

DETERMINACIÓN DE LA RELACION ENTRE LA PERDIDA DE AGUAS SUBSUPERFICIALES (VERTIENTES) Y LA PERFORACIÓN DE L TUNEL MISICUNI

1 INTRODUCCIÓN

El Centro de Levantamientos Aeroespaciales y Aplicaciones SIG para el Desarrollo sostenible de los Recursos Naturales “CLAS” en el marco del convenio de asesoramiento e investigación con la Empresa Misicuni, realizó esta investigación orientada a encontrar la influencia de la perforación del Túnel Misicuni sobre la pérdida de aguas superficiales en la zona.

El agua subterránea adquiere su composición química de una variedad de fuentes. Aumenta su disolución y suspensión de los constituyentes por contacto con gases, líquidos y sólidos que encuentran durante el pasaje del ciclo hidrológico, desde que desciende y entra en contacto con el suelo, litología de subsuelo y en general la gran variedad de factores geológicos que interaccionan con esta.

Para determinar si existe una relación entre las aguas del Túnel y las superficiales, se ideó la forma de relacionar los aspectos geológicos, estructurales, espaciales e hidrogeoquímicos, como se muestra en el desarrollo de esta investigación.

El presente trabajo fue de carácter restrictivo con respecto al tiempo y recursos disponibles y no pretende ser un análisis profundo, ni encontrar soluciones optimas la única pretensión es ser una herramienta útil para posteriores estudios en los que se decida hacer una inversión acorde a las expectativas.

1.1 Antecedentes

En la década de los 40 la escasez de agua en Cochabamba ya era un problema y fue el Ing. Luis Calvo Soux la primera persona en proponer como solución a largo plazo la captación de agua del río Misicuni y su transferencia hacia el valle de Cochabamba.

A mediados de la década de los 70 se realizaron los estudios de prefactibilidad del Proyecto Múltiple de Misicuni a cargo de la empresa francesa SOFRECLEC, financiados y supervisados por la Empresa Nacional de Electricidad. (ENDE)

En 1976 se realizó el estudio de factibilidad a cargo de la consultoras Lamarre Valois Galindo, para cuyo efecto se creó la Asociación Misicuni, conformada por ENDE, CORDECO, SEMAPA, MACA Y COFADENA, instituciones que aportan con fondos para su financiamiento y cuyos representantes conforman el directorio de la asociación.

La Empresa Consultora ELECTROWATT de Suiza realizó el diseño final, trabajo que fue concluido en marzo de 1987. En 1988 se creó la “Empresa Misicuni” con autonomía administrativa, los fondos para su financiamiento provienen, en forma directa e indirecta del Tesoro General de la Nación.

Estudio geológico para el Túnel Misicuni realizado por la Consultora ELECTROWATT, fue la base de este informe, de la cual se tomaron en cuenta 2 aspectos fundamentales, la litoestratigrafía y la geología estructural.

En 1992 la empresa “TAMS Consultans, Inc.” de los Estados Unidos, realizó sobre la base de toda la documentación existente acerca del proyecto una revisión de la factibilidad de éste. Los resultados fueron presentados en un documento titulado “*Explotación y Utilización de recursos de agua en el valle de Cochabamba y sus alrededores*”.

En 1993 las empresas ENDE y Misicuni hacen una evaluación de los impactos ambientales relacionados a la primera etapa del proyecto Múltiple Misicuni Fase I, y la proposición de medidas, programas y planes ambientales.

La empresa “DAMES & MOORE, Inc”, de los Estados Unidos, realizó en 1996 una actualización del estudio de evaluación de impacto ambiental del Proyecto Múltiple Misicuni, Fase I. Informe que se preparo de acuerdo a los términos de referencia dados por el Ministerio de Capitalización de la República de Bolivia.

En 1998, la Empresa Misicuni y el Consorcio Tams-Ingetec-Claure Pereira, firmaron un contrato cuyo objetivo fue la ingeniería y supervisión de las obras del Túnel Principal.

En dicho contrato se estableció que el consultor debe presentar informes anuales sobre el avance de las obras, el desarrollo del programa de construcción y el presupuesto utilizado, así como todos los aspectos relevantes del proyecto. De los informes anuales años 1998, 1999, 2000, y los mensuales de enero hasta mayo de 2001 se extrajo la geología del interior túnel.

La Empresa “MISICUNI” realizó en junio del presente año el Sistema de Agua Potable Uyuni, con el fin de abastecer de agua potable a la comunidad de Viscachani ya que anterior a la construcción del Túnel los habitantes de dicha comunidad se proveían del agua de las vertientes.

1.2 Características del Proyecto “TÚNEL MISICUNI”

El Proyecto Múltiple Misicuni tiene como finalidad el aprovechamiento de los recursos hídricos que drenan la cuenca del río Misicuni, con el objetivo primordial de, abastecer de agua potable y riego a los valles de Cochabamba y Sacaba, en el departamento de Cochabamba. La Fase I incluye la construcción de una presa y embalse en el valle del río Misicuni, Túneles de conducción de agua hasta la localidad de Calio, sobre la cara sur de la Cordillera del Tunari, desde donde el agua será transportada por un conducto forzado hasta la localidad de Molle Molle.

La longitud total del Túnel entre Bocatoma de embalse y Calio es de 19,5 Km y la longitud excavada o avance por ambos frentes hasta la fecha de entrega de este trabajo suma aproximadamente 15,5 Km

Las características de la sección transversales y longitudinales del Túnel se pueden ver en las Figuras N°s 1 y 2.

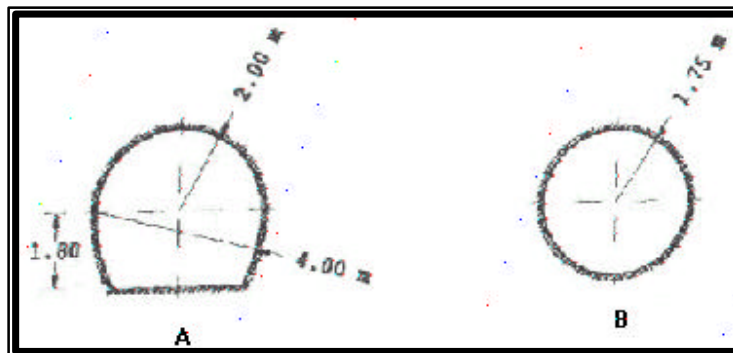


Figura N°1. Secciones transversales del Túnel Misicuni. A) Sección de excavación con TBM. B) Sección de excavación con método convencional

La zona de estudio de la presente investigación comprende una sección longitudinal a lo largo del Túnel entre la bocatoma embalse y el pozo intermedio, con una longitud aproximada de 7 Km

1.3 Justificación.

La ausencia de información acerca de las causas que provocan la disminución del caudal de las vertientes en la superficie del trazado del Túnel Misicuni hace que la Empresa Misicuni muestre interés en obtener algún tipo de información que explique este fenómeno.

Es por esta razón que la investigación permite la aplicación de metodologías las cuales determinan niveles de susceptibilidad a fracturamiento de la roca, permeabilidad y porosidad relacionados con el tipo de geología. (Estratigrafía y geología estructural.)

1.4 Planteamiento del problema.

La disminución total o parcial del caudal en las vertientes trae consigo el problema de desabastecimiento de agua para consumo humano y animal. Razón por la cual los campesinos han reclamado a la empresa Misicuni una solución a su problema, mientras la empresa aduce que la pérdida o disminución de las vertientes no se debe en su totalidad a la perforación del Túnel, admiten la posible existencia de factores que provoquen este tipo de alteración.

