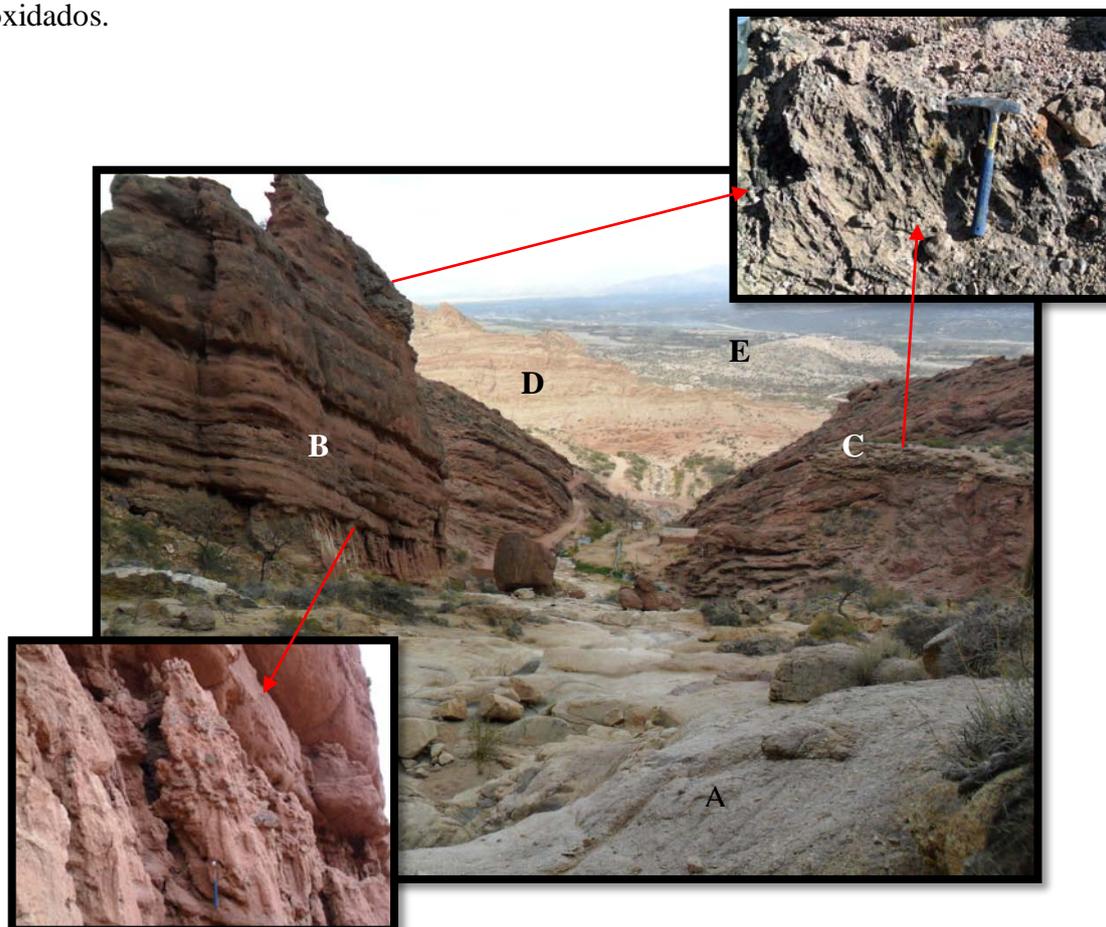


Figura N° 35. En primer plano la Fm. Chango Real (A) y en discordancia la Fm. Hualfín (B) suprayacente a esta ultima los travertinos (C); al fondo la Fm. Chiquimil (D) y Andalhuala (E). Vista al Este

➤ Formación Chiquimil, Mioceno tardío temprano:

El término Formación Chiquimil fue introducido por Bossi y Palma (1982) sobre la base de una reconsideración y valorización de los estudios estratigráficos llevados a cabo por Stahlecker en 1926 (en Riggs y Patterson, 1939; Marshall y Patterson, 1981).

La unidad es litológicamente muy variable, aunque se caracteriza por su predominante color amarillo claro y su coherencia mucho más friable que las unidades limitantes. Consiste en general en una alternancia de areniscas finas en conjuntos gruesos

(macizos, laminados paralelos o con estratificación cruzada) que alternan con limolitas y arcilitas de colores variados entre pardo amarillento, rojo y verde claro, generalmente es moderadamente salina y con venillas de yeso.

Las pelitas contienen una rica fauna de vertebrados e impresiones y carbonizaciones de hojas y tallos. Se puede registrar niveles de toba en algunos sectores.

Según Muruaga (op.cit.) la Formación Chiquimil puede ser dividida en tres miembros: Los Baños (inferior), El Áspero (medio) y El Jarillal (superior). Los hallazgos fósiles en el área de Villa Vil han sido ubicados en el Huayqueriense por Powell et. al. (1998). La edad Huayqueriense de esta fauna está acotada en el intervalo 6,8-9 Ma (Flynn y Swisher, 1995) sugerido por radiometría, o sea Mioceno tardío temprano (Cowle y Basset, 1989).

El Miembro superior de la Formación Chiquimil, El Jarillal, aflorante en los sectores aledaños a los surgentes termales (Figura N° 36), está formado por una arenisca gruesa en capas tabulares irregulares macizas y algunas capas de areniscas gruesas sabulíticas con estratificación cruzada en artesa, pardas amarillentas a rojizas. Los rodados son subredondeados a angulosos, de composición granítica, gnéisica y en menor escala, volcánica.



Figura N° 36. Mb. El Jarilla, Fm. Chiquimil

Los sedimentos de estas dos formaciones, se muestran generalmente como un relieve abrupto, también se observan plegamientos de muy pequeña escala predominando las estructuras monoclinales, para González Bonorino (op. cit.) no se tratarían de verdaderos plegamientos sino de una dislocación a causa del ascenso de los bloques cristalinos. Estos estratos inclinan aproximadamente entre 30° y 70° al Este, presentando una suave flexura y señales de movimientos diferenciales entre la cobertura y el basamento granítico.

Tanto en el flanco oriental como occidental, fracturas de dirección submeridional, afectaron los afloramientos de ambas laderas de la Sierra de Hualfín.

➤ **Formación Andalhuala, Mioceno tardío a Plioceno temprano:**

La introducción de la Formación Andalhuala (Andalhuala en Kraglievich, 1934), proveniente del valle de Santa María, en esta zona de estudio, fue sugerida por Bossi (1987, 1993, 1999) y Muruaga (1998). La Formación Andalhuala sería correlacionable con la Formación El Cajón (Turner, 1973), en referencia al Grupo El Bolsón. Respecto a la edad, Bossi (op. cit.) indica una edad Miocena tardía a Plioceno temprano, sobre la base del contenido fosilífero, edades radiométricas y magnetoestratigrafía del área de la Puerta de Corral Quemado.

Esta unidad corresponde a una sucesión predominantemente arenosa castaño clara a grisáceas de estratos tabulares continuos. Es posible dividirla en dos miembros:

- a) un miembro inferior compuesto por areniscas de grano fino a muy fino y limos de color gris amarillento algo rosados y/o verdosos con abundantes intercalaciones de yeso y
- b) un miembro superior compuesto por areniscas y limos de color castaño con niveles conglomerádicos y bancos de tobas cineríticas.

Los afloramientos se encuentran en la entrada a la quebrada de las termas, bordeando la margen izquierda del río Los Nacimientos, en la foto de la figura N° 35 se la observa como una loma.

La sucesión presenta evidencias paleoclimáticas que indican una creciente aridez hacia la parte superior; los conglomerados y arenas gruesas indican flujos mantiformes y con frecuencia hiperconcentrados. Posiblemente el clima era más húmedo que el actual presentándose una sabana de gramíneas (vegetación C3 en Latorre et al., 1997).

5.1.1.2. Fuente La Quebrada

5.1.1.2.1. Ubicación:

Se encuentra al Sur Oeste de la Sierra de Hualfín mas precisamente a los 27°12'48,3” de latitud Sur y 66° 51'57,3” de longitud Oeste a 1877 m.s.n.m.

5.1.1.2.2. Acceso:

Para llegar a las termas, partiendo de Belén por Ruta Nacional N° 40, aproximadamente 2 Km. antes de llegar a Hualfín, se toma el camino (señalizado) que lleva al sitio. Desde aquí son nuevamente unos 2 Km. por camino de tierra cruzando el rio Villa Vil.

5.1.1.2.3. Datos de la fuente:

El paisaje en este sector de la sierra presenta una variada gama de colores, estos van de los pardos oscuros, pasando al rojo ladrillo, para terminar en un castaño claro (Figura N° 3). El diferente grado de litificación de estas areniscas y su erosión, han provocado quebradas y paredones, de significantes alturas con geofomas que llevan a la imaginación.

Ya llegando al camping de las termas, el verde de los arboles de algunos algarrobos (*Prosopis nigra*, *Prosopis alba*), retamos (*Bulnesia retamo*) y chañares (*Geoffroya*), fiel indicio de la presencia de agua, reconfortan la aridez y el calor acechante de los aproximadamente 20 minutos de camino en camioneta.



Figura N° 37. Panorámica del sector Sur de la Sierra de Hualfín. Vista al Oeste

5.1.1.2.4. Estratigrafía del sector:

El afloramiento de agua termal en este sitio no está expuesto porque ha sido captado (aparentemente justo de donde surge) y guiado por caños a los baños que se hicieron para su aprovechamiento; pero se estima que el agua brotaría del contacto entre la Formación Las Arcas y Los Baños, ya que en campo la diferencia y el contacto entre formaciones es bastante apreciable (Figura N° 38).

➤ **Formación Las Arcas, Mioceno Medio:**

Incluye esta formación un espeso paquete de conglomerados, limos, arcilitas y areniscas finas y medias, macizas o con laminación paralela, rojo ladrillo a castañas rojizas, rodados dispersos y paraclastos pelíticos. Se trata de bancos de dureza variable, propiedad física que determina un relieve accidentado y abrupto, donde se destacan farellones de arenisca. La formación presenta en su parte inferior y media una típica sedimentación gradada (Muruaga, 1999).

La edad mínima considerada por Bossi (op. cit.) para esta formación es Mioceno Medio, considerando dataciones de Sasso (en Bossi, 1997) para un cuerpo subvolcánico intruído en el Miembro El Áspero de la Formación Chiquimil. Este autor sugiere que la Formación Las Arcas fue acumulada en una gran planicie poblada de barreales (algunos bañados o lagunas semipermanentes) y cursos de agua que discurrían por un fondo de cuenca plano de muy escasa pendiente. El clima era cálido y húmedo en la estación estival y seco en el invierno, como posible explicación para su elevado contenido en pigmento de óxido férrico.

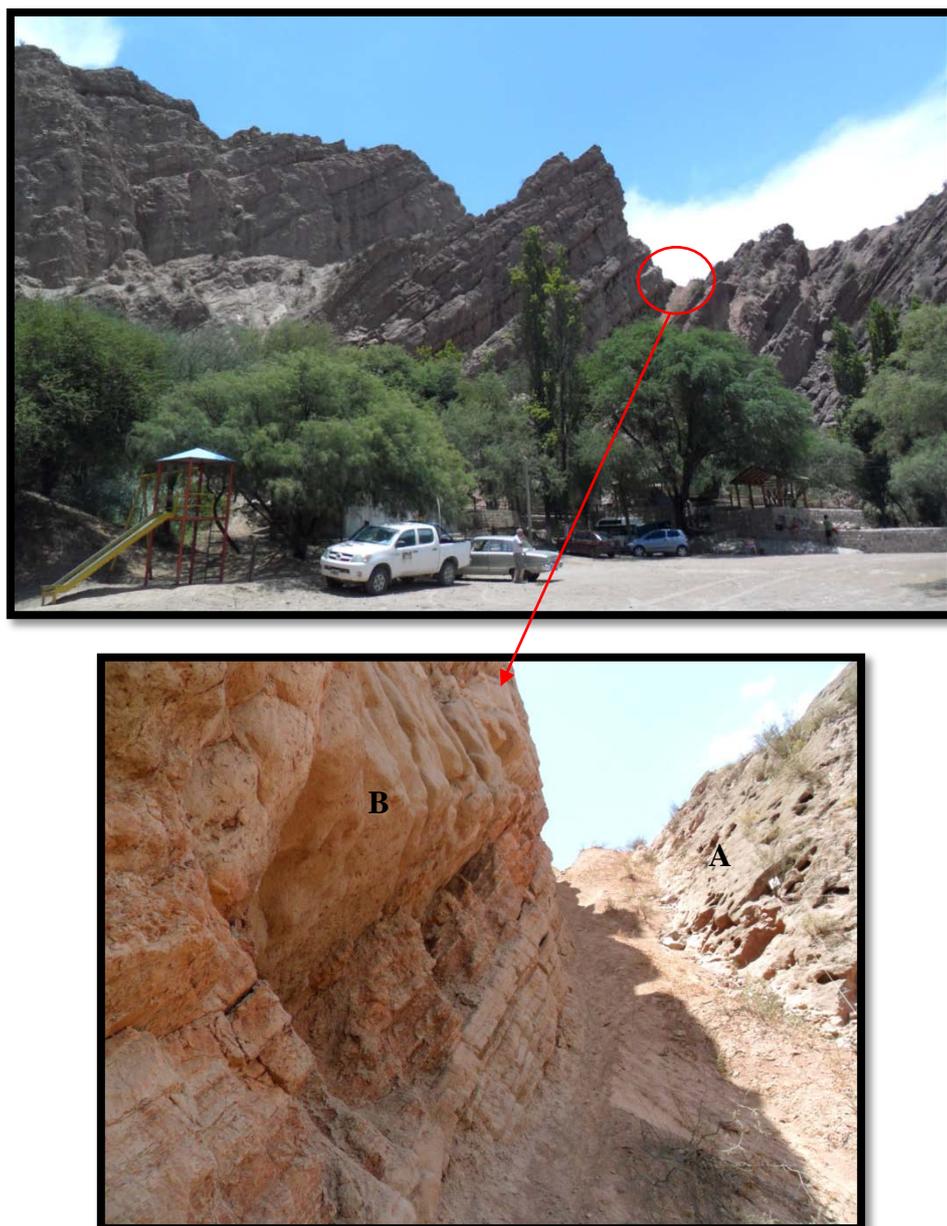


Figura N° 38. Contacto entre la Fm. Las Arcas (A) y los Baños (B)

➤ Formación Chiquimil, Miembro Los Baños, Mioceno Superior:

Consiste en una alternancia de areniscas castañas amarillentas finas en conjuntos gruesos macizos o laminados paralelos que alternan con limolitas y arcillitas de colores variados entre pardo amarillento, rojo y verde claro (Figura N° 39).

Ambas formaciones, que inclinan al Oeste, se diferencian en campo por su marcado grado de litificación, el color, la granulometría del material y la forma en que fue afectada por la erosión



Figura N° 39. Alternancia de areniscas, limolitas y arcillitas del Mb. Los Baños

5.1.1.3. Fuente Los Baños Grandes de Villa Vil

Estas fuentes termales (denominadas por Herrero Ducloux como fuentes de Villa Vil) “toman su nombre del pueblo de Villa Vil, o Billa Vil (Billa liebre, vil lugar o pueblo) situado al noroeste de las fuentes”.

5.1.1.3.1. Ubicación:

Están situadas en el fondo de una quebrada, sobre la falda occidental de la Sierra de Hualfín en su prolongación al norte a los 27°8'4" de latitud Sur y 66° 48'41,1" de longitud Oeste.

5.1.1.3.2. Acceso:

“Para llegar a las vertientes se sigue la quebrada de Villa Vil, hasta encontrar la de las Termales; el viajero reconoce sin dificultad el punto de unión de las dos quebradas (Figura N° 40), por el río que baja de las fuentes; luego se sigue hacia el nacimiento remontando dicho río; se deja a la derecha el colpar de Cura Fierro y después de una hora de camino se llega a La Parada, lugar arbolado donde la quebrada se ensancha y forma un gran recodo al poniente”.



Figura N° 40. Unión de los ríos Las Zanjias (a la derecha de la foto) y Aguas Calientes

“Desde La Parada, donde se dejan las cabalgaduras, hay media hora de camino a pié, marchando sobre la falda del cerro, por el costado occidental; encontrándose parajes difíciles, pues son subidas ásperas sin puntos de apoyo o son grandes bloques de arenisca oscura que deben salvarse. Si se pretende seguir el cauce del río, las dificultades son mayores aún, porque el viajero encuentra enormes bloques de un conglomerado rojo formando desniveles desiguales y dando lugar a pequeños saltos de agua y una gran cascada.

Las fuentes termales de Villa Vil se encuentran a 2500 metros (Bruch) sobre el nivel del mar; Brackebuch les señala 2000 metros de altitud”; siendo la altura con G.P.S de 2188 m.s.n.m.

5.1.1.3.3. Datos de la fuente:

“Cuando el viajero ha vencido las dificultades del camino y llega a una altura desde donde se ven los ojos de agua, la impresión que recibe borra por completo el recuerdo de las fatigas pasadas.

La quebrada, en este punto, es un cajón de unos 42 metros de ancho NS, cerrado a sus costados por barrancas a pico, y presentando en su fondo dos enormes rocas de más de quince metros de altura que cierran el paso (Figura N° 41), sosteniendo grandes bloques de piedra. A la derecha de estas dos curiosas moles (hacia el Este), trozos quizá de una misma

masa que al desplomarse se ha dividido, se observa un escalón de unos 19 metros de largo, algo convexo, que forma la base del acantilado.

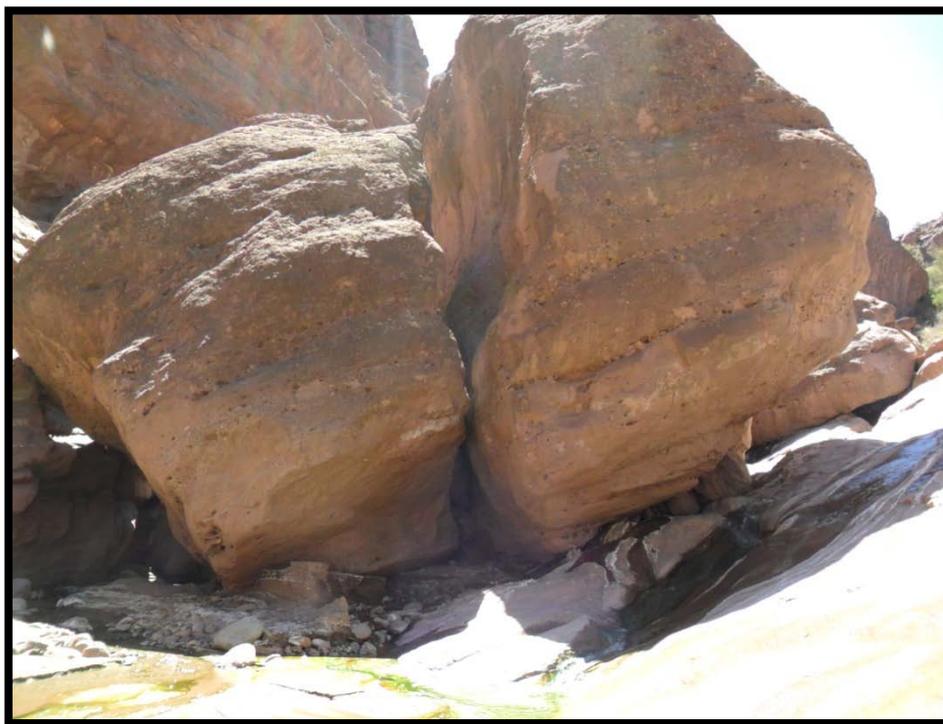


Figura N° 41. Bloques de piedras caídos (Fm Las Arcas). Vista al Norte

Sobre este escalón surgen las aguas de las fuentes, formando hilos de diferente potencia, algunos de los cuales van a engrosar directamente el caudal del río, mientras los demás se mezclan en una pileta o baño. La vegetación en la quebrada no es escasa. Los algarrobos (*Prosopis*), viscos (*Acacia visco Ltz.*) y retamos (*Bulnesia retamo Gr.*) de los rastrojos no son raros aquí, y abundan las compuestas de flores rojas (*Hyaloseris rubicunda Gr.*), de flores amarillas (*Niguera stenophylla Gr.*) y de hojas plateadas (*Hylalis argentea Don.*). Viéndose escalar las rocas y adherirse a las grietas por sus zarcillos una cucurbitácea (*Cucurbitella asperata Walp.*) de hermoso verde que contrasta con el matiz de una juncácea (*Junaos acutus L.*) que crece en gran cantidad sobre los escalones de la quebrada”.

Herrero Ducloux (op.cit.) menciona distintas fuentes donde “todas ellas surgen del mismo escalón que sirve de base al acantilado”. La temperatura de estas fuentes varían de 62 a 64 °C, “marcando el termómetro a la sombra 23 °C”.

El surgente del cual se tomo la muestra es el que se encuentra más al Norte (Figura N° 42), este brota de diaclasas del granito de la Formación Chango Real a 63.2°C. Es también apreciable la ebullición y el vapor en el lugar.

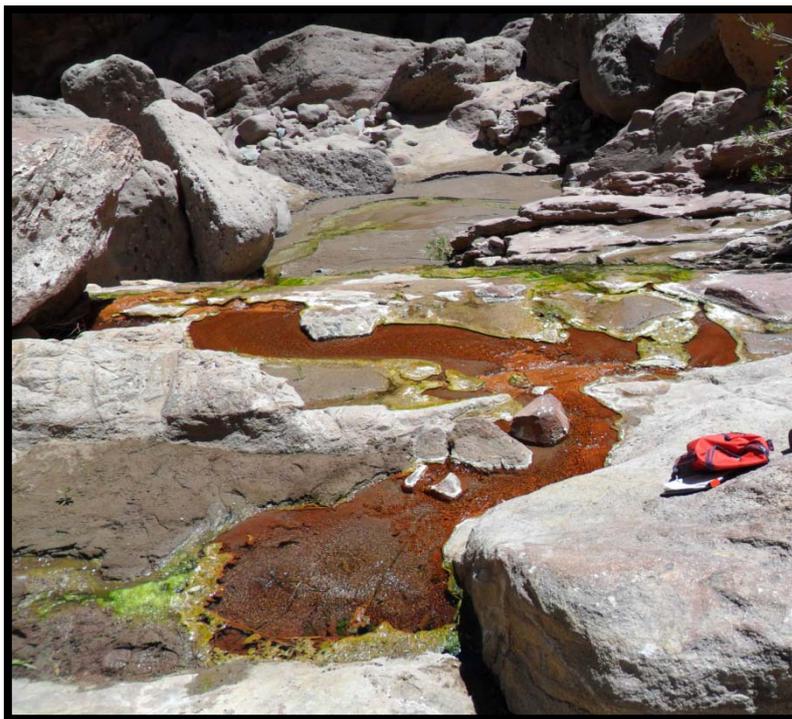


Figura N° 42. Vista del sitio de toma de parámetros y muestra

5.1.1.3.4. Estratigrafía del sector:

➤ Formación Chango Real:

El batolito tonalítico-granodiorítico característico de esta formación, aflora cuando empiezan a encontrarse los surgentes termales. Este pierde su carácter porfídico pero sus minerales constituidos por cuarzo, feldespato potásico y algo de mafitos son de grano grueso. Presenta un color rosado, grisáceo, dependiendo el grado de alteración (Figura N° 42). Al igual que el que aflora en Los Nacimientos, este presenta un importante juego de diaclasas.



