

ÍNDICE

Resumen	i
Agradecimiento	ii
Dedicatoria	iii
CAPÍTULO 1	1
1. INTRUDUCCIÓN	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	4
1.3.1 Objetivo General:	4
1.3.2 Objetivos Específicos:.....	4
1.4 Ubicación del Área de Estudio.....	5
1.5 METODOLOGÍA.....	7
1.5.1.- ETAPA DE CAMPO.....	7

1.5.2.- ETAPA DE LABORATORIO.....	13
1.5.3.- ETAPA DE OFICINA.....	29
CAPITULO 2.....	30
2 GENERALIDADES	30
2.1 Aspectos referentes a la Empresa.....	30
2.1.1 Misión, Visión y Ubicación Geográfica de la Empresa:.....	31
2.1.2 Objetivos de la Empresa:	33
2.1.3 División Hidrogeológica:.....	33
2.1.4 Objetivos de la División Hidrogeológica:.....	34
2.2 Aprovechamiento Hidroeléctrico Uribante-Caparo	34
2.2.1 I Desarrollo: Uribante – Doradas:.....	34
2.2.2 II Desarrollo: Doradas – Camburito:.....	35
2.2.3 III Desarrollo: Camburito – Caparo:.....	35
2.3 Descripción General de las Presas.....	37

2.3.1 Complejo Hidroeléctrico DESURCA-CADAFE	37
CAPITULO 3	50
3.- MARCO TEORICO	50
3.1 Hidrogeología y Propiedades de los Acuíferos.	50
3.2 Presencia de Aguas Subterráneas en las Rocas:	50
3.3 Propiedades Hidrogeológicas de las Rocas:	51
3.3.1.- Rocas Ígneas.	52
3.3.2.- Rocas Metamórficas:	52
3.3.3.- Rocas sedimentarias:	52
3.4 Trazadores y Transporte.	53
3.5 Trazadores Naturales del Agua: Temperatura, Conductividad y Composición Química.	54
3.5.1 Temperatura del Agua.....	56
3.5.2 Conductividad.	58
3.5.3 Composición Química del Agua.	59

3.6 Determinaciones Químicas.....	62
3.7 Evaluación de la Calidad de los Análisis.	66
3.8 Presentación de los Análisis Químicos.	67
3.9 Trazadores Artificiales.	69
3.10 Aforo de Corrientes Abiertas con Trazadores.....	72
3.11 Hidroquímica e Isótopos en el Agua Subterránea.....	73
3.12 Estudio de Isótopos Ambientales:.....	74
3.13 Principios Básicos de la Utilización de Isótopos Ambientales en Estudios de Aguas Subterráneas	76
3.14 Isótopos del Agua.....	77
3.13.1.-Oxígeno $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, Hidrogeno $^2\text{H}/^1\text{H}$ y Trítio ^3H :.....	77
3.13.2.- Carbono (^{13}C , ^{12}C y ^{14}C)	81
3.13.3 Otros isótopos	83
CAPÍTULO 4.....	86
4.- RESULTADOS	86

CAPITULO 5	119
5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:.....	119
5.1.-Conclusiones	119
5.2.-Recomendaciones.....	121
5.3.-Bibliografía y Referencias Citadas.....	123
5.4.- ANEXOS	125
A.1.- PERFIL GEOLÓGICO POR EL EJE DE PRESA BORDE SECO	125
A.2.- PERFIL GEOLÓGICO POR EL EJE DE PRESA LA HONDA	126
A.3.- PERFIL GEOLÓGICO POR EL EJE DE PRESA LA VUELTOSA	127
A.4.- VISTA EN PLANTA PRESA BORDE SECO	128
A.5.- VISTA EN PLANTA PRESA LA HONDA	129
A.6.- VISTA EN PLANTA PRESA LA VUELTOSA.....	130

LISTA DE FIGURAS

Fig.	Pág.
1.1 Ubicación Geográfica de DESURCA.....	6
1.2 Captación de Muestras.....	8
1.3 Lectura de Conductímetro y Peachímetro.....	10
1.4 Determinación de Alcalinidad en Campo.....	11
1.5 Titulación para Determinar la Alcalinidad.....	12
1.6 Sistema de filtrado.....	14
1.7 Muestras filtradas.....	15
1.8 Cromatógrafo Iónico.....	15
1.9 Picos de los Aniones Mayoritarios de la Muestra.....	16
1.10 Fotómetro de Llama.....	17
1.11 Solución Patrón de Calibración.....	19
1.12 Calibración de la Llama y de la Pantalla Indicadora.....	19
1.13 Manómetro (25 psi).....	20

1.14 Titulación en el Laboratorio.....	22
1.15 Titulación para Obtener Concentraciones de Cloruros.....	26
1.16 Espectro Fotómetro Hach.....	26
1.17 Calibración del Espectro Fotómetro.....	27
1.18 Secuencia de Muestras.....	28
2.1 Ubicación Hidrográfica.....	32
2.2 Esquema de los tres Desarrollos del Complejo Hidroeléctrico los Andes.....	36
2.3 Presa Borde Seco.....	37
2.4 Fotografía Aérea de la Presa Borde Seco.....	38
2.5 Fotografía Aérea de la Presa La Vueltona.....	40
2.6 Presa La Vueltona.....	41
2.7 Presa La Honda.....	42
2.8 Aliviadero Presa La Honda.....	43
3.1 Gráfico de Piper.....	68
3.2 Diagrama de Columnas Verticales.....	68

LISTA DE GRÁFICOS

Climatograma.....	45
Gráfico de Piper y Schoeller Presa La Honda 1995.....	89
Muestreo La Honda 15/02/95.....	90
Gráfico de Piper y Schoeller Presa La Honda 2007.....	91
Muestreo La Honda 13/03/07.....	92
Gráfico O ¹⁸ Vs Deuterio La Honda 01.....	93
Gráfico de Piper y Schoeller Presa La Vueltona 01.....	98
Muestreo La Vueltona 18/04/01.....	99
Gráfico de Piper y Schoeller Presa La Vueltona 06.....	101
Muestreo La Vueltona 11/10/06.....	102
Gráfico O ¹⁸ Vs Deuterio La Vueltona 00.....	103
Gráfico O ¹⁸ Vs Deuterio La Vueltona 01.....	104
Gráfico O ¹⁸ Vs Deuterio La Vueltona 02.....	105
Gráfico O ¹⁸ Vs Deuterio La Vueltona 06.....	106
Gráfico de Piper y Schoeller Presa Borde Seco 00.....	110

Muestreo Borde Seco 29/11/00.....	111
Gráfico de Piper y Schoeller Presa Borde Seco 01.....	112
Muestreo Borde Seco 18/04/01.....	113
Gráfico de Piper y Schoeller Presa Borde Seco 06.....	114
Muestreo Borde Seco 19/10/06.....	115
Gráfico O ¹⁸ Vs Deuterio Borde Seco 00.....	116
Gráfico O ¹⁸ Vs Deuterio Borde Seco 01.....	117
Gráfico O ¹⁸ Vs Deuterio Borde Seco 02.....	118

CAPÍTULO 1

1. INTRUDUCCIÓN

1.1 Introducción.

La mayor parte de los embalses que se construyen en el mundo presentan pérdidas de agua de mayor o menor importancia. A pesar de los estudios que rutinariamente se ejecutan antes y durante la construcción de las presas, no siempre es posible prever el comportamiento de las formaciones geológicas sobre las que éstas se apoyan. Por esta razón, siempre que se construya una obra de esta naturaleza existirá el riesgo de que se produzcan fugas de agua, riesgo éste que es asumido con toda normalidad, debido a la ausencia de otras alternativas para la construcción de este tipo de obra. Los problemas derivados de las fugas pueden variar entre aquellos que afectan a la estabilidad de la propia obra o de las formaciones en las que ésta se apoya los cuales pueden ser de suma gravedad, y los que por su pequeña magnitud, no representan peligro alguno para la misma y se reportan como una "pérdida" normal y controlable. Con frecuencia, las fugas de agua son de tal importancia que exigen la realización de costosas obras de reparación. En la mayor parte de los casos, estas obras se ejecutan sin un estudio previo suficientemente detallado y los resultados de las mismas suelen no ser los esperados, por lo que son frecuentes los casos en los que se han realizados grandes inversiones en obras de reparación sin llegar a obtenerse un buen resultado. En muchos casos, la razón de la falta de este estudio previo deriva del desconocimiento por parte de los técnicos que se ocupan de este tipo de obras y de las técnicas que se han desarrollado para estudiar el problema. Venezuela posee

un desarrollo importante en el área de construcción de presas y entre los objetivos primordiales de estos sistemas hidráulicos se encuentran: suministrar energía eléctrica a importantes ciudades y poblaciones, suministrar agua para sistemas de riego y alimentar acueductos de numerosas ciudades del país. En tal sentido, es menester determinar el comportamiento de las filtraciones y los flujos de aguas subterráneas que estarán presentes durante el ciclo de vida de éstas obras. Específicamente, se plantea proceder a determinar el levantamiento de la línea base hidrogeoquímica de cada uno de estos sitios, para poder así generar una hipótesis y sustentar un análisis que puedan servir para la prevención de grandes y graves accidentes.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La planificación de las obras de reparación de las filtraciones de embalses, con suficientes garantías de éxito, exige de un conocimiento detallado del comportamiento hidráulico de las formaciones involucradas, que no pueden obtenerse solo a partir de las informaciones disponibles a escala regional. Los parámetros hidráulicos de las formaciones geológicas y, por tanto, los flujos de agua en las proximidades de la presa pueden variar drásticamente dentro de distancias muy cortas, sobre todo cuando se trata de rocas consolidadas fracturadas y de litologías heterogéneas. Por tanto es absolutamente necesario disponer de datos obtenidos a través de técnicas directas de investigación, que informan sobre el esquema real de los flujos de aguas existentes en la zona afectada y no de datos inferidos, exclusivamente de consideraciones geológicas e hidrogeológicas de carácter general. Estas técnicas directas incluyen, entre muchas otras, el uso de trazadores naturales y artificiales del agua. Los problemas hidrológicos derivados de la presencia de fugas de agua son siempre complicados cuando se trata de identificar con detalle los flujos subterráneos responsables de

las mismas. Generalmente, es necesario recurrir para ello el uso de técnicas muy diversas, que se complementen entre sí. Por razones obvias el punto de partida para este tipo de estudios es siempre la geología e hidrogeología de la zona afectada. Una característica general de los estudios que se realizan para la localización de fugas de embalse es su bajo costo en comparación con las obras de reparación. Ello hace que la relación de costo a beneficio resulte insignificante en la mayor parte de los casos.

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 Objetivo General:

Evaluar la contribución de la hidrogeoquímica en la comprensión de incidentes de filtraciones y flujos de aguas subterráneas durante el ciclo de vida útil de las siguientes presas de Venezuela: La Honda, Borde Seco y La Vuelta.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- Con base a los estudios hidrogeológicos desarrollados en las presas La Honda, Borde Seco y La Vuelta, discutir las características de sus respectivas líneas bases y su aporte a la resolución de situaciones propias asociadas a su funcionalidad para controlar flujos subterráneos y aspectos de seguridad de las presas.

- Selección de criterios para escogencia de parámetros y trazadores en hidrogeología que puedan ser útiles para evaluar la funcionalidad y seguridad de presas y embalses.

- Familiarizarse con los aspectos teóricos-prácticos de las aplicaciones de trazadores en la hidrogeología.

- Divulgar entre ingenieros geólogos, geólogos e ingenieros civiles el uso de la hidrogeología aplicada a la ingeniería de presa en Venezuela.

1.4 Ubicación del Área de Estudio.

1.4.1 Desarrollo Uribante – Caparo. (DESURCA)

1.4.1.1 Presa La Honda:

La Honda se encuentra en el I Desarrollo Uribante - Caparo, ubicado en Siberia, Municipio Uribante, Estado Táchira.

1.4.1.2 Presa Borde Seco:

Borde Seco se encuentra en la región Sureste del Municipio Libertador en el Estado Táchira, en el sitio denominado Borde Seco cerca del caserío Los Bancos, el cual está ubicado en un punto intermedio de la vía que comunica a la población de Abejales (Estado Táchira) con Santa María de Caparo (Estado Mérida).

1.4.1.3 Presa La Vueltosa:

La Vueltosa se encuentra en Santa María de Caparo Municipio Padre Noguera, Estado Mérida y parte del Municipio Libertador. Esta presa se ubica dentro del Campamento Caparo del III Desarrollo Camburito – Caparo.



Fig. 1.1 Ubicación Geográfica de DESURCA.

1.5 METODOLOGÍA.

1.5.1.- ETAPA DE CAMPO

Esta etapa se realizó en un periodo de 15 días y consistió en la recolección de muestras en los diversos puntos escogidos de las presas La Honda, Borde Seco y La Vueltona. Esta selección de puntos se realizó bajo los siguientes criterios:

- Medidas de conductividad y temperatura obtenidas de Campañas realizadas en fechas anteriores.
- Cercanías de los puntos a los estribos de las presas y al embalse.
- Proveniencia de las aguas de los estribos de la presa, del embalse o de algún acuífero cercano.
- Presencia de aguas meteóricas.

La finalidad de esta recolección es la elaboración de un análisis físico-químico de cada una de las muestras captadas, donde se puede identificar los aniones y cationes mayoritarios presentes en el agua.

Esta recolección de muestras junto con la recopilación de datos de años anteriores es la base esencial del trabajo, ya que la calidad al momento de la toma de muestras se verá reflejada en los resultados y en el análisis de los mismos.

El muestreo que se realizó en cada sitio de presa es de tipo sistemático, el cual es ampliamente utilizado con fines de estudios hidroquímicos. Este consiste en la toma de muestras de agua en cada uno de los puntos seleccionados con anterioridad. Las muestras de aguas se tomaron en recipientes lavados previamente y se enjuagaron con agua del lugar de muestreo antes de tomar la muestra. En el sitio de muestreo se midió la temperatura de agua, la temperatura del aire, la conductividad, el pH, la alcalinidad total y se tomaron las coordenadas de cada punto. Finalmente, se identificaron cada una de las muestras con los datos tomados in-situ mediante unas etiquetas en buenas condiciones.



Captación de Muestras. Fig. 1.2

Las muestras se refrigeraron y trasladaron en cavas especiales enfriadas con hielo hasta el laboratorio donde se procedió de inmediato al análisis físico-químico.

La temperatura del aire se midió con un termómetro de mercurio, y está expresada en $^{\circ}\text{C}$.

La temperatura de agua se midió de tres maneras: con un termómetro de mercurio, con el sensor del peachímetro y con el sensor del conductímetro. Estos instrumentos se expresan en $^{\circ}\text{C}$

La conductividad se tomó con el conductímetro de campo, al momento de captar la muestra, y sus lecturas se expresan en $\mu\text{S}/\text{cm}$. Antes de salir al campo se debe calibrar este instrumento de la siguiente manera:

- Se prepara una solución de KCl de la siguiente manera:
 - Se pesa 0,74565gr de KCl y se diluye en un litro de agua destilada.
- Luego de preparar la solución, se introduce en ella el electrodo del conductímetro. Se debe esperar que la lectura se estabilice en la pantalla digital del instrumento.
- Al estabilizarse la lectura, esta debe ser de $1413 \mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C . De no ser así se debe llevar el instrumento a la medida indicada.

El pH se tomó con el peachímetro de campo, al momento de captar la muestra. Antes de salir al campo el peachímetro se debe calibrar de la siguiente manera:

- Para calibrar el instrumento se utilizan 2 soluciones Buffer; la primera a un pH 7 y la segunda a un pH 4.

- Luego de darle la orden al instrumento para que sea calibrado, se introduce el electrodo en la primera solución Buffer de pH 7 y se espera que el lector del instrumento se estabilice. Al estabilizarse, este debe indicar el pH de la primera solución, de no ser así se debe modificar el instrumento hasta llegar a lo esperado.
- Seguidamente, se debe limpiar con agua destilada el electrodo para ser introducido en la segunda solución Buffer. Al introducir el electrodo en la segunda solución se procede igualmente que en la primera solución.

Las coordenadas de los puntos fueron tomadas mediante el instrumento GPS (Global Positioning System).



Lectura de conductímetro y peachímetro. Fig. 1.3

La alcalinidad en las aguas es impartida por bicarbonatos, carbonato e hidróxido, siendo el bicarbonato la mayor forma encontrada, debido a la considerable acción del dióxido de carbono sobre los metales básicos del suelo.

La alcalinidad puede definirse numéricamente como la concentración equivalente de una base titulable, determinada con una solución valorada de ácido fuerte. La alcalinidad en el agua actúa como una sustancia reguladora para obtener un pH donde la floculación sea efectiva.



Determinación de alcalinidad en campo. Fig. 1.4

El procedimiento para obtener la alcalinidad en campo fue el siguiente:

1. Se tomó un volumen de agua apropiado en una fiola de 250 mL.
2. Se agregaron 3 gotas del indicador mezclado verde de bromocresol y rojo de metilo.

3. Se tituló sobre una superficie blanca con el ácido sulfúrico 0,0200N al punto final de equivalencia adecuado.

El indicador produjo los siguientes cambios de color:

Arriba de pH 5,2 = azul verdoso

pH 5,0 = azul claro y gris lavanda

pH 4,8 = rosado grisáceo azulado

pH 4,6 = rosado claro o salmón.

Si no se indicaba lo contrario, se tomaba como punto final el último cambio.



Titulación para determinar la alcalinidad. Fig. 1.5

1.5.2.- ETAPA DE LABORATORIO

1.5.2.1.- Metodología para el Filtrado de Muestras:

El filtrado de muestras es el primer paso para la determinación de los aniones y cationes mayoritarios presentes en ellas. Este procedimiento es de vital importancia ya que no se debe introducir muestras de aguas en el Cromatógrafo Iónico sin filtrarlas ya que se dañaría el mismo.

Procedimiento:

1. Se arma el sistema de filtrado compuesto por: una bomba de succión que genera vacío, una manguera, un kitazato, un tapón de goma, un embudo, una malla metálica circular, una pinza para sujetar, papel de filtro Millipore de tipo HA tamaño 0,45 μ M y un crisol (ver fig. 1.6)



Sistema de filtrado. Fig. 1.6

2. Se vierte suficiente cantidad de agua de la muestra dentro del crisol, quedando sobre el papel de filtrado, el cual fue colocado con anterioridad en la boca del embudo sobre la malla metálica.
3. Se enciende la bomba para crear vacío permitiendo que el agua traspase el filtro y caiga dentro del kitazato.
4. Una vez que se obtuvo el agua filtrada se colocó en un embase limpio para que finalmente fuese llevada al Cromatógrafo Iónico.
5. Este procedimiento se repitió con cada una de las muestras.
6. Es importante mencionar que los instrumentos siempre se lavaron con agua destilada al inicio de cada ciclo.



Muestras filtradas. Fig. 1.7

1.5.2.2.- Metodología para el Análisis Físico-Químico de las Muestras:

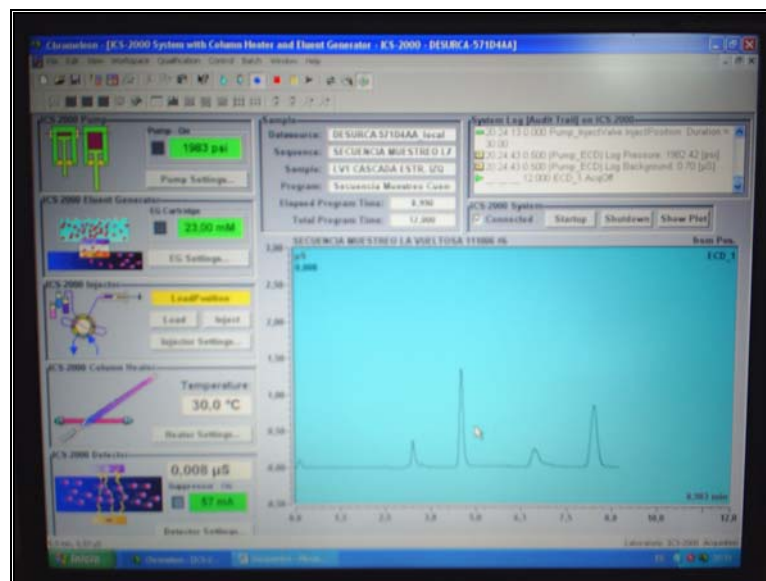
El análisis Físico-químico de las muestras se realizó luego del filtrado de las mismas, mediante un instrumento llamado Cromatógrafo Iónico (Fig. 1.8).



Cromatógrafo Iónico. Fig. 1.8

Procedimiento:

1. Se crea una secuencia de muestreo en el software del Cromatógrafo Iónico, identificando cada una de las muestras.
2. Al terminar la secuencia se procede con una inyectora a suministrar la primera muestra de agua al instrumento.
3. Durante el análisis de la muestra el software va determinando por picos los aniones o cationes mayoritarios presentes (existe una columna para aniones y otra para cationes por lo que una secuencia de muestras posee dos ciclos de inyección; un ciclo para cada columna. Estas columnas son parte del Cromatógrafo y deben instalarse antes de comenzar la primera inyección).



Picos de los aniones mayoritarios de la muestra. Fig. 1.9

4. Al terminar la lectura de la muestra se procede a inyectar la segunda muestra. Las inyecciones se van realizando en el orden de la secuencia creada al inicio hasta llegar a la última muestra.

1.5.2.3.- Determinación de Cationes Sodio (Na) y Potasio (K) por el Fotómetro de Llama.



Fotómetro de Llama. Fig. 1.10

Sodio (Na):

1. Preparar una solución madre de Na: disolver 2,542gr de NaCl secados a 140°C y dilúyase con agua destilada hasta 1000ml; 1,00ml=1,00mg Na.

2. Preparar una solución de Na intermedia: se diluye 10,00ml de solución madre de Na hasta 100,00ml empleando agua destilada $1,00\text{ml}=100\mu\text{gNa}$. Emplear la solución intermedia para preparar una curva de calibración en el intervalo de Na de 1 a 10mg/l.
3. Encender el fotómetro de llama por 15min aproximadamente para estabilizarlo.
4. Organizar las muestras jerarquizándolas por orden de captación.
5. Colocar 80 cc de cada muestra en tantos beaker como muestras hayan.
6. Calibrar el fotómetro de llama: se preparan dos soluciones patrones utilizando la solución intermedia. Para ello, primero se realiza un primer ciclo de mediciones de concentraciones de Na para cada muestra sin estar el fotómetro de llama calibrado, anotando esa primera medición en cada muestra. Luego, se agrupan las muestras que posean rangos de concentraciones similares, para así conocer el rango de concentraciones a preparar la solución patrón para el primer grupo de muestras. El valor menor será la cantidad de concentración intermedia a diluir con agua destilada para esa primera muestra patrón. De igual manera con el valor mayor. Se procede de forma similar para los otros grupos de muestras que posean rangos de concentraciones distintas. Primero se calibra el instrumento con la solución patrón mayor y finalmente se calibra con la solución patrón menor.



Solución Patrón de Calibración. Fig. 1.11

7. Se calibra la llama del instrumento llevándola al color azul de la misma.
8. Se calibra el cero de la pantalla del instrumento colocándole agua destilada.



Calibración de la Llama y de la Pantalla Indicadora. Fig. 1.12

9. El instrumento posee un manómetro que debe marcar una presión de 25 psi., para el buen funcionamiento de la calibración.



Manómetro (25 psi). Fig. 1.13

10. Finalmente, se inicia la medición para cada muestra dentro del rango de concentraciones obtenidas. Este procedimiento se debe repetir para los grupos de diversos rangos de concentraciones de Na.

Potasio (K):

1. Preparar solución de potasio de reserva: disolver 1,9707 g de KCL secado a 110°C y diluir con agua destilada hasta 1000 ml; $1\text{ml}=1,00\text{mg K}$.
2. Preparar solución de potasio intermedia: diluir 10,0 ml de solución de potasio de reserva hasta 100ml empleando agua destilada;

1,00ml=0,100mg K. Utilizar esta solución para preparar una curva de calibración en el intervalo de 1 a 10 mg de potasio/l.

3. Se repite el proceso explicado anteriormente para la determinación del sodio (Na).

1.5.2.4.- Calcio (Ca) y Magnesio (Mg):

De acuerdo a la práctica común se define como dureza de un agua a la suma de las concentraciones de calcio y magnesio expresadas como carbonato de calcio en mg/L.

El método oficial, rápido y seguro para la determinación de la dureza del agua es el Método Complexométrico o de Schwarzenbach, EDTA.

Dureza Total:

1. Tomar en una fiola de 250mL, 50mL de la muestra filtrada o una parte alícuota llevada a 50 mL.
2. Agregar 1mL de solución reguladora, homogeneizar y luego agregar 0.1 g de ManVer¹ y disolver por agitación. Se obtiene una solución rojo vino.

¹ Preparado de la Hach Chemical Company que incorporan al indicador Calmagite en lugar del Eriochrome Black T.

3. Titular con la solución EDTA hasta viraje al color azul.



Titulación en el Laboratorio. Fig.1.14

4. Si se obtiene una lectura mayor de 5mL, comenzar desde 1, agregar 80-90% del agente titulador, y luego el indicador, homogeneizar y terminar como en 3.
5. El límite de tiempo recomendado para cada titulación es de 5 minutos.

Cálculo:

Dureza Total como CaCO_3 , en mg/L=

$$=(\text{mL de EDTA} \times 0.02\text{meq/mL} \times 50 \text{ mg/meq} \times 1.000 \text{ mL/L})/\text{mL de muestra}$$

Dureza Cálcica:

1. Tomar en una fiola de 250mL, 50ml de la muestra filtrada o una parte alícuota llevada a 50mL.
2. Verter 1 mL de solución de NaOH 8N, homogeneizar y de seguida agregar 0,1g de CalVer² y da coloración rosada.
3. Titular con la solución de EDTA hasta viraje al color azul celeste.
4. Usar un blanco para la determinación exacta del punto final de titulación.
5. Con una lectura mayor de 5mL o en todo caso, si al agregar la solución alcalina se forma un precipitado, comenzar de nuevo desde 1, agregar 80-90% de EDTA, luego el NaOH y el indicador y terminar como en 3.

Cálculo:

Dureza Cálcica como CaCO₃, en mg/L=

$$=(\text{mL de EDTA} \times 0,02 \text{ meq/mL} \times 50 \text{ mg/meq} \times 1.000 \text{ mL/L})/\text{mL de muestra}$$

² Preparado de la Hach Chemical Company que incorporan al indicador Calmagite en lugar del Eriochrome Black T.

Dureza Magnésica:

La dureza magnésica como CaCO_3 en mg/L viene dada por la diferencia aritmética entre la dureza total y la dureza cálcica.

Calcio: el contenido de calcio puede calcularse a partir de la dureza cálcica en mg/L en la siguiente forma:

$$\text{Calcio, Ca, en mg/L} = D_{\text{Ca}} \times 0,4$$

donde, D_{Ca} = dureza cálcica como CaCO_3 en mg/L.

Magnesio: el contenido de magnesio puede calcularse a partir de la dureza magnésica en mg/L en la siguiente forma:

$$\text{Magnesio, Mg, en mg/L} = (D_{\text{Total}} - D_{\text{Ca}}) \times 0,244$$

donde, D_{Total} = dureza total como CaCO_3 en mg/L.

1.5.2.5.- Cloruros (Cl):

1. Tomar en una fiola de 250mL, 100mL de la muestra filtrada o una parte alícuota llevada a 100mL.

2. Agregar 0,1g de Difenilcarbazona³ y homogeneizar, dando coloración champañizado.
3. Titular con la solución de Nitrato Mercúrico a 0,2256 N hasta viraje al primer cambio del color rosado pálido.
4. Para obtener la concentración de fluoruros se debe multiplicar por 0,1 la concentración reflejada en el dispensador titrador del Nitrato de Mercurio.

³ Reactivo de la Hach Chemical Company que actúa como indicador para realizar la titulación.



Titulación para obtener concentraciones de Cloruros. Fig. 1.15

1.5.2.6.- Cálculo de Sulfatos (SO_4^{2-}) mediante el Portátil Espectro Fotómetro Hach DR/ 2010:



Espectro Fotómetro Hach. Fig. 1.16

Procedimiento:

1. Verter 25 mL de muestra en un recipiente de vidrio especial diseñado para que encaje en el Espectro Fotómetro Hach.
2. Añadir 0,1 g de SulfaVer⁴ en cada recipiente de vidrio y homogeneizar con un mínimo de 5 minutos.
3. Introducir un código estipulado por el manual del instrumento permitiendo buscar un dial que para el caso de los sulfatos es el 450nm.
4. Calibrar el Espectro fotómetro con agua destilada contenida en el recipiente de vidrio y eso permite llevarlo al cero.



Calibración del Espectro Fotómetro. Fig. 1.17

⁴ Reactivo de la Hach Chemical Company, el cual disuelve el sulfato en la muestra para luego ser captado por el Espectro Fotómetro Hach.

5. Finalmente, limpiar bien cada recipiente de vidrio e introducirlos uno a uno en el Espectro Fotómetro para que puede ser leída su concentración.



Secuencia de Muestras. Fig. 1.18

1.5.3.- ETAPA DE OFICINA

A partir de los análisis realizados a las muestras tomadas en campo y de la recopilación de análisis anteriores, hechos por la División de Investigaciones Hidrogeológicas de DESURCA en los diversos sitios de presas mencionados en los objetivos de este trabajo, se obtuvieron una serie de datos, los cuales deben ser manipulados de forma correcta para poder realizar la caracterización hidrogeoquímica de cada uno de las presa.

Mediante la concentración de los aniones y cationes mayoritarios y de las relaciones isotópicas de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, se elaboró un conjunto de gráficos mediante la ayuda de los programas:

5. AquaChem versiones 3.70 y 4.0

6. Microsoft Excel.

Estos gráficos reportan la calidad en los muestreos de agua subterráneas, permitiendo analizar los datos para determinar su potencial y origen.

Al tener estas gráficas realizadas correctamente se pudo evaluar de fácil manera los cambios en las variables químicas e isotópicas que ocurren en cada sitio de presa, relacionándolas de con la geología regional y local que influye de forma significativa en el medio.