1.5 Objetivos

1.5.1 General

- Determinar cual es la relación entre la pérdida de aguas subsuperficiales (vertientes) y la perforación del Túnel en la zona de estudio.

1.5.2 Específicos

Establecer la influencia de la geología estructural con la posible infiltración de aguas subsuperficiales.

Determinar de acuerdo al tipo de roca, los índices de permeabilidad e infiltración.

Encontrar alguna relación entre la distancia vertical de las vertientes al Túnel con la posible infiltración o pérdida de agua mediante perfiles geológicos.

Determinar la alteración que se produce en el régimen hidrogeológico por efecto de la perforación del Túnel.

Determinar si el área de estudio es una zona de recarga para los acuíferos fisurados

Encontrar zonas susceptibles a la infiltración utilizando modelos espaciales SIG.

Analizar las características hidroquímicas en las vertientes y en el Túnel, para utilizar el modelo PLOTCHER

1.6 Hipótesis.

La geología estructural es el factor desencadenante para que exista infiltración y el área de estudio se convierta en zona de recarga para acuíferos controlados por la litología, principalmente en aquellos sectores donde afloran rocas fracturadas de la formación San Benito (A).

2 AREA DE ESTUDIO

2.1 Ubicación

La zona de estudio se ubica políticamente en el sector sur de las provincias de Ayopaya y Quillacollo del departamento de Cochabamba y específicamente en la cuenca Misicuni, alrededor del trazo del Túnel principal del proyecto múltiple Misicuni; entre el portal bocatoma (progresiva K0+0.54) y el pozo intermedio (progresiva K7+134), ver Anexo 1

2.2 Accesibilidad.

Existen dos caminos carreteros que permiten el acceso a la zona de estudio. El primero que arranca de la población de Quillacollo se dirige hacia Morochata, es una carretera de segundo orden, el primer tramo tiene un desarrollo de aproximadamente 40 Km. y desvía del cruce hacia Misicuni siguiendo por una vía de tercer orden con un desarrollo de 37 Km. El primer tramo es un camino empedrado y estable todo el año, el segundo camino es angosto, en tierra pero en general en buenas condiciones.

La segunda carretera que permite llegar a Misicuni es la carretera Escalerani-Misicuni, como la anterior tiene un primer tramo regular hasta llegar a la cumbre del Tunari y a partir de este punto la carretera se encuentra en malas condiciones.

2.3 Geomorfología.

La zona del proyecto está emplazada en la parte media de la unidad morfoestructural conocida con el nombre de Cordillera Central y Oriental.

La parte superficial del área del proyecto Misicuni presenta una típica morfología de cordillera andina. Se trata de un cordón montañoso constituido superficialmente por suaves cubiertas detríticas y surcado por sistemas de drenaje de tipo dendrítico, los cuales aparecen con frecuencia con un marcado control estructural que se manifiesta a gran escala en la orientación de los cordones montañosos. (en forma paralela al plegamiento principal de la zona con rumbo nordeste)

El control estructural se advierte, además en la presencia de laderas que se exponen muchas veces en forma paralela a los planos de estratificación, aunque otras veces, cuando estos planos son subhorizontales, los afloramientos de roca competentes constituyen farallones.

Los valles principales, que corresponden a los ríos Misicuni, Titiri y Serkheta son amplios y muestran terrazas aluviales de hasta 250 m. de ancho. El espesor expuesto de estos depósitos en el cauce actual de los ríos alcanza alrededor de 10 metros.

Las laderas de los cordones montañosos aparecen cubiertas principalmente por materiales detríticos que corresponden a coluvio cuyos espesores son con frecuencia inferiores a 2 m. Los afloramientos rocosos son por lo general restringidos y aparecen controlados por fajas constituidas por las litologías más resistentes, como las areniscas cuarcíticas.

2.4 Geología.

Partiendo de mapas geológicos suministrados por MISICUNI a escala 1:20000, y del mapa geológico regional de SERGEOMIN, se elaboró un mapa geológico del área de estudio a escala **1:5000**. Este mapa se complementó con una revisión rápida de campo en aquellos sitios de interés hidrogeológico, especialmente para el área de influencia del Túnel. Ver mapa Geológico. Anexo 2.1.

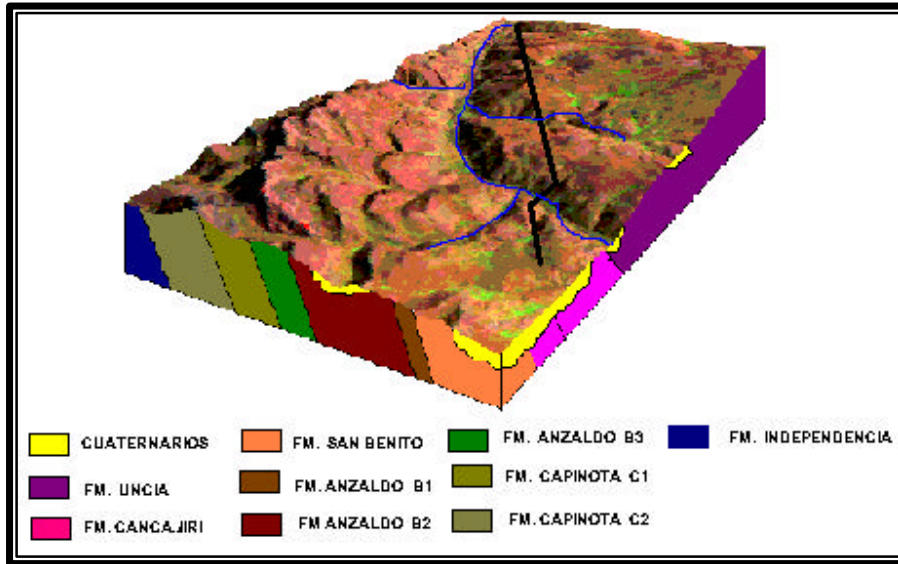


Figura N°3. Bloquediagrama de la geología en la zona de estudio.

2.4.1 Geología Regional.

Las partes altas de la cuenca montañosa están constituidas por rocas ordovícicas resistentes (formación Anzaldo y San Benito) y las rocas débiles silúricas (Formaciones Uncía y Cananchiri). Los sedimentos no consolidados están constituidos por depósitos Cuaternarios.

El sistema Ordovícico está conformado por rocas que van desde el Arengiano al Caradociano, todas de origen marino, que por ser las rocas más antiguas forman el basamento de la zona.

Estas rocas están constituidas principalmente por limolitas o siltitas, areniscas, cuarcitas, lutitas y pizarras que totalizan un espesor de más de 5000 m. El sistema Silúrico está también constituido por rocas de origen marino y glacio-marino.

El sistema Cuaternario está representado por depósitos del Pleistoceno, consistentes en morrenas y depósitos fluvio-glaciales. Los depósitos aluviales recientes forman terrazas en los márgenes de los ríos, lechos aluviales y conos aluviales en las desembocaduras de quebradas. La parte del valle es un graben tectónico, limitado por fallas normales en el norte y en el sur, y por fallas inversas en el oeste.

2.4.2 Descripción Estratigráfica.

2.4.2.1 Estratigrafía de Superficie.

La estratigrafía de la zona de estudio se describe de acuerdo al informe geológico hecho por la empresa ELECTROWATT 1987. Las rocas que cubren el área están constituidas íntegramente por una secuencia sedimentaria perteneciente a los sistemas Ordovícico, Silúrico y Cuaternario. Se tiene en orden cronológico las formaciones de forma general en la Tabla N°1.