Figura N° 43. Granito alterado y diaclasado de la Fm. Chango Real

➤ Formación Hualfín:

La sección tipo que presenta las características litológicas representativas de esta formación, es la que se observo en el contacto con el granito (Figura N° 44).



Figura N° 44. Contacto entre Chango Real y la Formación Hualfín

La arenisca se presenta de grano medio, en estratos tabulares de fuerte litificación intercalando con estratos pelíticos y algunos niveles de areniscas conglomerádicas polimícticas. Los estratos buzcan aproximadamente 55° al WNW.

➤ Formación Las Arcas, Mioceno Medio:

Esta formación presenta una coloración más clara que la Fm. Hualfín (castaño rojizo) y se encuentra hacia el lado Oeste del margen del río que discurre Norte-Sur.

Está constituida por areniscas de grano medio a grueso con intercalaciones de niveles conglomerádicos (Figura N° 45) formando bancos y farallones de dureza variable.

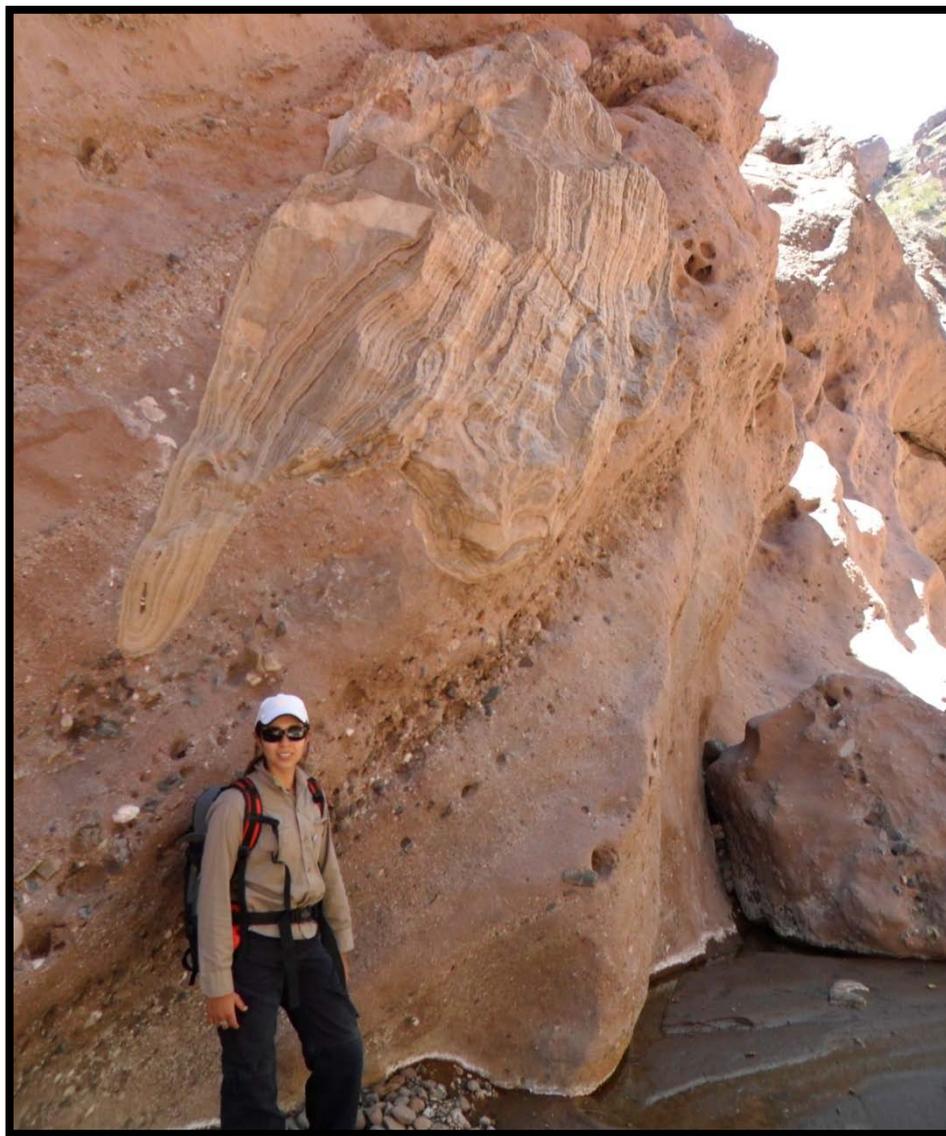


Figura N° 45. Niveles conglomerádicos en la Fm. Las Arcas

➤ Formación Corral Quemado, Plioceno medio-superior:

Con él se marca el predominio total de las facies conglomerádicas finas y medias clastosoportadas, matriz arenosa gruesa, con guijones y bloques dispersos en estratos tabulares a lenticulares gruesos amalgamados, que constituyen importantes paredones verticales (Figura N° 46). Se observan lentes delgados de areniscas medias y algunos

cuerpos de conglomerados medios matrizsoportados. El resto de la sucesión es grano y estratocreciente. Esta formación se puede observar tanto camino a las termas de La Quebrada como a la de los Baños Grandes; porque se encuentra en el margen derecho del rio Villa Vil.



Figura N° 46 Paredón de conglomerados. Vista al Oeste

5.1.1.4. Fuente de Villa Vil

5.1.1.4.1. Ubicacion:

Estas termas se encuentran al Sur del pueblo de Villa Vil, junto al rio del mismo nombre y sobre su margen izquierda. Mas precisamente a $27^{\circ} 06'47,3''$ de latitud Sur y $66^{\circ} 49'21,2''$ de longitud Oeste a una altitud de 2112 m.s.n.m.

5.1.1.4.2. Acceso:

Para llegar a las termas, partiendo de Belén se toma la Ruta Nacional N° 40 para luego empalmar con la Ruta Provincial N° 236 a la altura del Eje.

Aproximadamente 1 Km. antes de llegar al pueblo de Villa Vil, en el cruce de la ruta con el rio homónimo, se recorren unos 1500 metros aguas abajo para llegar a la construcción de los baños.

5.1.1.4.3. Datos de la fuente:

Esta fuente termal, no presenta el contraste de colores, ni las geformas tan llamativas como los sitios anteriormente descriptos; más bien es un paisaje monocromático, de escaso desarrollo, y con vegetación solamente a los alrededores de las termas (Figura N°47).

El punto de surgencia no es visible pero aparentemente seria por las brechas del Mb. El Áspero.

5.1.1.4.4. Estratigrafía del sector:

La columna estratigráfica empieza con las brechas volcánicas correspondientes al Miembro El Áspero para Muruaga (op.cit.) y la serie efusiva de brechas y tobas para González Bonorino (op.cit.) en el margen Oeste del rio Villa Vil para continuar con el Miembro El Jarillal del lado Este del rio.

➤ **Formación Chiquimil, Miembro El Áspero, Mioceno Superior:**

La sucesión se inicia con conglomerados finos verdoso amarillentos con rodados de composición totalmente volcánica (Figura N° 47, A). Hacia arriba pasan a brechas y coladas volcánicas (andesíticas), para concluir con una alternancia de conglomerados volcánicos, pelitas y areniscas medias, macizas y con laminación paralela (Figura N° 47, B).

Este miembro se caracteriza por presentar el arrastre de materiales pefíticos de relieves cercanos e importantes, con un predominio de procesos de remoción en masa: brechas *ash-block*, brechas volcánicas ('lahares') y erupciones explosivas.

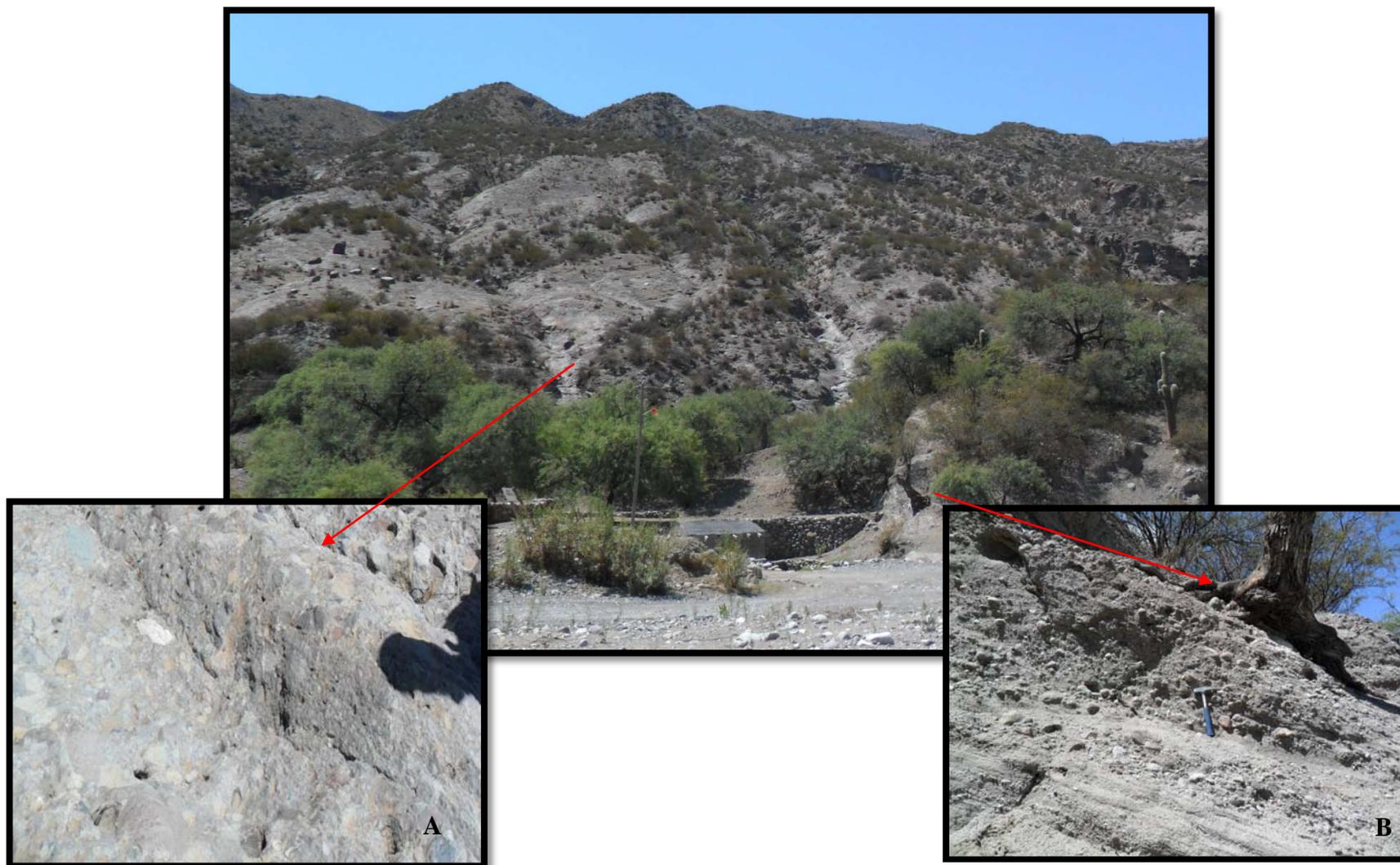


Figura N° 47. Baños para el aprovechamiento del agua termal, al fondo el Mb. El Aspero. Vista al Oeste

➤ Miembro El Jarillal, Mioceno superior:

Es una sucesión granodecreciente de areniscas castañas a amarillentas (Figura N° 48) con intercalaciones de conglomerados finos y areniscas gruesas en estratos amalgamados con estratificación cruzada en la parte inferior y estratos laminados más arenosos en la parte superior.



Figura N° 48. Areniscas estratificadas del miembro el Áspero. Vista al Este

➤ Cuaternario:

El Cuaternario aflora en ambas laderas de la Sierra, más precisamente en los márgenes de los ríos Villa Vil y Los Nacimientos.

Estos depósitos corresponden a conglomerados de pie de monte, arenas fluviales, y arenas eólicas, de origen continental; se encuentran ampliamente distribuidos y están constituidos geomorfológicamente por los deslizamientos (Figura N° 49), conos aluviales y niveles aterrizados (Formación Punaschotter?, Holoceno). Estos conos encajan en la ladera

oriental de la sierra de Hualfín (Figura N° 11), cubriendo ampliamente las rocas terciarias; son acumulaciones casi exclusivamente de rocas graníticas de diversos tamaños, en una masa limo-arenosa. Estas acumulaciones son originadas por lluvias torrenciales de gran intensidad y corta duración.

Los niveles aterrazados son también muy frecuentes a lo largo de las márgenes de los ríos principales (Figura N° 12), lo componen conglomerados muy poco consolidados, gravas y arenas gruesas.



Figura N° 49. Fanglomerados en la cuestecilla de acceso a las termas de Los Nacimientos

5.1.1.6. Sistema de estructuras en el sector Sierra de Hualfín

Los principales lineamientos estructurales están orientados esencialmente NE-SW y ENE-WSW, representados por fallas inversas de alto ángulo (75° a 85°), inclinadas hacia el NW (Muruaga op.cit.).

Dos estadios tectónicos fueron reconocidos en la evolución de la cuenca: uno de extensión y otro posterior de inversión. La sedimentación se inicia con relleno de tipo rift superficial y una configuración de hemigraben asimétrico (Bossi, 1992; Bossi et. al., 1994). El espacio de acomodación se habría producido por fallamiento normal de alto ángulo, provocado por el abovedamiento litosférico superficial.

5.1.1.6.1. Fallas de primer orden:

La falla denominada de Los Nacimientos que se encuentra en el borde oriental de la sierra de Hualfín, es una falla inversa de alto ángulo submeridional que levanta y báscula el bloque de basamento granítico hacia el Oeste. Es la más importante, puesto que es la responsable del relieve actual. Se reconoce por los cambios de inclinación que exponen las capas terciarias. Es de carácter rectilíneo en el Norte y ligeramente curvada hacia el SW.

Las fallas paralelas a la falla de Los Nacimientos, configuran un perfil asimétrico del cordón montañoso, con las mayores alturas hacia el Oeste y una suave ladera en sentido opuesto.

La falla de Villa Vil de rumbo NW-SE y movimiento transcurrente dextrógiro, probablemente activa desde el inicio de la sedimentación siendo la responsable del diseño diferente que muestran los perfiles a cada lado de esta estructura (Muruaga op.cit).

5.1.1.6.2. Fallas de segundo orden:

Son fallas más nuevas que las anteriores de dirección E - W que funcionan como estructura de alivio a los mayores esfuerzos de intensidad regional, que provienen del oeste. Estas fallas cortan tanto el basamento como la cubierta sedimentaria.

5.1.1.6.3. Fallas de tercer orden:

Son fallas de tercer orden, con un trazado rectilíneo, de rumbo NW - SE, afectando la sierra prácticamente en todo su ancho, mostrando un escalonamiento decreciente hacia el SW.

5.1.1.6.4. Fallas menores:

Se ha detectado la presencia de pequeñas fallas que carecen de importancia en el contexto regional. La mayoría de ellas son de rumbo E-W, NE-SW, NW-SE, evidenciadas por remanentes de capas terciarias cubriendo escalones del basamento a cierta altura de la sierra.

La estructura de la cobertura sedimentaria es de tipo homoclinal de rumbo predominante: N-S, con inclinaciones que varían de NE-SW y NW-SE de 30° a 35°. La inclinación de los estratos decrece hacia el SE, a medida que se alejan de la sierra hasta ponerse casi horizontal cerca del río Los Nacimientos (Bravo op.cit.).

5.1.2. Sector YMAD – Vis Vis

5.1.2.1. Fuente Aguas de Dionisio

5.1.2.1.1. Ubicación:

Esta fuente se halla en una quebrada que se designa del mismo modo, a aproximadamente 13 Km. (en línea recta) de Hualfín, en dirección E. S. E a 27°16'9.70" de latitud Sur y 66°43'9.10" de longitud Oeste. Como curiosidad, el lugar se encuentra justo en el borde de la caldera del antiguo estratovolcán.

5.1.2.1.2. Acceso:

“El camino a seguir para llegar a esta fuente, saliendo de Hualfín, se reduce a remontar el río en dirección Noreste Este hasta la quebrada Grande; seguir por ésta y traslomar después, siempre en la misma dirección hasta encontrar la Quebrada de Dionisio a través de una picada molesta, pues está llena de piedras frágiles y es un plano inclinado bastante acentuado”.

Otro modo de acceder es yendo por Farallón Negro hasta el portón que permite el ingreso a la quebrada ya que esta es propiedad de Y.M.A.D. Este recorrido se lo puede realizar en camioneta pero luego hay que seguir a pie por una senda al principio pesada de una hora y media hasta llegar a un hermoso colpar.

“2150 metros sobre el nivel del mar, según Brackebusch, sería la altura de esta fuente. Brueh le señala 2475 metros”; encontrándose más precisamente a 2298 metros según dato G.P.S.

5.1.2.1.3. Datos de la fuente:

“La Quebrada de Dionisio, en las proximidades de la fuente, está encerrada por barrancas altas, constituidas por arenisca en algunos puntos y por rocas calcáreas en otros, abundando mucho las tobas de andesita anfibólica (¿cretáceo?) que se disgregan con mucha facilidad; el fondo de la quebrada es de arenisca casi completamente.

En este punto, donde la quebrada corre en la dirección Norte-Sur bien marcada, se encuentra la fuente constituida por varios ojos de agua. El ojo principal se halla en el cauce o lecho, sobre una saliente de la arenisca, corriendo el agua luego hacia una hondonada, de donde unida con la que surge de otro ojo, cae desde una altura de cinco metros y va a una ciénaga” (Figura N° 50).



Figura N° 50. Cascada en Aguas de Dionisio

“Al norte de la fuente se extiende un colpar de 100 metros de extensión, matizado por una asclepiadácea (*Asclepia campestri* De.) muy vistosa que crece sobre la roca.

La barranca del poniente, al lado de la fuente, sobresale en forma de punta y se transforma luego en un plano inclinado que sirve de camino, presentando como única vegetación, en las partes algo arenosas, algunas jarillas (*Jarilla cuneata*) y garabatos (*Acacia tucumanensis*).

La barranca del nacimiento, junto al manantial, está formada por una tierra muy calcárea cubierta de cortadera (*Cortadera dióica*)”.

El agua brota de las brechas del C.V.F.N. con un caudal mínimo (Figura N° 51). Su temperatura de 18.1°C la convierte en un agua atermal.



Figura N° 51. Punto de surgencia y toma de muestra para análisis

Herrero Ducloux (op.cit.) menciona para esta fuente una temperatura de 24°C, lo que da a suponer que quizás lo que varío fue el punto de muestreo ya que se registro esa misma temperatura frente al puesto de Dionisio aproximadamente 300 metros más al Sur de la toma de parámetros.

Esta diferencia de temperatura puede estar influenciada por el calentamiento producido por el sol.

5.1.2.1.4. Estratigrafía del sector:

- ✓ Complejo volcánico, Mioceno medio:

Se trata de una potente acumulación de material volcánico y volcanoclástico generada por un inmenso estratovolcán que cubre aproximadamente 255 Km², constituyendo la expresión más oriental del vulcanismo Cenozoico en el Noroeste argentino. Está limitado tectónicamente al Este y Sureste por corrimientos que montan al basamento sobre el Complejo Volcánico Farallón Negro (CVFN) (Montenegro; Morales, 2004).

La caracterización petrológica de este Complejo fue realizada por Llambías (1972) indicando que está constituido por material efusivo de rocas piroclásticas andesíticas y rocas hipabisales de composición variable, desde básica hasta ácida, comparable con la asociación volcánica basalto toleítico-andesita-riolita, típica de orógenos de subducción con engrosamiento de corteza continental.

Las unidades litológicas principales que integran el grupo Farallón Negro se describen a continuación en orden decreciente de edad según Llambías (1970, 1972):

- Brecha Morada y Polimíctica: afloran en el área central entre Farallón Negro y Agua Tapada y en la periferia del Complejo, respectivamente. Se caracteriza la primera por ser en su mayor parte oligomíctica, con clastos y matriz de composición andesítica (Figura N° 52), a diferencia de la polimíctica que se agregan los clastos de basalto. Son de color morado-grisáceo y poseen estratificación grosera en bancos y en algunos sectores intercalaciones de basalto-andesita.



Figura N° 52. Brechas en Aguas de Dionisio

- Tobas, brechas y aglomerados tobáceos: afloran en la parte externa del volcán, particularmente en la quebrada de Agua de Dionisio (Figura N° 53) donde alcanzan su máximo desarrollo (hasta 90m). Son concordantes con la Brecha Morada y en algunos sectores están atravesadas por diques de basalto, andesita y riodacita (Figura N° 54). Tienen colores amarillentos y grises claros.



Figura N° 53. Borde de caldera en Agua de Dionisio. Se distingue la secuencia piroclástica estratificada. Al fondo la Sierra de Hualfín. Vista al Oeste



Figura N° 54. Diques camino a Aguas de Dionisio

- Filones capas y coladas: presentan características similares. Los filones capa predominan en el área central del complejo, tienen forma tabular y espesores variables; las coladas predominan en Agua de Dionisio y tienen estructuras irregulares y espesores variables dentro de un mismo cuerpo. Están compuestas por andesitas y basaltos con texturas porfíricas.
- Andesita La Chilca: aflora en la periferia del Complejo Volcánico y en áreas menores de la zona central. Constituye un domo intrusivo andesítico compuesto por fenocristales de plagioclasas inmersos en una pasta afanítica.
- Monzonita Alto de la Blenda: es un *stock* monzonítico intruído en la parte central

del Complejo, de forma ovalada. Se emplazo al final de la actividad volcánica y constituye la roca de caja de vetas con mineralización auroargentíferas (Halter et. al. 2004 en Montenegro; Morales, 2004).

- Riodacita Macho Muerto: aflora en una faja de 5 km de ancho NO-SE, en el sector central del Complejo intruye a la monzonita Alto de la Blenda. Es un domo porfídico con cristales de sanidina, cubierto en gran parte por depósitos cuaternarios.