CAPITULO 2

2 GENERALIDADES

2.1 Aspectos referentes a la Empresa

En el año 1993 se constituyó la empresa Compañía Anónima Desarrollo Uribante-Caparo (DESURCA), que tiene su sede principal en la ciudad de San Cristóbal, estado Táchira y que dispone de unidades operativas en las distintas áreas del proyecto, principalmente en las obras de construcción y actividades relacionadas con la conservación de cuencas, investigación hidrológica, monitoreo sísmico, hidrología e instrumentación de los tres desarrollos. El proyecto hidroeléctrico Uribante-Caparo consiste en la construcción de un conjunto de obras de ingeniería sobre los ríos Uribante, Doradas, Camburito y Caparo, y se encuentra ubicado en la región Sur-Occidental de Venezuela.

El desarrollo Uribante – Caparo fue diseñado con fines múltiples: hidroelectricidad, control de inundaciones, riego, transporte fluvial por el eje Apure – Orinoco, turismo, piscicultura y saneamiento de tierras, entre otros.

Todas las obras, justificadas económicamente solo desde el punto de vista de producción de hidroelectricidad, determina que los demás beneficios, ya citados, reafirman aún más su factibilidad económica, además de formar parte de los planes de construcción de infraestructuras del país, ya que incrementa el nivel de regulación de las aguas, constituyendo así un elemento importante del control de aguas en toda la ladera oriental de los Andes Venezolanos, mediante la

construcción de tres embalses y una obra de derivación los cuales complementados con tres túneles de trasvase permitirán la generación de energía en tres centrales hidroeléctricas.

El proyecto fue concebido para ser construido por etapas y/o desarrollos, cada uno de los cuales comprende obras de embalse y obras de generación, diseñadas para un aprovechamiento en cascada mediante el uso progresivo y repetido del potencial hidroeléctrico de los ríos embalsados.

2.1.1 Misión, Visión y Ubicación Geográfica de la Empresa:

MISIÓN

DESURCA es una filial de CADAFFE, creada para la ejecución del plan maestro del proyecto Uribante – Caparo, cuya finalidad es la producción de energía eléctrica para suplir las necesidades del Sur Occidente del país.

VISIÓN

Garantizar el desarrollo de la región Sur Occidental mediante la construcción de centrales hidroeléctricas que fortalezcan la integración del sistema de energía, generando empleo, principalmente a Ingenieros, T.S.U. en varias ramas como electricistas, hidrólogos, geólogos, ingenieros civiles, así como personal obrero, propiciando el desarrollo de otros sectores vitales para la economía, como la agricultura y las industrias manufactureras, convirtiendo la región en un punto favorable a nuevas inversiones dentro de las expectativas de globalización con las cuales se acomete el nuevo milenio.

UBICACIÓN GEOGRÁFICA

DESURCA tiene su oficina en el Centro Comercial El Pinar, San Cristóbal, Estado Táchira, en el cual se realiza el trabajo gerencial, contraloría interna y consultoría jurídica, mientras que el trabajo operacional se realiza en los diferentes lugares donde se ubican las obras pertenecientes al Desarrollo Uribante-Caparo. Siberia, Municipio Uribante, Estado Táchira, lugar donde se ubica el I Desarrollo, presa La Honda. Santa María de Caparo, Municipio Padre Noguera, Estado Mérida y parte del Municipio Libertador, forman el escenario geográfico donde se emplazan las presas La Vueltoosa y Borde Seco, correspondientes al III Desarrollo.



Fig. 2.1 Ubicación Hidrográfica. [Tomado de DIH- DESURCA].

2.1.2 Objetivos de la Empresa:

- Producir energía eléctrica en la región sur – occidental de Venezuela mediante el aprovechamiento en cascada del potencial hidroeléctrico de los ríos Uribante, Doradas, Camburito y Caparo.
- Construcción, programación, ejecución y control de la infraestructura del proyecto hidroeléctrico Uribante – Caparo, en función de las políticas previstas por el Ejecutivo Nacional y todas las actividades conexas del lícito comercio que sea necesario para el cabal cumplimiento de los objetivos que estén relacionados con el mismo.
- Generar fuentes de empleo para las comunidades afectadas de las zonas aledañas al desarrollo y de empresas dentro y fuera del país.
- Promover el desarrollo de la región Andina a través del aporte de energía eléctrica.
- Atender los convenios energéticos binacionales de Colombia

2.1.3 División Hidrogeológica:

La división hidrogeológica tiene la misión de promover ideas, desarrollar proyectos y crear grupos de trabajos interdisciplinarios para la ejecución de investigaciones en el ámbito hidrogeológico, con el fin de de caracterizar los fenómenos de flujo y transporte de las aguas subterráneas, así como su interrelación con las aguas superficiales y las obras de ingeniería.

2.1.4 Objetivos de la División Hidrogeológica:

- Consolidación del grupo de trabajo con trazadores, en Venezuela para introducir sus aplicaciones en la Investigación de Fugas en Presas y Embalses.
- Promover, adquirir y desarrollar los conocimientos y tecnologías de punta para la modelación hidrogeológica, como herramienta fundamental para el manejo, integración de datos, simulación y predicciones del comportamiento de acuíferos.

2.2 Aprovechamiento Hidroeléctrico Uribante-Caparo

Consta de tres desarrollos:

2.2.1 I Desarrollo: Uribante – Doradas:

La base principal de este desarrollo se encuentra en Siberia, Estado Táchira y consiste en aprovechar los caudales de la cuenca del río Uribante, trasvasarlos y usarlos en producción de energía eléctrica en la Central Hidroeléctrica San Agatón, ubicada en la margen derecha del río San Agatón, con una potencia instalada de 300 Megavatios y una capacidad de generación de 956 Gigavatios/horas.

En términos generales, el desarrollo está compuesto por una presa de tierra en el sitio “La Honda” , de 140 m de altura, que da origen a un embalse con una superficie de 20 Km² , para una capacidad de 775 millones de metros cúbicos de agua. Comprende la Central “Leonardo Ruiz Pineda” (San Agatón), en funcionamiento desde septiembre de 1987.

2.2.2 II Desarrollo: Doradas – Camburito:

Este desarrollo permitirá aprovechar las aguas turbinadas en la Central San Agatón, más las provenientes de las cuencas del río Doradas y del Uribante (aguas abajo de la presa La Honda).

Consiste en una presa de tierra, sobre el río Doradas en el sitio Las Cuevas, de 115 metros de altura, que da origen a un embalse con una superficie de 37,4 Km², para una capacidad calculada en 1185 millones de metros cúbicos de agua. Posee un túnel de trasvase de 3,6 km de longitud hasta las válvulas, en donde se interconectan con la tubería forzada que conduce a la central Colorada, en la cual se instalará una potencia total de 920.000 Kilovatios. Actualmente se están evaluando diferentes esquemas de aprovechamiento Hidroeléctrico para este Desarrollo, a los fines de definir la opción más conveniente para CADAFE, desde el punto de vista técnico.

2.2.3 III Desarrollo: Camburito – Caparo:

Consiste en dos presas de tierra; una sobre el río Camburito denominada Borde Seco de 125 metros de altura y la presa la Vueltoza de 130 metro de altura, dando origen a un embalse con una superficie de 118 Km² cuya capacidad de almacenamiento será de 5.600 millones de metros cúbicos de agua. Comprende la central la Vueltoza con una capacidad de generación de 771 MW de potencia total.

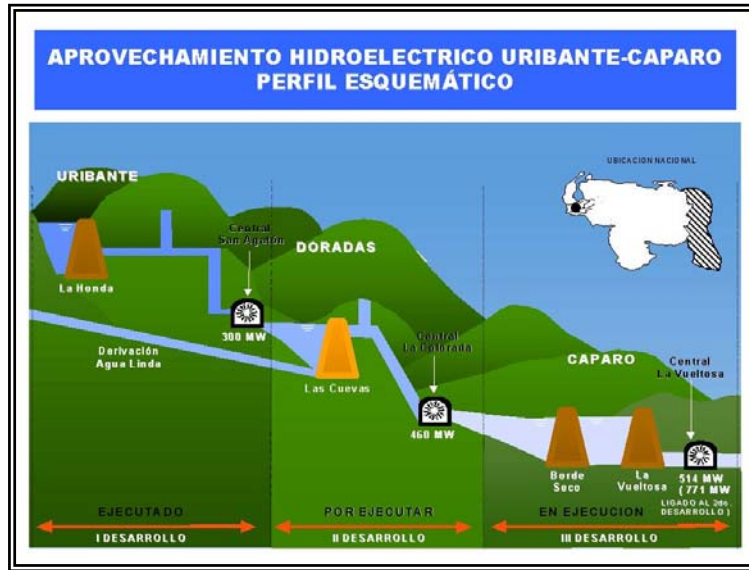


Fig. 2.2 Esquema de los tres desarrollos del Complejo Hidroeléctrico los Andes. [Tomado de DIH-DESURCA].

2.3 Descripción General de las Presas

2.3.1 Complejo Hidroeléctrico DESURCA-CADAFE

2.3.1.1 Presa Borde Seco:

Los trabajos de construcción de la Presa Borde Seco fueron iniciados en 1.983, se trata de una presa zonificada, por estar constituida de materiales de distinta granulometría y permeabilidad y tienen una altura 120 m sobre el nivel del río Camburito, con una longitud máxima de 630 m, y un ancho de 430 m en eje de la presa, un volumen de tierra zonificada de 5.5 millones de metros cúbicos y una cresta cuya longitud es de 400 m a la cota 320 m.s.n.m., los espaldones aguas arriba y aguas abajo indican que la presa tienen un volumen de material suelto de 6 millones de m³.

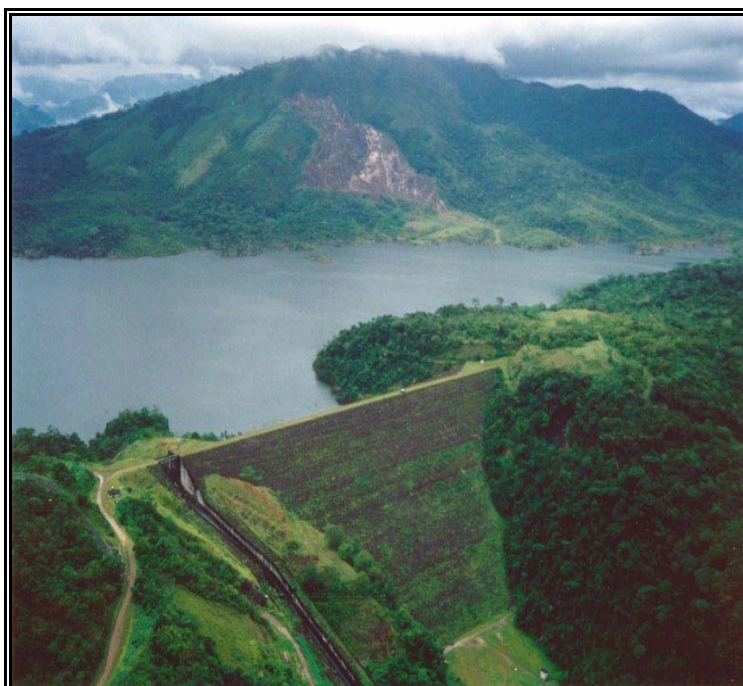


Fig. 2.3 Presa Borde Seco.

La presa posee un núcleo de areniscas limosa y espaldones de arenisca de grano medio, cubierta por material enrocado (canto y peñones); aguas abajo entre el núcleo y el espaldón hay un sistema de filtro y drenes donde las filtraciones que puedan ocurrir a través del cuerpo de presa sean captadas en los diferentes niveles. El cuerpo de presa reposa sobre un terreno constituido por estratos de areniscas y los estribos están compuestos por estratos de areniscas, lutitas y calizas arenosas.

Paralelo al eje de presa se construyó una cortina de inyecciones de lechada (cemento, agua y bentonita) en filas y un espesor total de 2,50 m que con una profundidad de 65 m, atraviesa tanto los estribos de la presa como la fundación. La función de la cortina de inyecciones es minimizar el paso de agua del embalse tanto por el terreno de fundación como por el terreno de los estribos. Aguas abajo de la cortina de inyección se construyeron las galerías de drenajes (dos en cada estribo) cuyos drenes tienen la función de disipar la energía de agua que atraviesa la cortina de inyecciones.



Figura 2.4 Fotografía Aérea de la presa Borde Seco.

El túnel de desvío de 695 m de longitud y un diámetro de 5 m, construido para desviar las aguas del río Camburito y construir la Presa, hoy en día actúa como túnel de

descarga de fondo, donde está ubicado una cámara de compuertas que permite regular las salida de agua del embalse, cuando se estima conveniente, cuya capacidad de descarga máxima es de 190 m³/seg.

En el estribo derecho de la presa hay un Aliviadero de 354 m de longitud, el cual funciona como un canal abierto que termina en una estructura tipo lanzador, que vierte las aguas que rebosan la cota 310 del embalse, al cauce del río, aguas abajo de la presa con una capacidad de 754 m³ / seg. Aguas abajo del eje de la presa en el mismo estribo, se localizan La Cámara de Compuertas, las Galerías de drenaje 2 y 3 con sus respectivas Galerías de acceso 2A y 3A, seis pozos de observación y algunos Piezómetros eléctricos e hidráulicos.

La Construcción de la Presa finalizó en Noviembre de 1.990 y constituyó el cierre de la cuenca del río Camburito en el sitio Borde Seco, así como la Presa La Vueltosa constituyó el cierre del río Caparo en el sitio La Vueltosa, para conformar ambas Presas el cierre de un solo embalse conocido como embalse Camburito-Caparo.

2.3.1.2 Presa La Vueltosa:

Es una Presa de Tierra Zonificada de Eje Curvo, con una longitud de la Cresta 600 m., una altura máxima 130 m. y un volumen de material de 16x106 m³. Como obras complementarias se encuentran: El túnel de desvío de 966m de largo y 8 metros de diámetro, el túnel de descarga de fondo de 1004 m de largo y 8 m de diámetro, la Torre de Toma y las tuberías forzadas.



Fig. 2.5 Fotografía aérea de la presa La Vultosa.

No tienen Aliviadero porque el de Borde Seco es común para todo el embalse. La función del túnel de desvío es desviar el cauce del río Caparo, está revestido de concreto armado y en su parte final este túnel será transformado en descarga de fondo, una vez culminada la construcción de las obras. La descarga de fondo es un túnel que tiene una torre toma en su portal de entrada a un nivel superior al del túnel de desvío. En su intersección se construyó una cámara en la cual se instalaron las compuertas de operación.

Esta descarga de fondo permitirá el llenado controlado del embalse y eventualmente su vaciado en el caso de presentarse una situación de emergencia. Las tres tuberías forzadas son subterráneas, se encuentran ubicadas en el macizo rocoso del estribo derecho donde esta la Torre Toma con sus compuertas. Estas tuberías forzadas conducirán las aguas del embalse a la Central la Vultosa. Esta Central Hidroeléctrica será de tipo convencional, y consistirá de un edificio de servicio, una nave de montaje y

tres naves para las unidades de generación. Dos unidades se instalarán en la primera etapa y la tercera unidad se instalará en el futuro.

Los tres generadores se acoplarán a turbinas hidráulicas tipo Francis y de una potencia nominal de 257.000 KW cada una, para una capacidad inicial de 514.000 KW y una producción de energía media anual de 1.624 GWh.



Fig. 2.6 Presa La Vuelta.

2.3.1.3 Presa La Honda:

La presa La Honda forma parte del Desarrollo Uribante- Doradas, con un embalse de 11 km de longitud con un volumen de 775 millones de metros cúbicos. Es presa de tierra zonificada, con una altura de 140 m y 600 m de longitud de la cresta, cuyo túnel de desvío está ubicado en el estribo derecho y el aliviadero y la descarga de fondo en el estribo izquierdo. El túnel de desvío tiene 5 m de diámetro interno y 1.000 m de longitud. El aliviadero de eje recto, rápido y lanzador, posee una descarga máxima de $949 \text{ m}^3/\text{s}$. La descarga de fondo ubicada a la cota 1.030 constituida por una estructura de toma, una cámara de compuertas, un túnel de 4 m de diámetro interno y un rápido de 146 m de longitud, con una descarga máxima de $210 \text{ m}^3/\text{s}$.

Posee una galería horizontal en el fondo del río, de 4 m de diámetro interno y 100 m de longitud, cinco galerías de inyección, con un diámetro interno de 2,40 m y una longitud total de 1.503 m y tres galerías de drenaje, con un diámetro interno de 2,40 m y una longitud total de 1.305 m. Las galerías de acceso tienen 2,40 m de diámetro interno y una longitud de 958 m.



Fig. 2.7 Presa La Honda

El estribo izquierdo consiste de areniscas y lutitas estratificadas. La roca de fundación es relativamente permeable y erosionable. El estribo derecho consiste de capas alternas de areniscas, areniscas calcáreas, calizas y lutitas.

Esta presa zonificada tiene un núcleo delgado de arenas arcillosas y unos espaldones, los cuales conforman la mayor parte del volumen del terraplén de la presa, constituidos por areniscas, provenientes de las excavaciones del aliviadero y de áreas de préstamo, ubicadas en el estribo izquierdo de la presa.

El sistema de tratamiento de fundaciones está constituido por una pantalla de concreto en el estribo izquierdo, con un área aproximada de 20.000 m² y una profundidad máxima de 120 m, una cortina de inyecciones profundas con aproximadamente 100.000 m de perforaciones y un sistema de perforaciones de drenaje con aproximadamente 13.400 m de perforaciones.



Fig. 2.8 Aliviadero Presa La Honda

2.3.1.4 Caracterización Climatológica

Los sitios de presa están definidos por parámetros como la precipitación, la temperatura y vegetación que en conjunto ofrecen una visión de cómo es el clima de la zona, por lo que a continuación se describen cada uno de estos factores, de acuerdo a datos registrados en la estación Borde Seco (precipitación), la estación de Santa María de Caparo (temperatura) en un período de 19 años (1987-2006) y descripción de la vegetación por medio de información suministrados por la unidad de conservación de cuencas.

Precipitación: El promedio de precipitación anual es de 2768.2 mm. Los valores de precipitación media mensuales oscilan entre 12.3 mm en Enero y 463.6 mm en Agosto las precipitaciones medias máximas se encuentran en los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre, y las mínimas medias en Enero, Febrero y Marzo.

La precipitación en el área de estudio posee una estación lluviosa, que va de Abril a Diciembre y una seca que va de Enero a Marzo. No obstante es conveniente señalar que durante la época seca puede presentarse lluvias de extraordinaria magnitud, cuyo origen está asociado a la influencia de las bajas presiones en el Lago de Maracaibo, y a las masas de aire que ascienden sobre los Andes desde los llanos.

Temperatura: De acuerdo a registros obtenidos de la estación Santa María de Caparo en un período de 19 años (1987-2006), la temperatura promedio anual es de 26.4 °C, la temperatura media mínima es de 25.5 °C en el mes de Junio y la máxima media es de 27.4 °C en el mes de Marzo.

En base a los valores promedios de cada mes de temperatura y precipitación de la zona para cada uno de los años desde 1987 hasta el 2006 se elaboró el Climatograma (ver Gráfico 2.1).

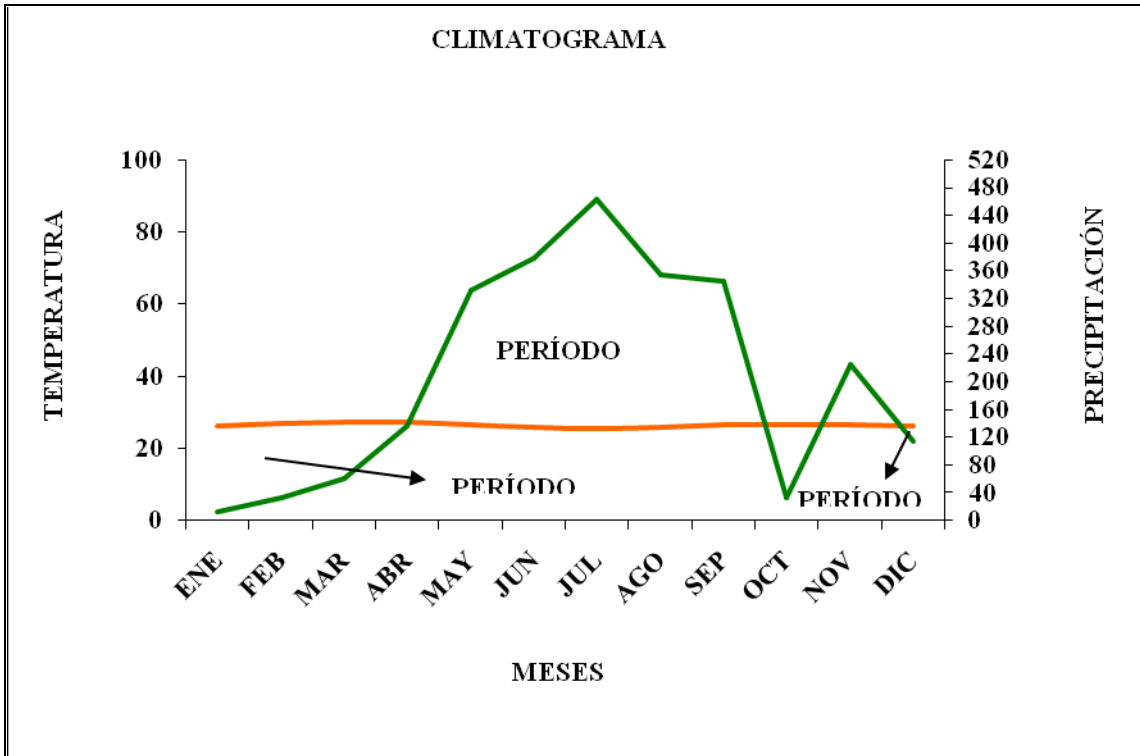


Gráfico 2.1 Climatograma.

En el climatograma se puede observar que el período seco va desde Enero hasta mediados de Abril y una buena parte del mes de Octubre mientras que el período húmedo abarca desde mediados de Abril hasta parte de Octubre con un pequeño intervalo desde Noviembre hasta inicios de Diciembre, claramente se refleja que los intervalos de duración del período húmedo y seco son parecidos lo que indica que el agua que se pueda almacenar durante el intervalo húmedo abastecerá satisfactoriamente las deficiencias que puedan presentarse durante el intervalo seco, asumiendo que no se tendrá que tomar medidas extraordinarias, como racionamiento y otros, durante el periodo seco.

Vegetación: De acuerdo al Ministerio del Ambiente de los Recursos Naturales Renovables (MARNR) (1982), en el área de estudio se presentan la formación vegetal siguiente:

Bosque: constituye la formación vegetal de mayor importancia. Predominan los tipos medio-rala, alto-ralo y alto-denso en paisajes de montaña, valles, llanura aluvial y colinas, caducifolia (plantas que pierden las hojas todos los años cuando se acerca la estación fría o seca) siempre verde. Se localizan en los pisos altitudinales tropical, premontano, montano bajo y montano.

2.3.1.5 Caracterización Hidrológica

Hidrología: En base a los registros obtenidos para un espacio de 19 años (1987-2006), el caudal medio anual es de 26.78 m³/seg, el caudal medio mínimo es de 9.73 m³/seg en Enero y el caudal medio máximo es de 56.33 m³/seg en Julio. La estación de medición de caudales se encuentra aguas abajo de la presa, por tanto los valores obtenidos están regidos por la capacidad del tubo de descarga de fondo lo que imposibilita el cálculo de crecientes en esta estación.

Caracterización de la red de drenaje: El área de estudio se caracteriza por presentar una densa red fluvial de drenaje, cuyos cauces principales, están representados por los ríos Camburito y Caparo que aportan agua al embalse durante todo el año, la concentración de las quebradas es rápida formando ríos que drenan extensas áreas. Los mismos poseen características típicas de montaña: torrentosos, de pendientes fuertes, crecidas de grandes picos y corta duración.

El río Camburito, en donde está fundada la presa, tributa en el río Caparo, a unos 18 Km aguas abajo de la presa la Vueltona. La cuenca del Camburito, aguas arriba de la presa Borde Seco, está conformada por la quebrada Palai, el río Tucupido o el cañón, la quebrada la Pita, y el propio río Camburito, que nace en la vertiente derecha de la cuenca. En los estribos de la presa se encuentra un conjunto de quebradas cuya orientación está dominada por los sistemas de diaclasas (aguas abajo) y el buzamiento de las capas (aguas arriba).

Movimientos del embalse Camburito-Caparo: Los niveles del embalse están influenciados por el Balance hídrico del mismo, el cual determina cual es el volumen de agua que entra y sale del embalse y por consiguiente el volumen de agua que queda en él, en determinado momento. Siendo los volúmenes entrantes los aportados por precipitación y caudales, los salientes por evaporación, filtración (fondo y paredes del embalse) y caudal de descarga de fondo. Permitiendo efectuar, con la información recopilada en años anteriores, simulaciones para predecir el comportamiento de llenado del embalse.

Las curvas de área-capacidad (diseñadas por TECNOCONSULT) son imprescindibles al momento de realizar este tipo de cálculos, debido a que con los volúmenes obtenidos se puede determinar el nivel o cota en que se encuentra el embalse o viceversa, es importante mencionar que la curva está dividida en dos, antes de la cota 260 (aproximadamente), cuando los embalses del Camburito y del Caparo están separados y a partir de esta cota se convierte en una sola curva al unirse las cuencas.

2.3.1.6 Geología Regional del Sistema Hidroeléctrico DESURCA-CADAFE:

Estas zonas se definen como subcuencas (García Jarpa *et al*, 1980):

- Subcuenca Lara-Trujillo.

- Subcuenca Machiques.

- Subcuenca Uribante

La sedimentación en el Occidente de Venezuela durante gran parte del Cretácico ocurrió en una cuenca de margen pasivo, influenciado por pulsos transgresivos de alcance mundial.

La sección cretácica de esta área es básicamente de composición clástica, predominantemente arenosa y yace en discordancia sobre sedimentos limolíticos rojos, compactos de la Formación La Quinta del Jurásico. La capacidad de éstos últimos contrasta con la fragilidad de los sedimentos cretácicos ofreciendo condiciones para un excelente reflector sísmico en la base del Cretácico o límite de secuencia.

La secuencia estratigráfica del Cretácico se divide en 5 formaciones cuyos nombres en orden ascendentes son: Río Negro, Aguardiente, Escandalosa, Navay y Burguita.

La Formación Río Negro; comprende areniscas de grano fino-medio intercaladas con bandas conglomeráticas, de color pardo amarillenta a gris verdoso y algunas violáceas, presentan intervalos de limolita de color violáceo; y lutitas de color gris claro. Se definen como rocas frescas a meteorizadas, dura, fracturada a poco fracturada. Presencia de bandas de óxido ferruginoso, diaclasas cerradas y abiertas con relleno limoso, algunas con bordes oxidados paralelos inclinadas entre 30° y 50° con respecto a la vertical y otras paralelas a la estratificación. Grado de fracturación medio, presentando una calidad de roca regular a buena.

La Formación Aguardiente, comprende areniscas calcáreas duras, de color gris a verde claro, grano variable y estratificación cruzada, localmente glauconíticas, con intercalaciones de lutitas micáceas y carbonáceas y algunos lechos de caliza en la parte inferior; localmente las areniscas son tan calcáreas que se aproximan a calizas arenosas. También se describieron areniscas de colores claros, duras, en capas de espesor variable, intercaladas con limolitas y lutitas carbonáceas, y señalaron que al norte y oeste de Táchira la unidad se hace más calcárea y las capas de caliza constituyen un elemento litológico característico. Posee gran carácter cuarzoso.

La Formación Escandalosa, está compuesta por areniscas macizas, cuarzosas y muy glauconíticas, con cantidades menores de lutitas negras calcáreas. Las areniscas son de color gris, gris oscuro a marrón claro y verdoso, de grano fino a medio, bien escogidas,

micáceas y carbonáceas. Se presentan en capas delgadas a masivas, con estratificación cruzada en las capas más gruesas. Las lutitas son gris oscuro, algo arenosas, calcáreas y carbonáceas. En el tope de la sección, se encuentra una caliza de unos 4 m de espesor, gris oscura, masiva, pura, cristalina y coquinoidea, con manchas de dolomita microcristalina.

La Formación Navay, está compuesta de lutitas silíceas, friables a no friables, blandas, duras, quebradizas, amarillo claro a crema y a blanco; lutitas tripolíticas muy porosas, pardo claro a gris claro, y algunas ftanitas no porosas, lenticulares, pardo claro, y lutitas calcáreas, carbonáticas, gris a gris oscuro. Como constituyentes menores de la formación, se presentan areniscas lenticulares de grano angular, calcáreas a silíceas, pardo claro a gris claro. Estas areniscas, muy calcáreas a veces, se han definido como calizas clásticas, probablemente por su contenido fosilífero. En afloramientos, las lutitas carbonáceas se meteorizan y lixivian a lutitas gris a pardo. Signos característicos son su fina laminación, restos fosfatizados de peces (vértebras, escamas y espinas), común glauconita, las ftanitas y una relativamente fácil correlación de electrofacies a través de la cuenca. Tiende a ser más arenosa hacia arriba; se vuelve muy arenosa hacia el Escudo de Guayana y hacia Apure y la Cuenca Los Llanos. En el afloramiento, la formación se meteoriza comúnmente a colores claros: gris claro, blancuzco, beige, marrón clara y con una textura silícea porosa, "tripolítica" o "porcelanizada".

La Formación Burguita, describe areniscas micáceas, limolíticas, parcialmente glauconíticas y frecuentemente calcáreas, friables, de grano fino y color gris claro, con fragmentos ftaníticos e interlaminaciones de lutitas gris oscuro y arcilita de color gris claro. Las areniscas son masivas, muy lenticulares y erráticas en su desarrollo, además, se hacen más delgadas y presentan lutitas interestratificadas de mayor espesor hacia el tope, son de color gris o marrón, plásticas o duras, carbonáticas, piríticas y no calcáreas.

CAPITULO 3

3.- MARCO TEORICO

3.1 Hidrogeología y Propiedades de los Acuíferos.

El agua subterránea es uno de los componentes de la hidrosfera. El flujo subterráneo y sus procesos hidroquímicos asociados pertenecen al ciclo hidrológico, que dependen de

a).- La estructura ecológica-geológica

b).- la composición petrológica de la litosfera

Esto último influye en los procesos geoquímicos y en la composición hidroquímica del agua subterránea. Ambos factores explican la velocidad relativamente lenta del flujo subterráneo, su normalmente largo tiempo de residencia y el amplio rango de la escala de tiempos que cubre el agua subterránea, en comparación con el agua superficial en el ciclo hidrológico.