Edad	Formación	Unidad Litológica	Descripción
Cuaternario	Aluvial Suelo Residual Coluvio Terrazas Fluvio-Glacial Morrenas Discordancia		
Silurico	Formación Uncía Formación Cancañiri Discordancia	Su Sec	Lutitas gris oscura Conglomerado dolomítico
Ordovícico	Formación San Benito Formación Anzaldo Formación Capinota Formación Independencia	A B1, B2, B3 C, C1, C2, D1, D2 E	Cuarcita gris Limolita, Pizarra, Cuarcita, lutitas, Pizarras, Areniscas, Areniscas laminadas Pizarras y Lutitas

Tabla N° 1. Secuencia estratigráfica generalizada. (ELECTROWATT 1987)

En el Anexo 2.2. Se presenta la columna Estratigráfica general, tomada del informe geológico de ELECTROWATT 1987. A continuación se dará una breve descripción de las formaciones en orden cronológico de la más antigua a la más reciente es la siguiente:

□ Sistema Ordovícico.

• *Formación Independencia (E)*

Las rocas de esta unidad sedimentaria representan la parte más baja del sistema Ordovícico de la cordillera del Tunari. Sus afloramientos se localizan en el sector occidental del área formando el núcleo del anticlinal de Misicuni.

Litológicamente está formada por pizarras y lutitas gris oscuras y azulinas, poco micáceas en partes muy blandas, intercaladas por bancos de areniscas de 20 cm de espesor de color gris blanquecino y gris oscuro de grano fino a muy fino, poco micáceas y duras.

- **Formación Capinota (C1, C2, D1, D2)**

Esta unidad sedimentaria se encuentra bien expuesta a lo largo de todo el flanco oriental del anticlinal de Misicuni donde denota un control sedimentario respecto a la morfología, es decir, que las unidades generalmente forman partes bajas o valles. En cambio las unidades más resistentes forman altos topográficos.

Regionalmente esta formación está formada por un paquete arenoso en la base y otro arcilloso gris oscuro hacia el tope, ambos con variaciones faciales de norte a sur.

Litológicamente la base se inicia con la presencia de una secuencia de areniscas y cuarcitas gris blanquecinas finamente estratificadas muy micáceas conformando una estratificación tabular bien característica con intercalaciones delgadas de lutitas gris oscura.

- **Formación Anzaldo (B1, B2, B3)**

Las rocas de esta unidad sedimentaria tienen una amplia distribución en el flanco oriental del anticlinal Misicuni. Esta formación en la base presenta limolitas gris verdosas muy micáceas estratificadas en capas delgadas de 10 a 20 cm. De espesor, intercaladas con delgadas capas de areniscas verdosas de grano fino, en conjunto se presentan como una unidad poco resistente formando pendientes suaves.

Paulatinamente hacia su parte media la estratificación se hace más resistente por la presencia de areniscas duras, estratificadas en capas gruesas de grano fino a medio, matriz poco arcillosa formando en el paisaje altos topográficos imponentes que se destacan en la morfología.

Su parte superior esta conformada por sedimentos muy semejantes a la parte inferior e inicia con un paquete lutítico de 120 m de espesor de color gris oscuro y gris verdoso. Siguen limolitas y areniscas suaves de color gris verdoso estratificados en capas de 1 y 2 m de espesor formando paquetes relativamente potentes.

- **Formación San Benito (A)**

Constituye la unidad formacional más joven del sistema Ordovícico. La característica principal que permite diferenciar las formaciones infra y suprayacentes es la presencia de niveles arenosos fuertemente consolidados que en algunos sectores presenta características de Cuarcita que algunas veces forma altos topográficos y acantilados.

De base a tope se puede decir que este ciclo sedimentario se inicia con la presencia de niveles arenosos de color gris blanquecino de grano fino a medio subredondeados, poco micáceos y fuertemente consolidados, estratificados en capas de 10 a 30 cm de espesor con intercalaciones de limolitas verdosas y algunas veces gris oscuras. Hacia arriba aumenta la proporción arenosa donde forma bloques compactos que se destacan nítidamente.

Hacia el tope se observa la presencia de una alternancia de arenas de arenas y limolitas permitiendo suavizar el perfil topográfico.

□ **Sistema Silúrico.**

• ***Formación Cancañiri (Sc)***

Esta unidad se inicia con un conglomerado polimíctico y ferruginoso de 1 m de espesor que pasa a arenisca de grano grueso de color claro bastante resistente de 40 cm de espesor. Luego sigue una alternancia de diamictitas y arcillas de color gris claro, limolitas amarillentas y un delgado horizonte calcáreo también de color gris claro completando un espesor total de aproximadamente 17 m y hacia el tope un horizonte de arenisca ferruginosa de grano medio a grueso de 20 m de espesor.

• ***Formación Uncía (Su)***

Esta unidad esta conformada íntegramente por rocas pelíticas de color gris oscuro y azulino compuesto por lutitas negruzcas carbonosa que pasan transicionalmente a limolitas también gris oscuras. Son rocas fácilmente erosionables suaves que forman una topografía de lomerío suave, esporádicamente presenta niveles delgados de arenisca arcillosa gris amarillenta color marrón de grano fino a muy fino.

□ **Cuaternarios.**

• ***Depósitos Morrénicos***

Producto de la intensa glaciación a la que ha estado sometida esta parte de la cordillera se formaron las morrenas que ocupan gran partes del área. Se trata principalmente de morrenas laterales que se extienden por varios Km y causan alturas de mas de 100 m en algunos casos, las morrenas frontales y de fondo son menos frecuentes posiblemente por las pendientes abruptas presentes en la zona.

Los sedimentos que las conforman están compuestos por un material polimíctico mal seleccionado, por fragmentos y bloques de roca, pedrones, grava, arena y material arcilloso formando verdaderas barreras a la largo de las pendientes para terminar al final de su recorrido como morrenas frontales o de fondo en los lechos de los ríos principales

• ***Depósitos Recientes***

Se refiere a los depósitos fluvio-glaciales que son el resultado de la acción combinada del agua proveniente del deshielo de los glaciares, arrastrando material suelto desprendido por gravedad. Conformado generalmente por una mezcla de material mal seleccionado de grava arena y material arcilloso, material que se acumula en las faldas de la serranía y algunas veces llega hasta los lechos de los ríos.

También están presentes depósitos fluviales ubicados principalmente en los cauces de los ríos relativamente anchos, los mismos que forman a través del tiempo terrazas que tienen dos o más niveles producto de las épocas lluviosas.

Las terrazas están conformadas por material pobremente seleccionado consistentes en pedrones, cascajo de diámetro grueso cerca a la fuente de origen, pasando paulatinamente a arenas y finalmente a limos. Estas acumulaciones de material reciente presentan una pseudo estratificación no bien definida, sin embargo muestra en general cierto grado de selección que va de base a tope es decir de grueso a fino.

Los abanicos aluviales y conos de deyección se encuentran en las desembocaduras de las quebradas cubriendo superficies reducidas debido al poco desarrollo que estas tienen.

2.4.2.2 Estratigrafía del Túnel.

A continuación se hará una descripción geológico-estructural semidetallada del túnel, haciendo énfasis en los puntos de muestreo y en las zonas de falla, de acuerdo a los informes anuales (1998, 1999, 2000 y enero-mayo 2001) del consorcio TAMS-INGETEC-CLAURE PEREIRA. En el Anexo 3. se puede ver el perfil longitudinal del túnel entre Bocatoma y Pozo Intermedio con una descripción gráfica generalizada de las rocas del Túnel.