La edad de las rocas volcánicas del complejo Farallón Negro es bien conocida; sobre ellas se realizaron dataciones radimétricas Stipanovic y Linares (1975) y Sasso (1997). Las edades absolutas abarcan desde $6,0 \pm 0,2$ Ma. a $10,6 \pm 0,6$ Ma. Extrapolando regionalmente, se puede afirmar que la secuencia sedimentaria presente debajo del C.V.F.N., tiene una antigüedad mayor a 10,6 Ma. por lo que correspondería en su mayor parte al Mioceno medio, pudiendo sus secciones superiores pasar al Mioceno superior bajo.

✓ Cuaternario:

En el área está representado por una delgada unidad de conglomerados aterrizados, formados por la acumulación de material proveniente de la erosión del material volcánico.

Están formados por arenas y gravas bien estratificadas, con suave inclinación al NO, y tienen su máximo desarrollo al este de Agua de Dionisio. Aquí se han depositado sobre las tobas y gran parte del domo intrusivo de Loma Morada. De pósitos aterrizados de menor extensión se encuentran en poca proporción dentro del área volcánica, por ejemplo en El Durazno hay dos niveles de terrazas, las cuales están en la actualidad erosionadas (Llambías op.cit.).

5.1.2.2. Fuente de Vis Vis

Estas fuentes han sido denominadas por Herrero Ducloux (op.cit.) como Fuente de Nacimientos de Vis Vis para diferenciarlas de las que estarían más al Sur (Fuente de Vis Vis). Por la altitud y la descripción del paisaje que hace este autor, la fuente Nacimientos correspondería con la fuente en estudio.

5.1.2.2.1. Ubicación:

“La fuente se encuentra en la quebrada de Amanao, al norte de Vis Vis, en el departamento de Andalgalá”, más precisamente a los $27^{\circ}23'3.4''$ de latitud Sur y $66^{\circ}32'34.1''$ de longitud Oeste a 2017 m.s.n.m.

5.1.2.2. Acceso:

Para llegar a las termas basta seguir el camino de Vis Vis a las minas de Atajo. Aproximadamente desde este paraje son unos 5 Km. hasta la fuente ubicada precisamente frente de un puesto.

5.1.2.2.3. Datos de la fuente:

“Lo ojos de agua se abren en el mismo cauce del río, seco durante gran parte del año; el valle en cuyo fondo corre el río es muy pintoresco, presentando en invierno un aspecto curioso, pues del agua se levanta una niebla que todo lo envuelve.

Dos grandes algarrobos (*Prosopis*) sombrean el rastrojo cercano a las fuentes (Figura N° 55), al pie de una barranca de piedra, embelleciendo también el paisaje los cardones (*Cereus*) gigantes que son muy abundantes.



Figura N° 55. Precaria construcción de un baño

El rendimiento de los ojos es considerable, llegando hasta Amanao el arroyo que forman, aunque engrosado con las aguas de Vis Vis”.

5.1.2.2.4. Estratigrafía del sector:

- ✓ Formación Suncho, Paleozoico inferior:

Las rocas más antiguas de la región corresponden a la Formación Suncho definida así por Mirré y Aceñolaza (1972), quienes la describieron como un conjunto de pelitas y psamitas que presentan un bajo grado de metamorfismo regional (facies esquistos verdes) y en partes, metamorfismo de contacto; las mismas integran una unidad altamente tectonizada (Durand, 1980). Se la asigna al Cámbrico temprano en base de la evidencia fósil y la relación intrusiva del Granito de Capillitas.

Dentro de los esquistos se reconocen dos entidades:

- a) Esquistos de bajo grado, pizarras y filitas (Figura N° 56) con una foliación tectónica marcada por la alternancia de capas milimétricas ricas en biotita con otras ricas en cuarzo que pertenecen a esta formación y
- b) Gneises y filonitas, instruidas por granitos porfiroides ocasionalmente e intensamente deformados; que afloran al Este en los cerros de El Atajo.

Ambas entidades están separadas por una franja de cizalla dúctil con estructuras miloníticas bien desarrolladas y una intensa deformación que ha obliterado todas las estructuras anteriores. Esta zona tiene un espesor total próximo a los 300 m, dentro de ella se distinguen franjas de menor espesor separadas por tabiques menos deformados.

Esta franja milonítica se extiende de Norte a Sur a lo largo de unos 30 Km, corre aproximadamente paralela al río Vis Vis (Figura N° 57) y delimita por el Oeste a los cerros de El Atajo.

Los esquistos de bajo grado que afloran sobre el borde sur del área, tienen importancia relevante en cuanto al termalismo dado que aparentemente albergan los fluidos termales (Mon et.al. op.cit.).



Figura N° 56. Formación Suncho, pizarras y filitas en Vis Vis



Figura N° 57 Pizarras, filitas alteradas y craqueladas, posiblemente a causa de la falla de Atajo

- Granitos:

En el bloque de la Ovejería predominan sienogranitos con marcada participación de granitos gráficos (Duran op.cit.). En el cerro Bola de Atajo existen variaciones a granodioritas y tonalitas.

En toda la comarca es factible observar cuerpos pegmatíticos, diques cuarzosos y lamprófiros. Estos afectan a las metamorfitas de la Formación Suncho. Las pegmatitas tienen potencias y rumbos variables y su composición mineralógica es de cuarzo, microclino, moscovita y turmalina.

- Milonitas:

Sus afloramientos dentro del sector, constituye una faja de ancho reducido (aproximadamente 500 m), que se extiende de NNO a SSE desde el sur del Campo de Tampa Tampa hasta desaparecer bajos sedimentos cuaternarios del Campo de Andalgalá (Aceñolaza, 1982).

- ✓ Formación Morterito, Mioceno superior:

En discordancia angular sobre el basamento metamórfico, sobreyacen las sedimentitas, en el sector oriental de la Quebrada de Vis Vis, frente al dique de colas de Minera Alumbreira. En este sector se presenta como areniscas finas con intercalaciones de limolitas de colores pardo rojizos estratificación tabular y una débil laminación paralela (Figura N° 58).

En general esta unidad presenta un rumbo que varía entre los 60° y 70°, y un buzamiento que oscila entre los 45° y 59° al Este.

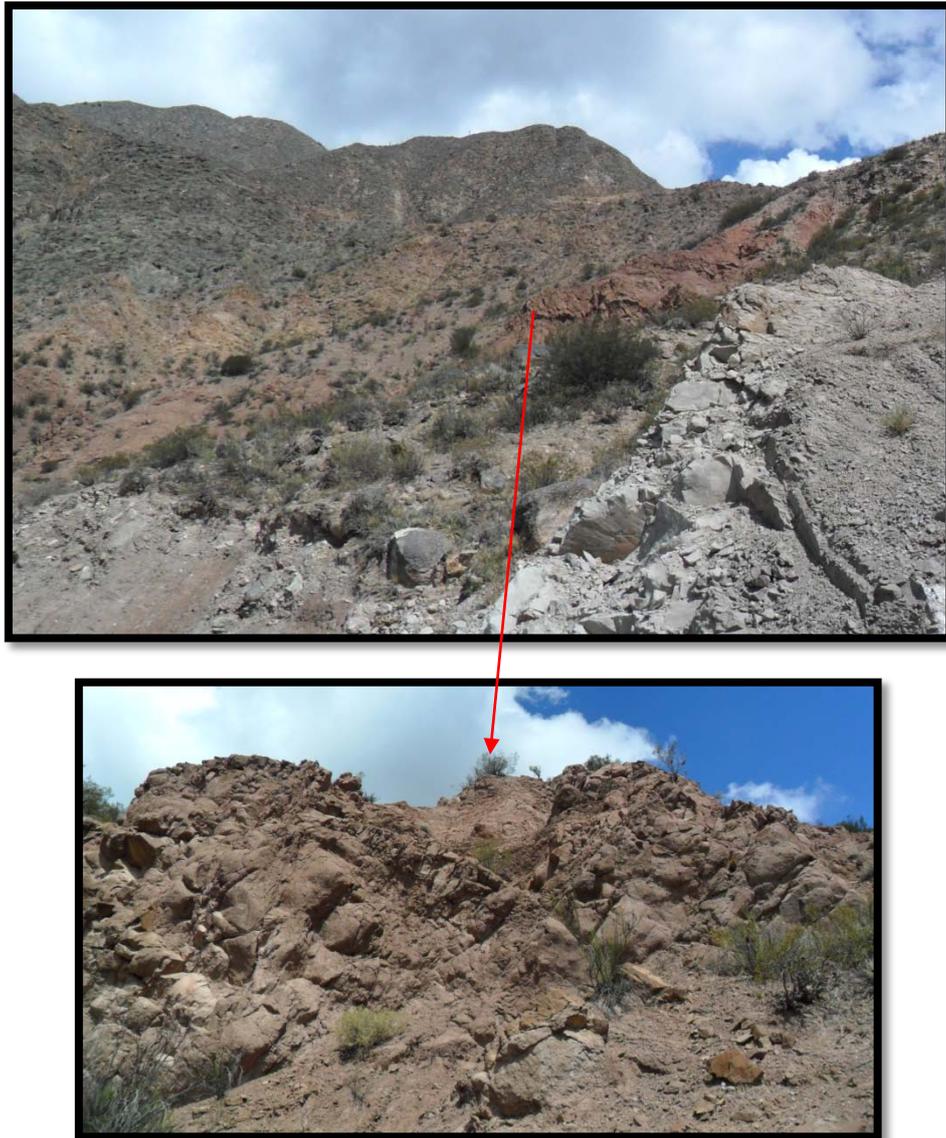


Figura N° 58. Areniscas de la Fm. Morterito

✓ Complejo Volcánico Farallón Negro, Mioceno medio:

Predominan las andesitas con horblendas, basaltos, brechas (Figura N° 59), tufitas, flujos piroclásticos con intercalaciones arenosas aisladas. La sucesión presenta una estratificación grosera en capas de hasta 10 metros de espesor.



Figura N° 59. Brechas polimícticas estratificadas

En el sector del río Jejenos, el basamento metamórfico se encuentra en contacto con el C.V.F.N. (Figura N° 60) a través de la falla directa San Buenaventura, de rumbo general E-O e inclinación al Norte.



Figura N° 60. Contacto entre filita (A) y brecha (B)

✓ Cuaternario:

Estos sedimentos cubren discordantemente a las rocas Terciarias y al basamento cristalino; están representados principalmente por relleno aluvial de gravas (de la unidad volcánica) y arenas (de la unidad terciaria).

Se destacan también las terrazas aluviales a lo largo del sector oriental de la Quebrada de Vis Vis (Figura N° 61), lo que refleja claramente el levantamiento de la sierra del Este de la del Oeste. Los abanicos aluviales están formados por gravas, cantos rodados y bloques de granito de basamento y de metamorfitas.



Figura N° 61. Terraza al frente de la fuente termal

5.1.2.3. Sistema de estructuras en el sector Y.M.A.D. - Vis Vis

5.1.2.3.1. YMAD

El fracturamiento interno del complejo volcánico (el cual se emplazo a fines del Terciario), de rumbo preferencial NW-SE y NE-SW, debe su origen a la acción de fallas dextrales paralelas llamadas Fallas Amanao y Ampujaco de rumbo NW-SE. Estas fallas, constituyen el extremo sur de megafracturas de rumbo NO-SE que se extienden hasta Chile (Gutiérrez, 2000). El esquema estructural del distrito YMAD guarda estrecha relación con el marco tectónico regional y la teoría de la tectónica de placas. La geometría de la Placa de Nazca y la Dorsal de Juan Fernández habrían generado fuerzas paralelas sinestrales de rumbo NE-SW entre los 27°S-33°S, originando estructuras regionales de rumbo NE-SW y NW-SE y la formación de un incipiente “*rift*” de retroarco que favoreció el emplazamiento del Complejo Volcánico Farallón Negro en un ambiente tectónico de torsión transpresivo en el Terciario superior (Gutiérrez et.al. op.cit.).

Según Mon (op.cit.) dentro del Complejo Volcánico hay un significativo juego de fallas normales de segundo orden y de fracturas menores que tienen rumbo NW-SE. Estas se extienden hacia las manifestaciones termales de Agua de Dionisio. Tienen elevado buzamiento tanto hacia el SW como hacia el NE. Paralelos a estas fracturas se encuentran diques básicos subverticales. Este sistema de fallas no se encontraría desarrollado en el basamento metamórfico.

5.1.2.3.2. Vis Vis

Las líneas estructurales más importantes en este sector responden a dos sistemas principales que pueden agruparse de la siguiente manera:

- Un sistema que incluye fracturas de rumbo dominante NE-SW
- Un sistema de fallas con rumbo general submeridiano.

El primero de éstos es el principal responsable del levantamiento de las unidades que en la actualidad aparecen como positivas. A éstas las podemos agrupar en dos bloques principales cuyas características se reseñan a continuación:

1. Bloque de La Ovejería

Este bloque queda definido por la falla San Buenaventura por el norte; a este elemento estructural se considera el causante principal de la elevación. Al sur lo limita la falla Vallecito y al este el Sistema Cerro Bola del Atajo-Santa Bárbara. Mientras que por el oeste su límite lo constituye la fractura que corre por el pie oriental del cerro Pampa.

El perfil del bloque es asimétrico con pendiente fuerte hacia el norte y más extensa y suave hacia el sur.

- Falla San Buenaventura

Constituye el más claro elemento estructural que puede definirse en el área. Se sitúa sobre el borde norte de la sierra de la Ovejería poniendo en contacto al basamento metamórfico con el Complejo Volcánico. La superficie de contacto buza hacia el Norte entre 30° y 60°. La superficie de falla que se encuentra inclinada hacia el norte indica que se trata de una falla normal, tal como había sido postulado por Llambías (1972) y Proffett (1996).

Su traza tiene una longitud de aproximadamente 25 kilómetros; por el oeste culmina al pie del cerro Pampa, mientras que hacia el oriente lo hace en el cerro Bola del Atajo, donde es interceptada por el sistema que corre por el faldeo occidental de aquella unidad.

- Falla de La Escalera

Delimita al Norte al macizo metamórfico de cerro Atajo y marca el contacto entre el Basamento metamórfico y las capas de areniscas terciarias que se encuentran casi verticales o con empinado buzamiento hacia el Norte. Representa también el contacto con capas de brechas andesíticas casi horizontales que se adosan contra el basamento. Estas se apoyan en marcada discordancia angular sobre las capas terciarias.

La falla de la Escalera es normal y tiene marcada similitud con la de Buenaventura. Algunas observaciones sugerirían que se trata de la misma falla dislocada por la falla del Atajo.

- Falla Vallecito

Su rumbo general es casi E-W y la extensión en la que se pone en evidencia es de unos 9 kilómetros. Hacia el Oeste su trazado es enmascarado por los sedimentos aluviales del campo de Ampujaco. Al este se continúa por el río Jaci Yaco hasta Las Juntas.

Se la interpreta como una falla inversa de gran ángulo con un rechazo vertical algo menor que el de la falla San Buenaventura.

- Falla Jaci Yaco - El Tigre

Esta falla tiene una dirección general NE - SW. Su recorrido lo realiza por el arroyo del Tigre hasta Las Juntas; luego por el pie septentrional del bloque del cerro Quemado - cerro Chaguaral hasta el portezuelo del Potrero bifurcándose.

Esta falla se continúa hacia el NE y en partes constituye el límite austral de la Sierra Capillitas.

2. Sistema Bola de Atajo - Santa Bárbara

Consiste en un sistema de fallas escalonadas que han originado una zona de imbricamiento.

A la altura de la quebrada del Huayco, las fallas son interceptadas y se unen con aquella por la que labró su curso esa quebrada; como una falla con un recorrido paralelo a la quebrada de Amanao (rumbo NNW-SSE). Finalmente desaparece bajo las sedimentitas modernas del campo de Andalgalá.

Durand (op.cit.) interpreta que el conjunto de fallas son las responsables de la elevación del cerro Bola de Atajo y posiblemente, junto a otras de rumbo NE-SW observables al NE del bloque de la sierra de Santa Bárbara - Capillitas.

Las líneas estructurales mayores que se han descripto constituyen la respuesta a una tectónica compresiva. Los esfuerzos andinos responsables del fallamiento y consecuente levantamiento habrían tenido una dirección NW-SE en esta zona (González Bonorino, 1950; Baldis et. al. 1975).

- Falla El Atajo

Representa la estructura principal por su gran extensión longitudinal y porque estaría relacionada con ella las principales zonas mineralizadas de la región. Tiene una longitud aproximada de 61 Km desde la sierra de Hualfín-Las Cuevas hasta el extremo Sur del río

Vis Vis, en el Salar de Pipanaco (Figura N° 62) y un ancho de la zona de falla de aproximadamente 400 metros (Rasuk, 2012).

Se trata de una falla inversa regional de rumbo aproximado NNO-SSE que inclina entre 45° y 60° hacia el Este, produce cabalgamiento del basamento metamórfico sobre la cubierta volcánica y terciaria y pone en contacto dos entidades de basamento completamente distintas desde el punto de vista petrológico y estructural (Figura N° 63).

Esta falla trunca también otras fallas más antiguas de rumbo NE. La traza muestra inflexiones pronunciadas, ramificaciones e intersecciones con fallas más jóvenes que producen desplazamientos en ella. Está acompañada también por fallas de segundo orden paralelas configurando una zona de falla de varias decenas de metros de ancho. Se encuentra ubicada sobre una zona de debilidad dada por la franja de cizalla dúctil que pone en contacto dos entidades de basamento. Sin embargo su traza coincide solo parcialmente con la antigua cicatriz, en muchos sectores se aparta claramente de ella (Proffett, 1996 en Mon et.al., 2006).

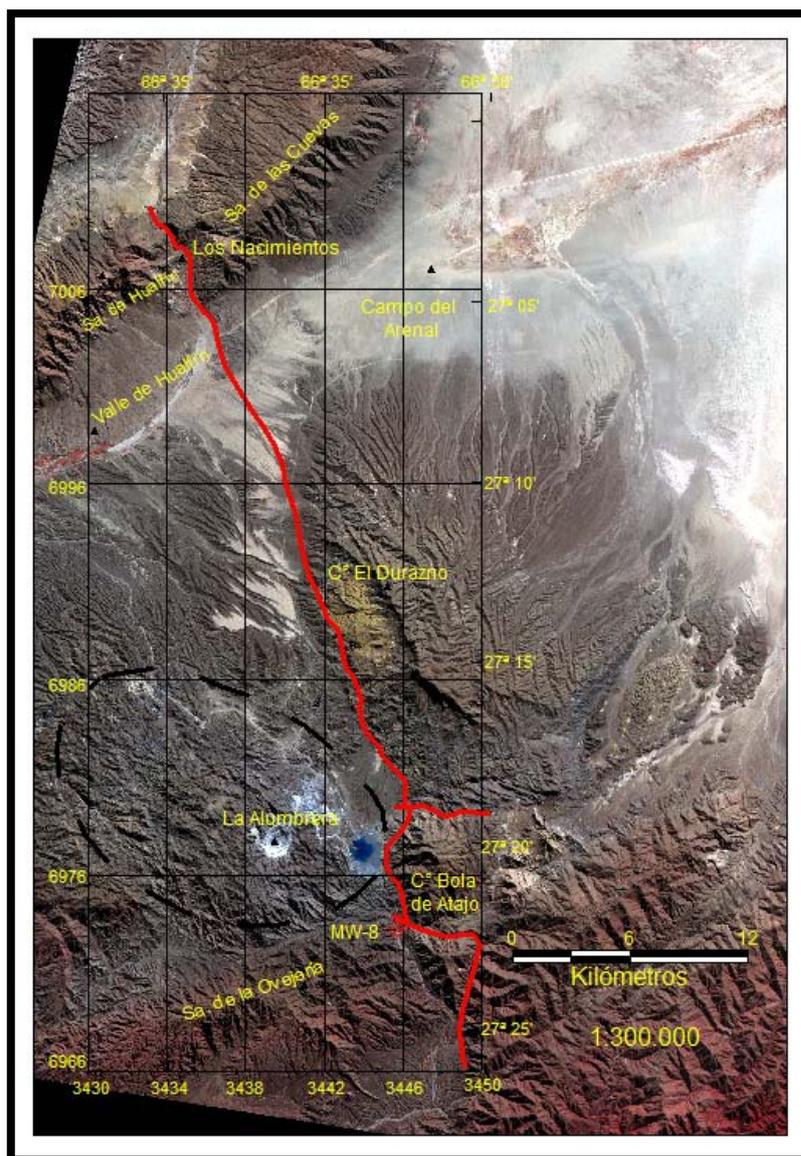


Figura N° 62. Extensión de la falla El Atajo (Mon op.cit.)



Figura N° 63. Falla del Cerro Bola del Atajo. El bloque Oeste expone esquistos del basamento con deformación dúctil; el bloque Este expone basamento metamórfico intensamente brechado y cizallado (Varela, 2006). Vista al Norte

A continuación en la Tabla N° 2, un resumen de la estratigrafía para ambos sectores de estudio.

ESTRATIGRAFIA DE LAS ZONAS DE ESTUDIO SEGÚN MURUAGA							
	Formación	Los Nacimientos	La Quebrada	Los Baños Grandes de Villa Vil	Villa Vil	Aguas de Dionisio	Vis Vis
Pleistoceno Holoceno	Punaschotter						
Mioceno Plioceno	F. Corral Quemado						
	F. Andalhuala						
	Mb. El Jarillal						
	Mb. El Áspero						
	Mb. Los Baños						
	C.V.F.N						
	F. Las Arcas						
Paleógeno	F. Hualfín						
Paleozoico	F. Chango Real						
	F. Suncho						

Tabla 1Tabla N° 2. Cuadro estratigráfico para las fuentes termales

5. Metodología de trabajo

5.2.1. Trabajo en campo

La toma de muestras y determinación de parámetros en el campo se realizó del 3 al 9 de Octubre de 2012, empleando un día para cada sitio termal.

Los materiales que se emplearon fueron (Figura N° 64 A): botellas de plástico de 1 litro y ½ litro de capacidad (dos de litro y dos de medio por cada fuente), una conservadora con hielo, una jarra para la recolección de agua. En este recipiente se realizó la de toma de parámetros con el conductímetro (HACH), peachimetro (WTW) y Oxímetro (WTW). Se dispuso de agua destilada para el lavado de los electrodos correspondientes.

Las botellas fueron rotuladas para su transporte con las especificaciones que se muestran en la Figura N° 64 B.

Los datos de los parámetros físicos fueron volcados en una planilla diseñada para tal fin por la empresa.

Los parámetros medidos fueron:

- a) Temperatura,
- b) PH,
- c) Oxígeno disuelto,
- d) Sólidos disueltos y
- e) Conductividad eléctrica.



Figura N° 64 Materiales para la toma de muestras y parámetros in situ

Además de la información anterior y para investigar a detalle la química del agua termal, las muestras tomadas se enviaron a distintos laboratorios para el análisis químico de elementos mayores e isótopos (^{18}O y ^2H).

Para el análisis de los primeros, las muestras se remitieron al Laboratorio Químico de la Planta de Filtros de Minera Alumbreira, ubicado en la provincia de Tucumán; certificado según Norma ISO 17025.