La mayoría de las aguas subterráneas son de origen meteorito, esto es, atmosféricas. El agua de lluvia se infiltra directamente en el terreno o indirectamente a partir del flujo de entrada de agua superficial (almacenado en los márgenes de los ríos). Una muy pequeña parte del agua subterránea (agua joven) se origina a partir del magma procedente del interior de la Tierra.

3.2 Presencia de Aguas Subterráneas en las Rocas:

También existen aguas subterráneas en los intersticios de las rocas, los que presentan varias formas, tamaños y orígenes. A la capacidad de las rocas para transmitir el agua a

través de sus intersticios se le llama permeabilidad. Esta depende de las propiedades físicas de la roca y de sus factores y procesos geológicos. Los intersticios de las rocas en cuanto a caminos por los que pasa el flujo subterráneo y la circulación (acuífero) se clasifican en:

Poros, son los intersticios intergranulares que hay entre los granos de los sedimentos clásticos consolidados y no consolidados.

Fisuras, son fracturas o grietas en las rocas.

Cavidades, presentes en las rocas carbonatadas y en los tubos de lava de las rocas volcánicas.

La distribución espacial de un acuífero controla la forma y el tipo de hidrodinámica del flujo, el tiempo de tránsito y el tiempo de residencia del agua subterránea. En las zonas fisuradas se forman caminos de flujos duales, que pueden contribuir substancialmente a la recarga de agua subterránea o interconectar acuíferos mediante acuitardos que gotean. La composición litológica del acuífero y la interfaz agua-roca controlan las reacciones hidroquímicas de los componentes disueltos en el agua subterránea.

3.3 Propiedades Hidrogeológicas de las Rocas:

Las rocas se pueden clasificar según sus propiedades hidrogeológicas, geohidráulicas (almacenamiento de agua, permeabilidad hidráulica) y edafológicas.

La ecuación de Darcy solo es válida para un régimen de agua subterránea laminar que se da en los acuíferos aproximadamente homogéneos e isótropos. La distribución espacial de las fisuras en las rocas fisuradas es normalmente discreta, aunque a menudo una orientación espacial preferente puede provocar una permeabilidad anisótropa. Por

este motivo la matriz rocosa solo puede ser considerada homogénea e isotrópica a gran escala. En este caso los términos de porosidad y permeabilidad hidráulica no se aplican de manera sencilla en los estudios geohidráulicos de los sistemas rocosos fisurados.

La permeabilidad de los sistemas fisurados refleja la historia geológica de las rocas, especialmente las exposiciones a tensiones tectónicas. Los procesos de meteorización y otros procesos geológicos pueden ocasionar cambios durante el pasado geológico. Los sistemas más jóvenes de fisuras de los últimos fenómenos tectónicos son a menudo más permeables que las más antiguas, las cuales pueden estar rellenas por minerales secundarios.

3.3.1.- Rocas Ígneas.

Las rocas ígneas (plutónicas y volcánicas) son permeables en las zonas donde las fisuras están abiertas. Normalmente el ancho de las fisuras y por lo tanto la permeabilidad decrecen con la profundidad.

3.3.2.- Rocas Metamórficas:

Al igual que las rocas ígneas son normalmente permeables en las zonas donde las fisuras están abiertas. Éstas se forman por meteorización a cierta profundidad. Por ejemplo los gneises ácidos que contienen cuarzo están sujetos a meteorización dando lugar a aluviones arenosos.

3.3.3.- Rocas sedimentarias:

El flujo subterráneo de las rocas sedimentarias depende de la composición de la roca, la litología y las facies de las secuencias sedimentarias completas, esto es, el tamaño de

grano y de la composición horizontal (lateral) y vertical. Generalmente la permeabilidad del sedimento en la dirección horizontal (lateral) es órdenes de magnitud mayor que la de la dirección vertical. En las rocas sedimentarias consolidadas el flujo subterráneo también depende del proceso de fisuración. Esto se debe a las perturbaciones tectónicas. Esto se debe a las perturbaciones tectónicas y a las alteraciones exógenas secundarias (meteorización, karstificación, etc.)

3.4 Trazadores y Transporte.

El agua subterránea contiene una mayor o menor cantidad de sustancias inorgánicas y orgánicas que se encuentran principalmente en solución, aunque también se encuentran en forma coloidal o incluso en suspensión. La materia en suspensión no es una característica habitual del agua subterránea, ya que tales partículas experimentan un filtrado efectivo debido a la velocidad de movimiento generalmente lenta a través de los intersticios de los acuíferos. No obstante son un complemento importante en los sistemas de flujo rápido.

Con el nombre de trazador se designa, en general, a cualquier aditivo incorporado a la masa de un determinado producto para estudiar su comportamiento en un proceso físico o químico. En Hidrología, los trazadores se utilizan para estudiar el comportamiento del agua durante alguna fase del ciclo hidrológico o en relación con problemas concretos derivados de su uso y aprovechamiento. La utilización de trazadores en Hidrología goza de una tradición muy antigua.

Las técnicas hidrológicas basadas en el uso de trazadores no siempre son fáciles de aplicar y los resultados obtenidos son, a veces difíciles de interpretar. En todos los casos, se precisa una planificación previa y un amplio conocimiento de las características y comportamiento del trazador utilizado.

El movimiento de los trazadores es a veces muy complicado, debido a la heterogeneidad del medio y a los fenómenos de dispersión e interacción con los materiales sólidos.

Se han realizado muchos estudios sobre las sustancias disueltas en el agua subterránea, y también aunque no tan intensamente, sobre los contenidos de coloides en el agua subterránea. La predicción de la calidad del agua a partir de los estudios químicos del agua subterránea son complicados. La adsorción, la desorción y la dispersión pueden variar las concentraciones durante el transporte.

Los trazadores disueltos y coloides pueden ser de origen natural o antrópico. Ambos orígenes proporcionan información sobre los diferentes aspectos del movimiento del agua subterránea.

3.5 Trazadores Naturales del Agua: Temperatura, Conductividad y Composición Química.

En principio, podemos diferenciar entre trazadores naturales y artificiales del agua. Los primeros corresponden a determinados productos que se encuentran en el agua como consecuencia de procesos naturales o de procesos no controlados y, por tanto, ajenas al hidrólogo y los segundos son adicionados al agua de una forma controlada y previamente planificada.

Los trazadores naturales del agua son utilizados para obtener información sobre el origen y localización de fugas de embalses. De una forma más concreta los trazadores naturales del agua se utilizan para obtener información sobre los dos puntos siguientes:

- Determinación de la procedencia de las aguas que afloran por las zonas de flujo situadas aguas debajo de la presa o que fluyen a través del terreno sin aflorar. Sucede con mucha frecuencia en muchos sitios de presa que las aguas aflorantes

proceden de los acuíferos colindantes o bien son una mezcla de agua del embalse con agua de éstos últimos. Por esta razón, siempre que se inicia un estudio de fugas, lo primero que debe hacerse es confirmar que las aguas de los afloramientos proceden, realmente, del embalse, aunque pueda parecer obvio. La naturaleza reserva muchas sorpresas sobre este particular.

- Investigación de la dinámica de los flujos subterráneos que afloran aguas abajo, la cual se basa en los cambios producidos a lo largo del tiempo en la concentración de un determinado componente químico o isotópico contenido en el agua del embalse, que pueda considerarse característico de la misma. Los estudios se realizan, en este caso, determinando si el cambio de concentración observado en el agua del embalse se detecta también en el agua de los afloramientos y, si es así, con cuanto retraso se transmite a estos dichos cambios. Este retraso proporciona información sobre el tiempo de tránsito del agua entre el embalse y la zona de flujo o entre aquél y los sondeos existentes aguas abajo. Si existen varias zonas de flujo, el tiempo de tránsito puede variar de unas a otras, debido a lo cual el control del cambio de concentración debe realizarse por separado para las diferentes zonas de flujo. Obviamente, en este caso, lo primero que debe hacerse es determinar si el agua de las diferentes zonas tiene o no una misma composición química e isotópica.

Ejemplo de este tipo de trazadores son los siguientes:

- Iones disueltos en el agua (Cl^- , NO_3^- , Na^+ , determinados oligoelementos, etc.).
- Isótopos ambientales (tritio, carbono-14, deuterio y oxígeno-18, radón, azufre-34, carbono-13, etc.).

- Agentes contaminantes procedentes de vertidos urbanos, industriales o agrícolas (bacterias, compuestos nitrogenados, elementos alcalinos, ión bicarbonato, etc.).
- Productos en suspensión tales como arcillas coloidales.
- En algunos casos la temperatura del agua puede utilizarse como trazador natural muy importante.

Sin embargo, los trazadores de mayor relevancia al momento de realizar estudios de fugas en presas y embalses son:

- Temperatura.
- Conductividad.
- Composición química, incluyendo solo los componentes mayoritarios del agua.
- Isotopos estables del agua deuterio y oxígeno-18.
- Tritio natural procedente, en su mayor parte, de los ensayos termonucleares.
- Carbono-13.

3.5.1 Temperatura del Agua.

La temperatura del agua es en muchos casos, un excelente trazador para la investigación de fugas de embalse. La razón de su uso deriva de la estratificación térmica experimentada por la mayoría de los embalses del mundo, no solo en zonas de climas

fríos y templados, sino también en zonas tropicales. En realidad solo los embalses de muy escasa profundidad (menor a unos 10m) suelen encontrarse con temperaturas uniformes debido al efecto mezclador del viento. Como se sabe la causa que origina la estratificación térmica es el intercambio de calor entre el agua del embalse y la atmósfera, la cual, en el caso de climas templados, actúa en los dos sentidos.

La estratificación térmica del embalse hace que se forme lo que se llama una termoclina, que corresponde a la zona de transición entre las aguas calientes y frías. La profundidad de esta termoclina aumenta durante el período de flujo de calor positivo y se destruye de forma rápida cuando se produce el mezclado vertical del agua del embalse a consecuencia de la llegada de estaciones otoñales o invernales. La capa de agua situada debajo de la termoclina se llama epilimnio y la situada debajo hipolimnio.

La estratificación térmica del embalse tiene profundas repercusiones en su comportamiento físico, químico y biológico. Por ejemplo, la aireación del agua afecta solo al epilimnio, mientras que en el hipolimnio se tienen condiciones anaeróbicas. El estudio y modelo de lagos o embalses profundos es muy complicado, debido a los efectos perturbadores derivados de las condiciones meteorológicas (radiación solar y viento), de los flujos de agua que entran y salen de los mismos y de la topografía del fondo. El efecto del viento hace que el mezclado del agua se produzca con mayor rapidez en el epilimnio que en el hipolimnio.

La comparación de la temperatura del agua de las zonas de fluidos que proceden del embalse con los perfiles de temperatura medidos en éste último puede proporcionar información valiosa sobre la profundidad del embalse a la cual se produce la infiltración del agua que aflora por aquellas. Por lo general cuando se miden perfiles de temperaturas, se miden también perfiles de conductividad. Utilizando para ello sondas mixtas, que suelen denominarse termoconductivímetros.

Obviamente, los perfiles de temperatura y conductividad medidos en los sondeos que puedan existir, eventualmente, en la zona de filtraciones son siempre de gran ayuda para identificar las vías preferenciales de circulación del agua que procede del embalse.

3.5.2 Conductividad.

Un parámetro tan simple y fácil de medir sobre el terreno como lo es la conductividad eléctrica del agua puede proporcionar informaciones muy valiosas en relación con la investigación de fugas en embalses. Se recomienda utilizar este parámetro como herramienta de reconocimiento inicial de todos los puntos de agua existentes en la zona del estudio, incluyendo el propio embalse.

Como se sabe la conductividad eléctrica representa la capacidad del agua para conducir electricidad. Más concretamente a la intensidad de corriente que circula entre dos electrodos de 1cm^2 de superficie sumergidos en el agua y situados a una distancia de 1cm, entre los cuales se aplica una diferencia de potencial de 1 voltio. La conductividad es la inversa de la resistividad. Esta última se expresa en ohmios.cm. Por lo tanto, conductividad se expresa en $(\text{ohmios.cm})^{-1}$ o lo que es lo mismo, en mhos/cm. Hace algunos años, se definió la unidad conocida con el nombre de Siemens/cm (S/cm) en honor al científico alemán, que equivale a 1 mho/cm. Esta unidad es muy elevada para los valores que se encuentran normalmente en aguas naturales y, por esta razón, se utilizan los submúltiplos mS/cm y $\mu\text{S/cm}$.

La conductividad del agua aumenta con la temperatura en una razón aproximada de 2 % por $^{\circ}\text{C}$.

Las informaciones que pueden proporcionar la conductividad del agua son muy numerosas y diversas. Lógicamente, la conductividad del agua del embalse es un parámetro que varía en el tiempo y en el espacio. Frecuentemente, los embalses presentan variaciones cíclicas de conductividad, con aguas menos salinas durante los

periodos lluviosos y mas salinas durante los periodos secos. En periodos lluviosos la mayor parte del agua que llega al embalse procede de la escorrentía superficial de la cuenca, la cual suele tener un nivel bajo de salinización. En cambio, durante periodos de estiaje, aumenta la contribución relativa de aguas procedentes de la descarga de manantiales cuyo nivel de salinización puede ser mucho mayor. Estos cambios cíclicos de conductividad del agua pueden aprovecharse para investigar la conexión hidráulica existente entre el embalse y los sondeos y zonas de flujo existentes aguas abajo.

Los cambios de conductividad del agua a lo largo de la columna de un sondeo pueden relacionarse con la existencia de flujos a través del mismo. En líneas generales, Los tramos de baja conductividad corresponden a zonas de mayor flujo. Los tramos con elevada conductividad suelen corresponder a aguas estancadas.

3.5.3 Composición Química del Agua.

La composición química del agua subterránea es resultado de la composición del agua que entra en un reservorio subterráneo (acuífero), las reacciones que ocurren durante su infiltración a través de la zona no saturada y las reacciones que ocurren con los minerales presentes en la roca y que pueden modificar su composición.

Además de los procesos naturales que actúan como factores de control de las características de las aguas subterráneas, éstas pueden ser modificadas por acción de contaminantes tales como nitratos, fertilizantes y lluvia ácida, entre otros.

Algunos factores que controlan la química del agua en todo el mundo a escala continental son:

- Evaporación y evapotranspiración.

- Captura selectiva de iones por la vegetación.
- Decaimiento de materia orgánica.
- Meteorización y disolución de carbonatos, silicatos o minerales evaporíticos; precipitación de minerales en suelos o acuíferos
- Reacciones de intercambio iónico (en superficies de sedimentos)
- Mezcla de aguas de diferentes características.
- Actividades antrópicas.

Los parámetros físicos determinantes para entender e interpretar reacciones químicas son:

- pH
- Eh (potencial redox)
- Conductividad eléctrica
- Temperatura del agua.

La medición in-situ de estos parámetros es indispensable y se hace mediante utilización de sondas específicas.

Salvo casos excepcionales, los iones mayoritarios disueltos en el agua son los siguientes:

- Aniones: Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , CO_3H^- y CO_3^{2-} .
- Cationes: Na^+ , K^+ , Ca^{++} y Mg^{++} .

La concentración de estos elementos disueltos se expresa generalmente en mg / L (ppm) o meq/ L. La medición de estos elementos se debe hacer lo más pronto posible después del muestreo. La alcalinidad, compuesto de CO_2 , HCO_3^- y CO_3^{2-} , se medirá preferentemente in-situ.

Los elementos minoritarios o trazas como estroncio, boro, flúor, bromo, arsénico, cobre, son indicadores muy valiosos del medio ambiente natural o índices de contaminación. El contenido del agua subterránea en estos elementos puede llegar a niveles muy alto en casos específicos. La concentración de estos elementos se expresa generalmente en $\mu\text{g} / \text{L}$ (ppb).

Lógicamente, la composición química del agua proporcionará información sobre su origen, permitiendo diferenciar el agua procedente del embalse de otras aguas ajenas al mismo. Asimismo, permitirá identificar y evaluar posibles mezclas de estos dos tipos de aguas. Herramientas complementarias para este tipo de estudio son los isótopos estables deuterio y oxígeno 18.

3.6 Determinaciones Químicas.

Valor del pH: el pH es un término usado para designar la intensidad ácida o alcalina de una solución, o una vía para expresar la concentración de iones hidrógeno. En cambio, los términos acidez o alcalinidad expresan la capacidad amortiguadora neutralizable de una reserva total de sustancias químicas, estén o no ionizadas. El pH mide el potencial de los iones hidrógeno o su opuesto el oxhidrilo disociado en solución acuosa, en un proceso caracterizado por una constante de ionización. Los cambios de pH de un líquido se comprenden en una escala práctica entre 0 y 14, con un valor medio de 7 que significa neutralidad. Los pH menores a 7 indican reacción ácida y los mayores, reacción alcalina.

Alcalinidad: la alcalinidad en las aguas es impartida por bicarbonatos, carbonato e hidróxido, siendo el bicarbonato la mayor forma encontrada, debido a la considerable acción del dióxido de carbono sobre los metales básicos del suelo. La alcalinidad puede definirse numéricamente como la concentración equivalente de una base titulable, determinada con una solución valorada de un ácido fuerte.

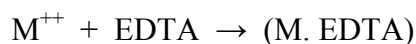
La alcalinidad se determina por titulación con un ácido mineral fuerte de concentración conveniente, hasta puntos de neutralización señalados por medio de indicadores colorantes. La alcalinidad en muestras que sobrepasen el pH 8,3, se determinan en dos fases: en la primera la titulación se conduce con el ácido y el indicador fenolftaleína, que vira de color rosado inicial a incoloro. En la segunda fase, con el anaranjado de metilo hasta pH 4,5, que vira de color amarillo inicial a anaranjado amarillento o con una mezcla de los indicadores verde bromocresol y rojo de metilo.

Cuando el pH no sobrepasa el pH 8,3 o sea no hay color con la fenolftaleína, se practica una sola titulación con el anaranjado de metilo o con la mezcla de indicadores. La alcalinidad puede medirse sin necesidad de indicadores y más satisfactoriamente, con un potenciómetro, hasta pH 8,3 o pH 4,5 u otros puntos convenientes.

Dureza: se ha entendido como dureza de un agua a su propiedad de precipitar el jabón y a la formación de sedimento y costras en las tuberías y en las unidades donde haya principalmente cambios provocados de temperatura. Se define como dureza de un agua a la suma de las concentraciones de calcio y magnesio expresadas como carbonato de calcio en mg/L.

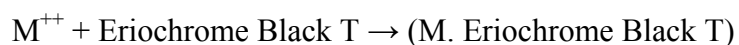
El método oficial, rápido y seguro para la determinación de la dureza del agua es el Método Complexométrico o de Schwarzenbach, EDTA.

El ácido etilendiamino tetraacético y sus sales sódicas (abreviadas EDTA) forman complejos incoloros solubles (es decir no ionizados o disociados), del tipo quelato, muy estables con el calcio y magnesio y otros cationes divalentes causantes de dureza, de acuerdo con la ecuación:



Complejo Incoloro

Es necesaria la presencia de un indicador que señale el punto final de la titulación de la dureza con EDTA. El colorante conocido como Eriochrome Black T es un excelente indicador para mostrar cuando todos los iones causantes de dureza han sido acomplejados. Si se agrega una pequeña cantidad de este indicador, que es de color azul a una solución acuosa que contiene iones de calcio y magnesio a un pH de 10,0 se combina con una pequeña parte de ellos formando un complejo menos estable de color rojo vino de acuerdo con la ecuación:



Complejo Rojo Vino

Si se agrega entonces al agente titulador EDTA, durante la titulación todos los iones de dureza libres son acomplejados y al final cuando todos los iones libres han reaccionado, el EDTA rompe el complejo rojo (M. Eriochrome Black T) porque es capaz de formar complejos más estables (M. EDTA) con los iones de dureza, con lo cual queda libre el Eriochrome y cambia el color rojo vino a azul indicando el final de la titulación.

Calcio: la presencia de calcio en las aguas, séptimo elemento en el orden de abundancia en la corteza terrestre, es el resultado de la disolución de la roca caliza, dolomita, yeso, etc., debido a condiciones ambientales.

Magnesio: el magnesio se clasifica en el octavo lugar en el orden de abundancia en la corteza terrestre y es un constituyente común, junto con el calcio, en las agua naturales. Sus concentraciones varían desde cero hasta cientos de miligramos por litro, dependiendo de la fuente y del tratamiento.

Cloruro: el cloruro en la forma de anión es uno de los más abundantes en el agua y líquidos residuales. El agua de muchos pozos en las zonas limítrofes al mar o de estuarios es salobre debido al cloruro. Generalmente se considera la concentración de 250mg/L como sabor umbral del ión cloruro.

Sulfato: el sulfato, como el ión cloruro, debe encontrarse en el agua potable dentro de ciertos límites aceptables por los organismos sanitarios. En exceso de 500mg/L comunica el agua ligero sabor amargo y actúa como laxante en algunas personas. El sulfato está asociado también en la formación de olores y en la corrosión del concreto.

Fluoruro: desde el punto de vista de la ingeniería sanitaria el interés analítico se justifica por la necesidad de proyectar y operar unidades de remoción o inyección de fluoruros para mantener los niveles normales cuando su concentración es excesiva o viceversa.

Fosfato: el fósforo se encuentra en aguas naturales y en líquidos residuales casi únicamente como fosfatos. Estos se clasifican en ortofosfatos, fosfatos condensados (piro, meta y otros polifosfatos) y fosfatos orgánicos.

Estas formas se encuentran en solución, en partículas o detritus, o en los cuerpos de organismos acuáticos. Las varias formas del fosfato encontrado en las aguas y en los líquidos residuales tienen su origen en su agregado artificial en el tratamiento: los polifosfatos y otros compuestos del fósforo se usan con frecuencia como medios para evitar la corrosión.

Amoniaco: el amoníaco se encuentra en forma natural en aguas de superficie (ríos, etc.), de pozos y puede producirse por diseminación del nitrógeno orgánico y por hidrólisis de la urea. También puede ser producido en forma natural por la reducción del nitrato bajo condiciones anaeróbicas. El amoníaco es uno de los eslabones del ciclo del nitrógeno en las descomposiciones aeróbicas y anaeróbicas, sirve de índice químico de contaminación de las aguas, sobre todo en las superficiales.

Nitrito: el nitrito es un estado de oxidación intermedio del nitrógeno, tanto en la oxidación del amoníaco a nitrato como en la reducción del nitrato. Su análisis, sobre todo en aguas superficiales, se justifica principalmente por construir un índice químico de contaminación. El nitrito y el cloro por su incompatibilidad química es improbable encontrarlos juntos en una misma muestra. La determinación de nitrito debe practicarse lo más pronto posible después de tomar la muestra.

Nitrato: el nitrato representa la fase más alta de oxidación del ciclo del nitrógeno; normalmente alcanza la más altas concentraciones en las etapas finales de oxidación químico-biológicas. En aguas superficiales se presenta en mínimas cantidades, pero en aguas provenientes de pozos alcanza concentraciones por arriba de 20 mg/L. El nitrato sirve como fertilizante y en los campos abonados. En consecuencia, mucho del nitrato

encontrado en estas fuentes tiene su origen en las labores agrícolas. Se practica como una indicación de calidad sanitaria.

Hierro: el hierro se disuelve en las aguas debido al CO_2 libre que se forma bajo el efecto de condiciones ambientales reductoras. Luego puede ser precipitado por la materia orgánica, pasando a formas complejas y a partículas en suspensión relativamente gruesa. El agua puede contener limo y arcilla en suspensión que pueden contener hierro insoluble, el cual se solubiliza por la acción de un ácido fuerte como el clorhídrico. En las muestras de agua para el análisis, el hierro puede encontrarse en la forma ferrosa y férrica, filtrable y suspendida.

Manganeso: hay un manganeso soluble, generalmente en pozos, en la forma divalente iónica, en ausencia de oxígeno pero a las plantas de tratamiento puede llegar en su más alta valencia, en la forma tetravalente y también relativamente soluble como trivalente; estas dos últimas formas vienen principalmente en aguas superficiales. Se justifica su análisis para fines de control.

3.7 Evaluación de la Calidad de los Análisis.

Antes de proceder a la interpretación de los análisis químicos de muestras de agua, es conveniente efectuar una evaluación de la calidad de los resultados. Para ello, las concentraciones expresadas en mg/l tienen que ser transformadas en meq/l (miliequivalentes por litro), lo cual se hace dividiendo dichas concentraciones por los valores del equivalente químico, que es igual al peso atómico o peso molecular dividido por la valencia. Para los iones fundamentales del agua, 1 meq/l equivale a las siguientes concentraciones expresadas en mg/l:

$\text{Cl}^- = 35,45$; $\text{SO}_4^{2-} = 48,03$; $\text{NO}_3^- = 62,0$; $\text{CO}_3\text{H}^- = 61,03$; $\text{CO}_3^{2-} = 30,0$;

$\text{Ca}^{++} = 20,04$; $\text{Mg}^{++} = 12,15$; $\text{Na}^+ = 22,99$; $\text{K}^+ = 39,1$.

Un criterio de calidad consiste en verificar que se cumpla la electroneutralidad (E.N) de la muestra de agua, es decir, que la suma de las cargas positivas y negativas asociadas a los iones disueltos sea la misma.

$$E.N(\%) = [(caciones + aniones) / (caciones - aniones)] \times 100$$

Donde la suma de los cationes y aniones viene expresada en meq/l. Como se trata de cargas eléctricas debe tenerse en cuenta que los aniones tienen carga negativa, debido a lo cual los signos más o menos de la ecuación anterior se invierten a efectos del cálculo. Diferencias de la electroneutralidad de hasta 2% son inevitables. Diferencias mayores de un 10%, no son aceptables y exigen revisar los resultados analíticos.

La determinación de la composición química del agua puede proporcionar informaciones muy valiosas en relación con la investigación de fugas de embalses. La evolución de la composición química del agua del embalse infiltrada en el terreno informa sobre la naturaleza de los materiales rocosos a través de los cuales circula, permitiendo, frecuentemente, identificar la existencia de flujos preferenciales en el subsuelo mediante el muestreo de los sondeos y de los afloramientos existentes.

3.8 Presentación de los Análisis Químicos.

Los resultados de los análisis químicos suelen representarse en gráficos de tipo Piper, así como diagramas de columnas verticales de Schöller o similares. El gráfico Piper relaciona entre sí los valores relativos a las concentraciones iónicas expresadas en meq/l. Los valores representados corresponden a los tantos por ciento de cada ion o pareja de iones (casos de los iones Na^+ y K^+ , Cl^- y NO_3^- y CO_3H^- y CO_3^{--}). Los puntos del gráfico que se encuentran situados dentro de la elipse intermedia se interpretan como mezclas de dos tipos de agua.

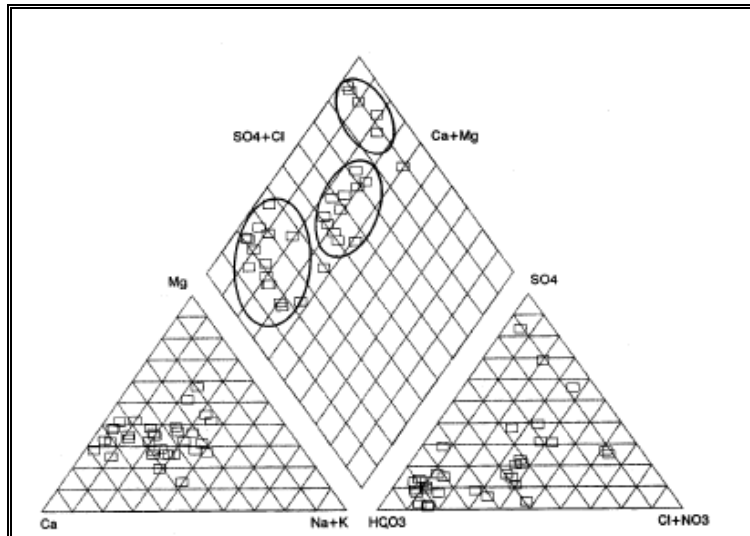


Fig. 3.1 Grafico de Piper. (Tomado del Manual de Fugas del Embalse).

Los diagramas de columnas verticales reflejan, en cambio, los valores absolutos de las diferentes concentraciones iónicas.

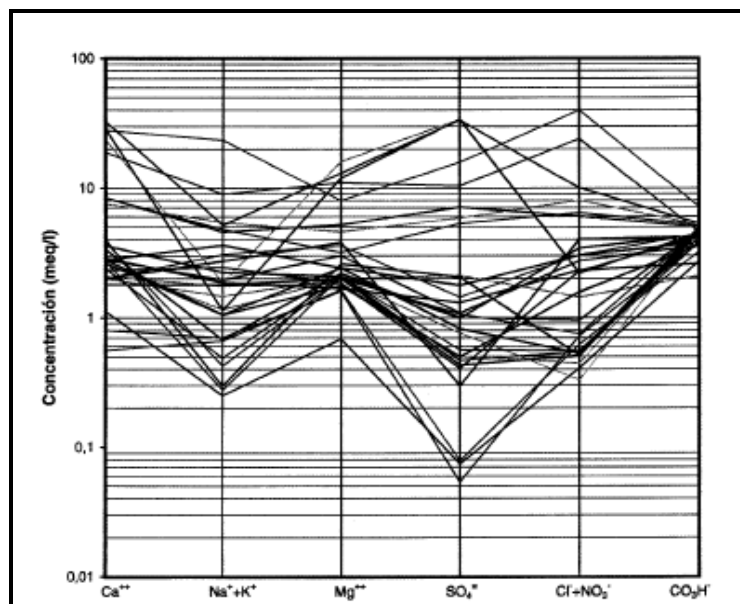


Fig. 3.2 Diagrama de Columnas Verticales. (Tomado del Manual de Fugas del Embalse).

3.9 Trazadores Artificiales.

Los trazadores artificiales son adicionados al agua de una forma controlada y previamente planificada. Algunas diferencias fundamentales entre el uso de trazadores naturales y artificiales se indican a continuación:

- ***Volumen de agua marcado;*** en los naturales el volumen es muy elevado y en los artificiales el volumen es relativamente pequeño debido a la limitada cantidad de trazador que puede utilizarse.
- ***Tiempo disponible;*** en los naturales el tiempo es muy grande o indefinido, lo contrario de los artificiales.
- ***Control del proceso de marcado;*** en los naturales no existe este control y las condiciones de marcado no son siempre bien conocidas. En los artificiales las condiciones de marcado son elegidas por el hidrólogo (tiempo, espacio, forma de marcado, tipo de trazador, etc.).

De acuerdo a esta comparación es obvio que los trazadores naturales son más apropiados para estudios hidrológicos de carácter regional, mientras que el uso de los artificiales está reservado a problemas o ensayos de carácter local y de corta duración.