Este primer sector 2.1 Km pertenece en su totalidad a la **Formación Anzaldo unidad (B1)** y su descripción en el informe anual del consultor año (1999 y 2000) es reiterativa por cuanto se consideró conveniente recalcar los aspectos más significativos como zonas de debilidad, fallas importantes, y descripción general del material encontrado.

- (K0+054.5 a K0+226.) En general se excavaron areniscas grises verdosas de grano fino, intercaladas con niveles de limolitas arenosas más claras. Estratificación subhorizontal de 20 a 90 cm de espesor, con delgadas intercalaciones de arcilla entre estratos. En general la roca se encuentra muy fracturada, con diaclasas abiertas rellenas de material arcillo-brechoso.
- (K0+226/501) se presentaron areniscas y limolita gris oscura en matriz arcillosa, Estratificación irregular fracturadas constituyendo una zona de alteración. A partir de K0+373 las areniscas y limolitas tiende a ser más micáceas y su color va tornándose más claro.
- (K0+501/K1+328) Arenisca cuarcítica gris clara Y limolita gris oscura micácea, con intercalaciones de limolitas y areniscas cuarcíticas gris clara y oscura fracturadas a moderadamente fracturadas. En los sectores (K0+604/608; K0+818/840; K0+914/966; K1+0.25/0.28; K1+0.75/0.80; K1+111/128) se encontraron rocas muy fracturadas con presencia de fallas, relleno de material brechado (roca triturada y arcilla) que generaron en todos los casos sobreexcavaciones de consideración en la bóveda (techo del túnel) durante su construcción, a la vez que se presentaron infiltraciones en todas ellas que varía de 1 l/s hasta algo más de 6 l/s.
- (K1+328/890) Intercalación (bandeada) de arenisca cuarcítica gris clara con arenisca y limolita gris oscura, poco a moderadamente fracturada. Estratificación media a gruesa. Discontinuidades algo abiertas entre 1 y 2 mm rellenas de arcilla, que son la vía preferencial para el flujo de agua. A partir de (K1+470), la roca presenta una mayor dureza debido a una silicificación en su textura. Los sectores de falla de mayor influencia en este tramo fueron encontrados en las progresivas (K1+6621/645; K1+670/682; K1+837/848; K1+874/890), generalmente son fallas transversales al eje del túnel, con material brechado y ocasionan sobreexcavaciones en bóveda.
- (K1+890/K2+170) Intercalaciones de limolitas gris oscura, arenisca gris oscura de grano fino, matriz arcillosa y arenisca cuarcítica. Estratificación gruesa con estructuras de deformación, lenticulares, con rellenos de cuarzo en discontinuidades con corrimiento de estratos y presencia de lutitas blandas. A medida que se llega al tope de la Formación Anzaldo, la estratificación se vuelve delgada irregular y plegada, la roca se presenta

muy facturada y alterada con bastante material fino y arcilloso. Básicamente este sector es una zona de transición entre las Formaciones Anzaldo y San Benito en el cual no está claramente definido el contacto entre las dos formaciones. En varios sectores se presentan flujos menores a 1 l/s, especialmente en sectores de falla (K1+959/983; K2+108/117; K2+125/130).

Aproximadamente a partir de la progresiva K2+170, hasta llegar al pozo intermedio el túnel atraviesa rocas pertenecientes a la **Formación San Benito Unidad (A)**.

- (K2+170/ K2+712.9) Areniscas cuarcíticas gris claras intercaladas con delgados niveles de limolita gris oscura, de forma ondulada lenticular, fracturada a moderadamente fracturada. Planos de fricción rellenas de material arcilloso, niveles de lutita y pirita, en algunos sectores la arenisca cuarcítica pasa a Cuarcita. La relación arenisca/limolita varía entre 70/30 y 80/20. Estratificación media a delgada con pequeños repliegues en algunos sectores. Se presentaron fallas de consideración en los sectores (K2+193; K2+2269/273; K2+481/483; K2+501; K2+575) cabe destacar que en la progresiva K2+193 se presentó una sobreexcavación de 7.4 m de largo por 8.1 m de alto, en la progresiva K2+2269/273 un flujo intermitente mayor a 18 l/s el espesor de esta falla es aproximadamente 3,5 m, en K2+575 se presentó sobreexcavación de hasta 6.0 m de altura y 6.5 m de longitud con presencia de agua >2 l/s, en K2+613/618 sobre excavación de 10 m con un volumen aproximado de 40 m³ y flujo de agua > 18 l/s .

- (K2+712.9/K3+040.4) Cuarцитas y areniscas cuarcíticas claras, intercaladas con delgados niveles de limolitas oscuras, el fracturamiento varía de poco a moderado. Estratificación media a gruesa (40 a 70 cm), con rellenos de cuarzo y arcilla en discontinuidades, en cuanto a fallas se presentaron en las progresivas (K2+715; K2+732.5/734; K2+807; K2+826.5; K2+860/866 ; K2+981/K3), en la progresiva K2+860/866 se presenta una serie de fallas de 15 cm de espesor, a intervalos de 3 a 5 m, con pequeños flujos y desprendimientos en bóveda.

- (K3+040.4/K4+095) Arenisca gris oscura micácea, matriz limo arcillosa, intercalada con delgados niveles de limolita gris y arenisca cuarcítica gris clara, poco a moderadamente fracturada, con discontinuidades rellenas de material fino, arcilla, pirita y calcita, a partir de K3+312 la arenisca se torna arenisca cuarcítica y pasando gradualmente de clara a oscura con intercalaciones de limolita gris oscura , en K3+390 se presenta una intercalación bandeada de limolita gris oscura con arenisca cuarcítica gris clara, en K3+451 la roca pasa a arenisca cuarcítica clara con intercalación de limolita gris oscura. Se presentan fallas en las siguientes progresivas (K3+047; K3+351; K3+375/384; K3+611; K3+622/629; K3+733; K3+819/840; K3+961/967.2), en K3+047 se presentaron flujos no mayores a 2 l/s, en K3+375/384 se presentaron sobreexcavaciones de 1,5 m de altura, en K3+733 se presentó un flujo con caudal aproximado de 10 l/s, en K3+819/840 el caudal fue cercano a los 4 l/s.

- (K4+095/K5+467.9) A partir de este punto se incrementa la presencia de arenisca cuarcítica clara , intercalada con delgados niveles de limolita gris oscura (2-6 cm), poco a moderadamente fracturada y relleno de arcilla y ocasionalmente calcita en discontinuidades. Estratificación media a delgada , con presencia de corrimiento de

estratos y planos de fricción que ocasiona desprendimientos en algunos sectores. Hasta la progresiva K5+467.9 se mantiene la misma coloración tanto en arenisca como en limolitas, básicamente los cambios presentados en este tramo se refieren mas a espesores. Los sectores donde se presentan fallas de consideración son (K4+170; K4+237/243; K4+400/414; K4+475/493; K4+535/546; K4+577/586; K4+605/620; K5+058; K5+301; K5+316; K5+318), en K4+170 desprendimientos de 0.4 a 0.9 m de altura, en K4+535/546 se presento sobreexcavación de aproximadamente 1.17 m con caudal > 15 l/s, en K4+605/620 sobre excavación con un volumen de 3.8 m³, en K5+058 se presentan desplazamientos de 1 a 5 m con aperturas de 10 a 12 cm, en K5+316 se presenta sobreexcavación de 0.7 m de altura.