En el caso de los isótopos, estas fueron analizadas por parte de la consultora Aquaconsult (Chile).

5.2.1.1. Procedimiento:

✚ Muestreo de elementos mayores e isótopos (según Norma IRAM 29012):

Se tomaron las muestras en las botellas de litro y en una de medio con tapa y contratapa (ambas pre lavadas con la misma agua de la fuente). Se las rotulo e inmediatamente después, se colocaron en las conservadoras para su transporte al laboratorio; donde se las almaceno en heladeras a una temperatura de 2 a 5°C. Para la determinación de isótopos estables se utilizo una botella de 500 ml. Esta muestra no se filtro ni acidifico.

Es necesario aclarar que para reducir el entrampamiento de aire en burbujas se procuro llenar la botella a su máxima capacidad, en el menor tiempo posible, con el fin de minimizar la exposición de la muestra a la atmósfera. Todas estas medidas reducen la probabilidad de fraccionamiento isotópico entre la muestra y el aire.

✚ Obtención de parámetros físicos (según el procedimiento del departamento de Medio Ambiente de Minera Alumbreira):

Primero se lavaron los electrodos con agua destilada y rápidamente se colocaron los mismos en la fuente o en la muestra de agua obtenida con la jarra (en el caso que no se puedan tomar directamente del surgente), (Figura N° 64). Se dejo unos minutos para que se estabilicen los valores y después se anotaron en la planilla (Tabla N° 3).

Parámetro medido	Los Nacimientos	La Quebrada	Los Baños Grandes de Villa Vil	Villa Vil	Aguas de Dionisio	Vis Vis
Temperatura °C	37.6	34.9	63.2	38.9	18.1	35.0
Conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}$	1614	868	1180	401	1319	1955
Ph	6.6	8.96	-	8.87	7.58	7.03
Sólidos Disueltos mg/l	797	422	581	193.6	637	1270.7
Oxígeno Disuelto mg/l	3.08	1.92	2.32	0.86	5.47	432

Tabla N° 3. Resultados de los parámetros medidos para cada fuente termal

A continuación en la figura N° 65, se exponen fotografías de la toma de muestras y parámetros para cada fuente termal.



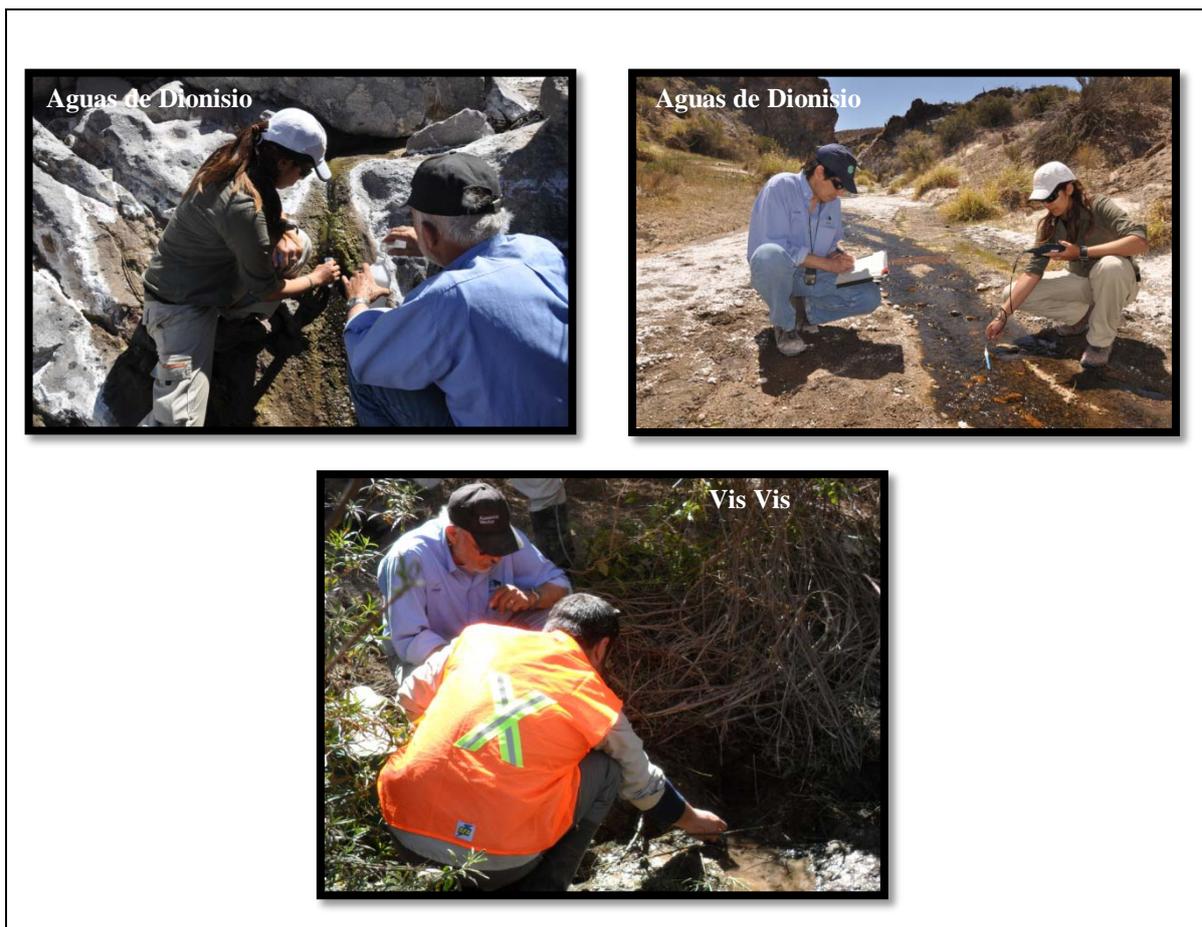


Figura N° 65. Toma de muestras y parámetros

5.2.2 Trabajo en laboratorio

Una vez traídas las muestras del campo, en el laboratorio de Minera Alumbraera - departamento de Medio Ambiente- , se procedió a preparar y acondicionar parte de ellas para el transporte hasta el laboratorio en Planta de Filtros. La otra fracción se utilizó para comprobar su alcalinidad.

En el primer caso se debe filtrar y acidificar el agua; siendo empleados los siguientes materiales: un kitasato, filtros, ácido nítrico y cinta indicadora de pH.

Para la alcalinidad se utilizó la técnica estándar de titulación con HCl a 0.1 N, además se empleó la fenolftaleína y naranja de metilo como indicadores de los puntos de equivalencia.

Otros materiales complementarios fueron: una bureta calibrada, soporte universal, probeta, erlenmeyer y agua destilada (Figura N° 66).

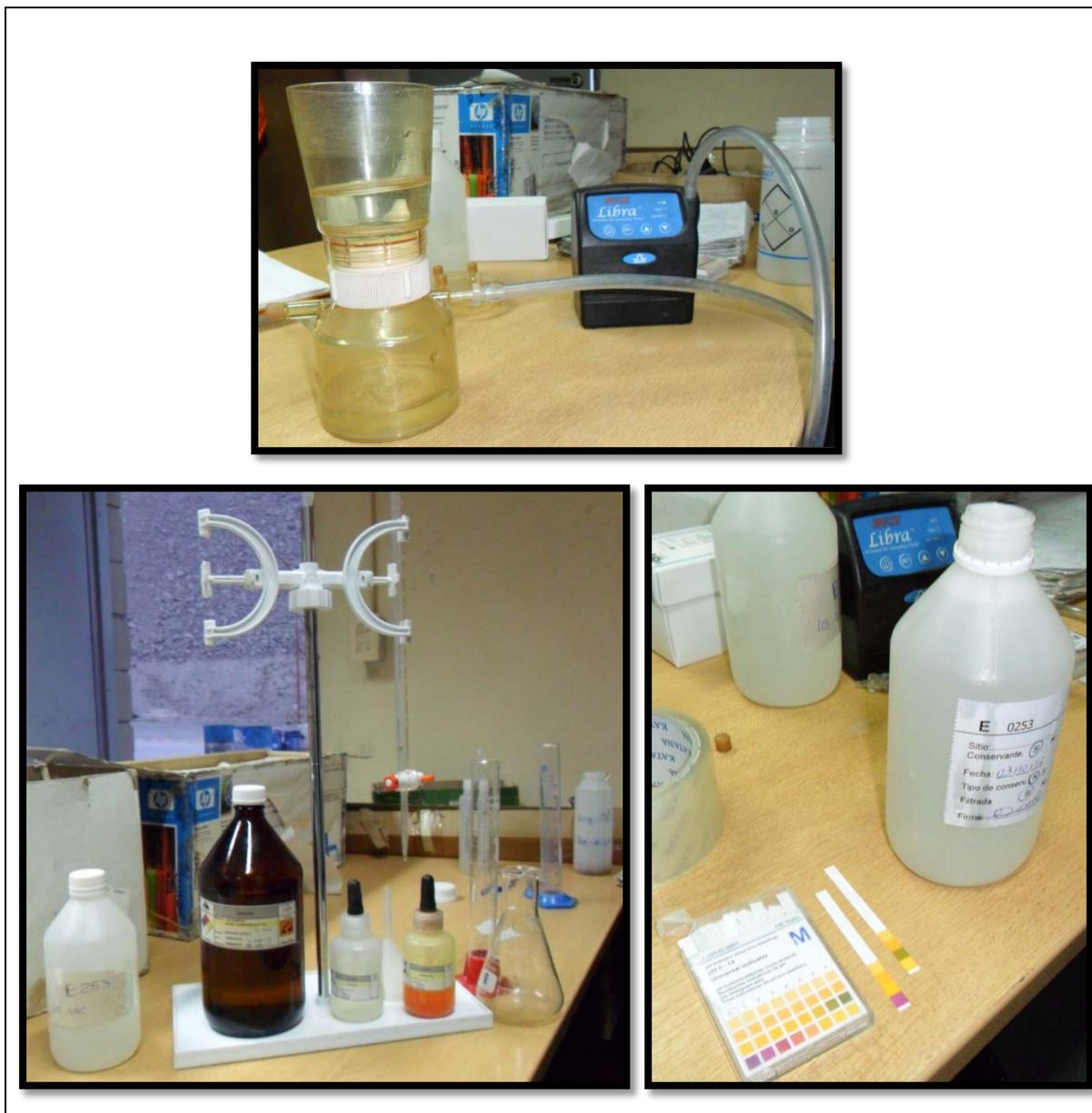


Figura N° 66. Material de trabajo

5.2.2.1. Pcedimiento:

Primero, se lavaron los elementos de trabajo con agua destilada y luego se procedió a filtrar una de las muestras de medio litro con el kitasato y bomba de vacío, al cual se le agrego un filtro de membrana de 0.45 μm entre el recipiente con agua a filtrar y la filtrada.

De esta manera el agua queda sin sólidos disueltos.

Prontamente se le agrego ácido nítrico de alta pureza para evitar precipitación y adsorción de elementos en las paredes de la botella y se disminuyó el pH entre 2 y 3, el cual se constató con la cinta indicadora de pH.

Este procedimiento de filtrado y agregado de conservante, debe ser especificado en el rotulo de la muestra (Figura N° 66).

Para obtener la alcalinidad, una vez acomodada la bureta en el soporte universal, se la llena con HCl. Se toma una de las muestras de litro y en una probeta se colocan 50 ml para trasvasarlo al erlenmeyer.

Para empezar con la titulación hay que tener en cuenta el pH original de la muestra, el que fue tomado y anotado *in situ*; si el pH es menor a 7 al agregar la fenolftaleína (indicadora de la presencia de bicarbonato) la muestra no vira; pero si el pH es mayor, se puede observar que la muestra toma un color violeta el cual cambia a transparente cuando el HCl neutraliza la muestra, entonces se mide cuanto ácido se utilizó observando la escala de la bureta y se anota, siendo este el valor de los bicarbonatos.

Para obtener los carbonatos, se utiliza el indicador naranja de metilo, este en medio básico vira de amarillo a naranja cuando se llega a la neutralización. La suma de este valor obtenido, con el de bicarbonato da la alcalinidad total.

5.2.3. Trabajo en gabinete: Procesamiento de la información

5.2.3.1. Comparación de datos históricos y actuales:

Uno de los objetivos de la presente tesis, es la recopilación, análisis y comparación de los datos químicos obtenidos en diferentes bibliografías; tales como “Aguas Minerales de la República Argentina. Volumen III Provincia de Catamarca” y el informe de la Consultora ESIN, titulado “Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos de Baja Entalpía en la zona Belén- Provincia de Catamarca” (ver referencias).

El primero presenta datos químicos obtenidos para algunas termas de los años 1900 y 1908 y los correspondientes al trabajo de 1937.

El segundo tiene en cuenta los análisis de 1937 del libro Aguas Minerales de la República Argentina, los realizados por Y.P.F. (que serán datados para el año 1980) y los correspondientes al trabajo realizado en el año 1983; estos dos últimos considerados para el presente trabajo.

Para poder analizar y comparar los datos antiguos de los años 1900 y 1908 (Figura N° 67) que estaban expresados en litro y no en mg/L como eran necesarios, se debieron

realizar cálculos estequiométricos de los compuestos para obtener los cationes y aniones de interés; siendo el procedimiento el siguiente:

a) Primero se dedujo que los resultados de los análisis químicos estaban en gr/L por la época en que realizaron los estudios; por lo tanto para obtenerlos en mg/L solo se corrió la coma después del punto hacia la derecha tres lugares. Ejemplo:

Valor original del CaO = 0.0800 gr/L

Valor calculado de CaO = 80.0 mg/L

b) Luego mediante la tabla periódica se obtuvieron los pesos moleculares de cada elemento químico, los cuales se sumaron para obtener los pesos moleculares totales de cada compuesto. Ejemplo:

$\text{Ca}^{+2} = 40.08 \text{ gr.}$

$\text{O}^{-2} = 16 \text{ gr.}$

$\text{CaO} = 16 + 40.08$

$= 56.08 \text{ gr.}$

c) Finalmente para obtener el valor en mg/L de cada ion que intervino en el compuesto se realizo una regla de tres simple. Ejemplo:

Para el Ca^{+2}

CaO 56.08 gr-----80.0 mg/L

Ca^{+2} 40.08 gr----- X

$$X = \frac{40.08 \text{ gr} \times 80.0 \text{ mg/L}}{56.08 \text{ gr}}$$

56.08 gr

$$X = 57.18 \text{ mg/L } (\text{Ca}^{+2})$$

Para el Na^{+}

Na_2O 61.98 gr-----339.0 mg/L

Na_2^{+} 2x 23 gr----- X

$$X = \frac{46.0 \text{ gr} \times 339.0 \text{ mg/L}}{61.98 \text{ gr}}$$

61.98 gr

$$X = 251.60 \text{ mg/L (Na}^+)$$

RESULTADOS ANALITICOS DE VILLA VIL		Gases disueltos	
obtenidos por el doctor E. Herrero Ducloux en 1900			Cent. cúb.
Datos físicos		0° —760mm } CO ₂	35.379
Color	incolora	} O'	4.251
Aspecto	lig. turbio	} N	15.110
Reacción	fuert. alcalina	Total	54.740
Datos químicos		Combinaciones hipotéticas	
	Por litro		Por litro
Alcalinidad en H ₂ SO ₄	0.5892	Anhidrido silíceo (SiO ₂)	0.0847
Materia mineral en suspensión .	0.0181	Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	vestigios
Residuo á 100-105°C	0.900	Carbonato ferroso (FeCO ₃) ...	0.0045
— 180°	0.877	— cálcico (CaCO ₃) ...	0.1000
— al rojo	0.759	— magnésico (MgCO ₃)	0.0184
Ácido silíceo (SiO ₂)	0.0847	— potásico (K ₂ CO ₃) ..	0.0012
— sulfúrico (SO ₃)	0.0343	— sódico (Na ₂ CO ₃) ...	0.4796
— clorhídrico (Cl)	0.0625	— lítico (Li ₂ CO ₃)	0.0012
— nítrico (N ₂ O ₅)	0.0003	Cloruro sódico (NaCl) :.....	0.1021
— nitroso (HNO ₂)	0	— amónico (NH ₄ Cl)	0
— carbónico (CO ₂)	0.2645	Sulfato sódico (Na ₂ SO ₄)	0.0142
— sulfhídrico (H ₂ S)	—	— potásico (K ₂ SO ₄)	0.0573
— fosfórico (P ₂ O ₅)	0	Nitrato potásico (KNO ₃)	<0.0005
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	0.0031		
— de aluminio (Al ₂ O ₃)	vestigios		
— cálcico (CaO)	0.0560		
— magnésico (MgO)	0.0092		
— potásico (K ₂ O)	0.0097		
— sódico (Na ₂ O)	—		
— lítico (Li ₂ O)	0.0005		
Amoniaco (NH ₃)	0		

Figura N° 67. Resultados analíticos de 1900 para la fuente de Villa Vil

En las tablas N° 4, 5, 6, 7, 8 y 9 se exponen los datos químicos obtenidos y calculados de las diferentes bibliografías más los nuevos análisis realizados por Minera Alumbra en Octubre de 2012.

Para clasificar las aguas y ver su variación composicional en el tiempo, se realizaron los gráficos de Piper y Stiff con el programa Aqua Chem 3.70 de cada fuente termal.

Para las fuentes termales con análisis de los años 1900 y 1908, se debió confeccionar un gráfico propio considerando los valores de CO₃ y no de HCO₃ ya que no contaban con este segundo parámetro.

Los asteriscos (símbolo *) que aparecen en las tablas presentadas significan:

* Valores obtenidos de las combinaciones hipotéticas de los carbonatos de sodio y calcio y del sulfato de sodio.

** Valores obtenidos de la combinación hipotética del sulfato de potasio.

5.2.3.1.1. Sector Sierra de Hualfín

Los Nacimientos						
Catión mg/L	E. Herrero Ducloux, 1900	E. Herrero Ducloux, 1908	E. Herrero Ducloux, 1937	YPF 1980	ESIN, 1983	Alumbrera, 2012
Ca	29.87	32.5	29.4	33.0	40.0	31.0
Na	319.7*	398.61	374.5	334.0	405.0	365.0
Mg	5.85	8.44	8.4	4.0	3.5	3.0
K	40.68	17.27	14.1	17.0	17.0	13.7
Anión mg/L						
CO ₃	44.85*	48.50*	-	-	0.0	-
HCO ₃	-	-	500.1	868.0	1020.0	766
SO ₄	52.01**	51.43*	130.1	51.0	44.0	<50
Cl	71.2	86.7	42.6	84.0	81.0	77.0
B	-	-	-	0.7	1.60	-
SiO ₂	72.7	70.8	69.6	74.0	72.0	49.2
Isótopos						
Tritio	-	-	-	-	-	-
Deuterio	-	-	-	-	-	-34.8
O18	-	-	-	-	-	-6.74
Temperatura °C	-	37	38.8	39	38.8	37.6
Ph	-	-	6.9	7.85	6.15	6.6

Tabla N° 4. Fuente Los Nacimientos

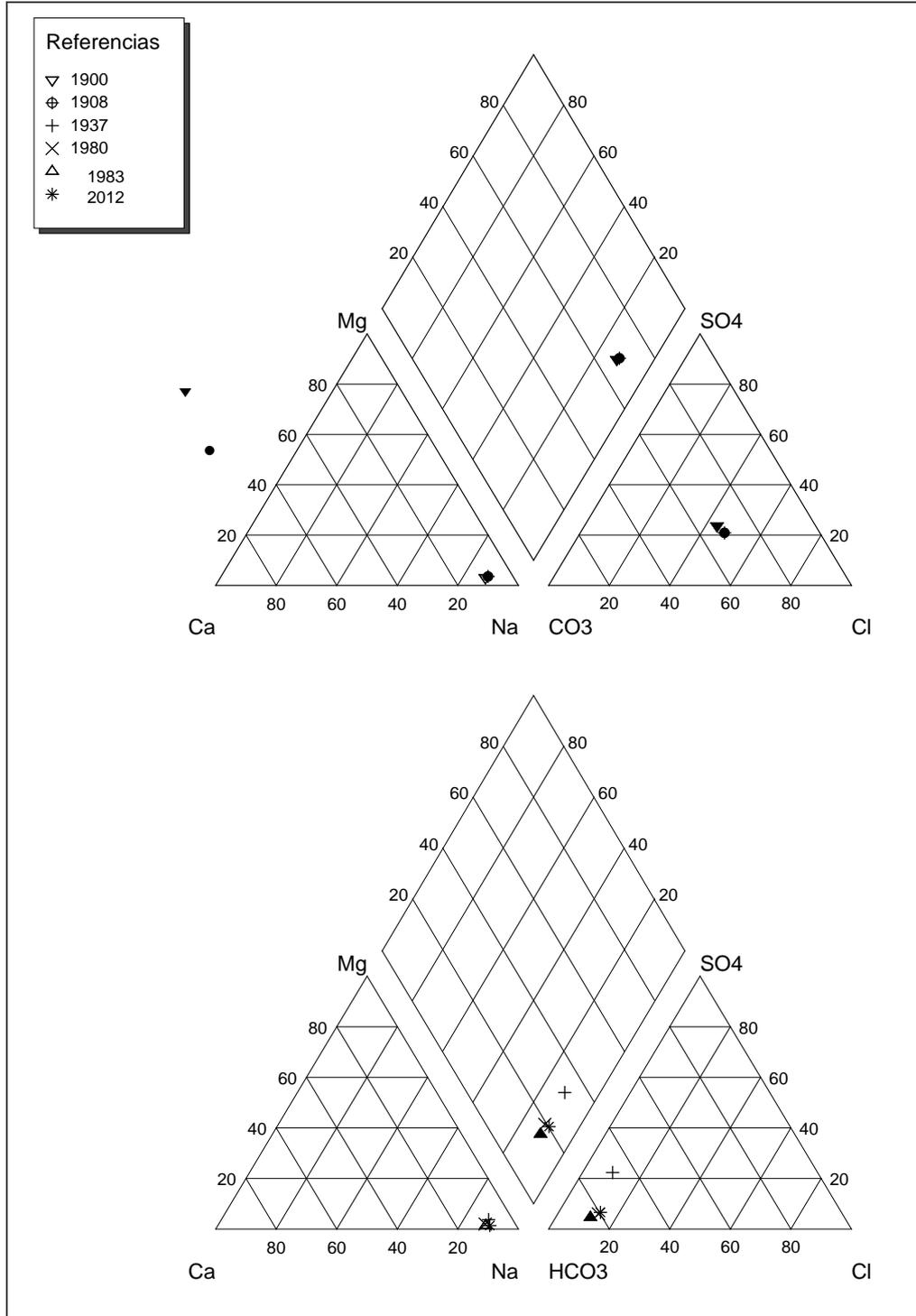


Figura N° 67. Diagrama Piper, Los Nacimientos

El agua de Los Nacimientos correspondientes al primer gráfico fue clasificada como “Clorurada, carbonatada - sódica” y la del segundo como “Bicarbonatada sódica”.