Son muy diversos los trazadores artificiales que pueden utilizarse para marcar flujos de agua, si bien, para cada caso concreto, el número de los que, realmente, pueden utilizarse es muy reducido. En principio, pueden distinguirse los siguientes grupos:

1) *Sólidos en suspensión;* solo tienen aplicación para casos de flujos superficiales o para investigar la circulación a través de conductos muy desarrollados de sistemas

carsticos. En medios porosos y finamente fracturados, se retienen fácilmente por filtración mecánica.

Dentro de este grupo, los trazadores más interesantes a efectos prácticos son: Almidón en forma de granos finos, Granos de polen y esporas de licopodio y microorganismos bacterianos.

2) **Trazadores químicos iónicos;** se trata en este caso de determinadas sales de electrolitos fuertes que se disuelven en el agua. Se han utilizados iones muy diversos, pero los más interesantes son Cl^- , I^- , y Li^+ .

3) **Colorantes y Trazadores Fluorescentes;** Sin lugar a dudas, los colorantes son los trazadores de uso más extendido en la hidrología. Se utilizan para ello colorantes de elevada solubilidad en agua que, en ciertos casos, pueden ser detectados, incluso, de una forma visual.

Su determinación cuantitativa se lleva a cabo en el laboratorio o en el campo con equipos portátiles. Estos productos pueden determinarse a concentraciones muy bajas, y en general, no están presentes en las aguas naturales. Entre los más importantes están:

1) **Dicromato Sódico:** es económico y fácilmente asequible. Se mide por la técnica de colorimetría utilizando difenil-carbacida para desarrollar el color. La concentración mínima detectable es del orden de 0,5 mg/l. Su solubilidad en agua supera los 2 Kg/l, no así el dicromato potásico que es mucho menos soluble.

2) **Fluoresceína y Rodamina:** Se trata de trazadores que pueden detectarse por espectrofluorimetría a concentraciones mínimas del orden de 10^{-6} gramos/litro. Permiten, por tanto, el aforo de grandes caudales (mayores de $250\text{m}^3/\text{s}$). Pero dan malos resultados con aguas muy contaminadas o con una importante carga de sedimentos. La

uranina es la sal sódica de la fluoresceína ($C_{10}H_{10}O_4Na_2$), la cual es más soluble en agua que ésta última y por ello se usa preferentemente. Las soluciones muy concentradas de Uranina (o de fluorescencia) tienen un color morado intenso y las diluidas son de color verde.

Las concentraciones se detectan con un fluorímetro. En aguas de baja alcalinidad, pueden alterarse por acción del CO_2 . La luz, ciertas bacterias y el óxido férrico producen su descomposición parcial. El pH y la temperatura influyen drásticamente en la sensibilidad de detección. Generalmente, la medida se realiza a valores de pH mayores de 10. El aumento de la temperatura hace disminuir la sensibilidad de detección.

3) Trazadores Activables con Neutrones: En este procedimiento de marcado se utiliza como trazador un elemento químico no radioactivo susceptible de ser activado fácilmente por irradiación con neutrones en un reactor nuclear. La actividad producida en esta irradiación permite identificar la presencia del elemento en la muestra y determinar su concentración. El método es engorroso, tanto en lo que se refiere a la preparación de las muestras para irradiación como para su medida. Por esta razón es muy escaso el uso que se hace del mismo.

4) Trazadores Radiactivos Artificiales: A pesar del elevado número de isótopos radiactivos que se conocen (algo más de 1000), solo unos pocos son utilizados en hidrología como trazadores.

El precio y las posibilidades de adquisición, junto con las condiciones exigidas para usos hidrológicos, constituyen las bases principales de selección. No existe ningún radioisótopo que pueda ser utilizado como trazador universal en hidrología. Debido a razones de protección radiológicas, estos trazadores deben utilizarse sólo cuando los trazadores no radiactivos no pueden proporcionar la misma calidad de información que los radiactivos.

3.10 Aforo de Corrientes Abiertas con Trazadores.

El conocimiento de los caudales de los flujos de agua que discurren por la superficie terrestre es de un interés básico en el proyecto de obras hidráulicas. Para conocer las disponibilidades de agua y sus condiciones de explotación es imprescindible, en lo que a escorrentía superficial se refiere, el conocimiento previo del régimen de los ríos, lo cual lleva implícito el establecimiento y desarrollo de un amplio programa de aforos de carácter permanente. Los principales métodos de aforos que se disponen actualmente para el caso de corrientes abiertas son:

- Aforos por vertedero, en pared gruesa o en pared delgada.
- Aforos por molinete, mediante medida de la velocidad lineal del agua en múltiples puntos de una sección conocida de la corriente.
- Métodos basados en el empleo de trazadores.

El primero de estos métodos, cuya comodidad y exactitud son conocidas, tiene su principal inconveniente en la elevada inversión que significa la construcción del vertedero. Por otra parte las fórmulas semiempíricas que permiten el cálculo del caudal dejan de cumplirse cuando se sobrepasan los límites de caudal para los cuales el vertedero ha sido proyectado. Los aforos con molinetes presentan a veces, dificultades insuperables.

Los aforos con trazadores pueden considerarse como técnicas complementarias y, en ciertos casos, alternativas. Se presentan ocasiones, en las cuales son las únicas técnicas que pueden utilizarse. El empleo de trazadores químicos para aforar corrientes abiertas de agua se inició en el año 1863. Las técnicas de trabajo han ido evolucionando de acuerdo con los adelantos obtenidos en los métodos de análisis cuantitativo de los

posibles trazadores a concentraciones bajas. Desde un principio, los trazadores más utilizados fueron cloruro sódico, nitritos alcalinos, sulfato de manganeso y fluoresceína. El procedimiento consiste, en general, en determinar la concentración máxima del trazador alcanzado en el agua, al efectuar una inyección de éste en un punto situado aguas arriba, con un caudal constante y durante un largo período de tiempo.

3.11 Hidroquímica e Isótopos en el Agua Subterránea.

La hidroquímica al proveer información sobre la distribución de los elementos y su evolución espacial y temporal en sistema hídrico, ayuda a caracterizar los acuíferos y definir problemas ambientales y proponer planes de remediación.

El conocimiento de los procesos que ocurren en los ambientes acuáticos es fundamental para caracterizar y planear el manejo del recurso y en particular, para planear su aprovechamiento y protección.

Las técnicas isotópicas hacen parte de la hidroquímica y la combinación de los dos son indispensable para estudios hidrogeológicos. Los elementos disueltos, así como también los isótopos del agua, permiten obtener información sobre:

- La renovación de las aguas en los acuíferos (recarga)
- Identificación de aguas antiguas (origen y edad del agua)
- Interconexiones hidráulicas entre varios acuíferos
- Mezcla de aguas de origen diferente
- Interacciones rocas-CO₂

- Hidrodinámica de los acuíferos (flujos y edad)
- Disolución de evaporita
- Intrusión de aguas marinas en acuíferos costeros
- Vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación (origen y circulación de los contaminantes)
- Identificación de las aguas termo-minerales.
- Origen del aguas en movimientos de masas en zonas urbanizadas

La interpretación de los datos de isótopos estables y radioactivos en medio subterráneo se debe complementar para la evaluación geoquímica de los elementos orgánicos e inorgánicos.

3.12 Estudio de Isótopos Ambientales:

La composición isotópica de los elementos con relativo bajo número atómico ($Z < 16$) es variable debido a que sus isótopos sufren fraccionamiento durante ciertos procesos químicos o físicos que ocurren en la naturaleza. El fraccionamiento se debe a leves variaciones en las propiedades químicas y físicas de cada isótopo y es proporcional a la diferencia entre sus masas. Estos elementos tienen algunas características en común:

- 1).- Tienen baja masa atómica (entre 1 y 34): H, Li, Be, B, C, O, N, F, Cl y S.
- 2).- La diferencia de masa relativa entre sus isótopos es bastante grande.

- 3).- Forman enlaces predominantemente covalentes con O y otros elementos.
- 4).- Excepto H, Li, Be, F y O, poseen más de una valencia o estado de oxidación (C, N, Cl, S).
- 5).- Forman una amplia variedad de compuestos y minerales, o son constituyentes importantes de sustancias sólidas o fluidas naturales comunes (H, C, O, S).
- 6).- La abundancia del isótopo menos abundante (generalmente el más pesado) es lo suficientemente elevada para ser detectada por los instrumentos actuales (espectrómetros de masas).

Evidentemente este tipo de procesos es más notable en los elementos más livianos y abundantes, siendo nulo e indetectable en los elementos pesados. Los más importantes elementos en los cuales se han observado variaciones en su composición isotópica incluyen: H, C, N, O y S, siendo éste último el más pesado en el cual este proceso es detectable.

Los isótopos de oxígeno más abundantes, ^{16}O y ^{18}O , al igual que los de hidrógeno, D y H, son muy utilizados. El Standard utilizado es el SMOW (Standard Mean Ocean Water) que representa el valor medio de dicha relación en el agua de mar, expresado como desviación en tanto por mil (‰). Los resultados muestran que la relación $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ depende de la temperatura. La información más relevante que arroja el estudio de los isótopos estables del oxígeno se refiere al origen de los fluidos.

En general, el fraccionamiento isotópico ocurre durante los siguientes tipos de procesos químicos y físicos:

1).- Reacciones de intercambio isotópico: que involucran la redistribución de isótopos de un elemento entre las diferentes moléculas o compuestos que contienen a ese elemento. Son gobernadas por cambios de presión y temperatura.

2).- Reacciones unidireccionales: en las que la velocidad de reacción depende de la composición isotópica de los reactantes y de los productos.

3).- Procesos físicos: como evaporación/condensación; fusión/cristalización; adsorción/resorción en arcillas; difusiones iónicas, molecular o gaseosa, debidas

3.13 Principios Básicos de la Utilización de Isótopos Ambientales en Estudios de Aguas Subterráneas

Durante las fases de evaporación y condensación del agua, cambia la concentración de los isótopos del oxígeno y del hidrógeno. (Diferentes nucleidos de un mismo elemento),

El vapor de agua que se sale de los océanos lleva una concentración más baja en isótopos pesados que el agua del mar.

Cuando se produce una precipitación, las gotas que descienden de la nube tienen una concentración en isótopos pesados más alta. Las masas nubosas, en su recorrido a través de los continentes se empobrecen en isótopos pesados y poco a poco el agua adquiere unas características propias a su medio ambiente.

Hay otros isótopos en el agua de lluvia cuya concentración disminuye con el tiempo. Estos isótopos se pueden medir en el agua superficial o subterránea para determinar la "edad" o tiempo de residencia del agua dentro de un reservorio particular.

3.14 Isótopos del Agua

Las numerosas aplicaciones de las técnicas isotópicas hidrológicas que aplican isótopos estables abarcan la hidrosfera completa. Uno de los principales campos de aplicación se refiere al origen y la mezcla del agua subterránea y los constituyentes naturales y antrópicos disueltos. La información más razonable se obtiene de la abundancia de los isótopos estables. Se miden de forma rápida y barata y se pueden utilizar de forma razonable como trazadores conservativos.

3.13.1.-Oxígeno $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, Hidrogeno $^2\text{H}/^1\text{H}$ y Trítio ^3H :

El oxígeno ($Z=6$) es el elemento más abundante de la corteza terrestre y se halla combinado con hidrógeno formando agua H_2O . El oxígeno tiene 3 isótopos estables y el hidrogeno ($Z=1$) dos, cuyas abundancias aproximadas son:

$$\text{O}^{16} = 99,63\%$$

$$\text{O}^{17} = 0,0375\%$$

$$\text{O}^{18} = 0,1995\%$$

$$\text{H (Protio)}=99,9852\%$$

$$\text{H}^2 \text{ (Deuterio)}= 0,0148\%$$

Los isótopos más abundantes del oxígeno ^{16}O y ^{18}O y los del hidrógeno ^1H y ^2H (o deuterio D) se combinan y crean moléculas de agua con diferentes masas moleculares entre 18 y 22. De todas ellas las más abundantes son $^1\text{H}_2\ ^{16}\text{O}$, $^1\text{H}\ ^2\text{H}\ ^{16}\text{O}$ y $^1\text{H}_2\ ^{18}\text{O}$. Como forman parte de la molécula se pueden usar como trazadores conservativos.

Las presiones de vapor de las diferentes moléculas de agua son inversamente proporcionales a sus masas, de modo que H_2^{16}O tiene una P_{vap} significativamente mayor que D_2^{18}O . Por este motivo, el agua formada por la evaporación de cuerpos de agua (océanos, lagos, etc.) se enriquecen muy levemente en ^{16}O e H, mientras que el agua remanente se enriquece muy levemente en ^{18}O y D.

Las composiciones isotópicas de hidrógeno y oxígeno se reportan en términos relativos a las diferencias de las relaciones $^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$ y D/H con respecto al Standard V- SMOW, definido a continuación:

$$\text{D/H (V-SMOW)} = 0,00015575$$

$$^{18}\text{O} / ^{16}\text{O (V-SMOW)} = 0,0020052$$

Los contenidos isotópicos de la precipitación (como principal fuente de recarga de los acuíferos) están condicionados por diversos factores climáticos y geográficos (temperatura, grado de condensación de la masa nubosa, altitud, latitud, etc.), siendo la temperatura el principal factor que controla, en última instancia, los valores absolutos observados en la composición isotópica de la precipitación.

Cuando el agua se evapora de la superficie del mar, el vapor de agua generado estará enriquecido en isótopos livianos (^{16}O y H), puesto que el agua “liviana” tiene una presión de vapor P_{vap} superior a la del agua pesada, la que contiene ^{18}O y D. Por consiguiente, los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD en el vapor de agua atmosférico son ambos negativos. Cuando las gotas de lluvias se forman en las nubes por condensación de vapor de agua, la fase líquida estará enriquecida en isótopos en ^{18}O y D, de modo que la composición de las primeras gotas de lluvias será similar a la del agua oceánica. La continua remoción de ^{18}O y D del aire húmedo causa un enriquecimiento de ^{16}O y H en el vapor remanente. Por lo tanto los valores $\delta^{18}\text{O}$ y δD del vapor de agua en la atmósfera

se hacen cada vez más negativos a medida que la lluvia, la nieve o el granizo continúen precipitando. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD de las precipitaciones, líquidas o sólidas, también se vuelven cada vez más negativos debido a que el vapor que los produce se agota en isótopos pesados.

En los estudios de fraccionamiento isotópico de O e H es importante tomar en cuenta la “línea de aguas meteóricas”. La variación isotópica de las aguas meteóricas depende de la latitud geográfica y de la elevación s.n.m., de modo que los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD tienden a ser más negativos a mayores elevaciones y/o más altas altitudes. El motivo de esto es que en esos lugares, como altas montañas o zonas templadas a polares, hay menos evaporación y por ende, menos fraccionamiento entre el agua oceánica o continental y el vapor atmosférico siendo este el que produce los cambios isotópicos observados, puesto que los isótopos livianos tienden a ser concentrados en la fase de vapor. La relación hallada por OHMOTO para esta línea (1986) es la siguiente;

$$\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10, \text{ esta corresponde a la línea de aguas meteóricas.}$$

El Organismo Internacional de Energía Atómica, en cooperación con la Organización Meteorológica Mundial estableció hace muchos años una red mundial de estaciones para la colección de muestras mensuales de precipitación, con objeto de determinar la composición isotópica. Este banco de datos pionero se utiliza en la actualidad como base para las investigaciones que conducen a una mayor comprensión de los ciclos dinámicos terrestres que guían la renovación y el establecimiento de los recursos hídricos.

El tritio es el isótopo radioactivo del hidrógeno, siendo su periodo de semidesintegración de 12,32 años.

Después de su formación natural (en la alta atmósfera) o artificialmente (ensayos termonucleares o industriales) el tritio se oxida (HTO) y entra a formar parte del ciclo del agua. Su distribución en la precipitación está condicionada por la latitud, proximidad al mar y distancia a fuentes artificiales o zonas de ensayos termonucleares.

Estos factores, junto a su desintegración radioactiva, permiten utilizar los contenidos de tritio como indicadores de la presencia de aguas recientes en los acuíferos y determinar, bajo ciertas condiciones, zonas de recarga preferente. La concentración de tritio se expresa en Unidades de Tritio (UT) ($1 \text{ UT} = 1 \text{ átomo de tritio en } 10^{18} \text{ átomos de } 1\text{H}$).

3.13.2.- Carbono (^{13}C , ^{12}C y ^{14}C)

El carbono ($Z=6$) es uno de los elementos más abundantes del universo y es la base para la existencia de la vida en la Tierra. Por consiguiente, es el elemento más importante de la biosfera, pero también ocurre en la corteza y el manto terrestre y en la atmósfera e hidrosfera. El carbono ocurre en estado reducido en los compuestos orgánicos y los carbones fósiles. También ocurre en estado oxidación en el CO_2 , el ión carbonato soluble y en minerales carbonatados. También se consigue en estado nativo, como grafito o diamante. El carbono tiene dos isótopos estables:

$$^{12}\text{C} = 98,89\%$$

$$^{13}\text{C} = 1,11\%$$

El ^{13}C es un isótopo estable y su concentración se expresa igualmente en unidades ‰ respecto al patrón PDB (carbonato de origen marino). El PDB es la composición isotópica del CO_2 liberado por reacción del ácido fosfórico puro con el carbonato que forma los fósiles de *belemnites* de la Formación Peedee, de ahí su nombre. Dicha formación aflora en el cretácico de Carolina del Norte, U.S.A.

Los contenidos de ^{13}C se utilizan en los modelos que corrigen la actividad inicial del ^{14}C para la determinación de edades radiométricas y también como indicador de diversas fuentes de carbono en las aguas subterráneas (procesos de adquisición de los bicarbonatos en el agua).

La composición isotópica del carbono disuelto en el agua subterránea es muy variable. El carbono disuelto en el agua subterránea proviene del CO_2 del terreno, el CO_2 de origen geogénico o el CO_2 magmático (desde fuentes corticales profundas o del manto), del fluido de las inclusiones, de la materia orgánica muerta de los sólidos y de las rocas,

de los minerales con metano y con carbonato. Cada una de estas fuentes poseen una composición isotópica diferente y contribuye al carbono disuelto total con proporciones diferentes. Por lo tanto la composición isotópica del carbono inorgánico disuelto en el agua subterránea abarca un rango amplio de valores del $\delta^{13}\text{C}$. El dióxido de carbono sólido posee normalmente un valor del orden de -22‰; en los terrenos tropicales su valor puede ser más positivo, del orden de -11‰. El CO_2 de origen endógeno o magmático presenta valores de $\delta^{13}\text{C}$ de -6‰, el carbono metamórfico de las rocas sedimentarias normalmente es del orden de cero siempre y cuando se derive de los carbonatos marinos. El carbono orgánico de las plantas terrestres posee valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre 30 y -20‰. La composición isotópica del carbono más pesado se encuentra en los carbonatos de evaporación, con un +10‰.

El ^{14}C radioactivo ocurre en la atmósfera debido a la reacción nuclear entre neutrones de los rayos cósmicos y el N^{14} estable. El método isotópico tradicional utilizado para la determinación del tiempo de tránsito de las aguas subterráneas se basa en la determinación de la actividad del carbono-14 presente en el carbono total inorgánico disuelto (CTID). Dicho isótopo presenta un período de semidesintegración de 5730 años, lo que permite investigar (en condiciones favorables) aspectos de la dinámica de los acuíferos hasta unos 35000 años BP.

La "edad" radiométrica se determina a partir de la ley de desintegración radioactiva, pero la dificultad principal se centra en la determinación de la actividad inicial del carbono que, tras atravesar la zona no saturada, llega a las aguas subterráneas.

Los contenidos en ^{14}C se expresan como porcentaje (pcm, partes de carbono moderno) sobre un patrón que corresponde a la actividad de una madera que creció el siglo pasado. Los valores superiores a 100 pcm corresponden a la presencia en las aguas subterráneas de carbono inyectado en la atmósfera durante la época de ensayos termonucleares (1950-1970).

3.13.3 Otros isótopos

Existen otros isótopos además de los “clásicos” ya presentados, para la datación de las aguas.

Recientemente se utiliza $^3\text{He}/^3\text{H}$, CFCs, SF6 o ^{36}Cl ; y para datación de aguas de más de 40000 años, se pueden utilizar ^{81}Kr , ^4He , $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$.

Para los estudios de contaminación del agua se utilizan las técnicas clásicas y se puede añadir la utilización de los isótopos del contaminante como ^{15}N y ^{18}O de los nitratos, ^{34}S y ^{18}O de los sulfatos. El boro-11 juega un papel potencial importante en los estudios de contaminación, especialmente en caso de intrusión de agua salada en un acuífero de agua dulce. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ se utiliza regularmente para definición del origen de salinización, movimiento de aguas subterráneas e interacciones con las rocas.

3.15 Planificación de los Estudios y Muestreo.

Los estudios hidroquímicos son indispensables a los estudios hidrogeológicos y se deben complementar con información geológica, hidráulica e hidrogeológica.

Es necesario tener una información básica sobre el acuífero a estudiar para preparar un plan de muestreo y monitoreo adecuado. El diseño del plan de monitoreo depende de los objetivos asignados.

El plan de monitoreo debe incluir los diversos términos del balance hídrico; precipitación, escorrentía, infiltración y evaporación. El muestreo para análisis químico e isotópico se puede hacer una sola vez en toda la zona de estudio o se puede repetir con frecuencia dependiendo de la extensión de la zona y de las variaciones temporales observadas.

Una preselección de los puntos de muestreo es indispensable; es necesario asegurarse de la representatividad y calidad de la información obtenida en cada punto de muestreo. Por ejemplo, es muy difícil utilizar los datos de química o isótopos de un pozo del cual no se conoce la profundidad, del acuífero captado, datos de un río del cual hay dudas sobre la influencia de otro afluente.

Es indispensable obtener toda la información sobre el sitio y condiciones de muestreo (coordenadas, profundidad del muestreo, día y hora, tipo de muestra, acuífero).

Para el muestreo, se requiere botellas plásticas de alta densidad, de 50 ml para isótopos estables y de 500 ml para tritio, con doble tapa. Las botellas se deben limpiar inicialmente con el agua a muestrear. Se procede a coleccionar la muestra llenando completamente la botella, para no dejar burbujas de aire.

En caso de que las muestras sean enviadas por vía aérea es conveniente llenar solamente 2/3 de las botellas. Es necesario inscribir sobre la botella el nombre de la muestra, lugar, fecha y hora del muestreo con un marcador resistente al agua. Se debe también coleccionar y apuntar la información completa sobre el sitio de muestreo y los parámetros físico-químicos de campo.

Lo importante es evitar evaporación durante el muestreo, transporte, envío y conservación de las muestras. Las muestras se deben dejar en lugar fresco (no necesariamente en nevera) y oscuro.

Para los elementos mayoritarios disueltos, ½ litro de agua es generalmente necesario para los aniones y 50 ml para los cationes. Esto depende de las técnicas analíticas utilizadas y conviene pedir el protocolo para el muestreo al laboratorio que procederá con los análisis.

Las botellas de plástico (HDPE o PP) se deben limpiar inicialmente con el agua a muestrear. Es recomendable filtrar el agua con filtros de 0,45 μm de porosidad. La botella reservada para análisis de cationes se acidificara hasta un $\text{pH} < 2$. Esto corresponde a 5 gotas de HNO_3 5N por botella de 50 ml. Si no se puede filtrar la muestra en el campo no conviene acidificar la muestra.

La acidificación de una muestra no filtrada puede provocar importantes cambios químicos. Para elementos en concentraciones bajas (trazas, minoritarios, orgánicos) es indispensable contactar los laboratorios antes de efectuar la misión de muestreo. Las muestras se deben conservar en un sitio oscuro y fresco y ser enviadas al laboratorio lo más pronto posible.

Las muestras para análisis químicos se deben conservar al frío y en la oscuridad durante uno o dos días máximo.

CAPÍTULO 4

4.- RESULTADOS

A partir de las interpretaciones del comportamiento de las características Físico-Químicas e Isotópicas realizadas en cada sitio de presa se logró la caracterización hidrogeoquímica de cada una de ellas de la siguiente manera:

4.1.- Presa La Honda: El sitio de presa se encuentra emplazado sobre rocas sedimentarias de edad Mesozoica, conformadas por las Formaciones:

- Río Negro
- Apón
- Aguardiente

La presa se encuentra a 20Km de la falla de Boconó, adicionalmente el sitio de presa es cruzado en el lecho del río por la falla del Uribante, que es la mayor estructura geológica presente. Esta falla pone en contacto las formaciones Río Negro en el estribo derecho y Aguardiente en el estribo izquierdo, originando que las características geológicas de cada estribo sean diferentes; adicionalmente, existe un sinclinal que se ubica en el estribo izquierdo. En la formación Aguardiente abundan las areniscas bien estratificadas y predominantemente cuarzosas y limpias, de grano variable de fino a grueso, escasamente cementadas y con la presencia de fracturas abiertas o rellenas con arenas sueltas, lo que genera una permeabilidad de 10^{-2} a 10^{-3} cm/s en la masa rocosa, incluyendo las familias de diaclasas que cruzan las rocas en diferentes direcciones, las cuales han originado una alta permeabilidad secundaria. Este entorno litológico y tectónico de condiciones difíciles de fundación, comprometió todos los esfuerzos de tratamiento de fundación: carpeta de arcilla, cortina de inyección y drenaje, pantalla de concreto e instrumentación, para reducir al máximo posible el riesgo de erosión

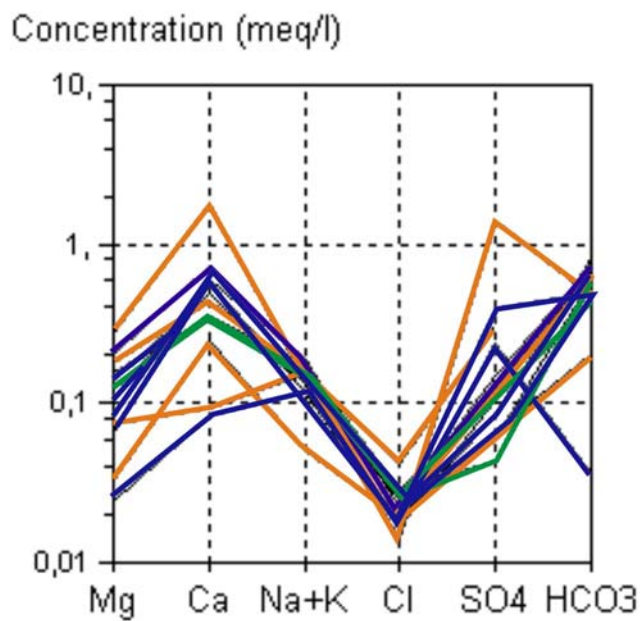
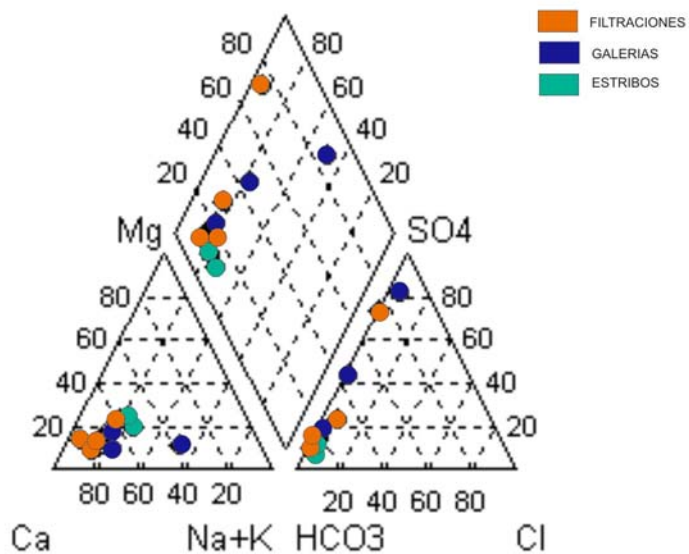
regresiva de la arenisca pobremente cementada, lo cual es en síntesis la mayor amenaza para la seguridad de la presa.

Los resultados hidroquímicos realizados para el año 1995 y actualmente en el año 2007, manifiestan la existencia de dos fuentes de agua y su mezcla que tienen una circulación local y rápida por los estratos litológicos del estribo izquierdo, tal como se esperaba por las altas permeabilidades de la arenisca de la formación Aguardiente (ver Anexo A.2). Las aguas del cuerpo del embalse se clasifican como aguas bicarbonatadas-cálcicas, las cuales recargan del acuífero superior y son captadas puras o mezcladas en los drenes de Bóveda de la Galería Drenaje N^o 6, con las aguas sulfatadas cálcicas del acuífero de la ladera adyacente, recargado con las precipitaciones locales y la Quebrada Caño Negro. En el acuífero inferior (por debajo de la cota 1000), la contribución de las aguas subterráneas es de mayor proporción, generándose una mezcla total de las aguas, evidenciado por los cambios en la composición de todos los drenes de solera de la Galería de Drenaje N^o 6, descartándose en base a su composición como posible fuente para las filtraciones N^o 1 y 3(LH-06). Así mismo, se estableció que la filtración N^o 7 (LH-07), es un afloramiento de las aguas subterráneas que circulan aguas debajo de la cortina de drenaje, a través de un acuífero colgado donde ciertos minerales de las lutitas (pirita) pueden generar el alto contenido de sulfatos. Estas filtraciones (1,3 y 7) se encuentran aflorando espaldón aguas debajo de la presa, al lado del aliviadero en el estribo izquierdo (Ver Anexo A.5).

En los resultados isotópicos muestreados para el año 2001, se concluye como fuente de las filtraciones 1 y 3(LH-06), exclusivamente el agua del embalse, esto se debe a que la relación de $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ del embalse en muestras superficiales son de alrededor de -7,5/-50 y las filtraciones 1 y 3 de -7,9/-48 y -7,3/-46 respectivamente. Se evidencia la influencia de agua no solo de embalse sino también de los acuíferos locales y de la Quebrada Caño Negro con sus mezclas. Nuevamente se evidencia la naturaleza diferente de la filtración 7 (LH-07) (agua subterránea).

Con los resultados de la caracterización hidrogeológica y apoyados en la evaluación de la instrumentación y de los trazadores naturales del agua se plantea en los siguientes términos la hipótesis de tránsito por los estribos: con la zona de recarga del acuífero superior al final de la cortina de inyección entre las cotas 1000 y 1050, bajo condiciones de descargas concentradas de agua en ciertos sectores de la Cortina de Drenaje con la misma composición hidroquímica e isotópica que las filtraciones 1 y 3.