- (K5+467.9/K7+133.7) Limolita gris oscura, micácea, grano fino en toda la sección, intercalada con niveles de arenisca cuarcítica gris clara, fracturada con presencia de arcilla y películas de calcita, estratificación subhorizontal. Prácticamente desde este punto hasta pozo intermedio se presenta la misma descripción geológica, variando el espesor de la estratificación y el fracturamiento que pasa de poco a moderado. En cuanto a las fallas en este sector (K5+977/980; K6+056; K6+085; K6+265/266). Se debe resaltar que en la progresiva K5+970/980 aunque la roca es de buena calidad y no necesitó soporte, se presento flujo considerable que entra casi por todos lados de la sección con un caudal aproximado de 20 l/s.

2.4.3 Geología Estructural.

El estilo estructural se definió con base en la información geológico-estructural del informe de ELECTROWATT 1987 y en la interpretación de una imagen de satélite en falso color a escala 1:250000 del Parque Tunari; con esta base se estableció, de forma clara, un patrón estructural con orientación NW-SE, y se identificó nuevas fallas antes no reportadas. Las fallas se pueden observar en el mapa Geológico-Estructural y en el perfil longitudinal del Túnel, ver Anexos 2.1; 2.3 y 2.4.

2.4.3.1 Superficie.

Puesto que el proyecto Misicuni se encuentra en la parte media de la unidad morfo estructural conocida con el nombre de cordillera Central y Oriental, la Geología Estructural juega un papel importante porque es precisamente en esta parte donde el bloque paleozoico cambia bruscamente de rumbo, este cambio que sufren las unidades litoestratigráficas permite suponer la presencia de una zona de debilidad que podría ser corroborada por la actividad relativa de movimientos sísmicos que ocasionalmente se presentan en esta parte de la cordillera y cuyos movimientos son también vinculados a anomalías regionales relacionadas con la teoría de la tectónica de placas.

El cuadro estructural en la zona de estudio presenta un anticlinal, dos sinclinales, varias fallas longitudinales inversas y otras secundarias de tipo normal que tienen rumbos perpendiculares y diagonales a las estructuras principales y localmente plegamientos transversales.

Estos rasgos estructurales, son producto de los esfuerzos tectónicos hercínicos que fueron posteriormente modificados por el ciclo andino que produjo el fallamiento de reajuste que se traduce en la presencia de fallas normales y lineamientos que presenta la zona de estudio.

Las estructuras de mayor relevancia en la zona de estudio, se describen a continuación:

- ***Anticlinal de Misicuni.***

Aunque no se encuentra dentro de la zona de estudio es una estructura que ejerce gran influencia sobre el trazado del túnel, consiste en una estructura positiva que se extiende en forma longitudinal con rumbo general N 35° W.

Esta conformado por un flanco occidental que tiene un ángulo de buzamiento del orden de 55° a 60° en promedio, y su flanco oriental es más suave con ángulos menores, cuyos valores fluctúan entre 36° y 45°, conformando así un anticlinal asimétrico.

- ***Sinclinal Uyuni.***

Es de considerable importancia ya que el tramo bocatoma de embalse-pozo intermedio, atraviesa las rocas que conforman esta estructura. Morfológicamente se muestra como una gran planicie sobre elevada, donde el flanco occidental presenta un desnivel de más de 200 m. de altura con relación al flanco oriental del anticlinal de Misicuni, producto de la falla Misicuni, cuya traza fue aprovechada por el río Titiri.

Topográficamente se observa que este flanco está sobre elevado presentando un escarpe de falla que paulatinamente va disminuyendo hacia el sur es decir aguas arriba de l río Titiri.

El valor de los buzamientos que presentan las unidades que forman este sinclinal varían desde los 12° en los flancos hasta buzamientos horizontales en el núcleo del sinclinal..

- ***Fallas***

En la zona de estudio se han diferenciado dos sistemas principales de fallamiento. Una que se desarrollo casi simultáneamente al plegamiento principal, producto de los esfuerzos de empuje tangenciales (fallas longitudinales) que tienen un carácter inverso como es el caso de la falla de Misicuni. Otro sistema que corresponde a las fracturas y lineamientos cuyas trazas tienen un rumbo perpendicular y diagonal a las estructuras o rumbo de las capas, que corresponden a esfuerzos de reajuste que se traducen en fallas generalmente normales o directas con ángulos altos y rechazos relativamente pequeños, como se observa en los plano geológico-estructural, Anexo 2.1.

Es importante señalar que el diseño del drenaje de la zona responde a un control tectónico, donde la frecuencia de estos rasgos estructurales esta influenciada por también por la competencia o incompetencia de las diferentes formaciones rocosas.

- ***Diaclasas***

Estas fracturas que tiene origen tectónico están íntimamente ligadas a los movimientos orogénicos que afectaron la cordillera del Tunari y a la calidad petrológica de las diferentes unidades litológicas.

“Todas las unidades geológicas han sufrido diferentes cambios en sus propiedades mecánicas dependiendo por supuesto de la naturaleza de las rocas lo cual implica que todos los sitios de emplazamiento de las obras tendrán lugar en un macizo constituido por rocas sedimentarias, afectadas por discontinuidades geológicas con diferente grado de intensidad y espaciamiento”. Electrowatt 1988

2.4.3.2 Interior Túnel.

Como ya se ha comentado en la geología estructural superficial y en la geología del túnel, esta es una zona muy fallada y fracturada debido a esfuerzos de compresión y tensión como resultado de la formación de la cordillera. La falla Misicuni es una falla inversa que va paralela al eje del túnel entre bocatoma y pozo intermedio da origen a una serie de fallas normales perpendiculares a ella por ende también al eje del túnel con ángulos de buzamiento alto y rechazos relativamente pequeños.

Las fallas más significativas para este estudio son el lineamiento **Uyuni** que forma el cauce de la quebrada del mismo nombre, la falla **Jatun Huaykho** que al igual que la anterior conforma el cauce de la quebrada del mismo nombre, entre estas dos fallas se encuentra tres fallas que no tienen nombre pero se encuentran mapeadas en el plano geológico hecho por ELECTROWATT que fueron denominadas en este informe **X1**, **X2**, **X3** cuyas direcciones y ángulos de inclinación de se encuentran dentro de los siguientes rangos :

N60-75E / 60-80NW

También se encontró una falla perpendicular a la **Jatun Huaykho** y paralela al eje del túnel que no fue mapeada en el informe geológico y se le denominó **X4**, su ángulo de inclinación aproximado es 70-80SW. Ver perfiles geológicos, Anexos 2.3. y 2.4.

Generalmente las fallas están asociadas con el Terreno III.

2.5 Tipos de Terreno.

Para una descripción más sencilla del tipo de roca a medida que se perforaba el Túnel y según su índice de calidad de roca RQD, el material encontrado fue dividido en cuatro tipos de terreno:

2.5.1 Terreno I

Esta clasificación corresponde a macizos rocoso con roca sana poco fracturada y estable donde se pudo realizar excavación sin necesidad de colocar soporte, en este tipo de terreno se presentaron infiltraciones en algunos sectores, sin que esto afectara la estabilidad , en general es un terreno de Buena calidad

2.5.2 Terreno II.

Corresponde esta clasificación a macizos rocosos con rocas duras, estratificadas, fracturadas a moderadamente fracturadas. Pueden existir trazas de meteorización en algunos planos de discontinuidad , por lo que existió la tendencia a desprendimientos con el tiempo, las infiltraciones pueden ser altas sin afectar la estabilidad del Túnel, limitándose a producir pequeños desprendimientos locales. En este tipo de terreno se tomaron las siguientes medidas de afianzamiento:

- 5 cm de hormigón proyectado en la bóveda, después de cada avance
- Pernos de anclaje de acuerdo a planos, después de cada avance
- 5 cm de hormigón proyectado en las paredes colocados a no más de tres avances Las *Colocación de malla metálica de acuerdo a planos.