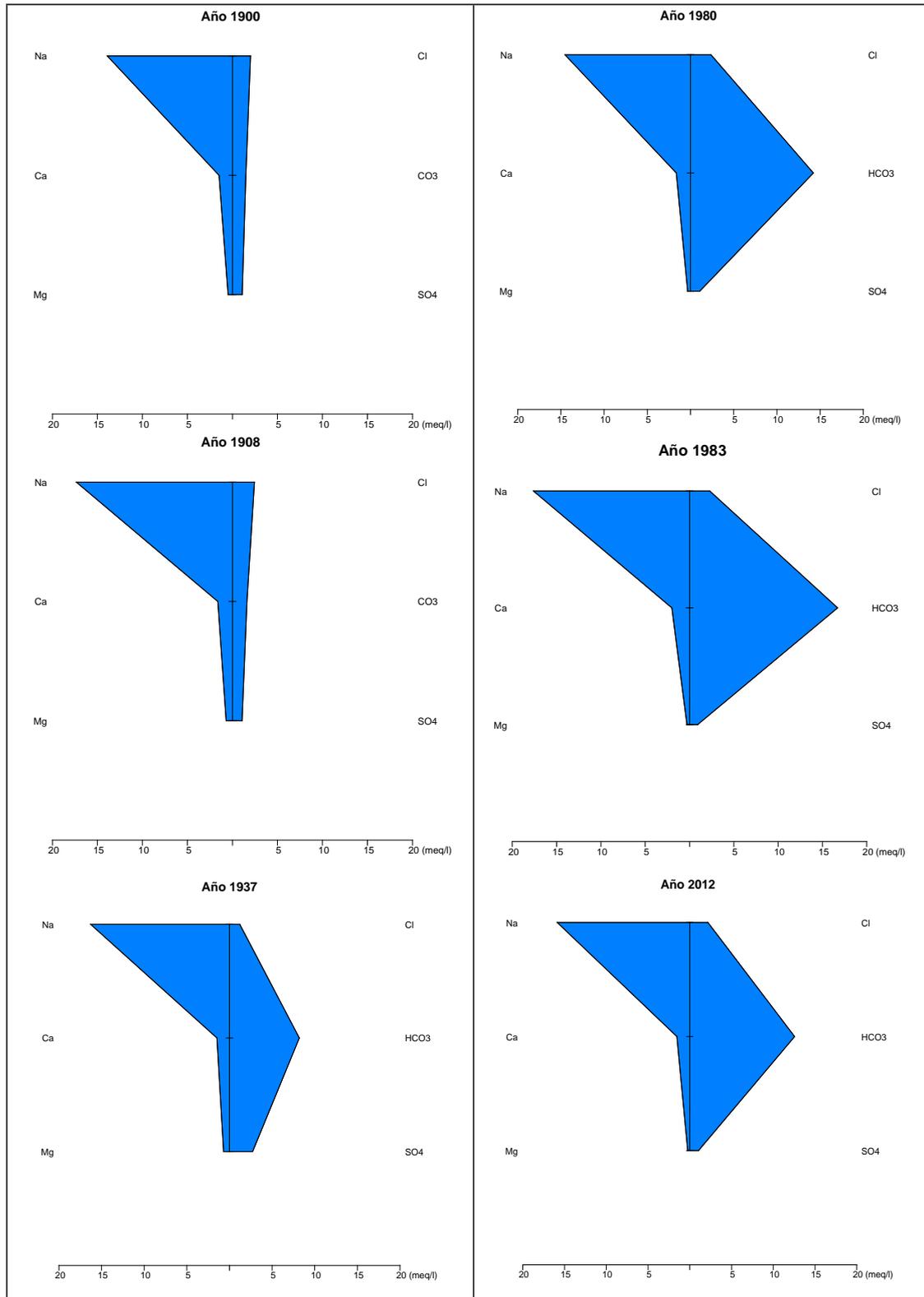


Figura N° 69. Diagramas de Stiff

Los diagramas de Stiff permitieron ver un comportamiento cíclico del agua desde 1900 al 2012. La concentración del bicarbonato aumenta progresivamente hasta llegar a un

pico máximo en el año 1988, para volver a disminuir en 2012. Los valores de cloro y sulfato se mantienen constantes excepto para el año 1937 donde la concentración de cloro es la mínima y la de sulfato la máxima para todo el registro. En el caso de los cationes, se presentan muy constantes sin variaciones significantes.

La Quebrada de Hualfín						
Catión mg/L	E.Herrero Ducloux, 1900	E.Herrero Ducloux, 1908	E.Herrero Ducloux, 1937	YPF 1980	ESIN, 1983	Alumbraera, 2012
Ca	Sin Análisis			37.5	Sin Análisis	12.0
Na				660		165.0
Mg				3.0		<1
K				45		1.0
Anión mg/L						
CO3				-		4.4
HCO3				356		22.2
SO4				1018.5		90.0
Cl				175		195.0
B				10.9		
SiO2				115.0		<42.8
Isótopos						
Tritio						
Deuterio						-27.4
O18						-4.65
Temperatura °C						29.5
Ph		7.8	8.96			

Tabla N° 5. Fuente La Quebrada

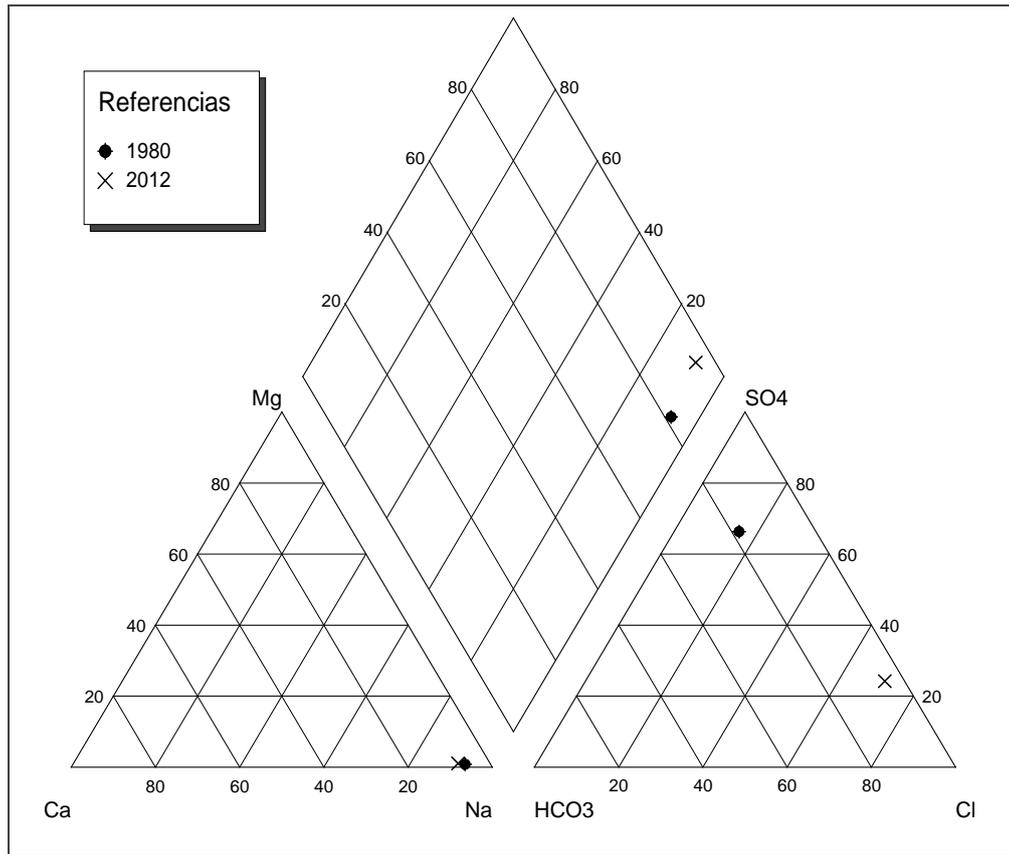


Figura N° 70. Diagrama Piper, La Quebrada

El agua de La Quebrada fue clasificada como “Sulfatada sódica” para el año 1980 y como “Clorurada sódica” para el año 2012.

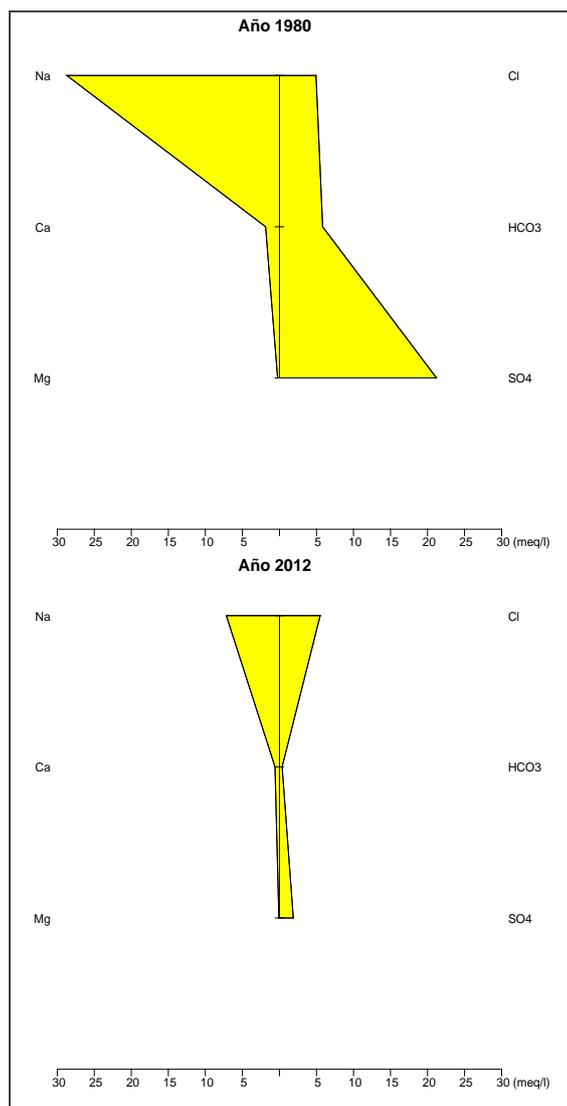
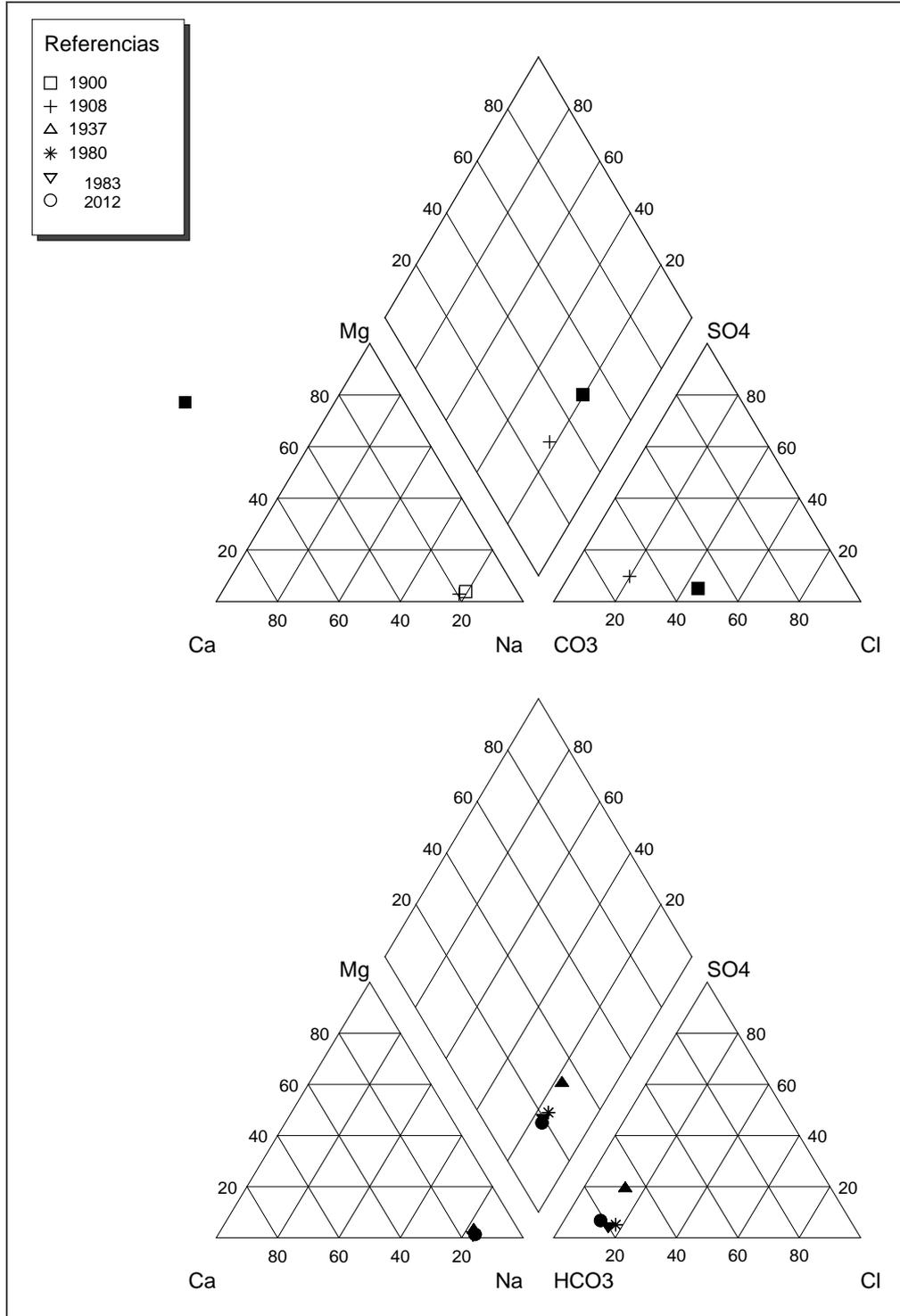


Figura N° 71. Diagramas de Stiff

La terma de La Quebrada ha sido aparentemente de poco interés para algunos investigadores, pero es en si la que presenta mayores variaciones con respecto a sus componentes. El grafico de Stiff permitió observar la grosa disminucion tanto de aniones como de cationes, con la salvedad de que el cloro y el calcio se puede considerar como los que sufrieron menor variación.

Baños Grandes de Villa Vil						
Cación mg/L	E.Herrero Ducloux, 1900	E.Herrero Ducloux, 1908	E.Herrero Ducloux, 1937	YPF 1980	ESIN, 1983	Alumbraera, 2012
Ca	40.02	57.18	38.3	37.0	43.0	37.0
Na	208.13*	251.60	238.3	228.0	250.0	227.0
Mg	5.55	5.13	4.9	2.0	2.0	2.0
K	8.05	44.33	26.6	13.0	14.0	8.7
Anión mg/L						
CO3	59.96*	239.92*	-	-	0.0	-
HCO3	-	-	330.1	633.0	650.0	766
SO4	9.6*	53.05*	74.8	33.0	29.0	<50
Cl	62.5	79.9	39.0	84.0	73.0	65.0
B	-	-	-	0.8	0.77	-
SiO2	84.7	90.0	95.6	84.0	61.0	53.5
Isótopos						
Tritio	-	-	-	-	2.1 +/- 0.7 U.T.	-
Deuterio	-	-	-	-	-	-31.0
O18	-	-	-	-	-	-6.14
Temperatura °C	-	64	60.5	65	64	63.2
Ph	-	-	6.7	7.6	6.38	-

Tabla N° 6. Fuente Los Baños Grandes de Villa Vil



N° 72. Diagrama Piper, Los Baños Grandes de Villa Vil

El agua de Los Baños Grandes de Villa Vil fue clasificada como “Bicarbonatada sódica”.

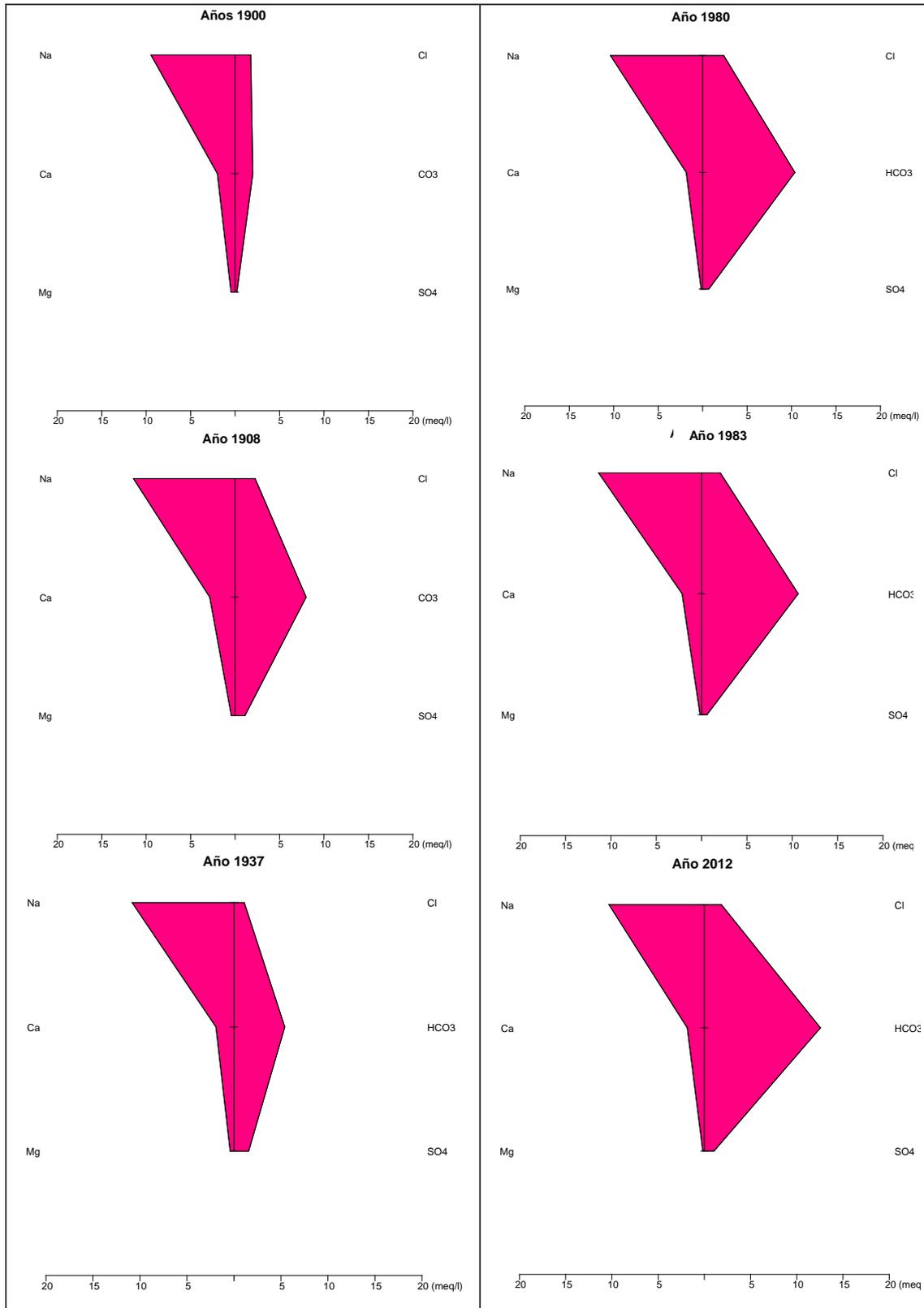


Figura N° 73. Diagramas de Stiff

Con ambos diagramas se puede observar que las composiciones químicas de las aguas no han variado notablemente. Con respecto a los cationes se puede decir que se han

mantenido aproximadamente constantes; en el caso de los aniones, el sulfato presenta un aumento progresivo hasta llegar a un máximo para el año 1937 para luego disminuir año a año; el cloro tiene un comportamiento parecido al de los cationes y el bicarbonato presenta un aumento progresivo en cada estudio.

Villa Vil						
Catión mg/L	E. Herrero Ducloux, 1900	E. Herrero Ducloux, 1908	E. Herrero Ducloux, 1937	YPF 1980	ESIN, 1983	Alumbarrera, 2012
Ca	Sin Análisis			36.5	5.0	<10
Na				69.5	78.0	76.0
Mg				0.5	0.1	<1
K				0.75	16.0	0.6
Anión mg/L						
CO ₃				-	13.0	8.7
HCO ₃				56.0	52.0	30.9
SO ₄				75.0	42.0	<50
Cl				85.5	61.0	62.0
B				1.1	1.20	-
SiO ₂				-	34.0	<42.8
Isótopos				-	-	-
Tritio				-	-	-
Deuterio				-	-	-21.1
O ₁₈				-	-	-4.21
Temperatura °C				38.5	41.4	38.9
Ph				7.4	8.33	8.87

Tabla N° 7. Fuente de Villa Vil

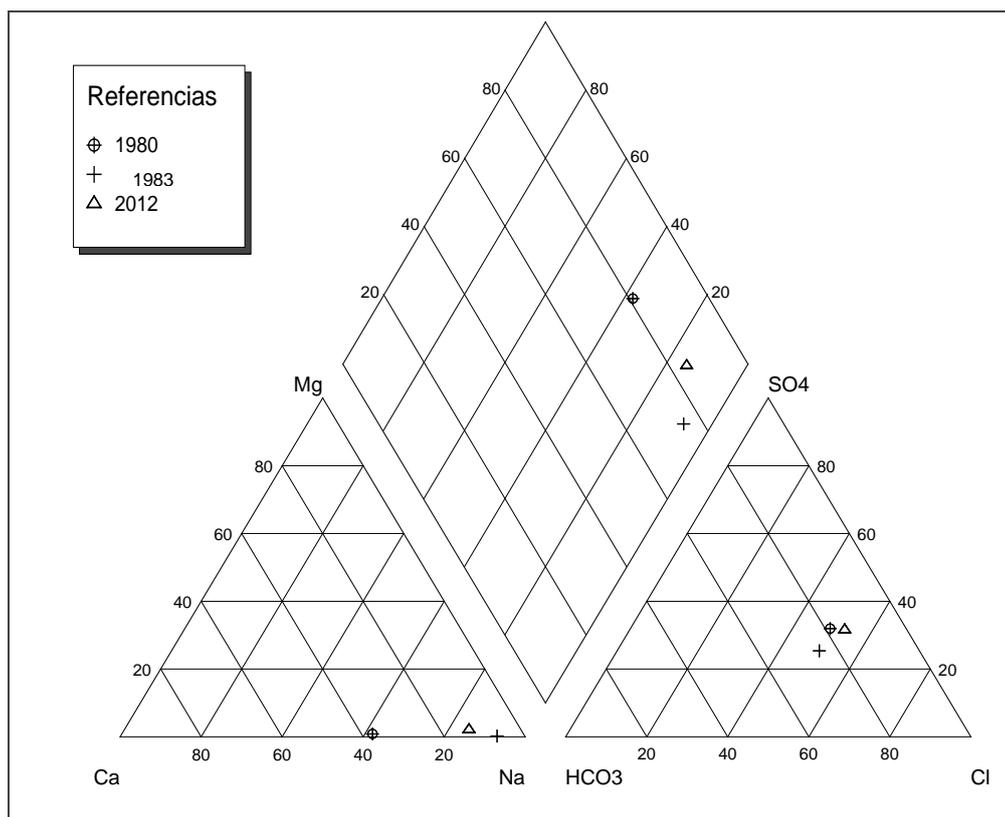


Figura N° 74. Diagrama Piper, Villa Vil

El agua de Villa Vil fue clasificada como “Clorurada sulfatada - sódica”.