Se puede hablar definitivamente que para el sitio de presa de La Honda existe principalmente aporte de tres tipos de aguas: subterráneas locales, acuíferos y de embalse.



DESCRIPCIÓN: Muestreo en presa La Honda para 1995.
 Arriba: Gráfico de Piper.
 Abajo: Gráfico de Schoelle

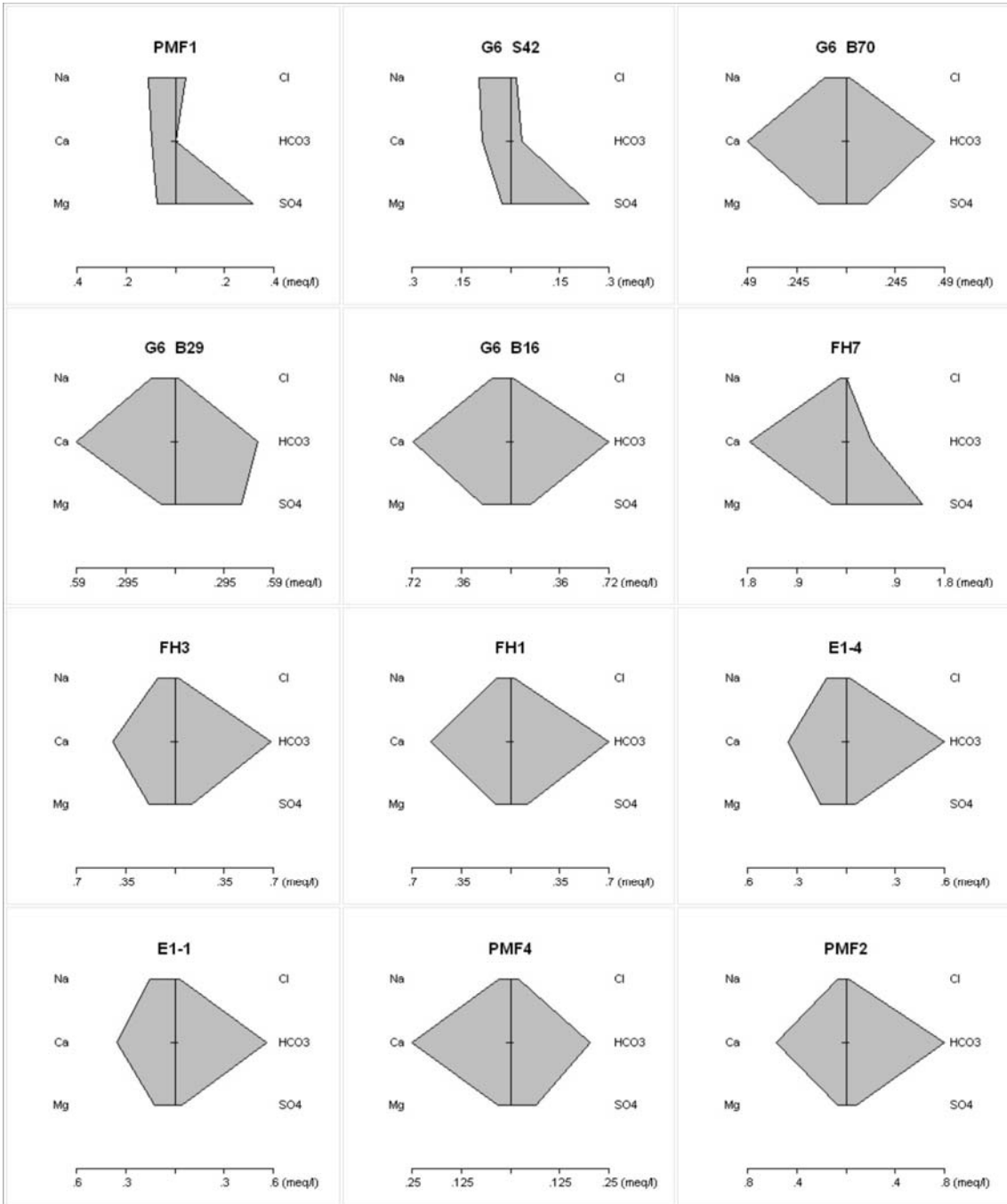


GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

ARCHIVO: HONDA_95.HC3

FECHA: 13/03/07



DESCRIPCIÓN: Análisis Físico-Químico en muestras capturadas en presa La Honda.
Muestreo 15/02/95. Mediciones efectuadas en DESURCA.

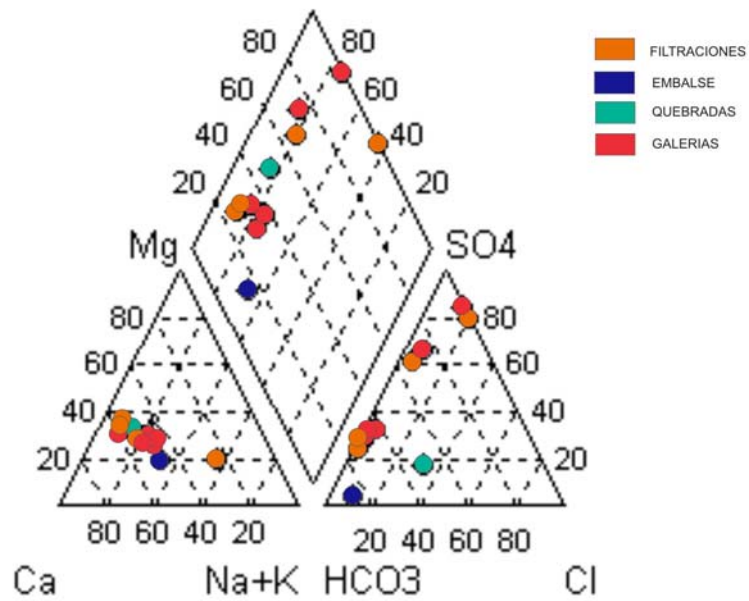


GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

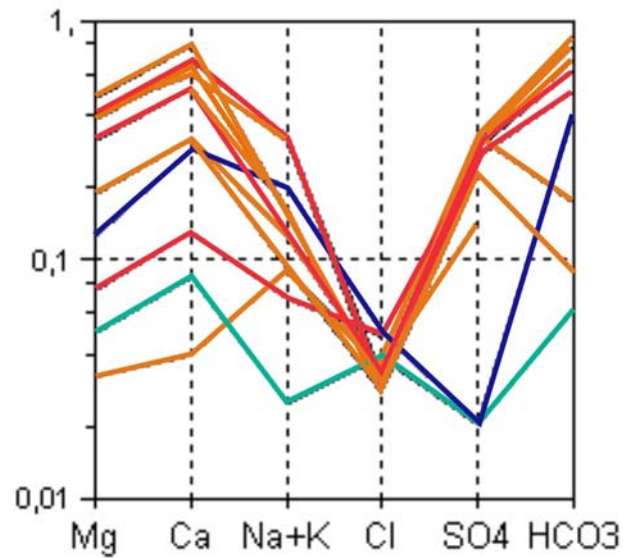
DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLOGICAS

ARCHIVO: HONDA_95.HC3

FECHA: 12/03/07



Concentration (meq/l)



DESCRIPCIÓN: Muestreo en presa La Honda para 2007.
 Arriba: Gráfico de Piper.
 Abajo: Gráfico de Schoelle

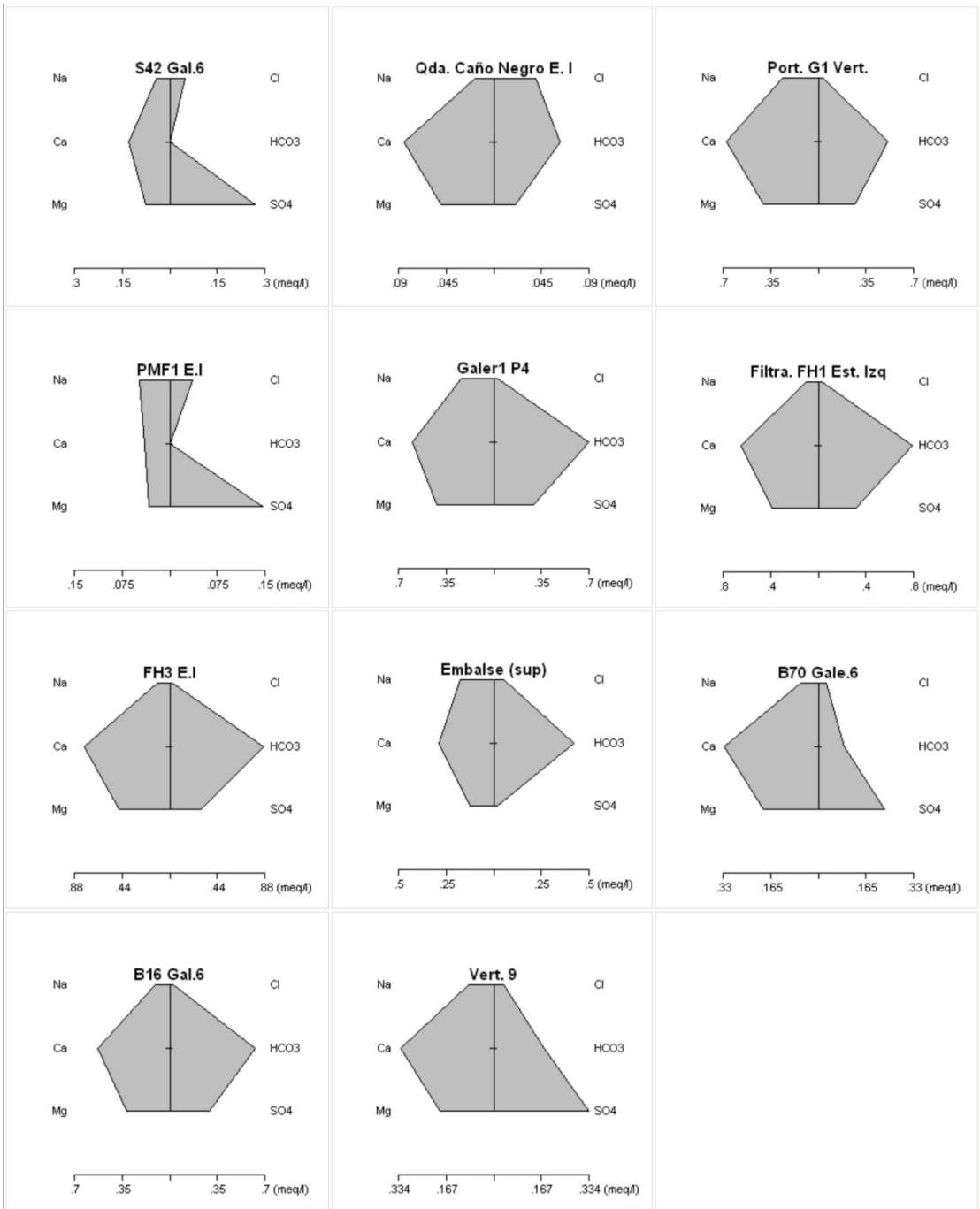


GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

ARCHIVO: HONDA_07.HC3

FECHA: 13/03/07



DESCRIPCIÓN: Análisis Físico-Químico en muestras capturadas en presa La Honda.
Muestreo 13/03/07. Mediciones efectuadas en DESURCA.

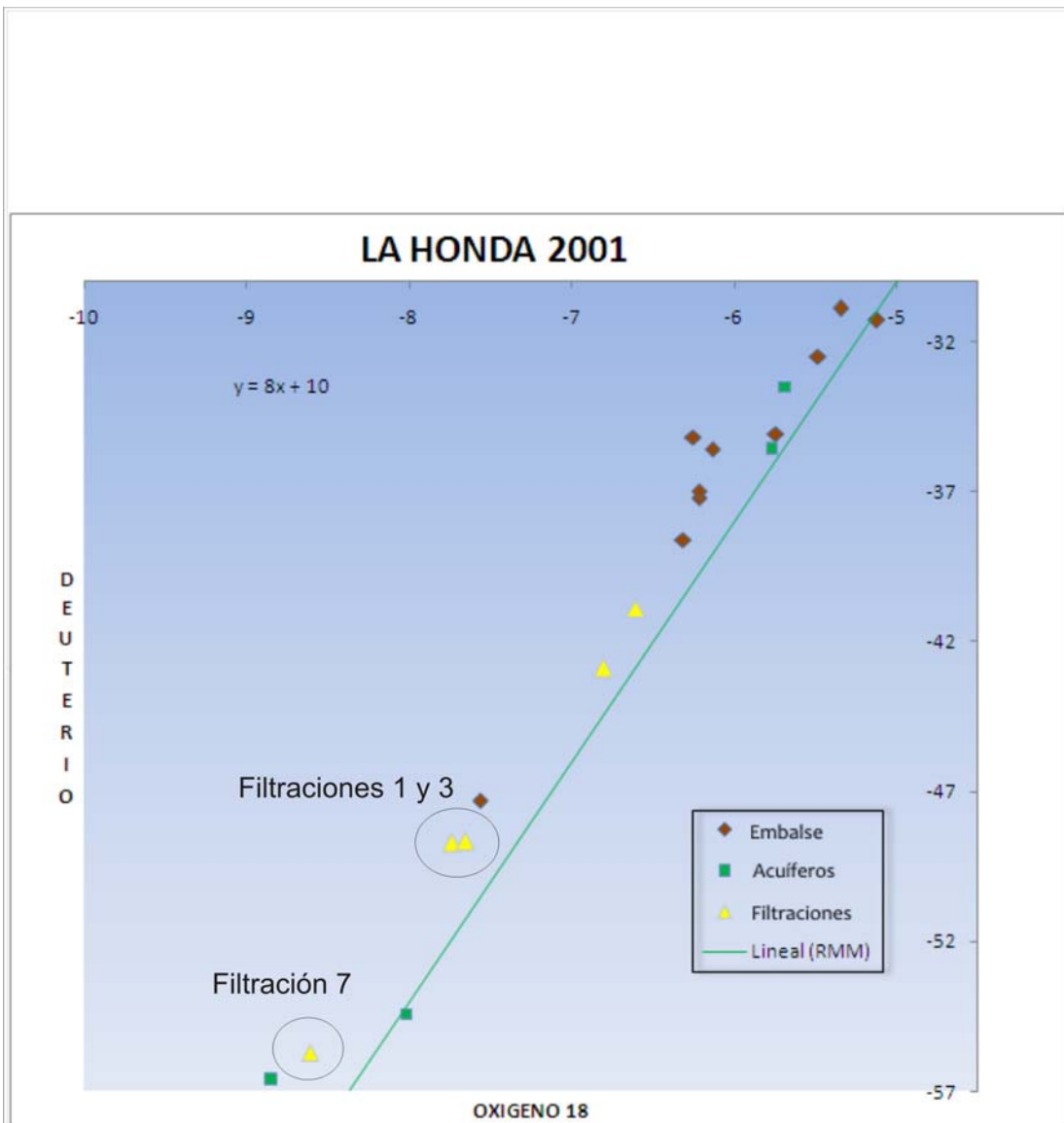


GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

ARCHIVO: HONDA_07.HC3

FECHA: 13/03/07



DESCRIPCIÓN: Muestreo Isotópico en Presa La Honda.
 Gráfico Oxígeno 18 Vs Deuterio. Análisis
 hecho en Laboratorio de Isótopos Ambientales , Chile.



GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

ARCHIVO: ISO.LH_01

FECHA: 13/03/07

4.2.- Presa La Vueltosa: La fundación y los estribos de la presa La Vueltosa están conformados principalmente por rocas pertenecientes a la Formación Rio Negro, pero en la parte alta del estribo derecho afloran areniscas de la Formación Aguardiente. La formación Rio Negro está constituida por areniscas de grano medio a grueso y presentan laminaciones y estratificaciones cruzadas. En la formación se encuentran lutitas carbonáceas y limolitas rojizas. En el área de La Vueltosa, la Formación Rio Negro tiene un espesor de 324 m. La parte inferior está constituida por conglomerados predominantemente formados por cuarzo, intercalados con pequeñas capas de lutitas arenosas (ver Anexo A.3).

La Formación Aguardiente, que se encuentra en la parte superior del estribo derecho, contiene areniscas cuarcíferas de colores amarillos claros y marrones, de espesor variable, intercaladas con limolitas y lutitas carbonáceas. La coloración de las areniscas la distingue de las areniscas de la Formación Rio Negro.

El contacto geológico entre la Formación Río Negro y la Formación Aguardiente, es difícil de precisar en el campo debido a las semejanzas litológicas entre estas unidades, pero parece ser concordante.

Estructuralmente Las Formaciones Rio Negro y Aguardiente presentan abundantes pliegues con ejes orientados Noreste, en concordancia con la orientación general de la Cordillera Andina y con las principales fallas de la región: La Falla de Caparo y La Falla de Burgua-Abejales. El área de la presa la Vueltosa está ubicada entre ambas fallas.

En particular, el sitio de presa La Vueltosa, constituye parte del flanco Sur de un anticlinal, donde pasa una falla que separa los estribos izquierdo y derecho, por esta razón los estratos en el estribo derecho están más inclinados que en el estribo izquierdo. El rumbo de la estratificación en el estribo izquierdo es de $N70^{\circ}-80^{\circ}W$ y el buzamiento

es de 18°SE . El rumbo y buzamiento de los estratos en el estribo derecho es $\text{N}70^{\circ}\text{E}20^{\circ}\text{SE}$ y el sistema principal de diaclasas $\text{N}60^{\circ}-80^{\circ}\text{W}80^{\circ}\text{SW}$.

Los resultados hidroquímicos realizados para el año 2001 y actualmente en el año 2006, manifiestan la existencia de por lo menos tres fuentes de agua y su mezcla que tienen una circulación local y rápida por los estratos del estribo izquierdo. Las aguas del cuerpo del embalse se clasifican como aguas bicarbonatadas-cálcicas. La secuencia vertical de rocas que está por encima de la capa de lutita que actúa como capa divisoria entre la secuencia vertical y la unidad de conglomerados que está por debajo de la capa de lutita, está compuesta de estratos de arenisca y limolitas, siendo dominante la litología arenácea.

Las areniscas y limolitas son más permeables por fracturamiento que por porosidad intergranular, pero la capa de lutita es relativamente impermeable.

La sección geológica por el eje de presa (Anexo A.3) en el estribo izquierdo pudiere ayudar a indicar que el nivel freático está por encima de la capa de lutita mencionada, indicando que hay una zona de saturación y una zona de aireación. La zona de saturación representa un acuífero no confinado. La zona de aireación es la que está por encima del nivel freático y a su vez es la zona por donde percola el agua de lluvia que se infiltra desde la superficie o el agua que se infiltra desde el embalse. De acuerdo a esto, la zona de aireación constituye la zona de recarga del acuífero no confinado.

La capa de lutita mencionada anteriormente, constituye la barrera hidrogeológica principal en el subsuelo tanto en el estribo izquierdo como en el derecho de la presa la Vueltosa. La barrera hidráulica la conforma el embalse Camburito-Caparo situado en el lado Norte de los referidos estribos. Por consiguiente, la interacción agua-roca en el estribo izquierdo ocurre entre el embalse y las zonas de aireación y saturación, en donde el movimiento del agua que percola varía desde vertical a horizontal.

Basicamente la composición isotópica de las muestras viene determinada por la evaporación y por el llamado efecto de cantidad de precipitación. Obviamente la evaporación afecta, principalmente a todas las aguas superficiales muestreadas. Se puede ver que para el muestreo en los años 2000 y 2001 en la Presa La Vueltoza, no existe una línea de evaporación. Es importante aclarar que para los años 2000 y 2001 no se realizaron muestreos en El Embalse, solo en Las Galerías, Pozos, Rios y Quebradas afluentes.

Puede verse que la mayoría de los puntos de las muestras tomadas se encuentran muy cercanas sobre la Recta Meteorica Mundial indicando la gran taza de aporte de lluvia local. También se observa como los puntos pertenecientes a las muestras de Las Galerías, Las Quebradas y los Rios poseen valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD muy distintos. Esto puede deberse a 2 cosas; la primera es que pudiese indicar que el agua de estas surgencias tiene un tiempo de transito relativamente largo entre Las Galerías, Las Quebradas y los Rios y los puntos de afloramientos, por esta razon los cambios de composición isotópica no se reflejan de forma inmediata en las surgencias. La segunda es que pudiese tratarse de una zona de mezcla de agua donde se involucren otros tipos de agua con composición isotópica diferente (ver Anexo A.6).

Como se ve en el gráfico, existe un aporte claro de dos tipos de agua; agua de lluvia local y aguas subterráneas regional, formándose de esta manera una línea de mezcla entre estos dos tipos de agua.

Para el año 2002 existe una una línea de evaporación, donde varios puntos correspondientes a Galerías, Rios y Embalse se encuentran sobre dicha recta. De igual manera, se observa el aporte importante de agua de lluvia local y de aguas subterráneas regionales.

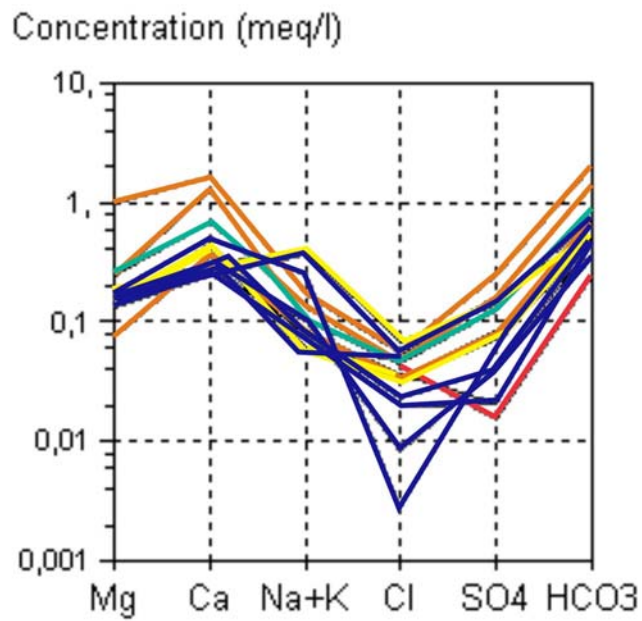
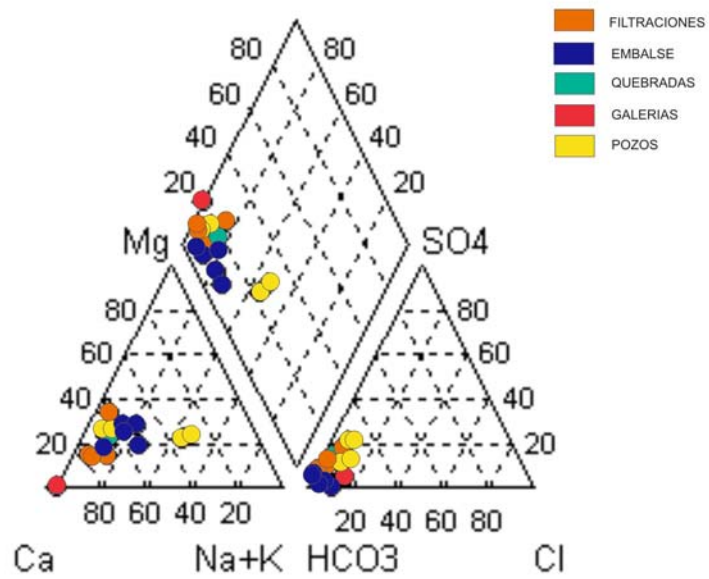
Para el año 2006 no existe línea de evaporación. Se observa como los puntos se encuentran sobre la Recta meteórica Mundial, indicando de nuevo el gran aporte por parte de la lluvia local.

Se puede hablar definitivamente que para el sitio de presa de la Vueltona existe principalmente aporte de dos tipos de aguas: subterráneas y de lluvia local.

Es importante mencionar que en todos los gráficos presentados se observa como el valor del Pozo 4 de agua subterránea (P4) se mantiene constante.

Este Pozo 4 se encuentra ubicado aguas abajo de la carpeta de lutita mencionada anteriormente. Esta capa tiene un espesor de 14m y como ya se mencionó funciona como la principal barrera hidrogeológica del cuerpo de presa.

El hecho de que la composición isotópica del P4 se mantenga constante indica el excelente funcionamiento de dicha barrera hidráulica, ya que se afirma que el agua del pozo es solo subterránea. Es importante el continuo monitoreo isotópico de este pozo en los próximos años, ya que al cambiar la composición isotópica indicará que la carpeta ha sido traspasada por otros tipos de aguas. Esto permitirá realizar cálculos de velocidad de percolación de agua dentro del cuerpo arcilloso. Esta velocidad será un dato de gran importancia para poder estimar el tiempo de vida de la carpeta de lutita.



DESCRIPCIÓN: Muestreo en presa La Vultosa para el 2001.
 Arriba: Gráfico de Piper.
 Abajo: Gráfico de Schoeller.

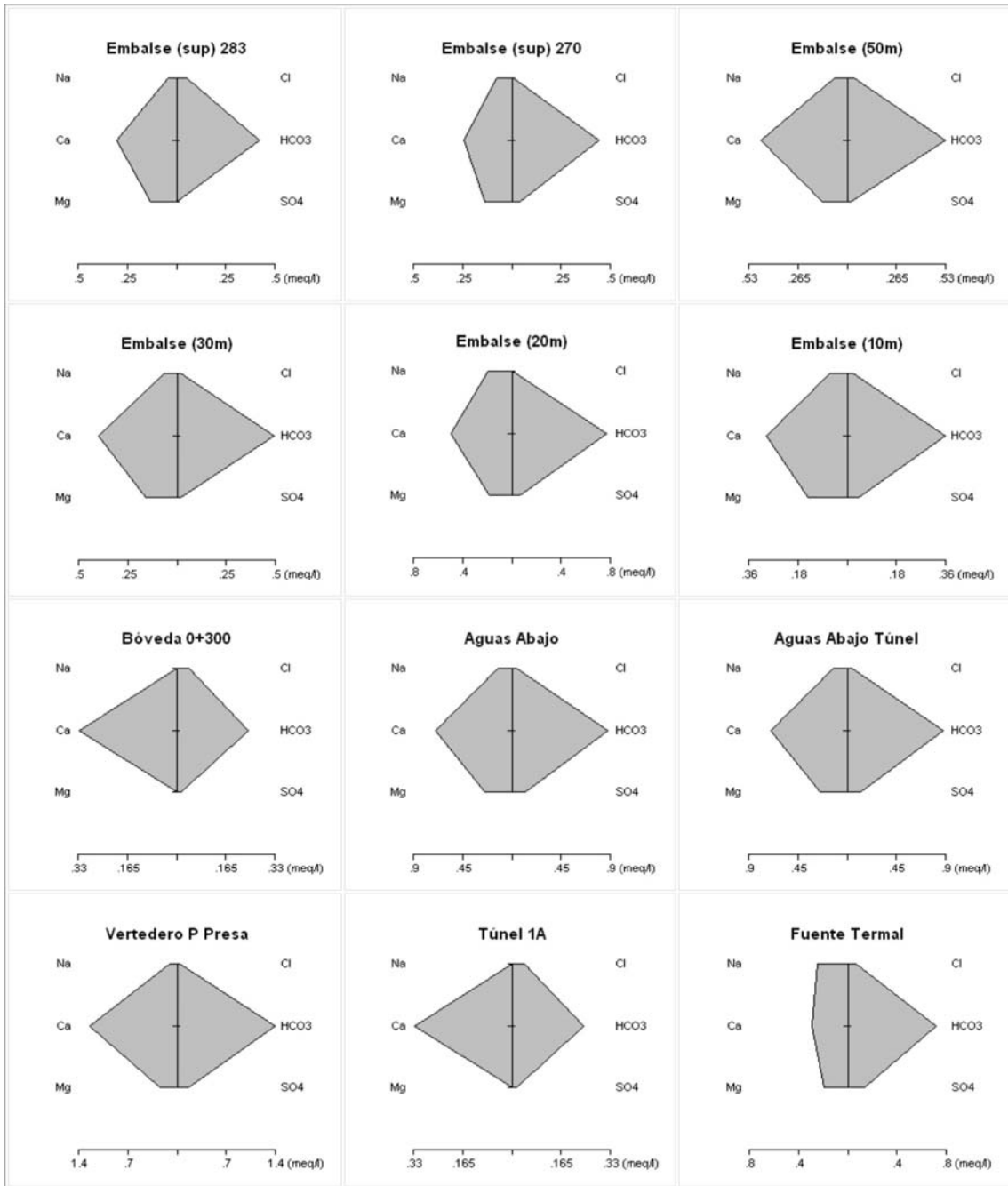


GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

ARCHIVO: LV_01.HC3

FECHA: 11/03/07



DESCRIPCIÓN: Análisis Físico-Qímico en muestras captadas en la presa La Vueltoza. Muestreo 18/04/01. Análisis efectuados en DESURCA.