Este tipo de terreno puede considerarse de calidad regular.

2.5.3 Terreno III.

Corresponde a macizos rocosos formado por rocas estratificadas muy fracturadas, donde los planos de discontinuidades se presentan alterados, las infiltraciones si bien son de magnitud moderada , aumentan apreciablemente los desprendimientos.

Los medios de afianzamiento son:

- 5 cm de hormigón proyectado en toda la sección después de cada avance.
- Malla metálica mostrada en planos adherida ala primera capa de hormigón.
- Colocación de cerchas de acero estructural, después de cada avance.
- 5 a10 cm adicionales de hormigón proyectado en toda la sección después de cada avance.
- Colocación de pernos de anclaje de acuerdo a planos
- 5 cm adicionales de hormigón proyectado a no más de 10 avances.

2.5.4 Terreno IV.

Macizo rocoso con rocas blandas o alteradas, que por su baja resistencia con relación a la cobertura en el lugar producen empujes del terreno, que en presencia de un alineamiento inadecuado causan derrumbes en los costados, agrietamientos intensos en el revestimiento. Este tipo de terreno no se presentó en el tramo bocatoma de embalse-Pozo intermedio.

2.6 Hidrogeología.

El río Misicuni se constituye en el principal colector de la cuenca y, por tanto, en fuente de recarga, presentándose importantes aportes de agua durante y posterior a la excavación del Túnel. El caudal del río es casi nulo en épocas de estío, aumenta sensiblemente durante épocas de lluvias.

El tipo de drenaje existente en el arrea es rectangular, esporádicamente dendrítico y esta definido por las condiciones estructurales de la zona.

2.6.1 Unidades Hidrogeológicas.

Con base en el mapa hidrogeológico del valle central de Cochabamba elaborado por (Huaranca & Neumann-Redlin, 1998) y reconocimiento de campo, se realizó una proyección de dicho mapa para que abarcara la zona de presente estudio. Ver mapa Hidrogeológico Anexo 3.1.

Según la leyenda internacional, la ocurrencia de acuíferos se ha clasificado en tres unidades hidrogeológicas principales de acuerdo a sus características como reservorio de aguas:

2.6.1.1 Acuíferos Porosos no Consolidados (I)

Este tipo de depósitos puede constituir una importante fuente de agua subterránea según su extensión o interconexión hidráulica con otros cuerpos de agua, sin embargo existen depósitos no consolidados que constituyen una fuente de agua muy reducida

Acuíferos Extensos y productivos (Ia)

Cuaternario Aluvial (Qa): En la zona de estudio el sector con mayor importancia para el aprovechamiento de aguas subterráneas corresponde a cauces de río maduro desarrollados principalmente a lo largo del río Misicuni, pues su fácil percolación y rápida recarga por el río que desciende de la cordillera, así como la gran conductividad hidráulica del acuífero, atribuyen a esta unidad la mayor importancia para el aprovechamiento de aguas subterráneas.

Acuíferos Locales Discontinuos de Productividad Moderada (Ib)

Terrazas Aluviales de ríos de pendientes altas (Qt): Comprende sedimentos de textura gruesa como cantos gravas y arena, que reflejan actividad fluvial. Esta unidad tiene un comportamiento de acuífero libre donde el nivel freático constituye el límite superior de saturación, Sin embargo por su reducida extensión no son una unidad de interés para el aprovechamiento. A esta unidad pertenecen los cauces de los ríos: Tirita, Jactan Huaykho, Uyuni, Serkheta.

2.6.1.2 Acuíferos en Roca Fracturada (II).

Esta unidad la constituyen principalmente areniscas calcares y margas, aparte de que no constituyen rocas de gran importancia para el aprovechamiento de aguas no se encuentran aflorando en la zona, por este motivo esta unidad no es mapeada.

2.6.1.3 Acuíferos Locales y Limitados o Regiones sin Agua Subterránea en Cantidades Apreciables (III).

Acuíferos menores con recursos de aguas subterránea locales y limitados (IIIa)

Formación San Benito (A): esta formación está compuesta por cuarcitas, areniscas y limolitas con permeabilidad secundaria debido a la fracturación producto de procesos tectónicos y ocupa la parte central de la zona de estudio.

Depósitos Coluvial (Qc), Coluvio glacial (Qcg), Fluvio glacial (Qfg) y Morrénicos (Qm): a esta unidad corresponden los depósitos de glaciación caracterizados por bloques y gravas en matriz arcillosa, estos depósitos se encuentran alrededor de los 4000 m.s.n.m. y son producto de la glaciación del Holoceno inferior en clima de bajas temperaturas y precipitaciones relativamente altas.

Acuíferos locales particularmente en áreas fracturadas, o acuíferos a profundidad no extraídos (IIIb)

Formación Independencia (E): Aflora en la esquina suroccidental de la zona y consiste de Pizarras y lutitas intercalados con delgados bancos de arena, no tiene gran importancia como acuífero.

Formación Capinota Unidades (C1,C2): Compuesta por pizarras intercaladas con delgados bancos de areniscas, al igual que la Formación Anzaldo, no presentan condiciones favorables para la extracción de aguas subterráneas.

Formación Anzaldo unidades (B1, B2): Se componen de limolitas, niveles de areniscas, lutitas y pizarras y no presentan condiciones favorables para la extracción de aguas subterráneas.

Formaciones Uncía (Su) y Cancañiri (Scc): Afloran en la parte nororiental de la zona , consisten de lutitas, limolitas con escasas intercalaciones de areniscas, presentan pocas posibilidades de extracción de aguas subterráneas

3 MARCO TEÓRICO.

3.1 Sistema de Información Geográfico SIG

Es un sistema informatizado de almacenamiento, análisis y recuperación de datos en el que los datos se hallan identificados por sus coordenadas geográficas (Norte, este). Además de los primarios, es posible utilizar un SIG para calcular valores derivados: Los datos se extraen normalmente de mapas, mientras que los valores derivados pueden presentarse en forma de mapas.

Aranoff (1989), en términos más concretos lo considera: Un sistema informatizado que ofrece cuatro tipos de posibilidades para manejar datos georeferenciados:

Entrada de datos

Manejo de datos (Almacenamiento y búsqueda)

Manipulación y análisis

Salida de datos

El objetivo general de un Sistema de Información Geográfico es el de ayudar y asistir durante la toma de decisiones espaciales para el manejo y conservación efectiva de los recursos naturales. El conocimiento básico sobre localización, cantidad y disponibilidad de recursos naturales es indispensable para la planificación más racional, el desarrollo y explotación más inteligente de los recursos.

3.2 Porosidad.

Un medio poroso está formado por un agregado de granos entre los cuales existe espacios vacíos que pueden ser ocupados por un fluido; estos espacios vacíos se llaman poros.

El medio poroso puede ser consolidado o no consolidado según que exista o no un cemento que aglutine y ligue las diversas partículas integrantes, o se establezca alguna conexión entre las mismas.

La porosidad total de rocas compactas puede ser afectada notablemente por la meteorización y el fracturamiento, por descompresión y esfuerzos tectónicos, los cuales tienden a elevarla.

3.3 Infiltración.

La infiltración se produce en el terreno por la acción conjunta de dos fuerzas, a saber la gravedad y la atracción molecular, las que pueden actuar en un mismo sentido o bien en forma opuesta, según las circunstancias.