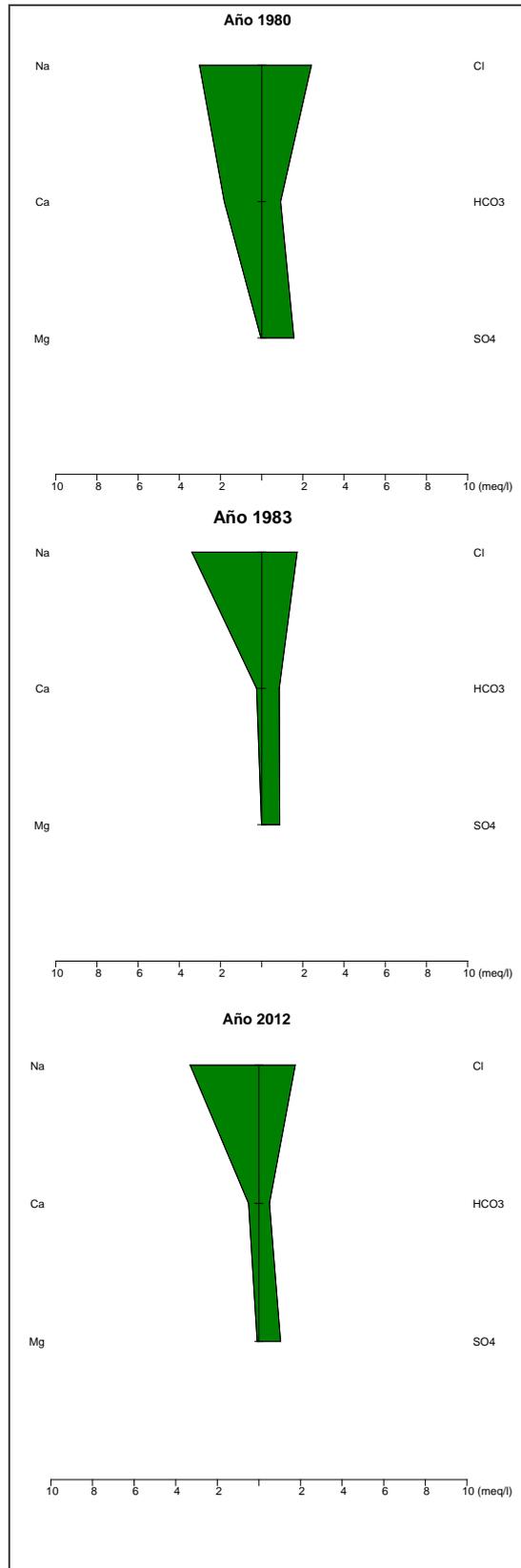


Figura N° 75. Diagramas de Stiff

El agua de Villa Vil no presenta cambios considerables en sus componentes a lo largo del tiempo, como se puede observar con el diagrama de Stiff, exceptuando el calcio que disminuye notablemente, el resto de iones se reducen pero en menor proporción.

5.2.3.1.2. Sector YMAD - Vis Vis

Aguas de Dionisio						
Cación mg/L	E. Herrero Ducloux, 1900	E. Herrero Ducloux, 1908	E. Herrero Ducloux, 1937	YPF 1980	ESIN, 1983	Alumbrera, 2012
Ca	Sin Análisis	163.65	129.3	87.0	150.0	138.0
Na		487.98	463.0	483.0	450.0	491.0
Mg		20.81	18.7	16.0	17.0	16.0
K		27.23	Vestigios	20.0	17.0	15.2
Anión mg/L						
CO3		199.53*	-	-	0.0	-
HCO3		-	278.0	451.0	529.0	421
SO4		835.32	849.8	981.0	790.0	823.0
Cl		144.7	63.9	154.0	141.0	135.0
B		-	-	2.2	2.90	-
SiO2		48.0	46.0	52.0	36.0	<42.8
Isótopos						
Tritio		-	-	-	-	-
Deuterio		-	-	-	-	-36.8
O18		-	-	-	-	-6.0
Temperatura °C		24	24.5	26.5	17.9	18.1
Ph		-	7.3	7.55	7.83	8.96

Tabla N° 8. Fuente Aguas de Dionisio

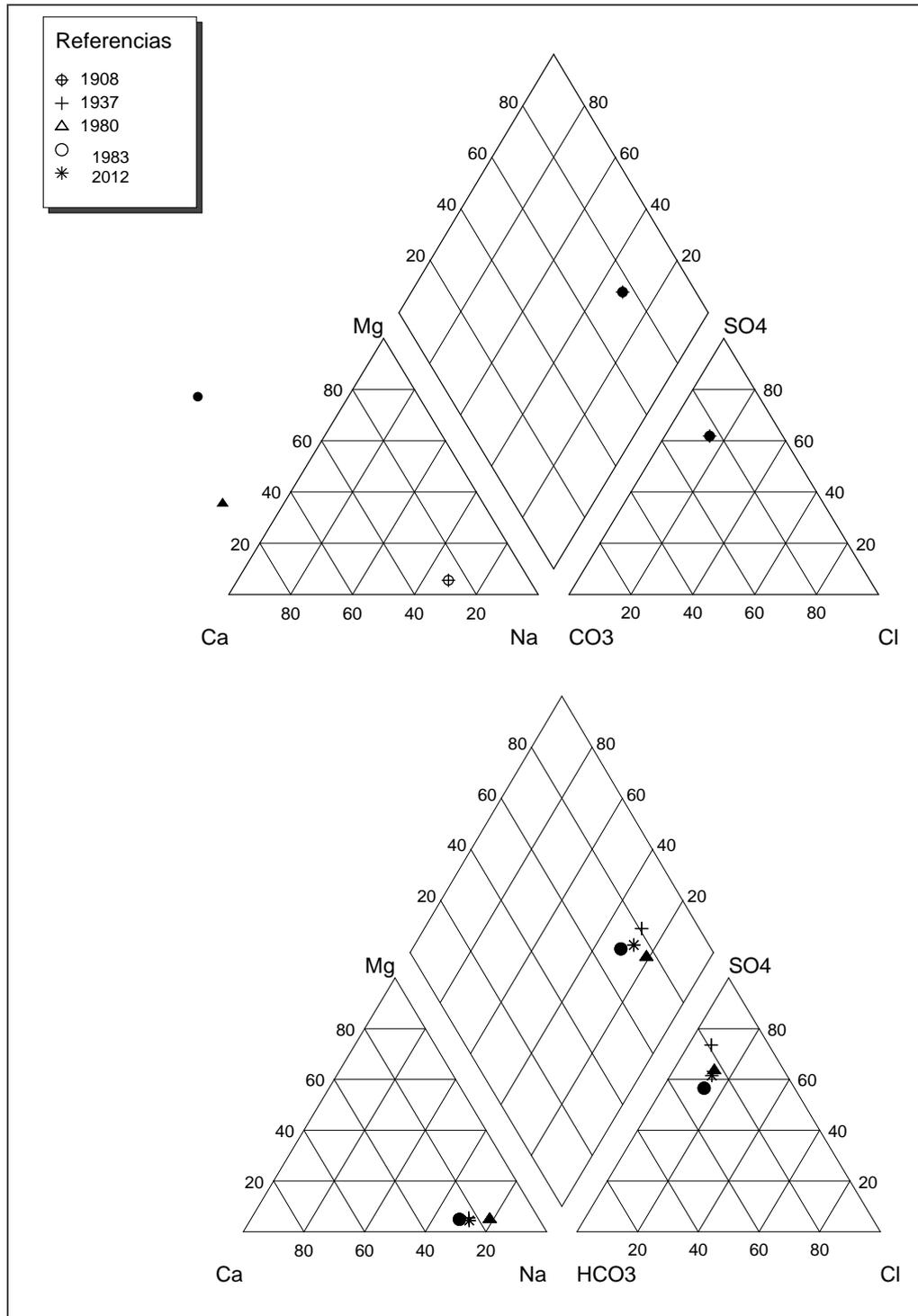


Figura N° 76. Diagrama Piper, Aguas de Dionisio

El agua de Aguas de Dionisio fue clasificada como “Sulfatada sódica”.

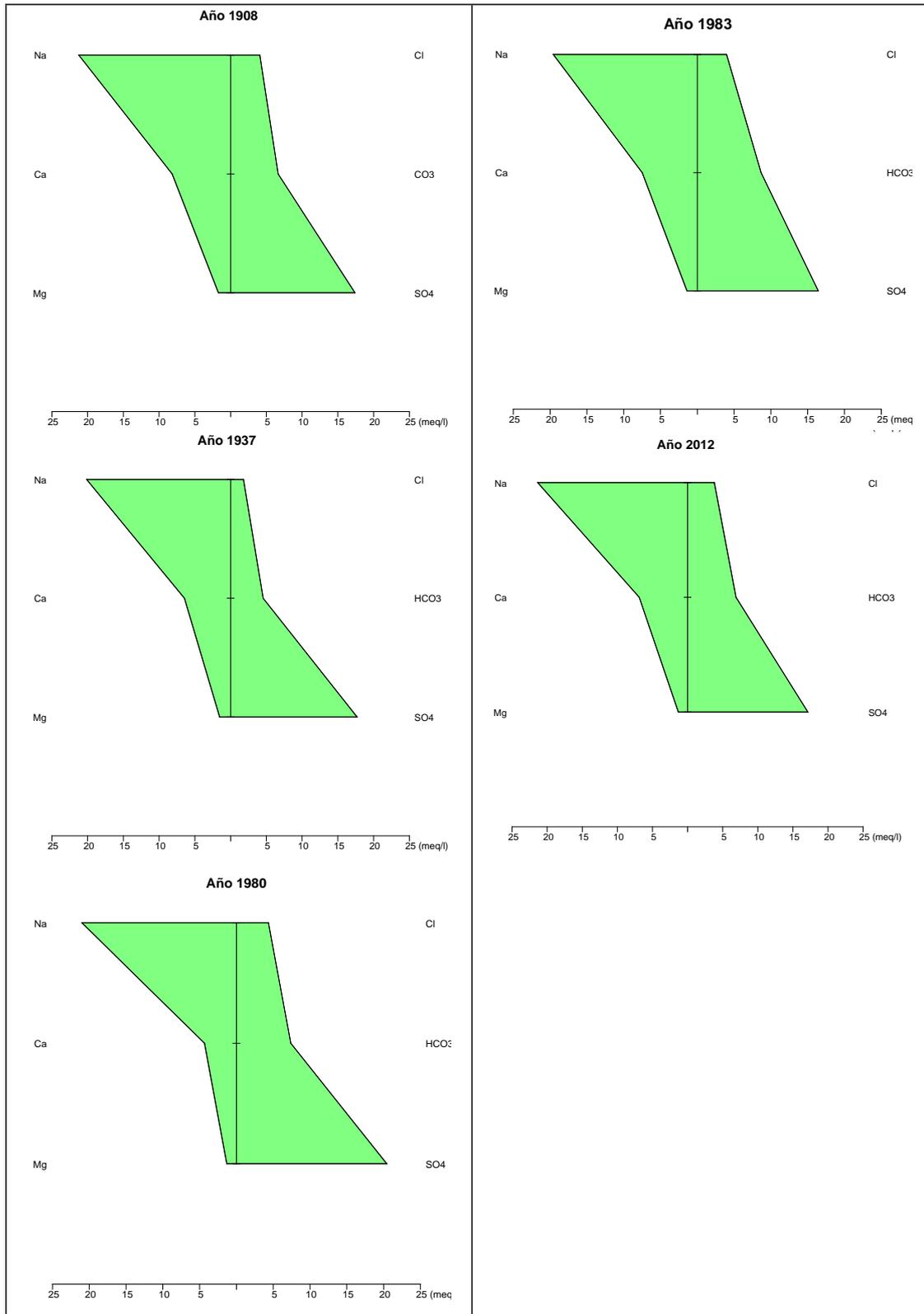


Figura N° 77. Diagramas de Stiff

A simple vista se pudo apreciar que en general el agua de Dionisio no ha sufrido cambios considerables en los años de análisis, pero si se observo que todos los elementos sufren un mínimo aumento y disminución para cada año.

Vis Vis						
Cación mg/L	E.Herrero Ducloux, 1900	E. Herrero Ducloux, 1908	E.Herrero Ducloux, 1937	YPF 1980	ESIN, 1983	Alumbraera, 2012
Ca	Sin Análisis	59.32	Sin Análisis	86.5	75.0	92.0
Na		349.56		262.0	295.0	298.0
Mg		19.0		29.5	20.0	28.0
K		19.43		19.5	17.0	18.0
Anión mg/L						
CO3		85.56*		-	0.0	-
HCO3		-		351.0	345.0	271
SO4		466.96**		437.5	442.0	507.0
Cl		153.0		140	123.0	141.0
B		-		1.1	1.50	
SiO2		51.6		38	42.0	<42.8
Isótopos						
Tritio		-		-	6.0 +/- 0.7 U.T.	-
Deuterio		-		-	-	-34.2
O18	-	-	-	-6.04		
Temperatura °C	-	27	35.2	35		
Ph	-	7.7	6.71	7.03		

Tabla N° 9. Fuente Vis Vis

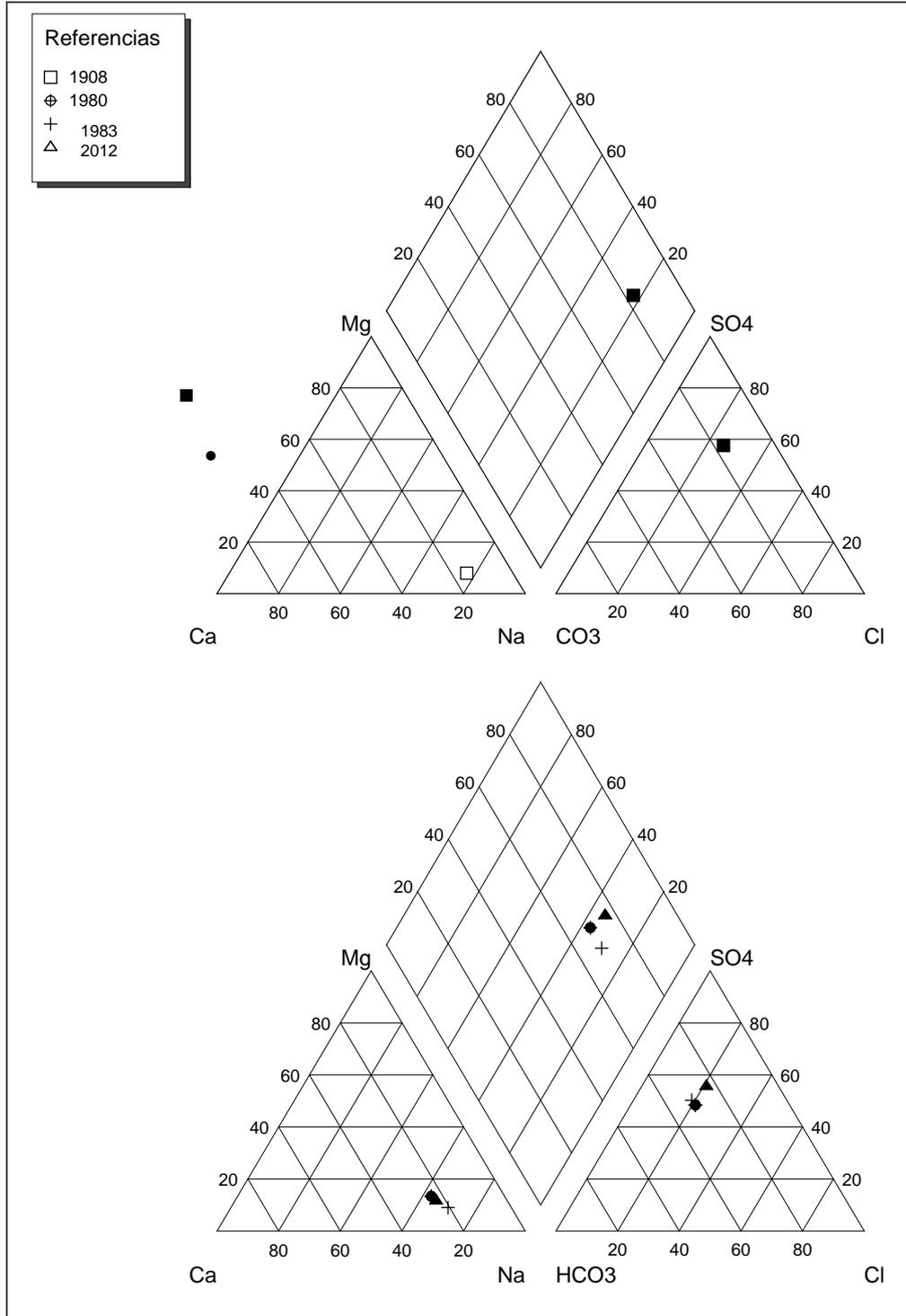


Figura N° 78. Diagrama Piper, Vis Vis

El agua de Vis Vis fue clasificada como “Sulfatada sódica”.

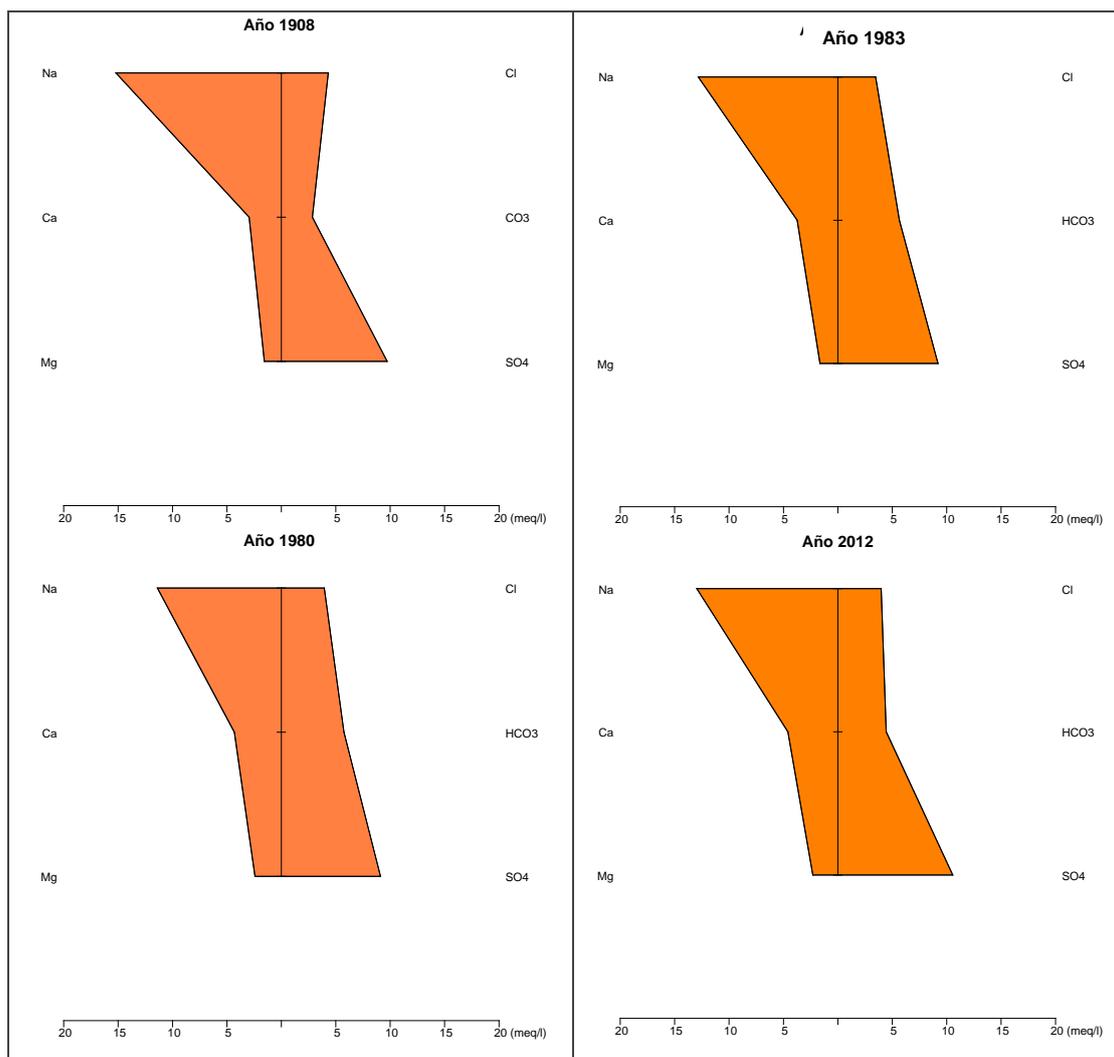


Figura N° 79. Diagramas de Stiff

El agua de Vis Vis presenta una composición aproximadamente constante en el tiempo. Se registran pequeñas variaciones en los cationes donde los valores aumentan y disminuyen e inversamente en los años analizados. Respecto a los aniones cabe hacer notar que en el caso del bicarbonato este presenta una progresiva disminución a diferencia de los sulfatos que aumentan.

5.2.3.2. Procesamiento del análisis de elementos mayoritarios e isótopos obtenidos en campaña

En este apartado, con los resultados analíticos obtenidos, se compararon todas las fuentes termales en estudio, para esto se utilizaron nuevamente los diagramas de Piper y Stiff, adicionando otros datos:

- ✚ Con las concentraciones de SiO₂ y el programa Aqua Chem, se realizó el gráfico del geotermómetro de sílice para estimar la eventual profundidad del reservorio,
- ✚ Con el programa Past se elaboró el gráfico Euclidean para confirmar la relación entre las fuentes,
- ✚ Con Excel se realizó el análisis para los isótopos ¹⁸O y ²H y su relación con la Línea de Agua Meteórica Global.