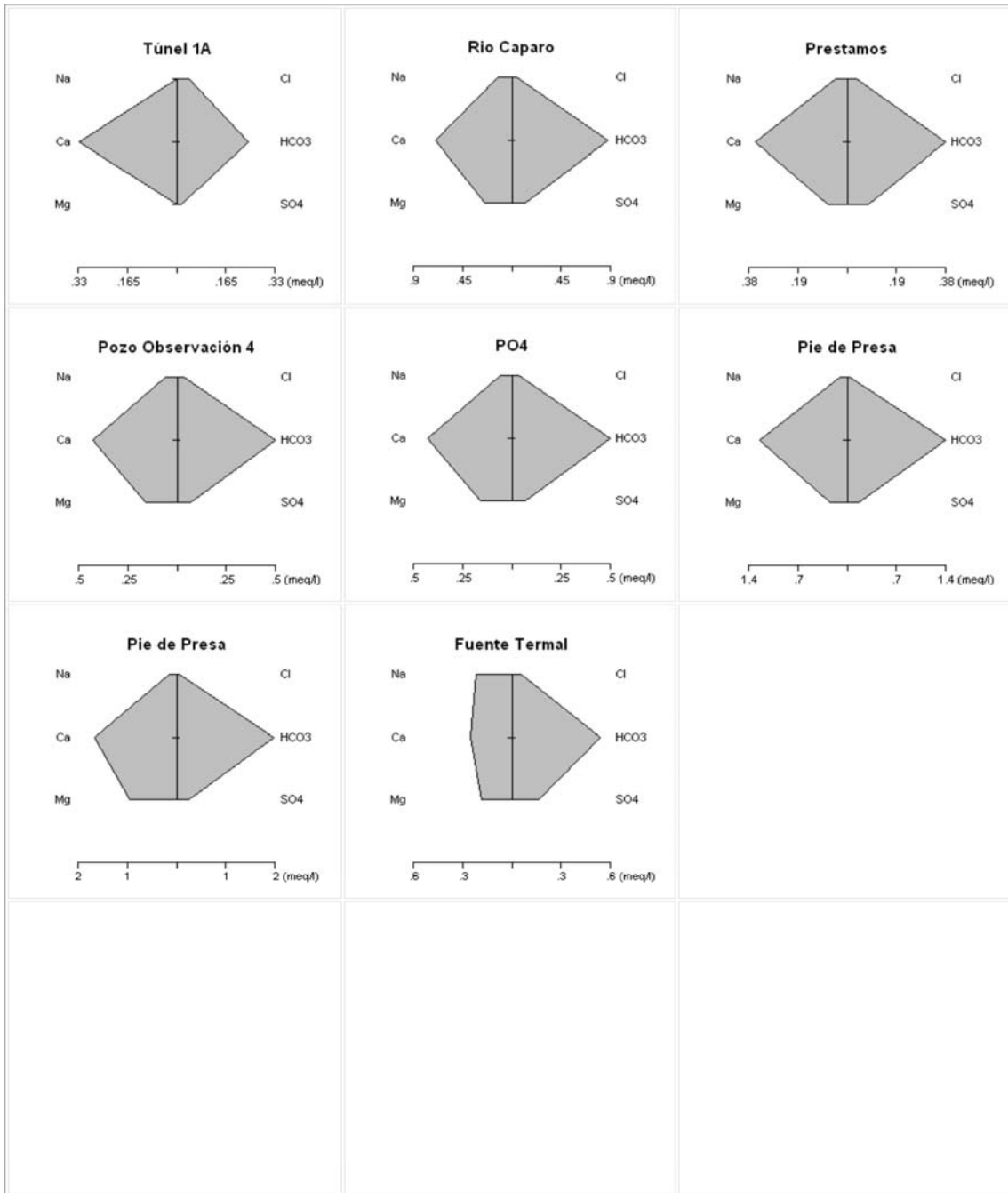


GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

ARCHIVO: LV_01.HC3

FECHA: 10/03/07



DESCRIPCIÓN: Análisis Físico-Qímico en muestras captadas en la presa La Vueltoosa. Muestreo 18/04/01. Análisis efectuados en DESURCA.

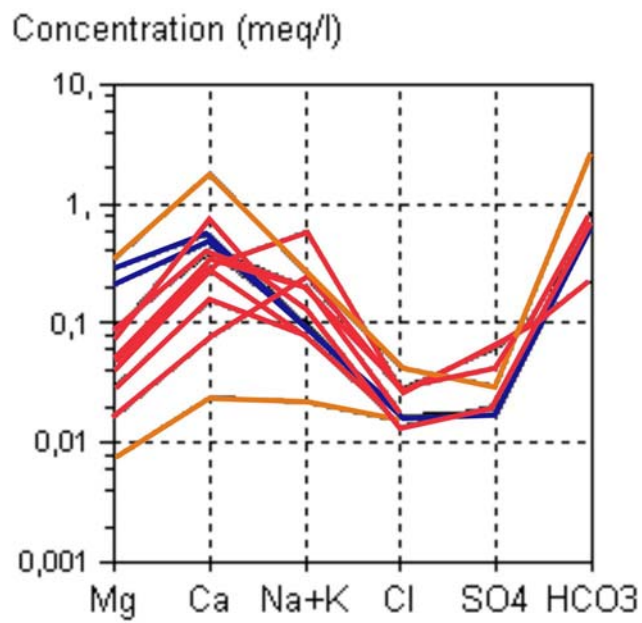
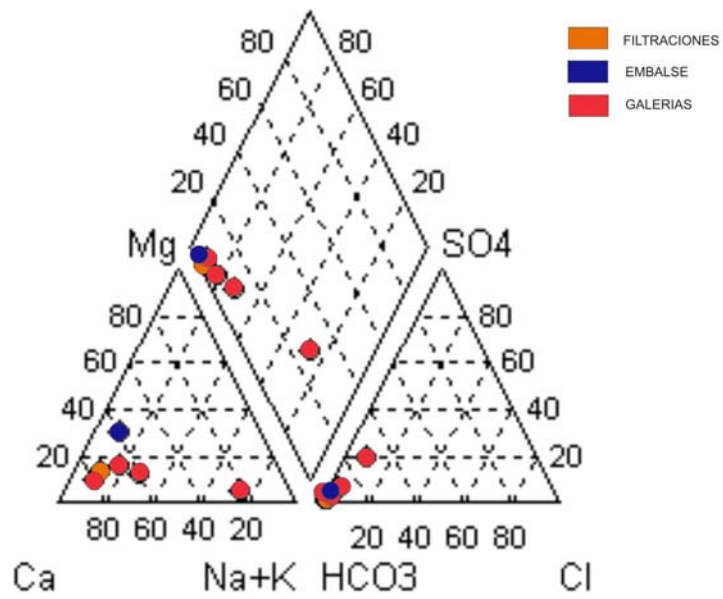


GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

ARCHIVO: LV_01.HC3

FECHA: 10/03/07



DESCRIPCIÓN: Muestreo en presa La Vultosa para el 2006.
 Arriba: Gráfico de Piper.
 Abajo: Gráfico de Schoeller.

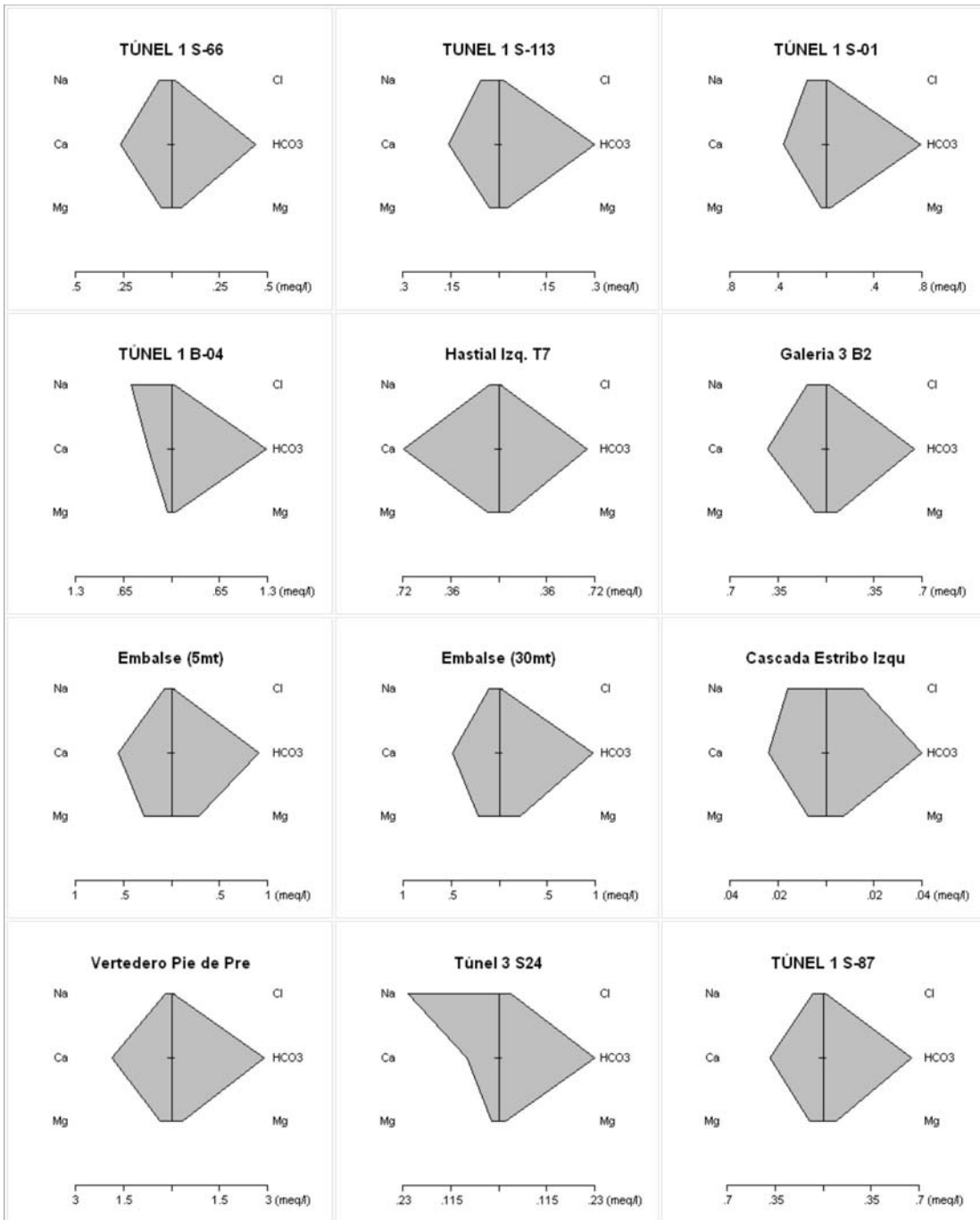


GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

ARCHIVO: LV_06.HC3

FECHA: 13/03/07



DESCRIPCIÓN: Análisis Físico-Químico en muestras capturadas en presa La Vueltoza. Muestreo 11/10/2006. Mediciones efectuadas en DESURCA.

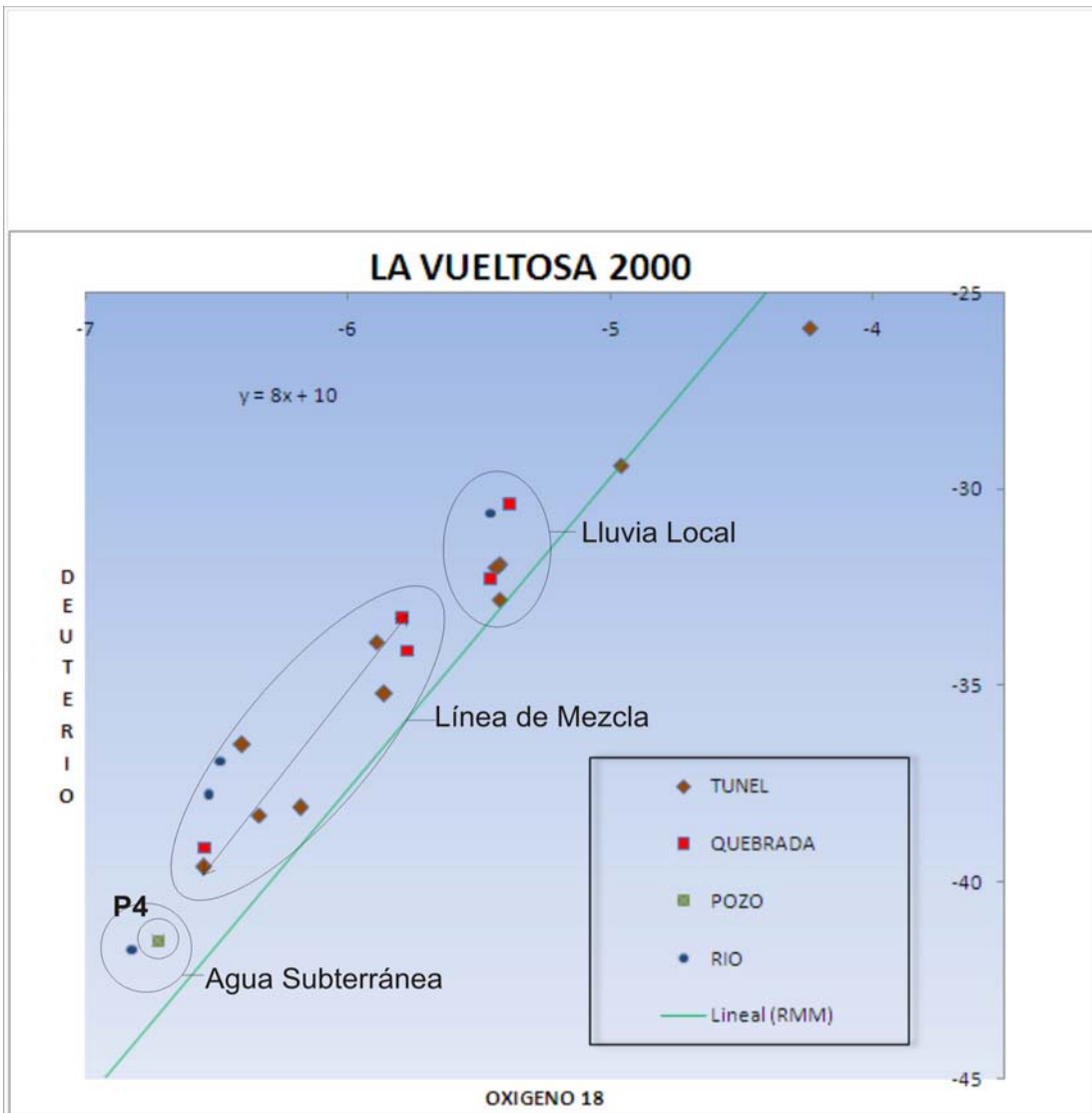


GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

ARCHIVO: LV_06.HC3

FECHA: 12/03/07



DESCRIPCIÓN: Muestreo Isotópico en Presa La Vuelta.
 Gráfico Oxígeno 18 Vs Deuterio. Análisis
 hecho en Laboratorio de Isótopos Ambientales , Chile.

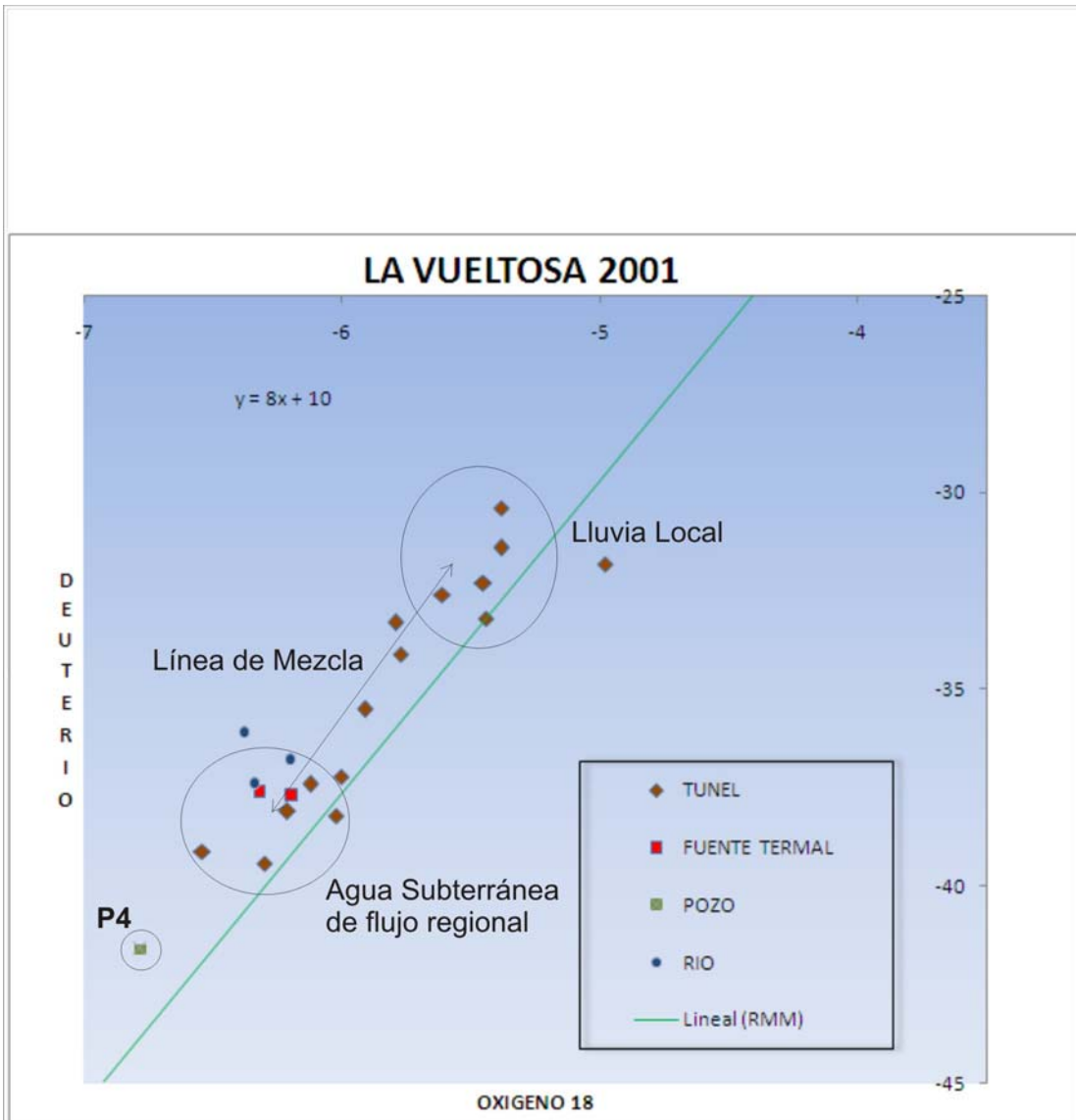


GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

ARCHIVO: ISO.LV_00

FECHA: 13/03/07



DESCRIPCIÓN: Muestreo Isotópico en Presa La Vuelta.
 Gráfico Oxígeno 18 Vs Deuterio. Análisis
 hecho en Laboratorio de Isótopos Ambientales , Chile.

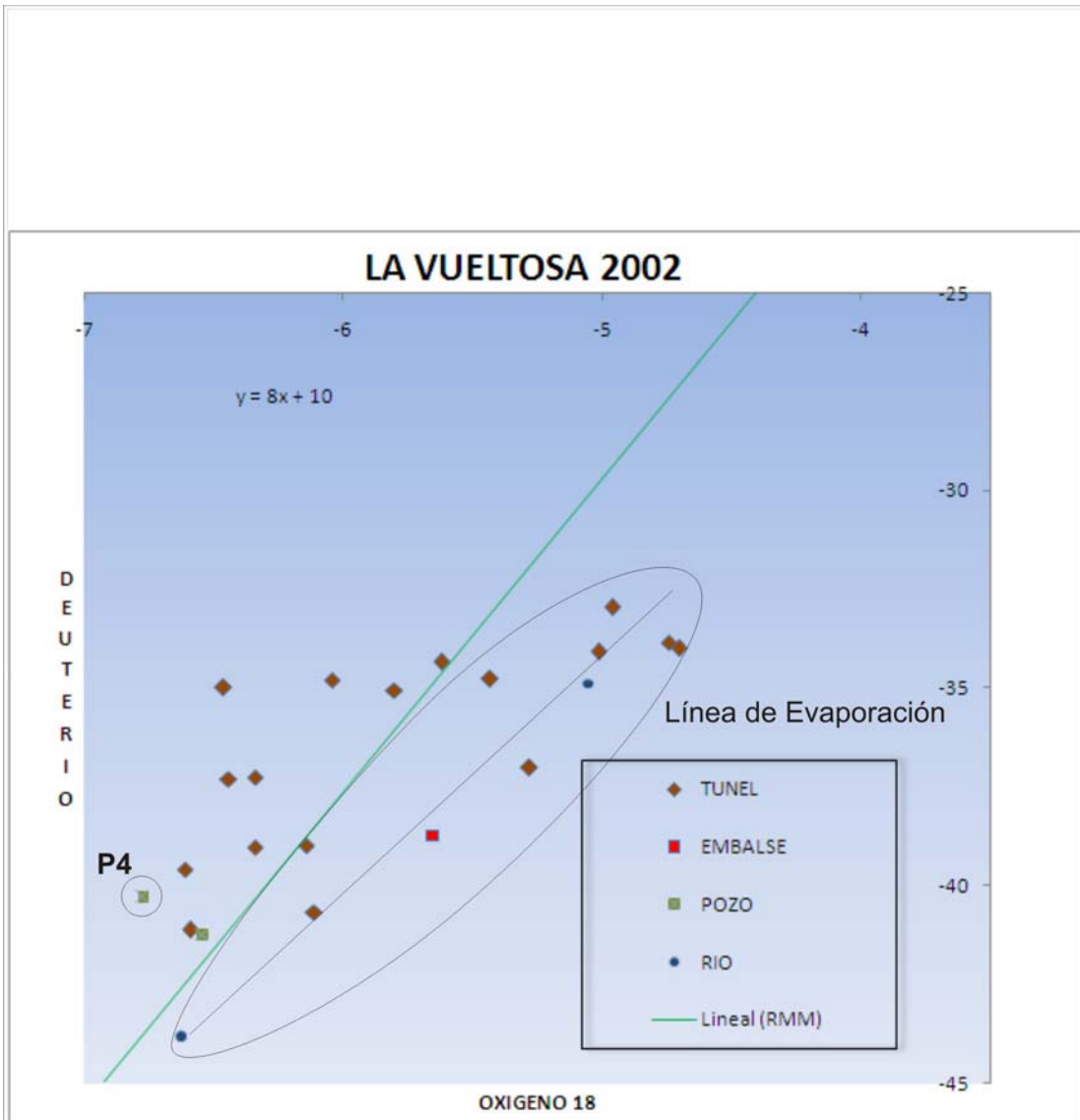


GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

ARCHIVO: ISO.LV_01

FECHA: 13/03/07



DESCRIPCIÓN: Muestreo Isotópico en Presa La Vueltona.
 Gráfico Oxígeno 18 Vs Deuterio. Análisis
 hecho en Laboratorio de Isótopos Ambientales , Chile.

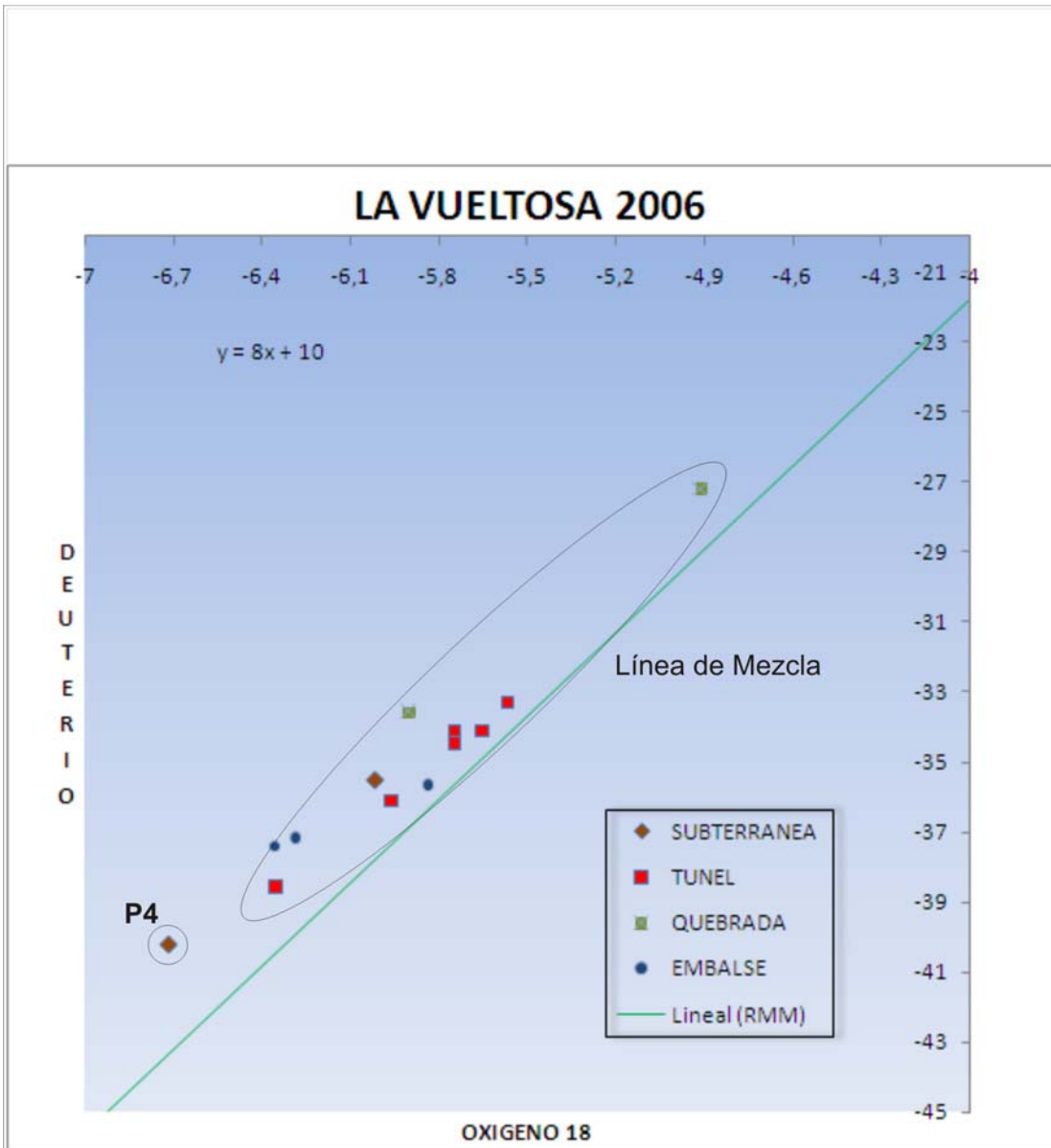


GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

ARCHIVO: ISO.LV_02

FECHA: 13/03/07



DESCRIPCIÓN: Muestreo Isotópico en Presa La Vuelta.
 Gráfico Oxígeno 18 Vs Deuterio. Análisis
 hecho en Laboratorio de Isótopos Ambientales , Chile.

	GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO	
	DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS	
	ARCHIVO: ISO.LV_06	FECHA: 13/03/07

4.3.- Presa Borde Seco: la zona de Borde Seco está dominada por terrenos pertenecientes a la Formación Escandalosa, la cual fue depositada en un ambiente nerítico-costero desde el cretácico superior (Albiense-Turroniense), con litología predominante arenosa, bajo la influencia de oscilaciones eustáticas del nivel del mar. El espesor de la Formación Escandalosa es de 300 m en la localidad.

La litología predominante consiste en areniscas, calizas, lutitas y limolitas y se identifican tres tipos de areniscas: areniscas glauconíticas de grano medio a fino, color verdoso, arenisca calcárea de grano medio a grueso de color crema y arenisca cuarzosa de grano fino de color gris claro.

El sitio de presa se caracteriza por estar ubicado en un anticlinal asimétrico que tiene un eje axial N42⁰E casi paralelo al eje de presa N54⁰E. La longitud del anticlinal se extiende hacia el oeste más que hacia el este del cañón de Borde Seco. El anticlinal donde se ubica la presa tiene inmersión hacia el este.

Entre las discontinuidades más relevantes de la zona destacan las fallas orientadas Noreste y Noroeste que controlan la orientación del río Camburito. Estas tienen una longitud que varía entre 5 y 18 Km.

La presa posee un núcleo de arena limosa y espaldones de arena de grano medio, cubierta por material enrocado (canto y peñones) aguas abajo entre el núcleo y el espaldón hay un sistema de filtro y drenes donde las filtraciones que puedan ocurrir a través del cuerpo de presa sean captadas en los diferentes niveles. El cuerpo de presa reposa sobre un terreno de formación constituida por estratos de areniscas y los estribos están compuestos por estratos de areniscas, lutitas y calizas arenosas.

La instrumentación de la presa muestra que el nivel freático está por encima de la cota 250 m.s.n.m. En esta zona se realizó la propagación de la Cortina de Inyecciones

(TREVI 2003). Esta zona es denominada unidad hidrogeológica N^o2 (UH-2) la cual es dividida por una capa de lutita, y está compuesta por arenisca. Esto vuelve a indicar que hay una zona de saturación y una zona de aireación. La zona de saturación representa un acuífero libre. La zona de aireación es la que está por encima del nivel freático y a su vez es la zona por donde percola el agua de lluvia que se infiltra desde la superficie o el agua que se infiltra desde el embalse. De acuerdo a esto, la zona de aireación constituye la zona de recarga del acuífero no confinado. Esta zona es bastante controlada por la pantalla de lechada (agua, cemento y bentonita) construida en filas y con una profundidad de 65m. Esta barrera hidrogeológica de espesor total de 2,50 m atraviesa tanto los estribos de la presa como la fundación. Esta cortina permite minimizar el paso de agua del embalse tanto por el terreno de fundación como por el terreno de los estribos (ver Anexo 5.4).

Los resultados hidroquímicos realizados para el año 2000, 2001 y actualmente en el año 2006, manifiestan una circulación local y rápida por los estratos litológicos del cuerpo de presa. Las aguas del cuerpo del embalse se clasifican como aguas bicarbonatadas cálcicas. El cuerpo de presa se constituye principalmente por tres unidades hidrogeológicas (UH-1, UH-2 y UH-3) constituidas principalmente de litología arenácea. Estas unidades son divididas por tres capas delgadas de lutita (Lutita A, Lutita B y Lutita C). La Lutita A se encuentra ubicada sobre los 310 m.s.n.m., siendo esta el tope de la UH-1. Al finalizar la UH-1, se encuentra la Lutita B, la cual es la divisoria entre dicha unidad y la UH-2. Y finalmente, la Lutita C a partir de la cual se profundiza la UH-3.