La magnitud de la infiltración y por lo tanto de la alimentación de las napas subterráneas, se ve influida por dos tipos de condiciones; las que dicen relación con las precipitaciones, que constituyen la fuente misma de origen del agua, y las que dicen relación con las condiciones del terreno, que son las responsables de las mayores o menores facilidades existentes para la infiltración y que determinan finalmente la proporción de las precipitaciones que pueden llegar a constituir una recarga de las napas subterráneas. En este segundo tipo deben incluirse, además, las condiciones geológicas del subsuelo que son las que fijan la existencia y potencia de rellenos permeables, es

decir, determinan la capacidad del subsuelo para recibir y regular el agua proveniente de las infiltraciones.

De acuerdo con los conocimientos que se tienen del ciclo hidrológico, las precipitaciones que caen sobre la tierra siguen distintos caminos, los que en rasgos muy generales pueden resumirse en: una parte no alcanza a llegar al suelo siendo retenida por el follaje de la vegetación, esta parte que recibe el nombre de intercepción, es devuelta nuevamente a la atmósfera por evaporación.

La parte que llega al suelo se mueve a través de la superficie de éste en un proceso designado como infiltración. Si la intensidad de las precipitaciones sobrepasan la capacidad de infiltración del terreno, se produce un movimiento de agua por su superficie, conocido con el nombre de escurrimiento superficial, cuyo caudal en cada instante es igual a la diferencia entre la intensidad de la precipitación y la capacidad de infiltración del suelo. Del agua infiltrada en el terreno, una parte vuelve por capilaridad a la superficie donde se evapora, o bien es extraída por las raíces de las plantas y utilizada en su proceso de transpiración.

Del resto del agua infiltrada una parte queda destinada a completar la “capacidad de retención” del suelo en la zona no saturada e incluso su capacidad capilar ubicada inmediatamente sobre el nivel de saturación, mientras el saldo continúa su descenso por acción de la gravedad pasando a constituir lo que ya hemos designado como la recarga de las napas subterráneas.

3.4 Tipo de Acuíferos.

Según la leyenda internacional, la ocurrencia de acuíferos se ha clasificado en tres unidades hidrogeológicas principales de acuerdo a su porosidad:

- *Acuíferos porosos no consolidados*, los recursos de agua subterránea más importantes se encuentran en este tipo de depósitos, ubicados en valles intermontanos y el altiplano
- *Acuíferos con porosidad secundaria o fisurados*, acuífero de productividad media a baja. Entre ellos son considerados de interés para el aprovechamiento de aguas subterráneas, las rocas calcáreas en proceso de Karstificación, al igual que algunas rocas volcánicas.
- *Acuíferos locales y limitados*, se presentan en rocas porosas o fisuradas de productividad baja a nula, aunque pueden ser una fuente importante de recarga, (esta puede ser posiblemente la situación que se presenta en la zona de estudio)

3.5 Permeabilidad en Acuíferos Fisurados.

Los medios permeables por fisuración son también de gran interés, aunque su estudio no pasa de ser meramente cualitativo o se basa en leyes generales cuyos detalles de aplicación no está suficientemente definido.

Muchas rocas consolidadas, aún teniendo una porosidad relativamente elevada, se comporta como prácticamente impermeable en sí misma, y el agua solo puede circular por grietas y fisuras. En principio es posible asimilar las fracturas a planos de paredes rugosas, y con una cierta anchura medida que las caracteriza.

3.6 Recarga de Acuíferos.

Se define como el volumen de agua que pasa a través de la zona no saturada, alcanzando al acuífero, durante un periodo específico de tiempo. La cantidad de la recarga tiene efectos significativos en los procesos físicos, químicos y biológicos que se producen en el sistema suelo-roca-agua subterránea. La recarga se expresa usualmente como recarga anual o neta.

Es un atributo de primera importancia por que se utiliza para establecer la capacidad de restauración o renovación de un acuífero Anersen y Gosk (1987), también se define como el volumen de agua almacenada en un acuífero (m³) dividido por el volumen de la recarga por unidad de tiempo, normalmente expresado en años.

3.7 Composición Mineralógica del Agua.

El conocimiento de las propiedades químicas de los minerales en el agua constituye un paso importante para determinación su posible origen y procedencia. Algunas de las propiedades o características químicas, como por ejemplo la solubilidad, son básicas para la realización del Análisis Químicos.

3.7.1 Ion cloruro Cl.

Es una de las sales que están presentes en mayor cantidad en todas las fuentes de agua.

Sales en general muy solubles. Muy estables en disolución y muy difícilmente precipitable. No se oxida ni se reduce en aguas naturales. En general va asociado con el ion Na; en especial en aguas muy salinas.

El sabor salado del agua, producido por los cloruros, es variable y dependiente de la composición química del agua, cuando el cloruro está en forma de cloruro de sodio, el sabor salado es detectable a una concentración de 250 ppm de NaCl. Cuando el cloruro está presente como una sal de calcio ó de magnesio, el típico sabor salado de los cloruros puede estar ausente aún a concentraciones de 1000 ppm. La presencia de este mineral en las aguas a estudiar es un buen elemento para correlacionar aguas en superficie y a profundidad

3.7.2 Ion calcio Ca.

Es el 5° elemento en orden de abundancia en la corteza terrestre, su presencia en las aguas naturales se debe al su paso sobre depósitos de piedra caliza, yeso y dolomita. Sales desde moderadamente solubles a muy solubles. Es muy fácil de precipitar como CO₃Ca. Su química va muy asociada a la de los iones CO₃H y CO₃ en muchas aguas naturales, pudiéndose precipitar y disolver con facilidad al cambiar el pH o la presión parcial del CO₂.

La cantidad de calcio puede variar desde cero hasta varios cientos de mg/l, dependiendo de la fuente y del tratamiento del agua.

Las aguas que contienen cantidades altas de **calcio y de magnesio**, se les da el nombre de " aguas duras ".

3.7.3 Ion sodio Na.

Es el sexto elemento en orden de abundancia en la corteza terrestre, solubilidad muy elevada y muy difícil de precipitar es por esto, que casi siempre esta presente en la mayoría de las aguas naturales. Es afectado fácilmente por el cambio de bases. Suele ir asociado al ion Cl, aunque no siempre sucede así. Las aguas naturales con elevado contenido de Na suelen tener contenidos elevados en F. Su cantidad puede variar desde muy poco hasta valores apreciables.

Altas concentraciones de sodio se encuentran en las salmueras y en las aguas duras que han sido ablandadas con el proceso de intercambio ciclo sodio.

3.7.4 Ion potasio K.

Es el séptimo elemento en orden de abundancia en la corteza terrestre, aunque su presencia en las aguas naturales rara vez ocurre en concentraciones mayores de 20 mg/l. Solubilidad muy elevada y difícil de precipitar. Es afectado fácilmente por el cambio de bases y es absorbida de forma muy poco reversible por las arcillas en formación (paso de montmorillonita a illita), para formar parte de su estructura.

3.7.5 Ion Magnesio Mg.

Presenta propiedades similares a las del ion calcio pero más soluble y algo más difícil de precipitar.

Se encuentra en concentraciones entre 1 y 100 ppm en aguas dulces, pudiendo llegar a veces a algunos miles de ppm en aguas salinas o salmueras.

3.7.6 Ion Sulfato SO₄.

Sales moderadamente solubles a muy solubles. En agua pura el SO₄Ca satura 1500 ppm, y puede llegar hasta 7200 ppm en aguas salinas. En medios reductores con abundante materia orgánica puede sufrir una reducción bacteriana, pero en general es estable. Es difícilmente precipitable ya que las sales solubles de Sr y Ba son muy escasas en la naturaleza.