5.2.3.2.1. Gráficos Piper y Stiff

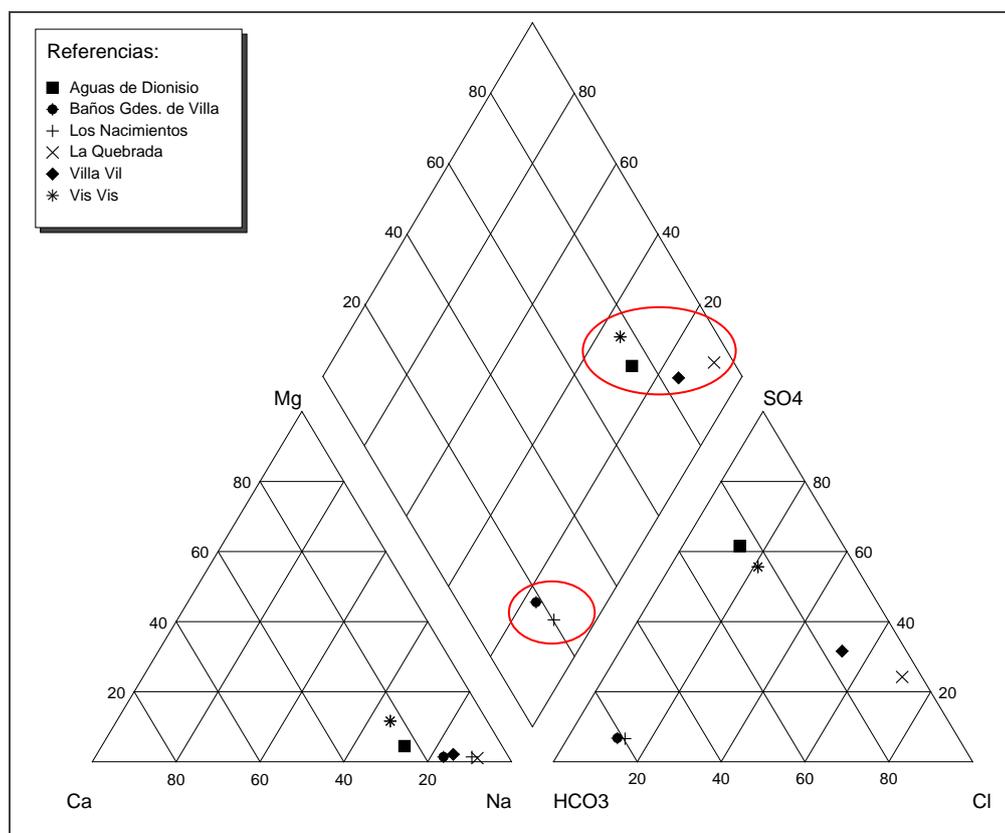


Figura N° 80. Gráfico Piper para todas las fuentes de estudio

Con este diagrama se pudo observar que las fuentes termales se encuentran agrupadas en áreas bien definidas constituyendo dos familias con aguas geoquímicamente similares.

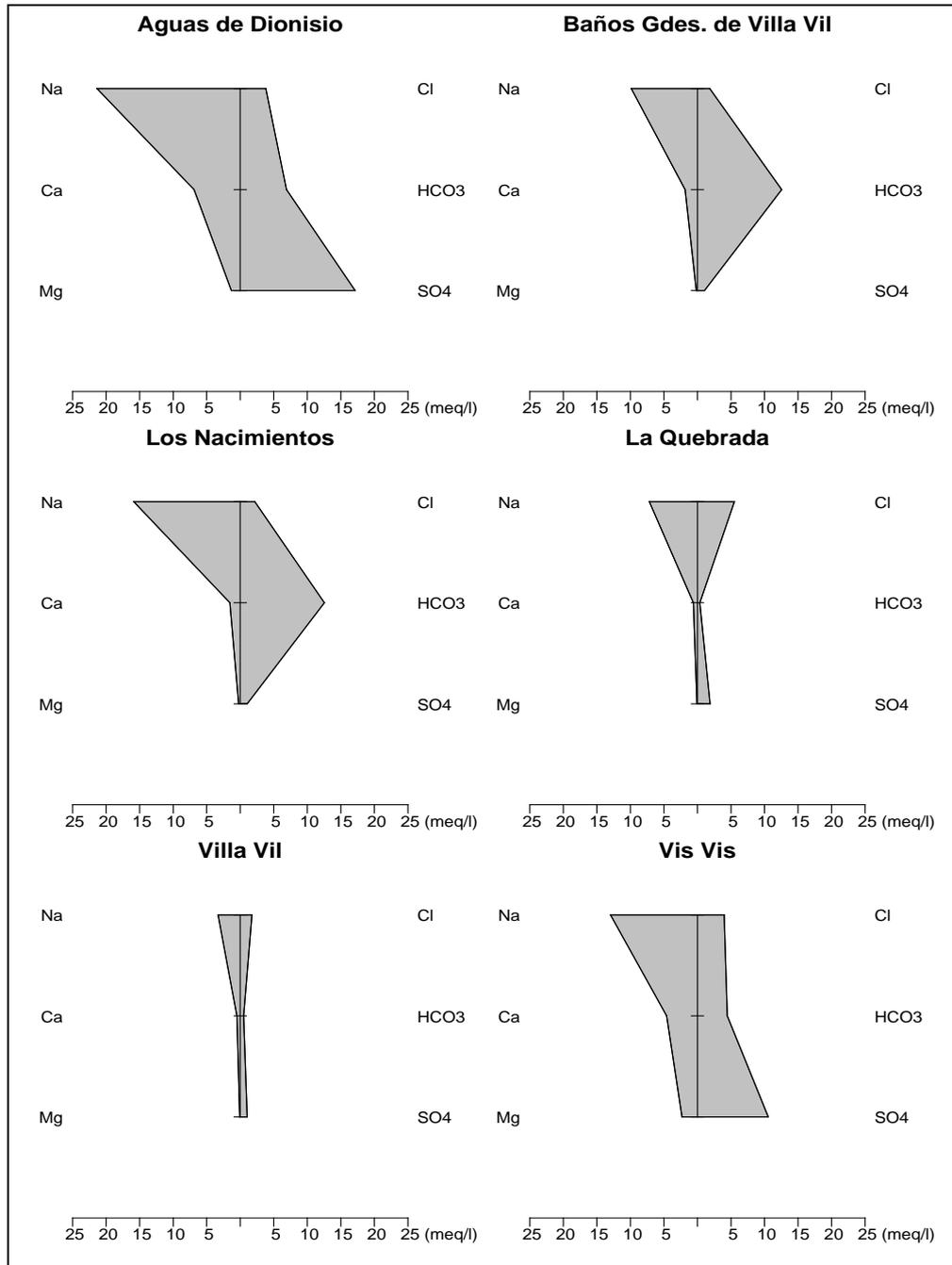


Figura N° 81. Diagramas Stiff para todas las fuentes de estudio

Por la forma geométrica de los diagramas de Stiff, se pudo hacer un agrupamiento más fino de las fuentes, así se tienen: Los Baños Grandes de Villa Vil con Los Nacimientos; La Quebrada con Villa Vil y Aguas de Dionisio con Vis Vis.

5.2.3.2.2. Grafico Euclidean, cationes y aniones

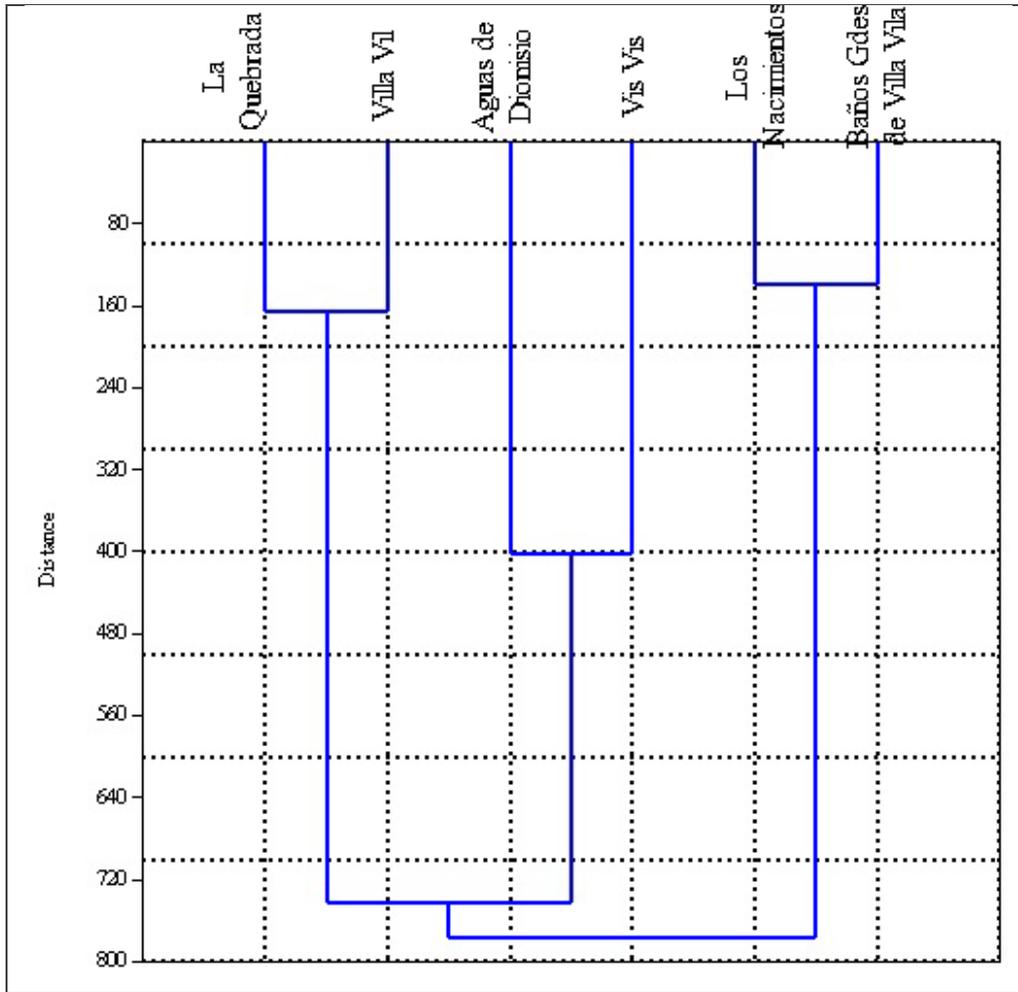


Figura N° 82. Grafico Euclidean

En este diagrama se representaron todos los aniones y cationes del análisis y se aprecia como se relacionan, según estos, las fuentes. Se individualizaron tres clúster principales. La distancia de las líneas perpendiculares verticales indican la relación entre cada clúster, así a menor relación mayor es la distancia.

5.2.3.2.3. Gráfico Geotermómetro sílice-cuarzo

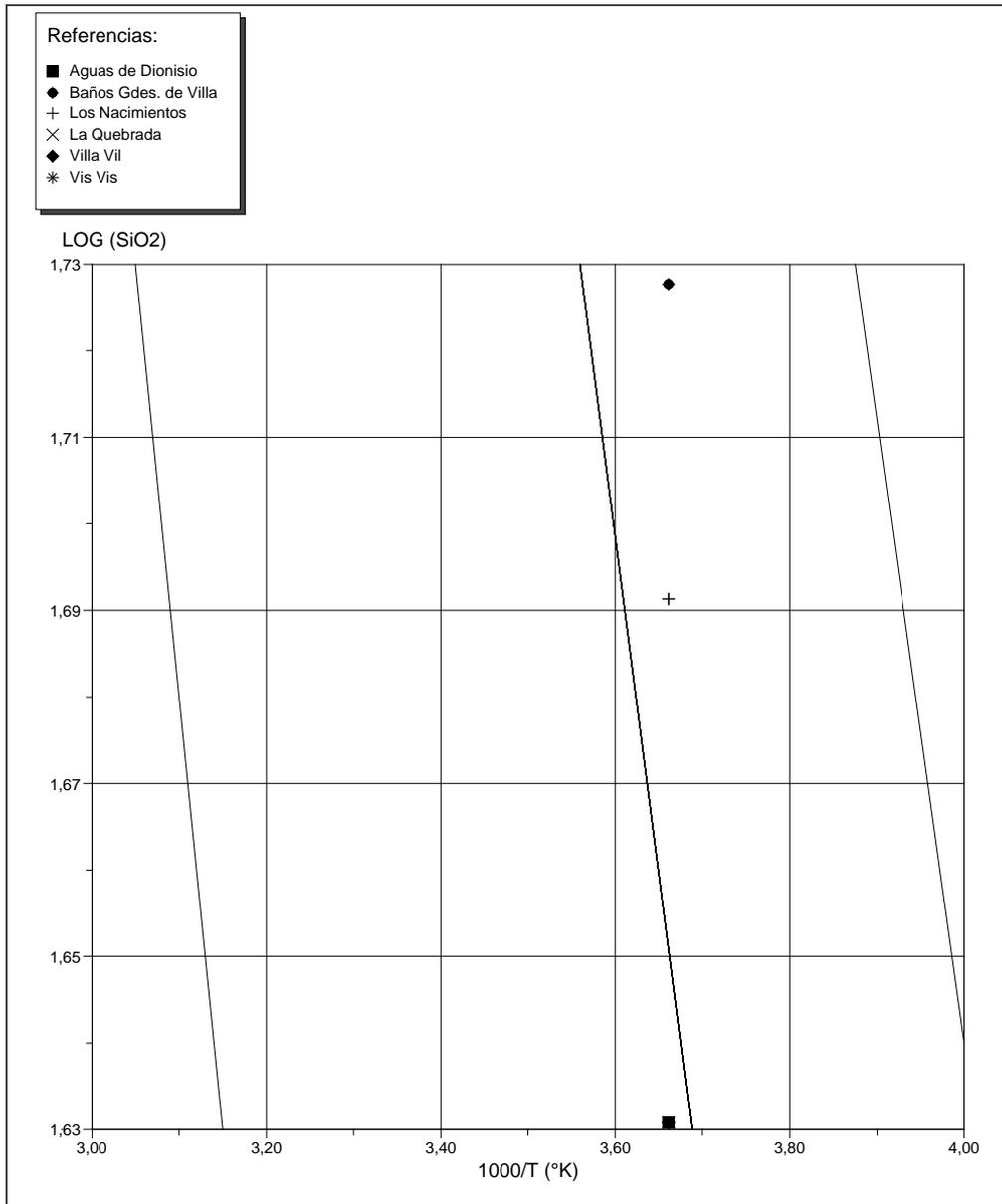


Figura N° 83. Grafico de geotermómetro

5.2.3.2.4. Datos de salida del software (la temperatura del reservorio esta en °C)

THERMOMETER	Calc Temp	Remarks	Reference	Range
Amorphous Silica	-15		Fournier 1977	0-250
Cristobalite Alpha	54		Fournier 1977	0-250
Cristobalite Beta	8		Fournier 1977	0-250
Chalcedony	75		Fournier 1977	0-250
Quartz	105		Fournier 1977	0-250
Quartz steam loss	105		Fournier 1977	0-250
K/Mg	28		Giggenbach 1983	
Na/K	94		Fournier 1973	
Na/K	103		Truesdell 1976	100-275
Na/K	160		Fournier & Potter 19	
Na/K	147		Fournier 1979	100-275
Na-K-Ca	134	Beta = 1/3	Fournier 1979	100-350
Na-K-Ca Mg corrected	130	R = 7,4	Fournier 1979	100-350

Tabla N° 10. Geotermómetros, Baños Grandes de Villa Vil

THERMOMETER	Calc Temp	Remarks	Reference	Range
Amorphous Silica	-19		Fournier 1977	0-250
Cristobalite Alpha	51		Fournier 1977	0-250
Cristobalite Beta	4		Fournier 1977	0-250
Chalcedony	71		Fournier 1977	0-250
Quartz	101		Fournier 1977	0-250
Quartz steam loss	102		Fournier 1977	0-250
K/Mg	28		Giggenbach 1983	
Na/K	92		Fournier 1973	
Na/K	102		Truesdell 1976	100-275
Na/K	158		Fournier & Potter 19	
Na/K	145		Fournier 1979	100-275
Na-K-Ca	141	Beta = 1/3	Fournier 1979	100-350
Na-K-Ca Mg corrected	116	R = 11,5	Fournier 1979	100-350

Tabla N° 11. Geotermómetros, Los Nacimientos

THERMOMETER	Calc Temp	Remarks	Reference	Range
Amorphous Silica	-24		Fournier 1977	0-250
Cristobalite Alpha	44		Fournier 1977	0-250
Cristobalite Beta	-2		Fournier 1977	0-250
Chalcedony	64		Fournier 1977	0-250
Quartz	95		Fournier 1977	0-250
Quartz steam loss	96		Fournier 1977	0-250
K/Mg	47		Giggenbach 1983	
Na/K	4		Fournier 1973	
Na/K	16		Truesdell 1976	100-275
Na/K	73		Fournier & Potter 19	
Na/K	66		Fournier 1979	100-275
Na-K-Ca	28	Beta = 4/3	Fournier 1979	100-350

Tabla N° 12. Geotermómetros, Villa Vil

THERMOMETER	Calc Temp	Remarks	Reference	Range
Amorphous Silica	-24		Fournier 1977	0-250
Cristobalite Alpha	44		Fournier 1977	0-250
Cristobalite Beta	-2		Fournier 1977	0-250
Chalcedony	64		Fournier 1977	0-250
Quartz	95		Fournier 1977	0-250
Quartz steam loss	96		Fournier 1977	0-250
K/Mg	42		Giggenbach 1983	
Na/K	-7		Fournier 1973	
Na/K	5		Truesdell 1976	100-275
Na/K	61		Fournier & Potter 19	
Na/K	56		Fournier 1979	100-275
Na-K-Ca	44	Beta = 4/3	Fournier 1979	100-350

Tabla N° 13. Geotermómetro, La Quebrada

THERMOMETER	Calc Temp	Remarks	Reference	Range
Amorphous Silica	-24		Fournier 1977	0-250
Cristobalite Alpha	44		Fournier 1977	0-250
Cristobalite Beta	-2		Fournier 1977	0-250
Chalcedony	64		Fournier 1977	0-250
Quartz	95		Fournier 1977	0-250
Quartz steam loss	96		Fournier 1977	0-250
K/Mg	42		Giggenbach 1983	
Na/K	79		Fournier 1973	
Na/K	89		Truesdell 1976	100-275
Na/K	145		Fournier & Potter 19	
Na/K	134		Fournier 1979	100-275
Na-K-Ca	126	Beta = 1/3	Fournier 1979	100-350
Na-K-Ca Mg corrected	99	R = 15,3	Fournier 1979	100-350

Tabla N° 14. Geotermómetros, Aguas de Dionisio

THERMOMETER	Calc Temp	Remarks	Reference	Range
Amorphous Silica	-24		Fournier 1977	0-250
Cristobalite Alpha	44		Fournier 1977	0-250
Cristobalite Beta	-2		Fournier 1977	0-250
Chalcedony	64		Fournier 1977	0-250
Quartz	95		Fournier 1977	0-250
Quartz steam loss	96		Fournier 1977	0-250
K/Mg	46		Giggenbach 1983	
Na/K	132		Fournier 1973	
Na/K	139		Truesdell 1976	100-275
Na/K	193		Fournier & Potter 19	
Na/K	177		Fournier 1979	100-275
Na-K-Ca	152	Beta = 1/3	Fournier 1979	100-350
Na-K-Ca Mg corrected	50	R = 31,3	Fournier 1979	100-350

Tabla N° 15. Geotermómetros, Vis Vis

5.2.3.2.5. Grafico Euclidean, sílice

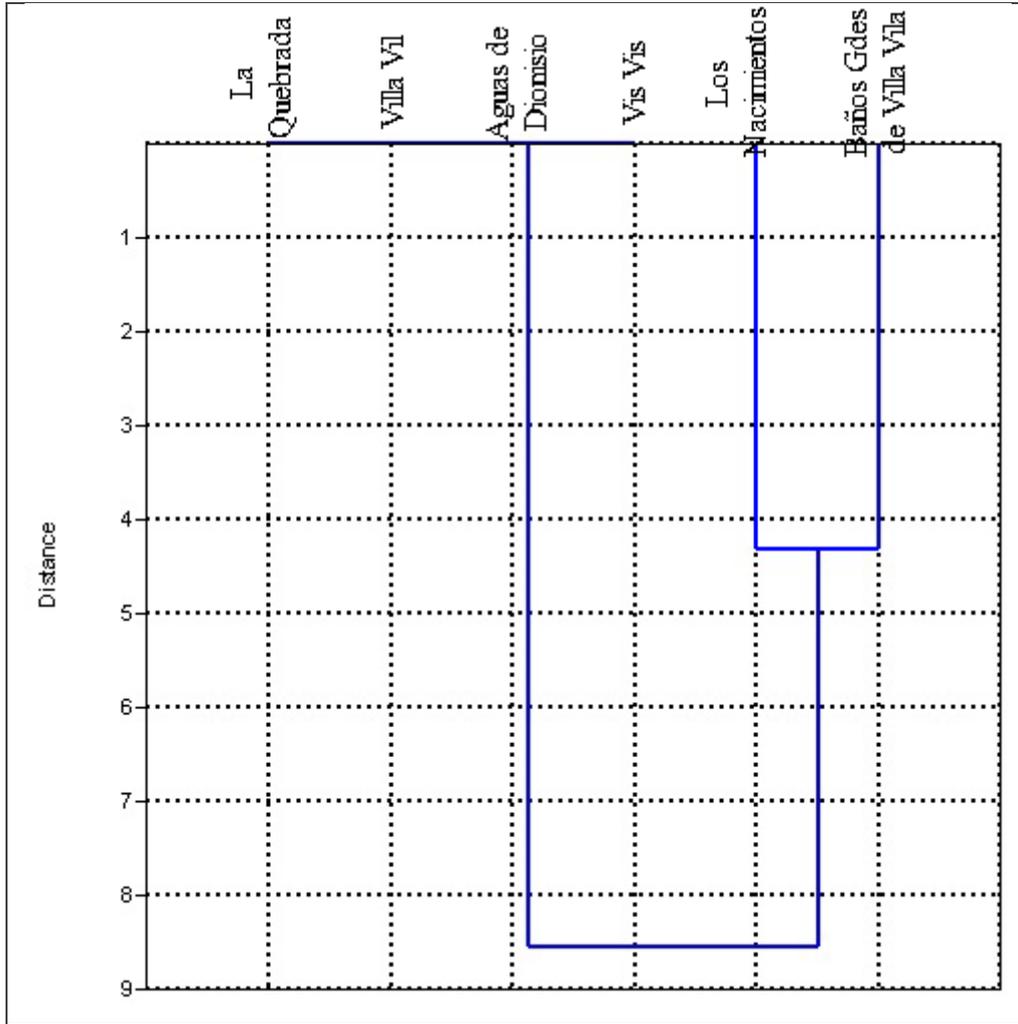


Figura N° 84. Grafico Euclidean

En este diagrama se represento los valores de sílice con la consiguiente separación de solo dos clúster, los cuales se encuentran mínimamente relacionados.