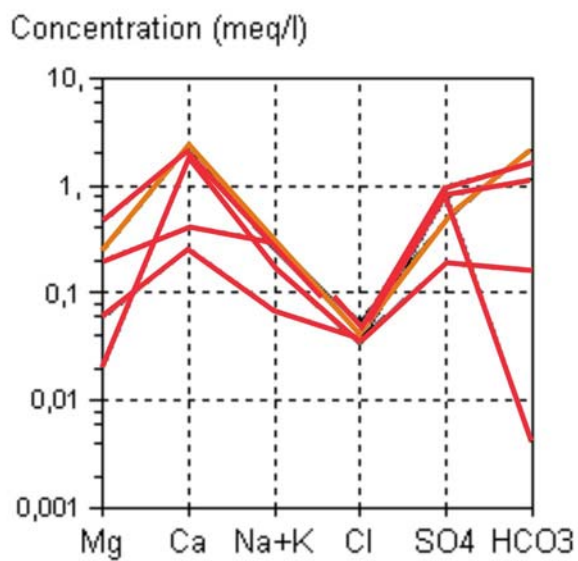
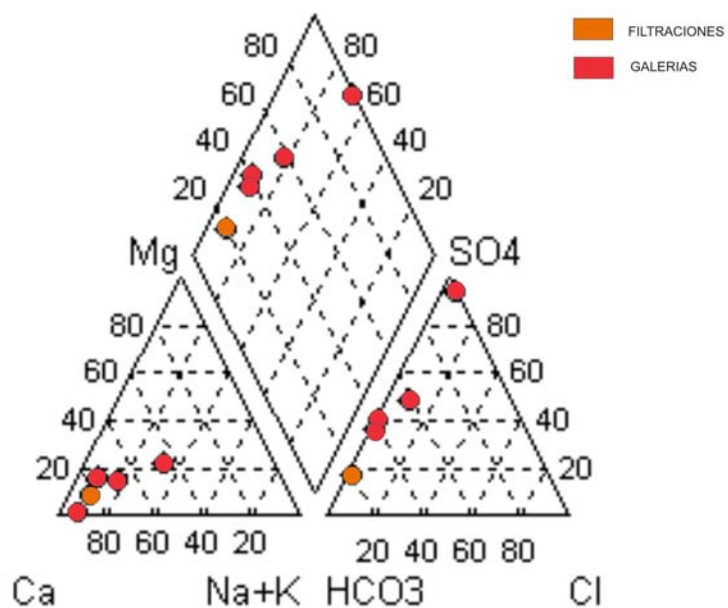
Los resultados isotópicos para el año 2000 muestran una gran influencia por parte del agua de lluvia local. Se observa como existe una línea de mezcla entre aguas subterráneas y agua de lluvia. Los puntos dispersos de las muestras pertenecientes a los Túneles y Quebradas indican posibles zonas de mezcla de aguas o tiempo de tránsito largo. No existe efecto de evaporación en las muestras tomadas (ver Anexo A.4).

Para el año 2001 se puede observar como existen un número de muestras importantes tomadas en el embalse que poseen una composición de δD y $\delta^{18}O$ muy similares lo que afirma que el embalse está uniformemente mezclado sin aportes de otras aguas. Además, se ve como estas muestras se ajustan perfectamente a la Recta Meteorica Mundial indicando que el agua del embalse en esa zona es 100% agua de lluvia local.

De igual manera se observa la presencia de muestras con valores isotópicos muy cercanos a los del embalse (se encuentran debajo), estas muestras pertenecen a las galerías de la presa y constituyen zonas de recargas por parte de las aguas del embalse. El gráfico demuestra una clara línea de mezcla entre las aguas subterráneas locales y las precipitaciones locales. Se empieza a observar un pequeño efecto de vaporización con muestras poco negativas.

Finalmente, para el año 2002 se observa una clara línea de evaporización perteneciente a muestras del embalse. Es importante aclarar que para ese año se iniciaba la etapa del primer llenado del mismo. Se observa como un importante número de muestras del embalse, ríos y túnel contienen una composición isotópica muy similar y se ajustan sobre la Recta Meteorica Mundial indicando que el tipo de agua es 100% agua de lluvia local. En este gráfico se observa la formación de una línea de mezcla entre aguas de río en un extremo y aguas de embalse en el otro.

Se puede hablar definitivamente que para el sitio de presa Borde Seco existe principalmente aporte de tres tipos de aguas: subterráneas, lluvia local y acuíferos adyacentes.



DESCRIPCIÓN: Muestreo en presa Borde Seco para el 2000.
 Arriba: Gráfico de Piper.
 Abajo: Gráfico de Schoeller.



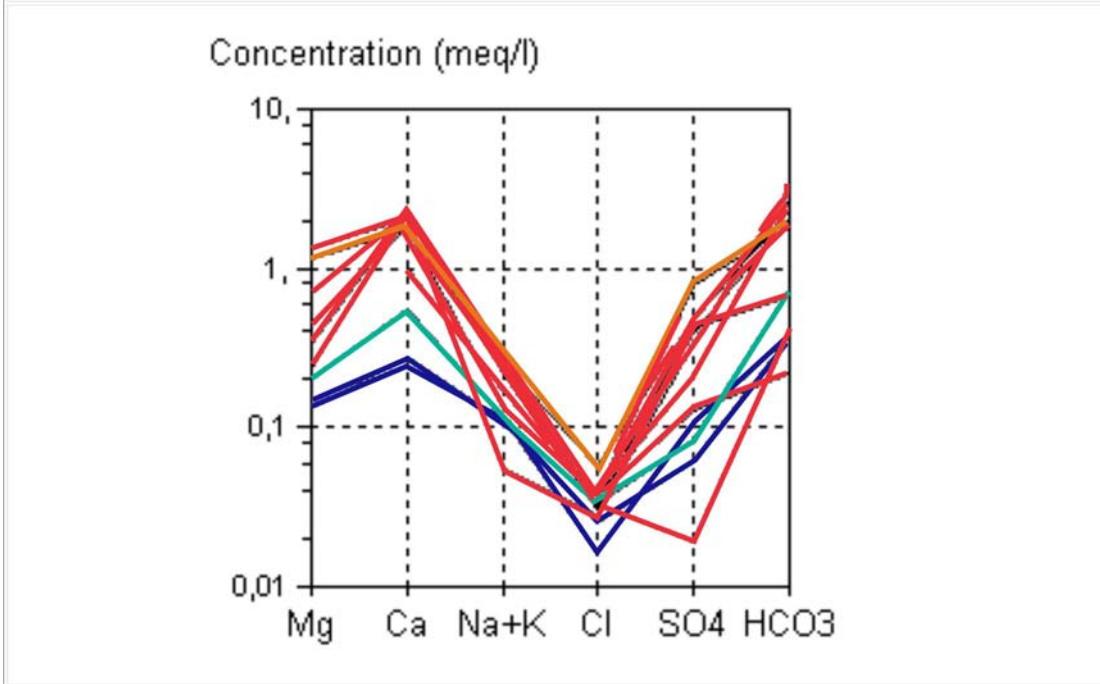
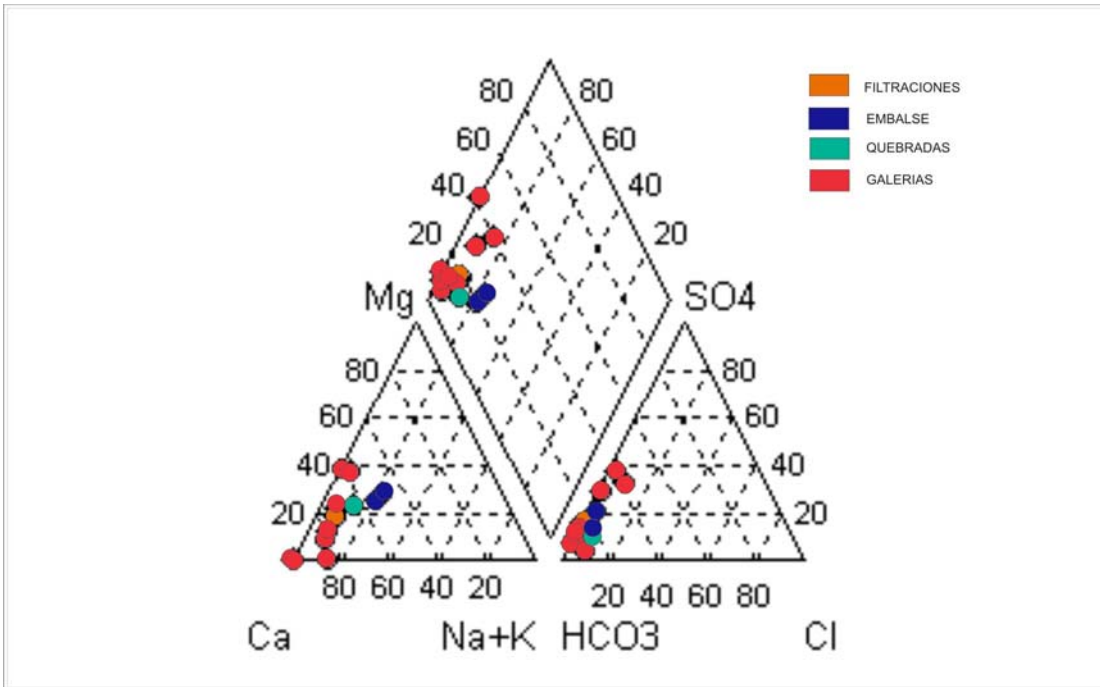
GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

ARCHIVO: BS_00.HC3

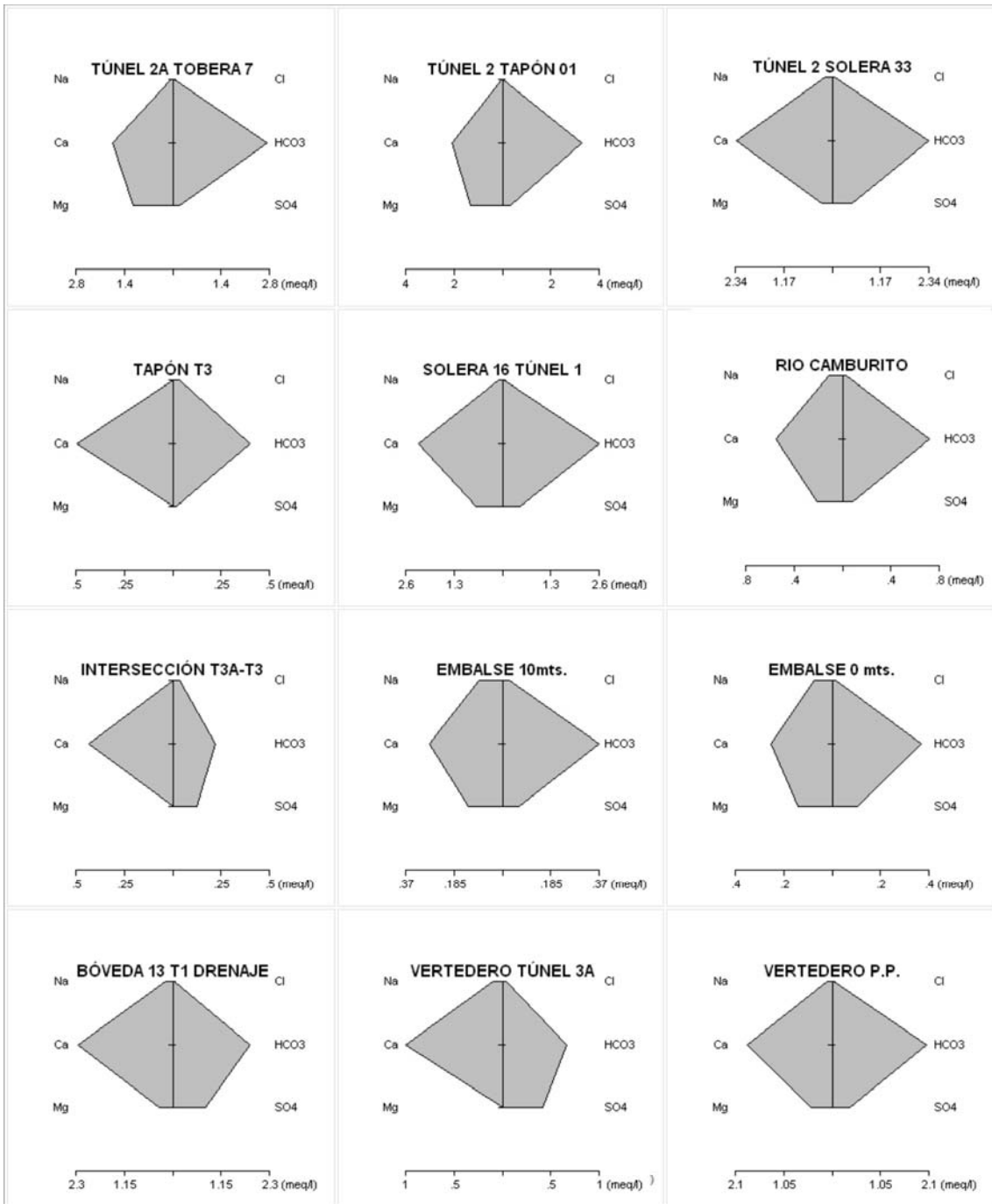
FECHA: 11/03/07

<p>VERTED. TÚNEL 3A</p> <p>Na Cl Ca HCO3 Mg SO4</p> <p>0 .27 .135 .135 .27 (meq/l)</p>	<p>VERTE. PIE DE PRESA</p> <p>Na Cl Ca HCO3 Mg SO4</p> <p>0 2.4 1.2 1.2 2.4 (meq/l)</p>	<p>INTERS. TÚNEL 3A/3</p> <p>Na Cl Ca HCO3 Mg SO4</p> <p>0 1.9 .95 .95 1.9 (meq/l)</p>
<p>BOVEDA 18 T1 DRENAJE</p> <p>Na Cl Ca HCO3 Mg SO4</p> <p>0 .9 .45 .45 .9 (meq/l)</p>	<p>BOVEDA 13 T1 DRENAJE</p> <p>Na Cl Ca HCO3 Mg SO4</p> <p>0 2.2 1.1 1.1 2.2 (meq/l)</p>	
<p>DESCRIPCIÓN: Análisis Físico-Químico en muestras capturadas en presa Borde Seco. Muestreo 29/11/2000. Mediciones efectuadas en DESURCA.</p>		
<p>DESURCA DESARROLLO URBISANTE - CAPARO C.A.</p>	<p>GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO</p>	
<p>DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS</p>		
<p>ARCHIVO: BS_00.HC3</p>	<p>FECHA: 20/12/2006</p>	



DESCRIPCIÓN: Muestreo en presa Borde Seco para el 2001.
 Arriba: Gráfico de Piper.
 Abajo: Gráfico de Schoeller.

	GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO	
	DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS	
	ARCHIVO: BS_01.HC3	FECHA: 11/03/07



DESCRIPCIÓN: Análisis Físico-Químicos en muestras captadas en presa Borde Seco. Muestreo 18/04/2001, 09/10/2001 y 03/11/01. Mediciones efectuadas en Desurca.

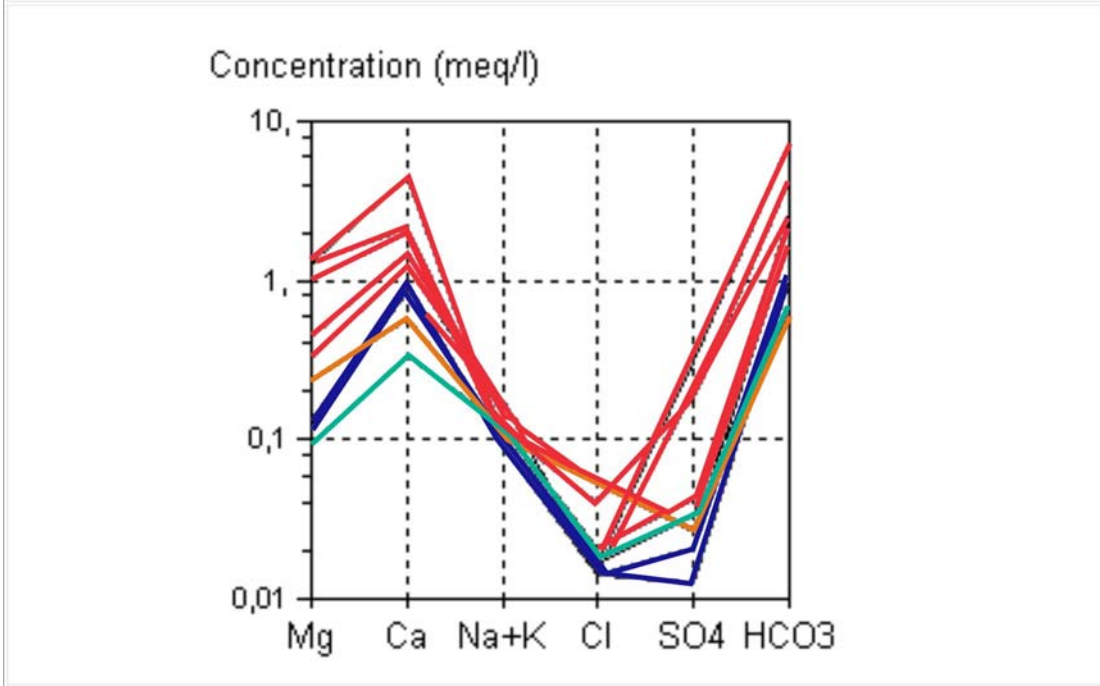
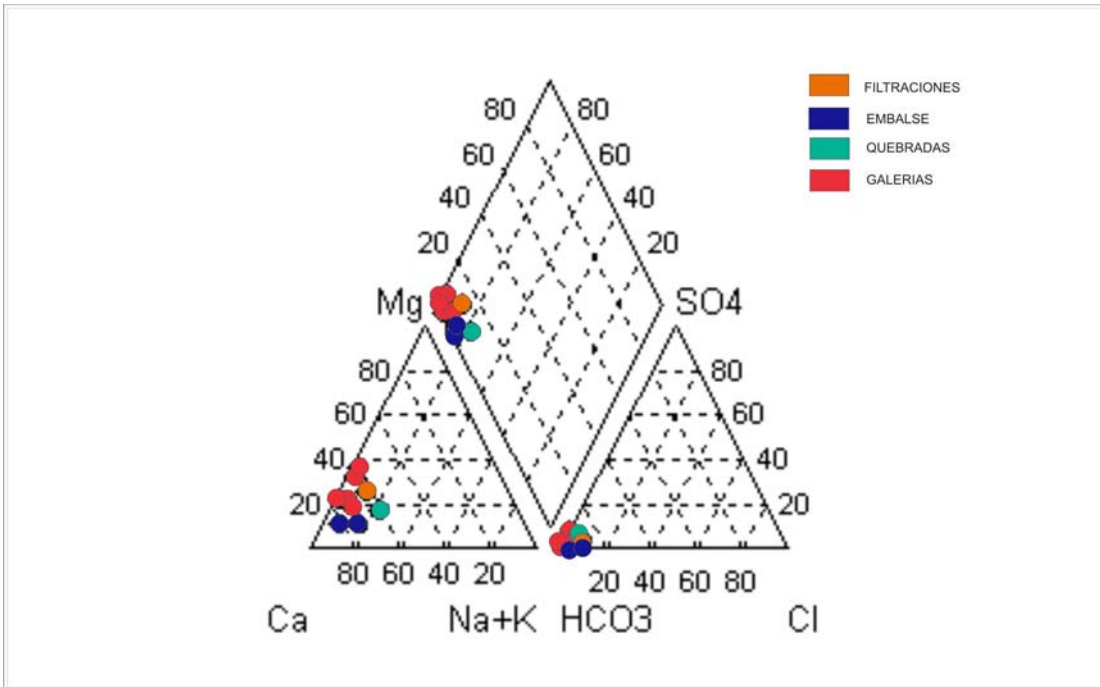


GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

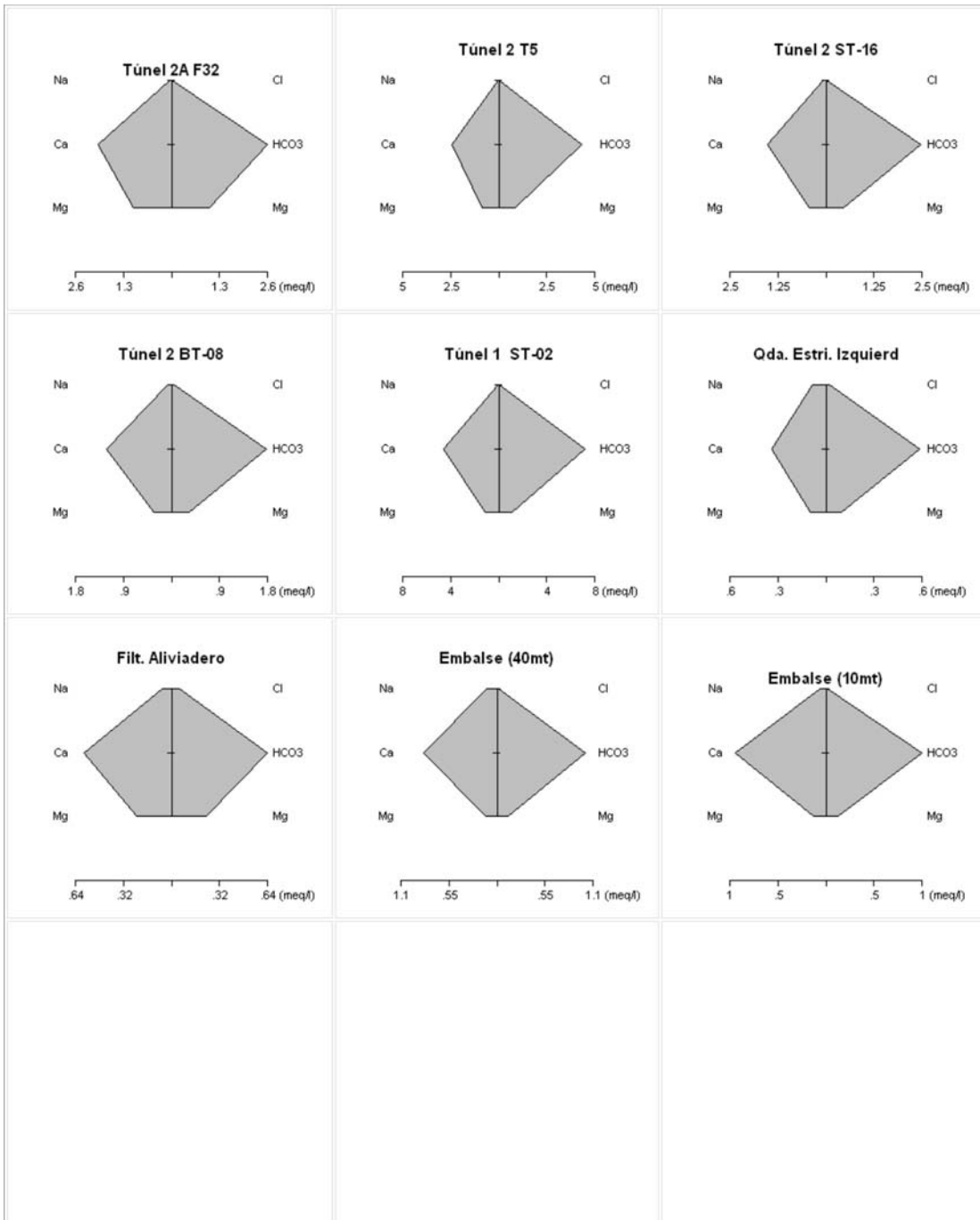
ARCHIVO: BS_01.HC3

FECHA: 20/12/2001



DESCRIPCIÓN: Muestreo en presa Borde Seco para el 2006.
 Arriba: Gráfico de Piper.
 Abajo: Gráfico de Schoeller.

	GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO	
	DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS	
	ARCHIVO: BS_06.HC3	FECHA: 13/03/07



DESCRIPCIÓN: Análisis Físico-Químico en muestras capturadas en presa Borde Seco. Muestreo 19/10/2006. Mediciones efectuadas en DESURCA.

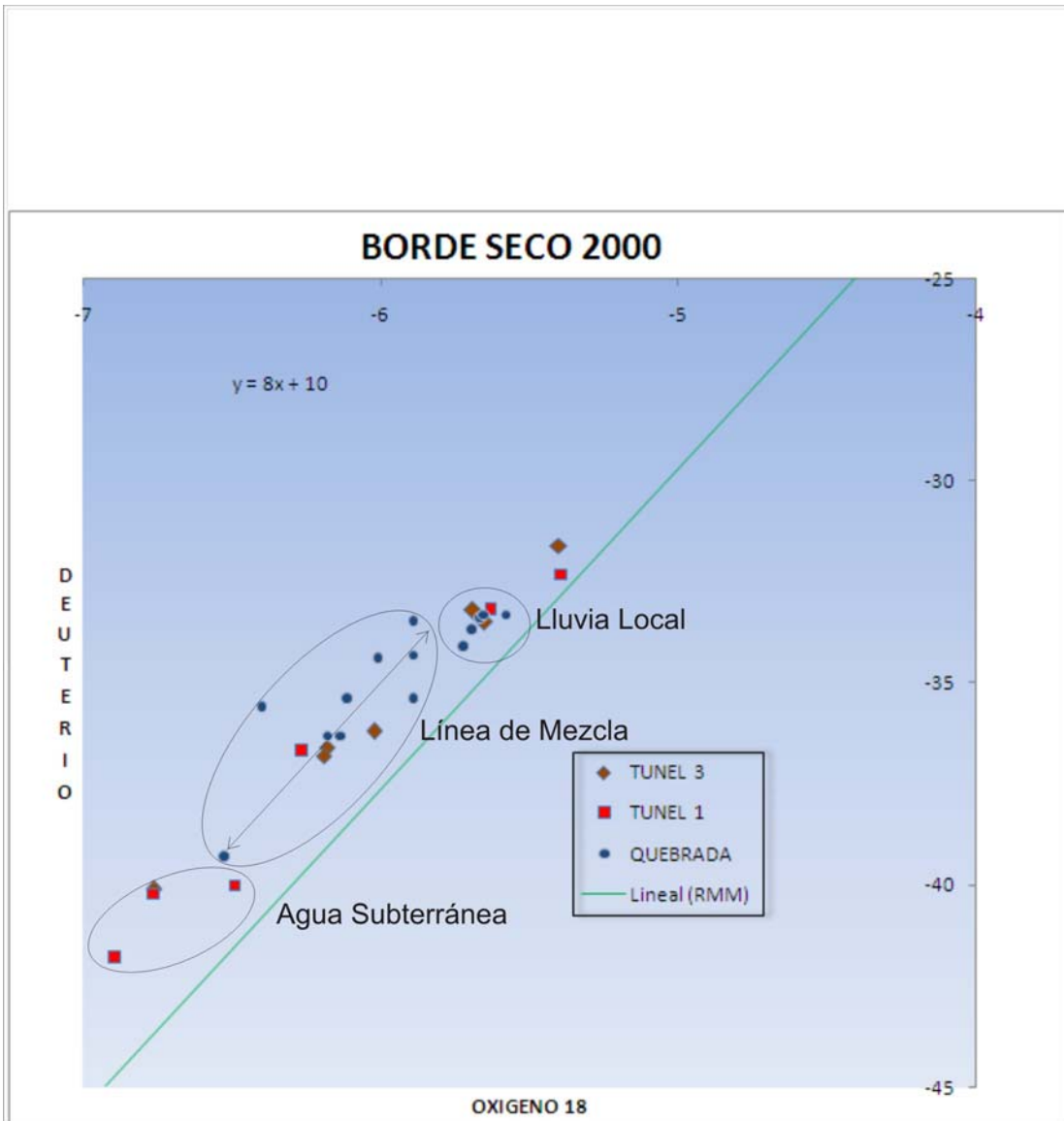


GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

ARCHIVO: BS_06.HC3

FECHA: 13/03/2007



DESCRIPCIÓN: Muestreo Isotópico en Presa Borde Seco.
 Gráfico Oxígeno 18 Vs Deuterio. Análisis
 hecho en Laboratorio de Isótopos Ambientales , Chile.

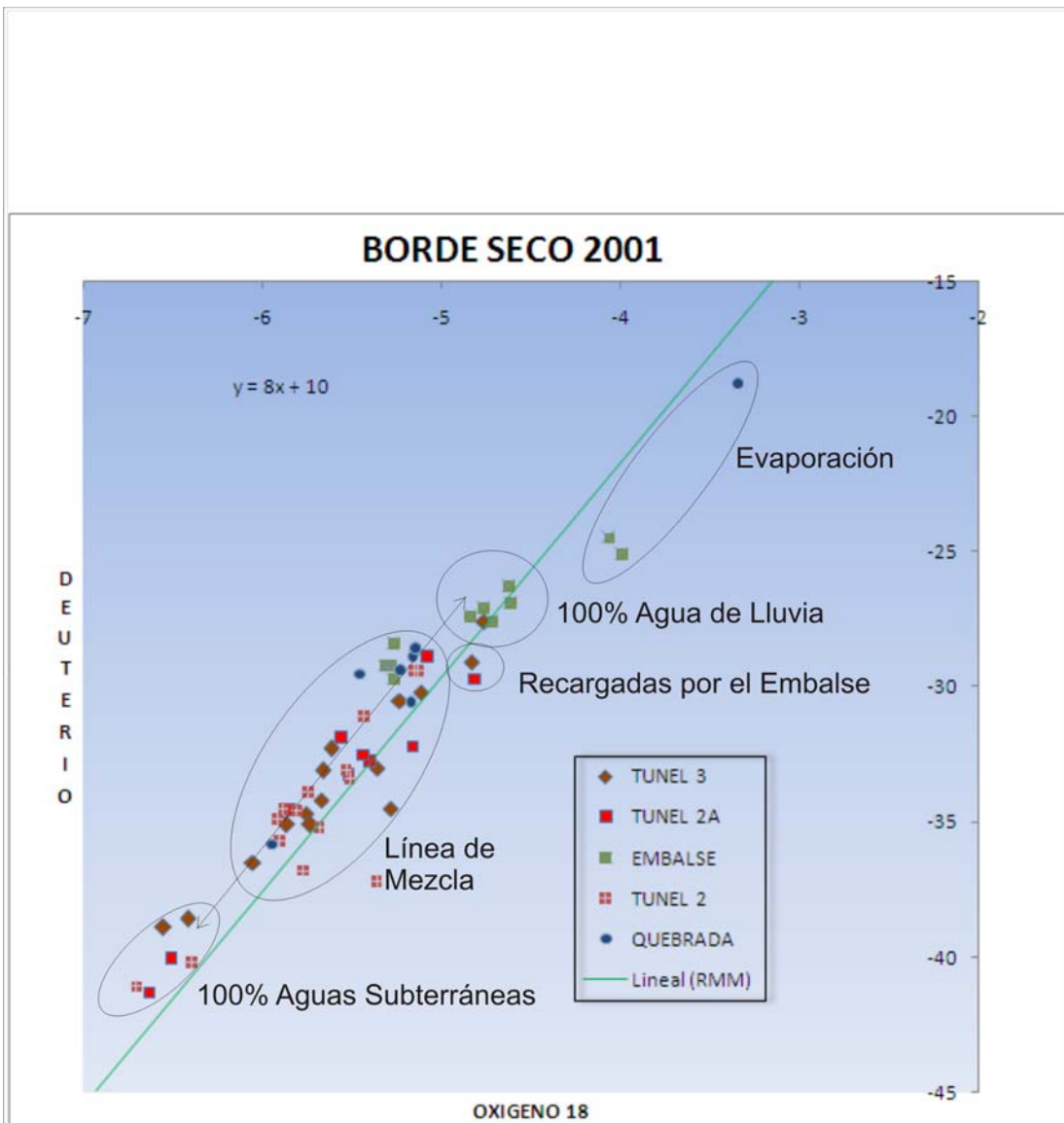


GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

ARCHIVO: ISO.BS_00

FECHA: 13/03/07



DESCRIPCIÓN: Muestreo Isotópico en Presa Borde Seco.
 Gráfico Oxígeno 18 Vs Deuterio. Análisis
 hecho en Laboratorio de Isótopos Ambientales , Chile.