5.2.3.2.6. Gráfico isotópico $^{18}\text{O} - ^2\text{H}$

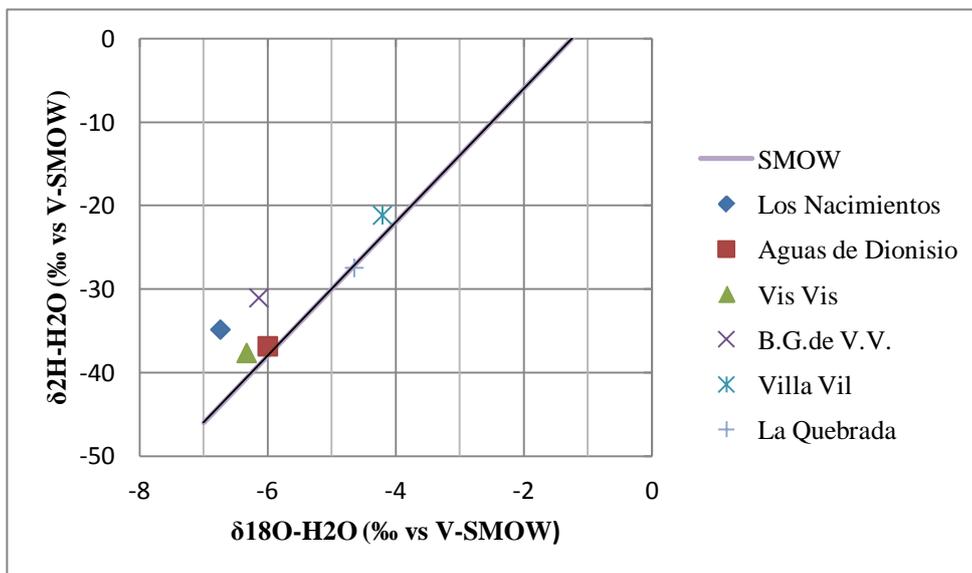


Figura N° 85. Grafico relación isotopos-SMOW

El gráfico permite observar indicios de eventos de evaporación en las aguas produciendo incrementos en la concentración de los isotopos pesados; constatados también por el exceso de deuterio tal como lo muestra el reporte de datos para isotopos del programa Aqua Chem, en las siguientes tablas.

18O (SMOW) = -6,14	
2H (SMOW) = -31,0	
Excess deuterium (Deuterium - 8.2*18O): 8,55	
Infiltration Height (18O)	-1294 = -526.32 * 180 + -4526
Infiltration Height (D)	-48 = 2.63 * D + 33.16
Infiltration Temperature (18O)	-5348 = -93.9 * 180 + -5924.9
Infiltration Temperature (D)	-580 = 20 * D + 40.23

Tabla N° 16. Isotopos, Los Baños Grandes de Villa Vil

18O (SMOW) = -6,74	
2H (SMOW) = -34,8	
Excess deuterium (Deuterium - 8.2*18O): 9,67	
Infiltration Height (18O)	-979 = -526.32 * 180 + -4526
Infiltration Height (D)	-58 = 2.63 * D + 33.16
Infiltration Temperature (18O)	-5292 = -93.9 * 180 + -5924.9
Infiltration Temperature (D)	-656 = 20 * D + 40.23

Tabla N° 17. Isotopos, Los Nacimientos

180 (SMOW) = -4,65
2H (SMOW) = -27,4
Excess deuterium (Deuterium - 8.2*180): -0,07
Infiltration Height (180) -2079 = -526.32 * 180 + -4526
Infiltration Height (D) -39 = 2.63 * D + 33.16
Infiltration Temperature (180) -5488 = -93.9 * 180 + -5924.9
Infiltration Temperature (D) -508 = 20 * D + 40.23

Tabla N° 18. Isotopos, La Quebrada

180 (SMOW) = -4,21
2H (SMOW) = -21,1
Excess deuterium (Deuterium - 8.2*180): 2,62
Infiltration Height (180) -2310 = -526.32 * 180 + -4526
Infiltration Height (D) -22 = 2.63 * D + 33.16
Infiltration Temperature (180) -5530 = -93.9 * 180 + -5924.9
Infiltration Temperature (D) -382 = 20 * D + 40.23

Tabla N° 19. Isotopos, Villa Vil

180 (SMOW) = -6,00
2H (SMOW) = -36,8
Excess deuterium (Deuterium - 8.2*180): 1,6
Infiltration Height (180) -1368 = -526.32 * 180 + -4526
Infiltration Height (D) -64 = 2.63 * D + 33.16
Infiltration Temperature (180) -5361 = -93.9 * 180 + -5924.9
Infiltration Temperature (D) -696 = 20 * D + 40.23

Tabla N° 20. Isotopos, Aguas de Dionisio

180 (SMOW) = -6,04
2H (SMOW) = -34,2
Excess deuterium (Deuterium - 8.2*180): 4,53
Infiltration Height (180) -1347 = -526.32 * 180 + -4526
Infiltration Height (D) -57 = 2.63 * D + 33.16
Infiltration Temperature (180) -5358 = -93.9 * 180 + -5924.9
Infiltration Temperature (D) -644 = 20 * D + 40.23

Tabla N° 21. Isotopos, Vis Vis

CAPITULO VI – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las aguas termales de estudio son la consecuencia de la percolación profunda de aguas meteóricas, a través de fracturas y fallas en rocas cristalinas y volcánicas, que absorben calor conductivamente en su trayecto. Para el sector de la Sierra de Hualfín, constituida por un cuerpo granítico, podría ser el causante de la fuente principal de calor además de la desintegración de sus elementos radiactivos. Para el sector YMAD-Vis Vis no se descarta como un factor más, el vulcanismo del área.

Las diferentes composiciones químicas de las fuentes, están influenciada por la geología de cada sector, el contenido en sustancias solubles, el tiempo de contacto y la temperatura.

- ✓ Las fuentes termales estudiadas, en su mayoría, conservaron una misma clasificación química en los 112 años desde el primer análisis realizado.

Se observo mediante los diagramas de Stiff que tanto los cationes como los aniones han experimentado mínimas variaciones en el tiempo, en algunos casos fue progresiva, en otras regresivas e incluso algunas fueron cíclicas.

Como factores causantes de estas variaciones se descartan causas geológicas (por el periodo de tiempo considerado) y las mínimas variaciones en la temperatura y ph.

- ✓ Los cambios tanto químicos como físicos, fueron atribuidos a una razón climática, es decir, que las muestras se hayan tomado en periodos que fueron más secos o lluviosos, antes o después de tormentas, en verano o en invierno, nublado o soleado, etc.

Esta situación está dada por cuanto las aguas de las fuentes termales, según la relación entre isótopos, tienen un origen principalmente meteórico y presentan evaporación, la mayor o menor solubilidad de los minerales está relacionada con el mayor o menor volumen de agua actuante en el proceso.

- ✓ Las fuentes termales de Los Nacimientos y La Quebrada son las únicas que presentaron una clasificación química distinta con respecto a los análisis realizados para este trabajo. Para la primera fuente, que presenta datos desde 1900 a la fecha, el agua en los dos primeros años de análisis corresponde a Cloruradas Carbonatadas Sódicas, para luego ser Bicarbonatadas Cloruradas Sódicas. Esta diferencia tan significativa puede ser solo porque en 1900 y 1908 no se analizo bicarbonato y quedo como anión dominante el cloro.

En el caso de La Quebrada, para el año 1980 se clasifico el agua como Sulfatada Bicarbonatada Sódica y en 2012 como Clorurada Sulfatada Sódica. Esta fuente no presenta el mismo número de análisis como el resto (para ver su evolución en el tiempo) y tampoco se cuentan con los resultados originales de YPF para constatar que no fue un error por parte de ESIN cuando lo transcribió. Lo que si presenta es una diferencia en los parámetros tomados. Se observa un aumento de 5.4°C y 1.16 de ph siendo quizás este el motivo de la mayor o menor solubilidad y consecuente concentración de los componentes, además de lo propuesto para las demás fuentes.

- ✓ Las fuentes que no presentaron mayor variación significativa tanto físicas como químicas en el tiempo, son las que forman parte del sector YMAD-Vis Vis, motivo para ello se puede deber al escaso desarrollo estratigráfico de la zona, a la influencia del vulcanismo, a la densidad de fracturas o a un régimen de pluviometría más estable.

- ✓ Respecto a la termalidad, todas las fuentes analizadas históricamente responden a la misma clasificación que la actual (según las tomadas para este trabajo).

Las fuentes termales de estudio quedan químicamente clasificadas como:

Los Nacimientos y Los Baños Grande de Villa Vil: Aguas bicarbonatadas cloruradas sódica-cálcica.

La Quebrada y Villa Vil: Aguas cloruradas sulfatadas sódica-cálcica.

Vis Vis y Aguas de Dionisio: Aguas sulfatadas bicarbonatadas sódica-cálcica.

- ✓ Las aguas cloruradas sulfatadas presentaron ph básico, las sulfatadas bicarbonatadas ph levemente básico y las bicarbonatadas cloruradas para Los Nacimientos acido.

En Los Baños Grandes este parámetro no se pudo registrar, pero si se relaciona la composición química de la roca de donde surge, su relación con Los Nacimientos y se compara además con los otros años muestreados, el ph para esta fuente podría ser también acido.

- ✓ Según su temperatura se clasifican como:

Aguas de Dionisio: Atermal.

La Quebrada: Hipotermal.

Vis Vis, Los Nacimientos y Villa Vil: Mesotermal.

Los Baños Grandes de Villa Vil: Hipertermal.

- ✓ Las aguas de Dionisio por su baja temperatura y coincidiendo con las numerosas clasificaciones propuestas, corresponde a una fuente atermal, debiéndose no ser considerada como una fuente de aguas termales en la provincia.
- ✓ El diagrama de Piper permitió observar, que no existen mezclas entre las aguas de las diferentes fuentes.
- ✓ De los resultados isotópicos se concluyó que las aguas termales de todas las fuentes, exhiben razones de mezcla con aguas superficiales, comprobadas por la correlación positiva entre los isótopos y su ubicación por encima de la *SMOW*.
Aguas de Dionisio y la Quebrada de Hualfín son las que se aproximaron más a la línea meteórica mundial por lo que corresponden a aguas que posiblemente deriven directamente de la precipitación tal como lo confirma el exceso de deuterio (D) (1.6 para la primera y -0.07 para la segunda). Las aguas que presentaron una mayor evaporación y mezcla con aguas superficiales y por lo tanto un exceso de D menor, en orden son Villa Vil, Vis Vis, los Baños Grandes y Los Nacimientos.
- ✓ Las temperaturas estimadas con geotermometría para los reservorios son de 105°C para los Baños Grandes de Villa Vil, 101°C para Los Nacimientos y 95°C para el resto de las fuentes.
- ✓ Los Baños Grandes y Los Nacimientos son las fuentes con menor concentración de isótopos en la Sierra de Hualfín, los que coincide también con el estar a mayor altura que el resto, presentan una alta temperatura para el reservorio, y como estas salen directamente de fracturas del granito la pérdida del calor puede ser más bien por conducción.
Las aguas de Villa Vil y Dionisio surgen de brechas volcánicas, la temperatura del reservorio es la misma y presentan mezcla con las aguas meteóricas. En una rápida clasificación corresponden a aguas sulfatadas y/o cloruradas sódicas pero a pesar de estas coincidencias, las temperaturas de surgencia son muy distintas siendo de 38.9°C para Villa Vil y de 18.1°C para Aguas de Dionisio. Los motivos pueden ser que en Aguas de Dionisio el agua de mezcla tenga una temperatura mucho menor que en Villa Vil o que la conducción térmica sea mayor.
- ✓ Los rasgos lineales que fueron identificados a través de imágenes satelitales son el resultado de fracturas y fallas que se caracterizan por ser aparentemente las

causantes de la permeabilidad secundaria de los sistemas hidrotermales donde se produciría la recarga del agua facilitando la existencia de las manifestaciones.

La ubicación geográfica de cada fuente en la imagen satelital, dio la pauta de que hay una cierta alineación en las mismas; coincidiendo el número de lineamientos con la cantidad de clúster.

- ✓ Los diagramas de Piper, Stiff y Euclidean, permitieron inferir que las fuentes se encuentran relacionadas por sus composiciones, con el grafico Euclidean, los clúster separados se relacionan con la alineación estructural de las fuentes observadas en imágenes satelitales e incluso permitió concluir que las fuentes más relacionadas entre sí son Los Baños Grandes de Villa Vil y Los Nacimientos, le sigue con una menor relación La Quebrada y Villa Vil y mucho menor Aguas de Dionisio y Vis Vis. Estas últimas cuatro fuentes se pueden considerar como también relacionadas con Los Baños y Villa Vil.

Como conclusión final podemos establecer que todas las fuentes estudiadas del departamento Belén y Andalgalá en este trabajo, así estén en ambientes distintos, pueden tener un origen en común.

6.1. Recomendaciones

- ✓ Realizar un modelo hidrogeológico para los sectores propuestos considerando zonas de baja pendiente, alto orden hidrológico y relativamente alta permeabilidad, con objeto de identificar y describir zonas de recarga.
- ✓ Caracterizar la geoquímica de la roca huésped del sistema geotermal, en perfiles transversales a las fallas.
- ✓ Medir en mayor proporción fracturas y fallas para cuantificar la influencia en la permeabilidad secundaria. De forma complementaria, realizar perfiles estructurales y geológicos a los lineamientos propuestos para las fuentes termales y utilizar métodos geofísicos, a fin de estudiar su comportamiento en profundidad.
- ✓ Incorporar los datos de gases geotermales existentes en la zona y realizar nuevos.
- ✓ Estimar el tiempo de residencia de las aguas termales, a partir del contenido de tritio (^3H) para tener un acercamiento a la hidrodinámica del sistema geotérmico.

6.2. Conclusiones y recomendaciones geotérmicas

- ✓ El rango de temperaturas en un eventual reservorio somero es de 105 a 95°C para el sector Sierra de Hualfín y 95°C para YMAD-Vis Vis con una temperatura de surgencia máxima de 63.2°C y una mínima de 34.9°C; de esta forma, ambos sectores son clasificados como recursos de baja entalpía (<150°C).
- ✓ Estas temperaturas son insuficientes como para la generación de energía pero pueden ser adecuadas localmente para calefacción de hogares, invernaderos, mejoramiento de la productividad ganadera, actividades artesanales y en pequeños procesos industriales y agrícolas.
- ✓ Las fuentes termales de Villa Vil, Los Nacimientos y La Quebrada, son las que más se podrían aprovechar, ya que cercana a estas hay poblaciones que podrían mejorar su calidad de vida, si se considerara la importancia del desarrollo de las energías alternativas.
- ✓ Se recomienda para estos sectores, la realización de estudios específicos en geotermia como geofísica, pozos exploratorios, etc. para justificar la factibilidad del proyecto.

- ✓ Cercana a la fuente de Vis Vis, al Norte, existe una perforación realizada por Minera Alumbreira correspondiente al pozo MW8 perforado hasta una profundidad próxima a los 15 m en aluviones cuaternarios conteniendo agua termal que alcanza una temperatura promedio de 53°C, aparentemente es de origen profundo y está asociada a las fallas de El Atajo o Buenaventura. Se recomienda la realización de estudios geológicos, estructurales, geofísicos e hidrogeoquímicos de detalle para comprobar la factibilidad de la aplicación como energía geotérmica con la posible utilidad en climatización de los alojamientos y/o en las etapas de producción de Minera Alumbreira.

REFERENCIAS

- ACEÑOLAZA, Florencio; TOSELLI, Alejandro. (1981). *Geología del Noroeste Argentino*. San Miguel de Tucumán: Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Tucumán.
- ALVARADO, Patricia y RAMOS, Víctor A. (2010). “Estructura Andica de las Sierras Pampeanas basada en los mecanismos focales de terremotos en su región noroeste”. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 67 (4), 461 – 472.
- AQUACONSULT. (2004). “Estudio isotópico y geoquímico en aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del río Vis Vis, Provincia de Catamarca, Argentina”. Informe inédito.
- BOSSI, Gerardo E.; MURUAGA, Claudia M. (2009). “Estratigrafía e inversión tectónica del 'rift' neógeno en el Campo del Arenal, Catamarca, NO Argentina”. *Andean Geology*, 36 (2), 311-341.
- BRAVO Estela del Valle. (1986). “Geología del área de los Nacimientos de Abajo. Departamento Belén. Provincia de Catamarca”. Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán.
- CASTANÍ, G. (1971). *Tratado Práctico de las Aguas Subterráneas*. Casanova 220. Barcelona, España: Omega.
- Catálogo de Manifestaciones Termale de la República Argentina Volumen I - Región Noroeste*. (2003). Servicio Geológico Minero Argentino. Anal N°36. Buenos Aires.
- CUSTODIO, Emilio; LLAMAS Manuel Ramón. (1983). *Hidrología Subterránea*. Tomo I y II. Platón 26 – Barcelona- 6: Omega S.A.
- DURAND, Felipe R. (1980). “Geología de la Sierra de la Ovejería, Provincia de Catamarca” Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán.

ESIN, Consultora. (1983). “Estudio de Reconocimiento de los Recursos Geotérmicos de Baja Entalpía en la zona Belén- Provincia de Catamarca”. Informe inédito. Gobierno de la Provincia de Catamarca y Secretaria de Energía de la Nación.

Geología Argentina. (1999). Servicio Geológico Minero Argentino. Anal N°29. Buenos Aires.

GONZALES BONORINO, Félix. (1950). *Geología y Petrografía de las Hojas 12d, Capillitas y 13d, Andalgalá*. Ministerio de Industria y Comercio de La Nación, Dirección General de Industria Minera. Boletín N°70. Buenos Aires.

GUTIERREZ, A.; KOJIMA, S.; ESPINOZA R. “Ambiente tectónico del Distrito Minero Agua de Dionisio (YMAD), Argentina”. En: *XI Congreso Peruano de Geología. Trabajos Científicos*. Sociedad Geológica del Perú.

LOBO, Patricia; ALVAREZ, Julio; VARELA, Miguel. (2008). *La Hidrografía y el Agua en Catamarca*. Catamarca: La Isla.

LURAGHI, Carlos A; TRUCO, Silvia I. (2007). “*Estudio de Impacto Ambiental. Exploración en vetas mineralizadas de Farallón Negro y Alto de la Blenda. Etapa de Exploración*”. Informe inédito. YMAD.

MON, Ricardo; GUTIÉRREZ, Adolfo Antonio; GALINDO, María Cristina. (2006). “Estudio de las relaciones entre las manifestaciones de aguas termales de Alumbreira con la estructura geológica” Informe inédito. Minera Alumbreira.

MORLÁNS, María Cristina. *Regiones naturales de Catamarca Provincias geológicas y provincias fitogeográficas*. Catamarca. Editorial Científica Universitaria. Universidad Nacional de Catamarca.

MURUAGA, Claudia M. (2001). “Petrografía y procedencia de areniscas terciarias en la Subcuenca de Hualfín, provincia de Catamarca, noroeste de Argentina”. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*. Vol. 8 N°2, 15-35.

NIETO, Romina Pamela. (2011). “Aplicación de técnicas de teledetección al análisis litológico y estructural de la zona de Puerta de Corral Quemado”. Universidad Nacional de Catamarca, Catamarca.

PALACIO, María de Belén; CHERNICOFF, Carlos J.; GODEAS, Marta C. (2005). “La estructura caldérica Vis Vis asociada al volcanismo mioceno del distrito minero Farallón Negro, provincia de Catamarca”. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 60 (3), 609-612.

PAOLI, Héctor. (2002). *Recursos Hídricos de la Puna, Valles y Bolsones Áridos del Noroeste Argentino*. Salta: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Estación Experimental Agropecuaria (EEA).

PAVETTI, Emiliano Andrés. (2011). “Estudio geológico del depósito tipo hot spring de Agua de Dionisio, Complejo Volcánico Farallón Negro, Catamarca, Argentina”. Escuela de Geología, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.

PERALTA GARCIA, Aníbal R.; SEGURA, Luis A.; FILIPPIN DE PATRIA, A.; ARJONA, M. (1988). *Aguas Termales de la Provincia de Catamarca*. Asociación de Termalismo. Catamarca: Universitaria-Secretaría de Extensión Universitaria- UNCa.

Rasgos Estructurales de Los Andes del NOA: Su control en la localización de Recursos Minerales. (2009). Servicio Geológico Minero Argentino. Serie Contribuciones Técnicas, Recursos Minerales N°32. Buenos Aires.

RASUK, Jorge Luis. (2012). “Geología de la Falla Atajo entre 27°10'26'' y 27°22'47'' Latitud Sur”. Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán.

SEGGIARO, R.; DA POIAN, G; BECCHIO, R.; GALLI, C; ARNOSIO, M.; CAFE, P. (2011). “Tectónica andina en las Sierras Pampeanas Noroccidentales. Provincia de Catamarca. Argentina”. En: *XVIII Congreso Geológico Argentino*. Neuquén.

SUSSINI, Miguel; HERRERO DUCLOUX, Enrique; BRANDAN, Ramón A. (1941). *Aguas Minerales de la República Argentina. Volumen III Provincia de Catamarca*. Ministerio del Interior, Comisión Nacional de Climatología y Aguas Minerales. Buenos Aires.

TOSELLI, Alejandro J., BASEI, Miguel A., ROSSI DE TOSELLI, Juana N. (2003) “Análisis geoquímico-geocronológico de rocas granulíticas y calcosilicáticas de las Sierras Pampeanas Noroccidentales”. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 58 (4), 629-642.

VARELA, Martin. (2006). “Evaluación Hidrogeológica de un Pozo Exploratorio Campañas de perforaciones 2005. Quebrada de Vis Vis. Mina Bajo de la Alumbra, Departamento Belén. Provincia de Catamarca”. Universidad Nacional de Catamarca, Catamarca.

Paginas de Internet

<http://proyectoargentino.org.ar/geotermico/geoter1.html>

<http://proyectoargentino.org.ar/geotermico/campos2.htm>

<http://termasworld.com/content/view/208/42/>

<http://www.digesto.catamarca.gov.ar/cod/Leyes11/Ley5096/5096.html>

<http://www.digesto.catamarca.gov.ar/cod/Leyes11/Ley4914/4914.html>

<http://www.digesto.catamarca.gov.ar/cod/Anexo/lp4934.html>

http://www.publispain.com/balnearios/historia_de_termas.html

http://es.wikipedia.org/wiki/Termas_romanas

<http://historia-e-geotermica.blogspot.com.ar/procesosgeo.blogspot.com.ar>

<http://impacto-ambiental-e-geotermia.blogspot.com.ar/>

<http://www.climatizaciongeotermica.com/geotermia/historia.html>

http://www.probicosl.com/index.php?option=com_content&task=view&id=198&Itemid=133

<http://www.ambiente.gov.ar/?idarticulo=1278>

<http://www.mineria.gov.ar/estudios/irn/cata/e42.asp>

ANEXO

MAPA GEOLOGICO

LOCAL