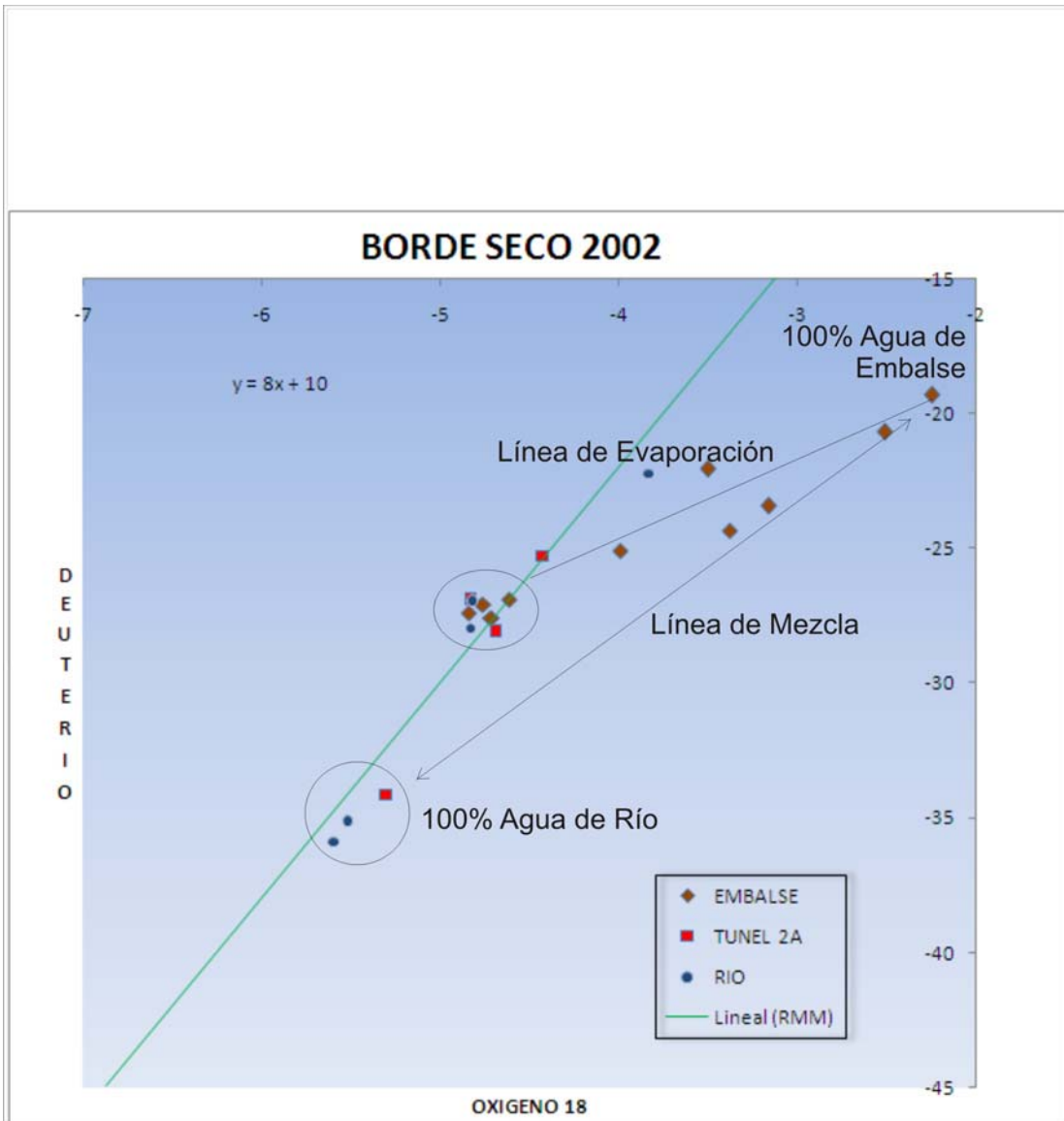


GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

ARCHIVO: ISO.BS_01

FECHA: 13/03/07



DESCRIPCIÓN: Muestreo Isotópico en Presa Borde Seco.
 Gráfico Oxígeno 18 Vs Deuterio. Análisis
 hecho en Laboratorio de Isótopos Ambientales , Chile.



GERENCIA DE INGENIERÍA, PLANIFICACIÓN Y PROYECTO

DIVISIÓN DE INVESTIGACIONES HIDROGEOLÓGICAS

ARCHIVO: ISO.BS_02

FECHA: 13/03/07

CAPITULO 5

5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

5.1.-Conclusiones

- La conclusión más importante que se puede desprender de los resultados obtenidos para los tres sitios de presa estudiados (Presa La Honda, Presa La Vultosa y Presa Borde Seco) hasta ahora, es la no existencia de un flujo subterráneo de carácter regional de gran relevancia que pudiese percolar y afectar la seguridad de los cuerpos de presa estudiados.
- La hidroquímica de las aguas para los tres sitios de presa estudiados reflejan un tipo de agua Bicarbonatadas-Cálcicas-Sulfatadas (Aguas Duras). Este tipo de aguas son acordes con la geología de los sitios de presa. La litología presente posee una mineralogía característica que permite, por procesos de disolución, la generación de los iones mayoritarios; El ión bicarbonato se genera por la presencia de calcita y de materia orgánica. El ión Calcio se genera por la presencia de rocas carbonatadas y posiblemente yeso. Finalmente, el ión Sulfato se genera por la presencia de yeso, oxidación de los sulfuros y en menor grado, por la atmósfera.
- Se puede observar como para los tres sitios de presa las aguas subterráneas se distribuyen en varios acuíferos recargados localmente con poca conexión hidráulica entre los mismos.
- Se observa el alto aporte por parte de las precipitaciones locales en las aguas subterráneas y del embalse con poca evidencia de evaporación previa antes de infiltrarse, la cual podría tener lugar por la acumulación del agua, así como

durante el proceso de precipitación con atmosfera no saturada de vapor de agua. Este último sería el caso de tratarse de precipitaciones poco intensas y de corta duración, cosa que no sucede.

- En el sitio de presa La Honda se concluye como fuente de las filtraciones 1 y 3, exclusivamente el agua del embalse, esto se debe a que la relación de $^{18}\text{O}/^2\text{H}$ del embalse en muestras superficiales son de alrededor de -7,5/-50 y las filtraciones 1 y 3 de -7,9/-48 y -7,3/-46 respectivamente. Se evidencia la influencia de agua no solo de embalse sino también de los acuíferos locales y de la Quebrada Caño Negro con sus mezclas. Se evidencia la naturaleza diferente de la filtración 7 (agua subterránea).
- Para el sitio de presa La Vueltosa se resalta el hecho de que la composición isotópica del P4 se mantenga constante para los muestreos isotópicos realizados. Esto indica el excelente funcionamiento de la barrera hidráulica (capa de lutita de 14m), afirmando de esta manera que el agua contenida en el pozo es subterránea.
- Para el sitio de presa Borde Seco se resalta el gran aporte de aguas provenientes de precipitaciones locales en el embalse. Los resultados isotópicos demuestran la uniformidad de mezcla que posee el embalse.
- Los valores isotópicos dispersos pertenecientes a los Túneles y Quebradas en Borde Seco indican posibles zonas de mezcla de aguas o tiempos de tránsito largos. Las galerías son parcialmente recargadas por aguas del embalse.

5.2.-Recomendaciones

- Iniciar el monitoreo físico-químico e isotópico de las aguas antes de dar inicio a la construcción la presa Las Cuevas perteneciente al Segundo Desarrollo, obteniendo así un margen referencial, el cual permitirá realizar hipótesis de gran valor que pudiesen evitar problemas futuros en la construcción de la obra.
- Realizar campañas mensuales de monitoreo para la determinación de conductividad, temperatura y pH tomadas in-situ en los diferentes puntos de las presas (galerías, embalse, vertederos, afloramientos, etc.) con el objeto de crear hipótesis del origen de las aguas.
- Realizar mediciones de conductividad y temperatura a diferentes profundidades de las aguas del embalse para realizar perfiles que ayuden a determinar la dinámica del embalse, sus condiciones y posibles zonas de mezcla.
- Realizar ensayos de interconexión con trazadores artificiales (rodamina, fluoresceína y tinopal) en cada uno de los sitios de presa para poder observar el tiempo de tránsito del agua a través de los cuerpos de las mismas y el medio en que se transportan (poroso o fracturado).
- Determinar por medio de los ensayos de trazadores artificiales posibles vías de percolación del agua que pudiesen poner en peligro la seguridad de las presas.
- Mantener el muestreo isotópico en los sitios de presa, especialmente en el Pozo 4 de la Presa La Vueltona.

- Obtener datos de precipitación y de temperaturas medias mensuales o diarias en los diferentes sitios de presa con el objeto de interpretar mejor los datos isotópicos en base a una Recta Meteórica Local.
- Mantener el monitoreo de las presas mediante el uso de la instrumentación de las mismas (piezómetros, inclinómetros, extensómetros y monumentos de superficie).
- Crear hipótesis más certeras del origen de las diferentes aguas mediante la recopilación de los datos hidroquímicos, isotópicos, trazadores naturales y artificiales del agua y la instrumentación de las presas, incluyendo el muestreo y ensayo previo de los cuerpos de agua presentes en la zona, antes de iniciarse la construcción de la obra, para tener un patrón de referencia.

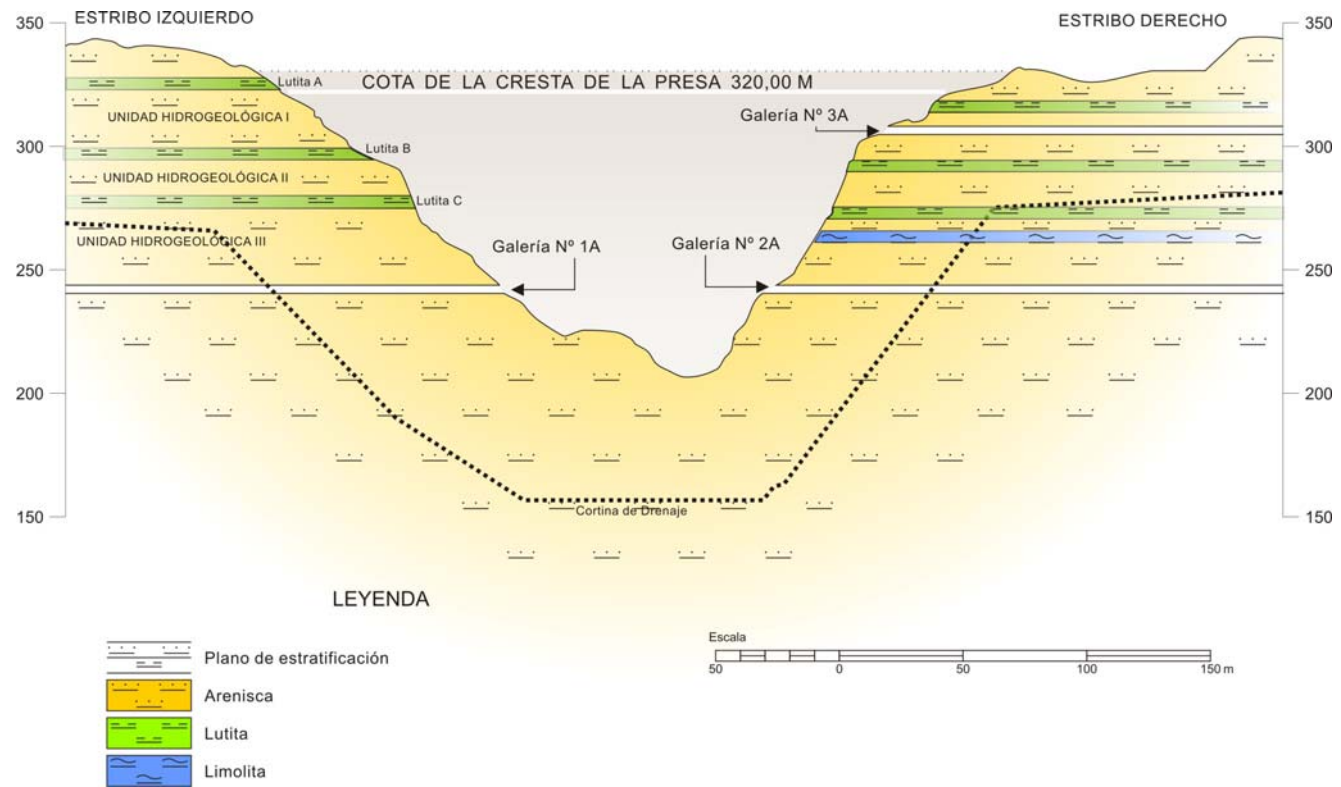
5.3.-Bibliografía y Referencias Citadas

- AMERICAN WATER WORK ASOCIATION POLLUTION CONTROL FEDERATION. (1992). Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. Ediciones Díaz de Santos, S.A. 631 p.
- BEDMAR PLATA, A. (1999). Manual de Fugas en Embalses. Madrid. CEDEX. 328 p.
- BEDMAR PLATA, A. (1993). Estudio de la Hidrología Isotópica de la Zona del Altiplano Incluida en el Proyecto Pasto Grande y Fugas de Agua en el Embalse Construido al Efecto. Lima. OIEA Proyecto PERU/8/007. 29 p.
- BEDMAR PLATA, A. (1988). Informe sobre Filtraciones en la Presa de Chacuey-República Dominicana. Viena. OIEA Proyecto DOM/8/002. 81 p.
- CARRILLO TRILLO, G., y MARCIALES, L. (2000). Análisis de Aguas y Líquidos Residuales y Ensayos de Laboratorio. Caracas. Editorial Innovación Tecnológica. Facultad de Ingeniería UCV. 178 p.
- CORDERO, C. (1995). Aplicación de Trazadores a Fugas en Presas y Embalses. San Jose. OIEA Proyecto RLA/8/018 Costa Rica. 27 p.
- FERRER, D (1984). Presa La Honda Sobre el Río Uribante. San Cristóbal. Boletín N^o 50 SVMSIF-CIV. 36 p.
- GONZÁLEZ SANCHEZ, R. (2005). Control de la Erosión Interna en el Cimiento de una Presa Mediante Técnicas Hidrogeológicas. Santa María de Caparo, DESURCA. Informe Final Trabajo de Pasantías Facultad de Ingeniería UCV. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 78 p.

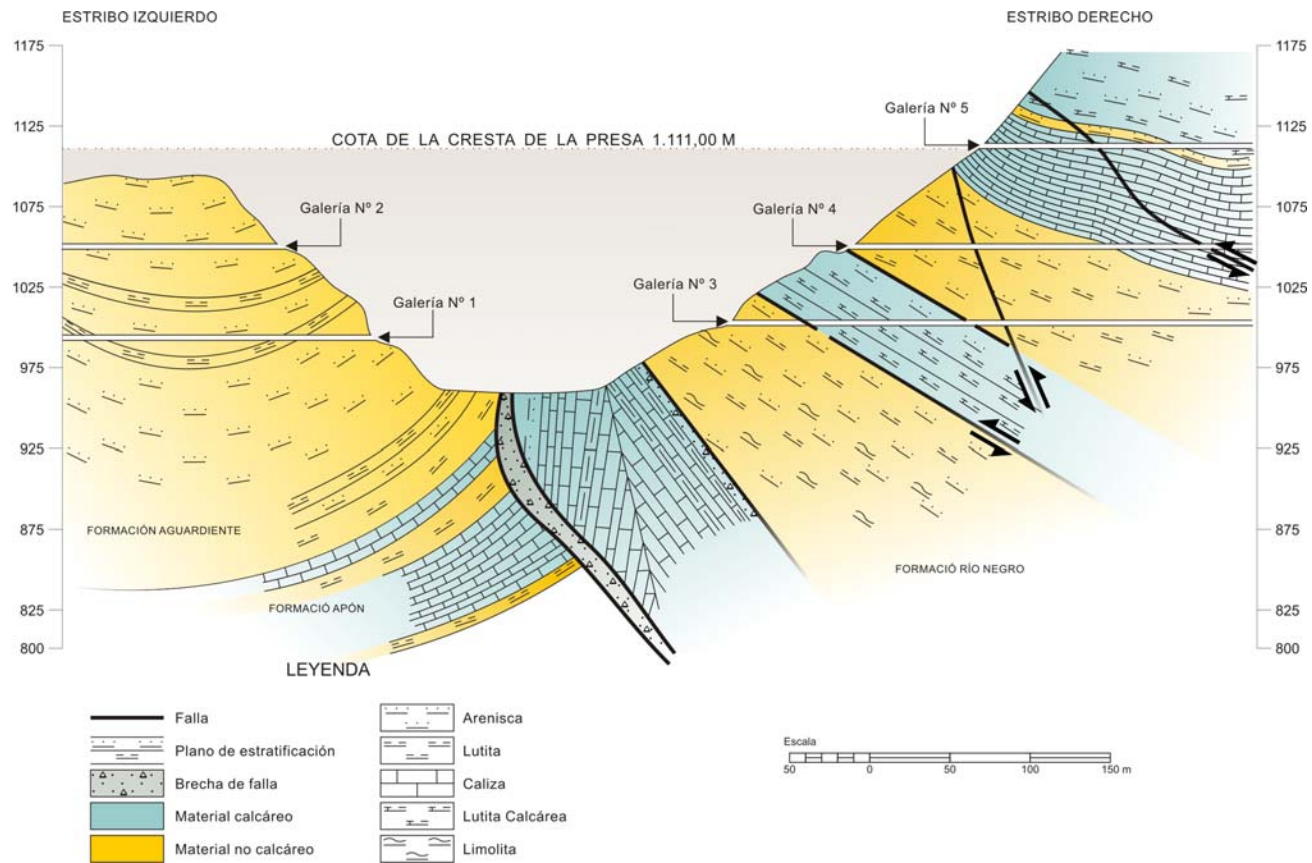
- GRANDE, S. (2006). Yacimientos de Minerales Metálicos. Tema 5. Técnicas de Geotermometría y Geocronología. Caracas. Facultad de Ingeniería UCV. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. 36 p.
- HERNANDEZ, S (1997). Aplicación de Técnicas de Trazadores en filtraciones del Estribo Izquierdo Presa La Honda. San Cristóbal. Proyecto ARCAL XVIII, OIEA, MEM y UCV. 14 p.
- HOUNSLOW, A. (1995). Water Quality Data. Analysis and Interpretation. New York. LEWIS PUBLISHERS. 381 p.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. (2006). Investigating leaks in Dams & Reservoirs. Viena. Department of Technical Co-operation. 2 p.
- MOOK, W. G. (2002). Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico. Principios y Aplicaciones. Programa Hidrológico Internacional. Madrid. IGME. 411 p.
- ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA. (2006). Gestión de los Recursos Hídricos Mediante la Hidrología Isotópica. Madrid. División de Información Pública. 2 p.
- SANDOVAL, Y., y BUENO, R. (2003). Origen de las Surgencias de Agua en la Galería 1 del Estribo Izquierdo de la Presa La Vueltona, III Desarrollo del Proyecto Uribante Caparo. Michelena. Informe Final Trabajo de Pasantías Instituto Universitario de Tecnología Agro-Industrial Extensión Zona Norte Especialidad Geología y Minas. 72 p.

5.4.- ANEXOS

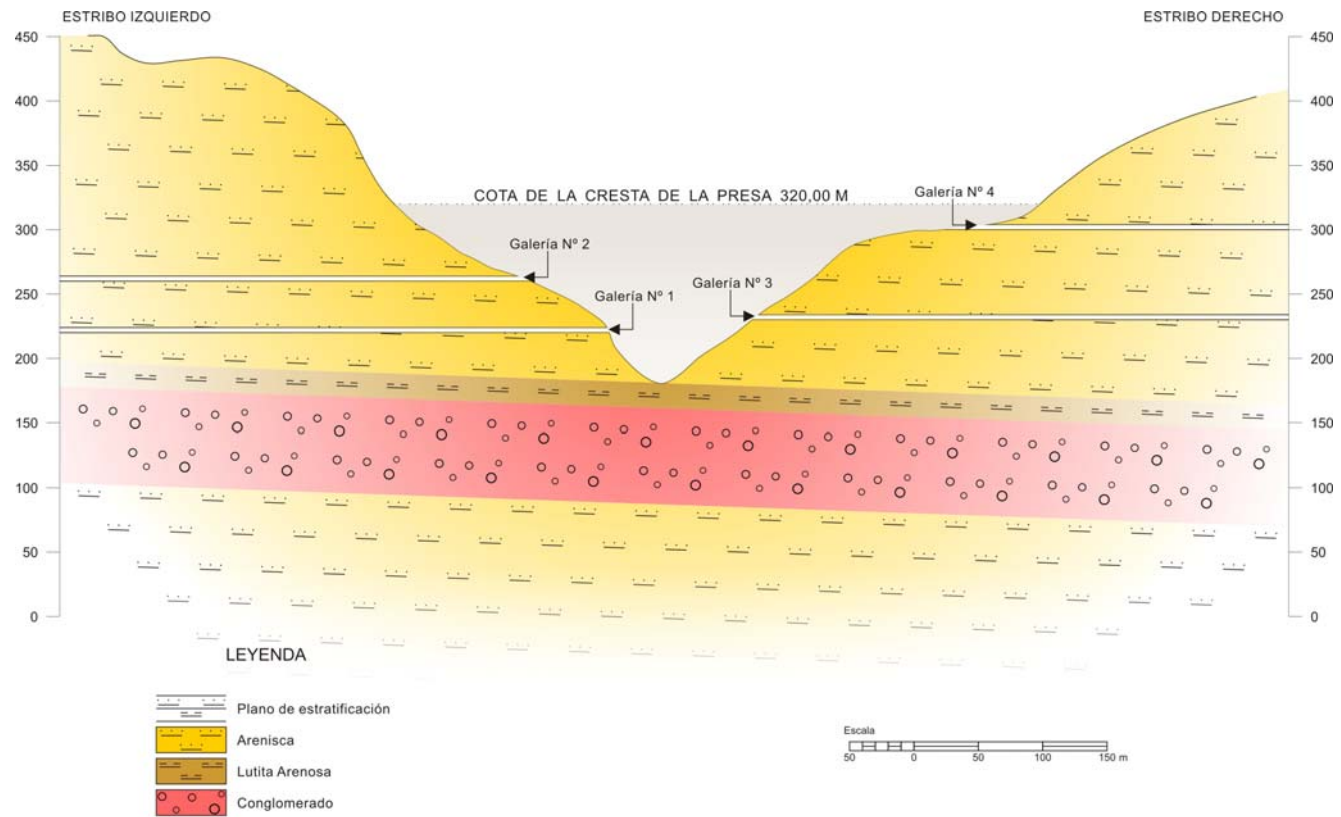
A.1.- PERFIL GEOLÓGICO POR EL EJE DE PRESA BORDE SECO



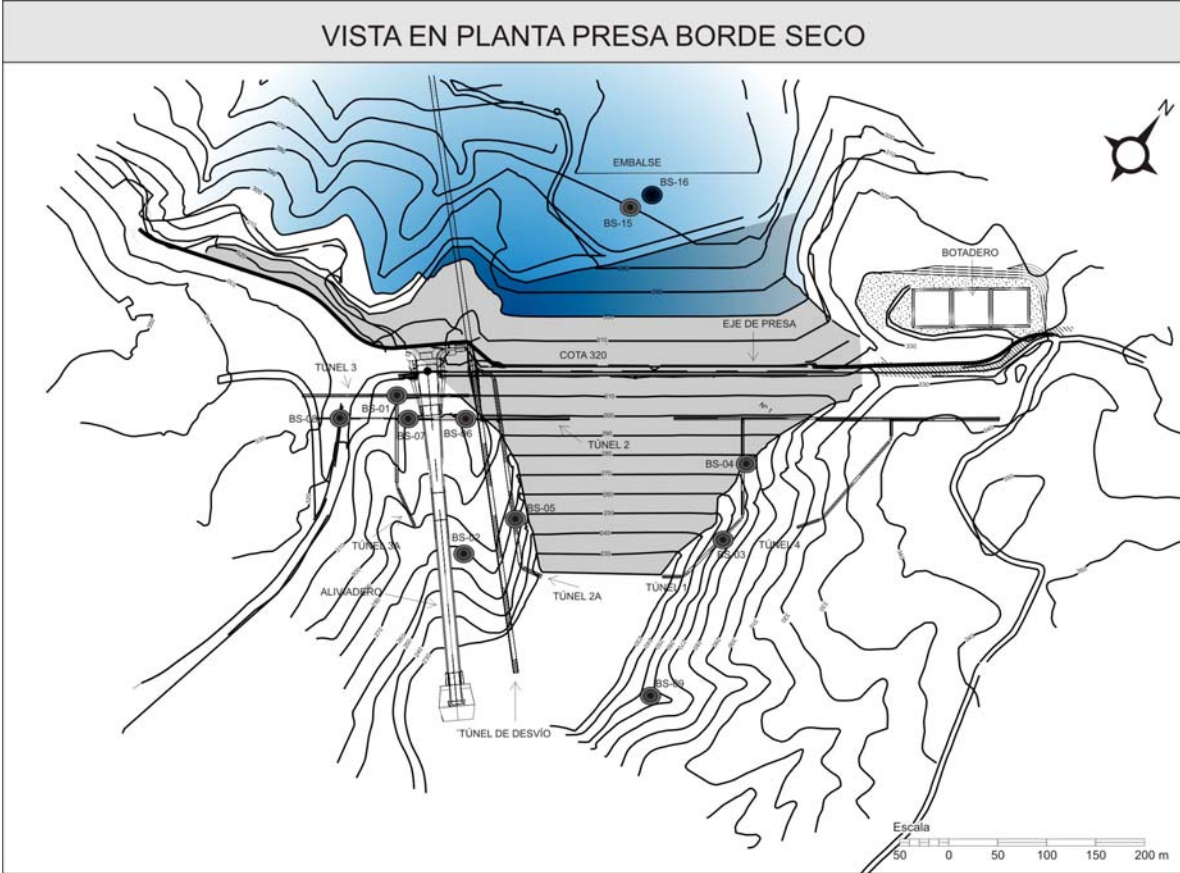
A.2.- PERFIL GEOLÓGICO POR EL EJE DE PRESA LA HONDA



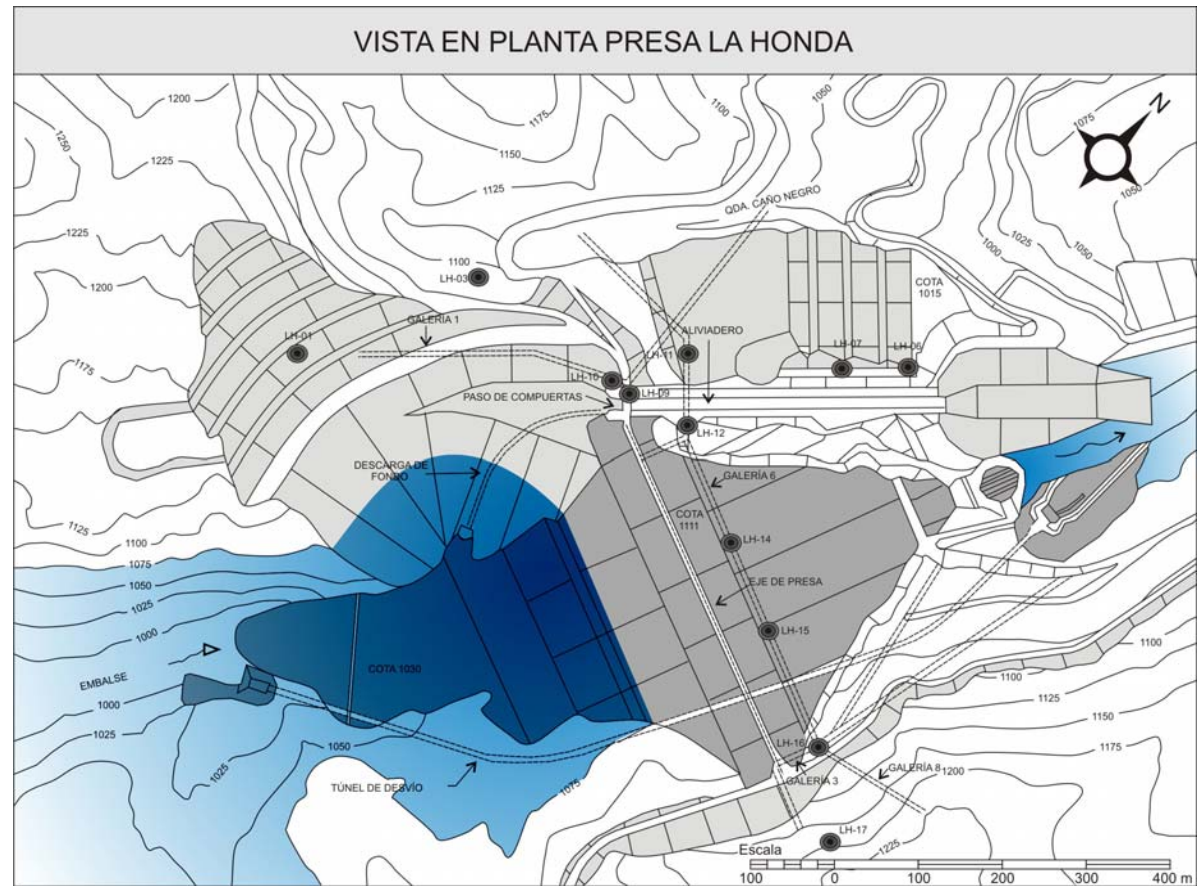
A.3.- PERFIL GEOLÓGICO POR EL EJE DE PRESA LA VUELTOSA



A.4.- VISTA EN PLANTA PRESA BORDE SECO



A.5.- VISTA EN PLANTA PRESA LA HONDA



A.6.- VISTA EN PLANTA PRESA LA VUELTOSA