Se encuentran en concentraciones entre 2 y 50 ppm en aguas dulces, pudiendo llegar a 500 en aguas salinas si existe Ca y hasta 200000 si está asociada con Mg y Na en ciertas salmueras.

3.7.7 Iones Bicarbonato y Carbonato HCO₃, CO₃.

Existe una profunda relación entre el CO₂ gas, CO₂ disuelto, HCO₃, CO₃ y pH. Estos iones comunican alcalinidad al agua en el sentido que dan capacidad de consumo de ácido al crear una solución tampón. No son oxidables ni reducibles en aguas naturales, se pueden precipitar con mucha facilidad como CaCO₃.

Concentraciones. El ion HCO₃ varia entre 50 y 350 ppm en aguas dulces pudiendo llegar a veces hasta 800 ppm. El CO₃ está en concentraciones mucho menores y si el pH < 8.3 se le considera cero. En aguas salinas con pH > 8.3 puede haber cantidades importantes, hasta 50 ppm en algunas aguas naturales.

3.7.8 Ion Litio, Li.

Sales bastante solubles y muy poco retenidas por el terreno, se encuentra en concentraciones generalmente entre 0.01 y 1 ppm, a veces hasta 20.

3.7.9 Acidez.

Capacidad de un agua para neutralizar bases. Es raro que las aguas naturales tengan acidez. Puede producir acidez la oxidación de sulfuros, hidrólisis de iones del Fe, Al y del NH_4 . La oxidación de sulfatos precisa mucho oxígeno y solo puede dar acidez importante en las proximidades del nivel freático y en medio no saturado.

3.7.10 Alcalinidad.

Capacidad de un agua para neutralizar ácidos y medir el contenido de iones hidrolizables.

Las alcalinidades miden el efecto de los iones HCO_3 y CO_3 y también de los OH, H_3SiO_4 , PO_4 , y otros.

3.7.11 Aplicación de los polígonos de Piper.

Son prácticas que permiten aplicar con facilidad el manejo de las relaciones entre los iones, el manejo y estudio de análisis químicos puede simplificarse con el empleo de gráficos y diagramas en especial cuando se trata de hacer comparaciones entre varias muestras. Estas gráficas y diagramas pueden poner de relieve variaciones temporales o bien resaltar relaciones entre los iones de las diferentes muestras.

Las representaciones que tienen por objeto resaltar la composición iónica de un agua para poder compararla con otras agua son los diagramas como los de Piper y Stiff.

En la Figura N° 4. Se muestra como interpretar de acuerdo a la ubicación de los puntos en los polígonos de Piper.

Si se quiere saber cuantitativamente la composición de la muestra en uno de los componentes, basta trazar por el punto respectivo una paralela al lado opuesto del vértice que representa a ese componente y leer en el lado que representa fracciones del mismo el % que corresponde.

En la Figura N° 4, se deduce la ubicación de las concentraciones de los elementos aniones (HCO_3 , CO_3 , SO_4 , Cl) y cationes (Na, K, Ca, Mg) que plotea el modelo, lo cual permite establecer una interpretación clara sobre la calidad y el tipo de aguas al que representa, más la concentración mayoritaria que se tiene.

3.7.12 Aplicación de los diagramas de Stiff

Consiste en tomar sobre semirectas convergentes o paralelas, segmentos proporcionales a cada ion, y unir los extremos dando así formas poligonales. Sobre cada semirecta se toma un ion o bien un catión simultáneamente. Figura N° 5.

El más conocido es el diagrama de polígonos de Stiff, en este diagrama se tienen cuatro rectas paralelas igualmente espaciadas entre cortadas por una normal, dando así cuatro semirectas izquierdas (campo de cationes) y cuatro semirectas derechas. (campo de aniones)

Sobre cada recta se toma un segmento proporcional a los meq/l de ion correspondiente y se unen los extremos dando lugar a la formación de un polígono representativo.

3.7.13 Espectrometría de Emisión Atómica en Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP).

La espectrometría por inducción de plasma es una de las técnicas más versátiles para el análisis de muestras geológicas y ambientales, incluyendo rocas, minerales, aguas, suelos, sedimentos, etc., siendo probablemente el primer método práctico para la determinación simultánea de un gran número de elementos trazas con la exactitud requerida para muchos estudios petrológicos y geoquímicas. Con el desarrollo de

Técnicas de concentración es posible hoy medir un gran número de elementos en niveles traza y ultratrazas.

El plasma de acoplamiento inductivo (*Inductively Coupled Plasma, ICP*) es una fuente de ionización a presión atmosférica que permite la introducción continua de muestras líquidas (mediante nebulización), sólidas (mediante ablación láser) o gaseosas (acoplamiento Cromatografía de Gases ICP-MS o generación de hidruros).

La muestra introducida en el plasma de argón sufre temperaturas superiores a los 6000 grados centígrados lo que conlleva la ruptura de todos los enlaces químicos (atomización) y la ionización de los elementos en función de su potencial de ionización.

La capacidad del ICP-MS de medir distintos isótopos de un mismo elemento encuentra aplicación en la medida de relaciones isotópicas y en la posibilidad de utilizar la técnica del análisis por dilución isotópica cuando se requieren resultados de alta exactitud y precisión.

El fundamento de la dilución isotópica es sencilla, a un número desconocido de átomos de un elemento cuyas abundancias isotópicas son conocidas (o medibles), o **muestra**. A esta se le añade un número conocido de átomos del mismo elemento pero que posea distintas abundancias isotópicas (conocidas o medibles), **elemento enriquecido** o **spike**, y las nuevas abundancias isotópicas se miden en la **mezcla** por Espectrometría de Masas. De los datos de abundancias isotópicas en la muestra, el *spike* y la mezcla se puede calcular la concentración del elemento en la muestra original.

4 METODOLOGIA

La investigación se dividió en dos fases principales.

4.1 Fase I

Esta fase involucra técnicas avanzadas del Sistema de Información Geográfica ILWIS en el que se aplicó un modelo de análisis espacial de “*Permeabilidad en medios fisurados*”. Esta fase se realizó siguiendo el esquema que muestra la Figura N° 6.

Los procesos que se siguieron en esta fase fueron:

- Interpretación, análisis, y verificación en campo de la información Geológico-estructural.
- Interpretación, análisis, y verificación en campo de la información de hidrogeología tanto en superficie como al interior del túnel,
- Delimitación de zonas afectadas por posible infiltración debido a fracturamiento y permeabilidad de las formaciones que afloran en la zona de estudio de acuerdo a interpretación de imágenes satelitales generando mapas que se describen en el capítulo de análisis espacial.
- En esta reclasificación también se tomó en cuenta el análisis geológico e hidrogeológico y datos hidrológicos tomados de otros estudios, de esta manera se definió el potencial hidrogeológico de las rocas en la zona de estudio estimando su recarga.

4.2 Fase II.

En esta fase se hizo el estudio y análisis hidrogeoquímicos del tipo de agua tanto en superficie como en el interior del Túnel, de acuerdo a los siguientes pasos: Ver Fig.N°7.

4.2.1 Muestreo y análisis de laboratorio.

Con la finalidad de establecer una caracterización de la composición mineralógica de aguas en superficie. La determinación de los puntos de muestreo se basó teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Inventario de vertientes de acuerdo a información disponible, Tabla N° 2. y Anexo3.2.
- Puntos de muestreo elegidos de acuerdo a la distribución espacial de las vertientes.
- Fuentes puntuales (vertientes con agua, que se ubicaran próximas al eje del túnel).
- Accesibilidad física.

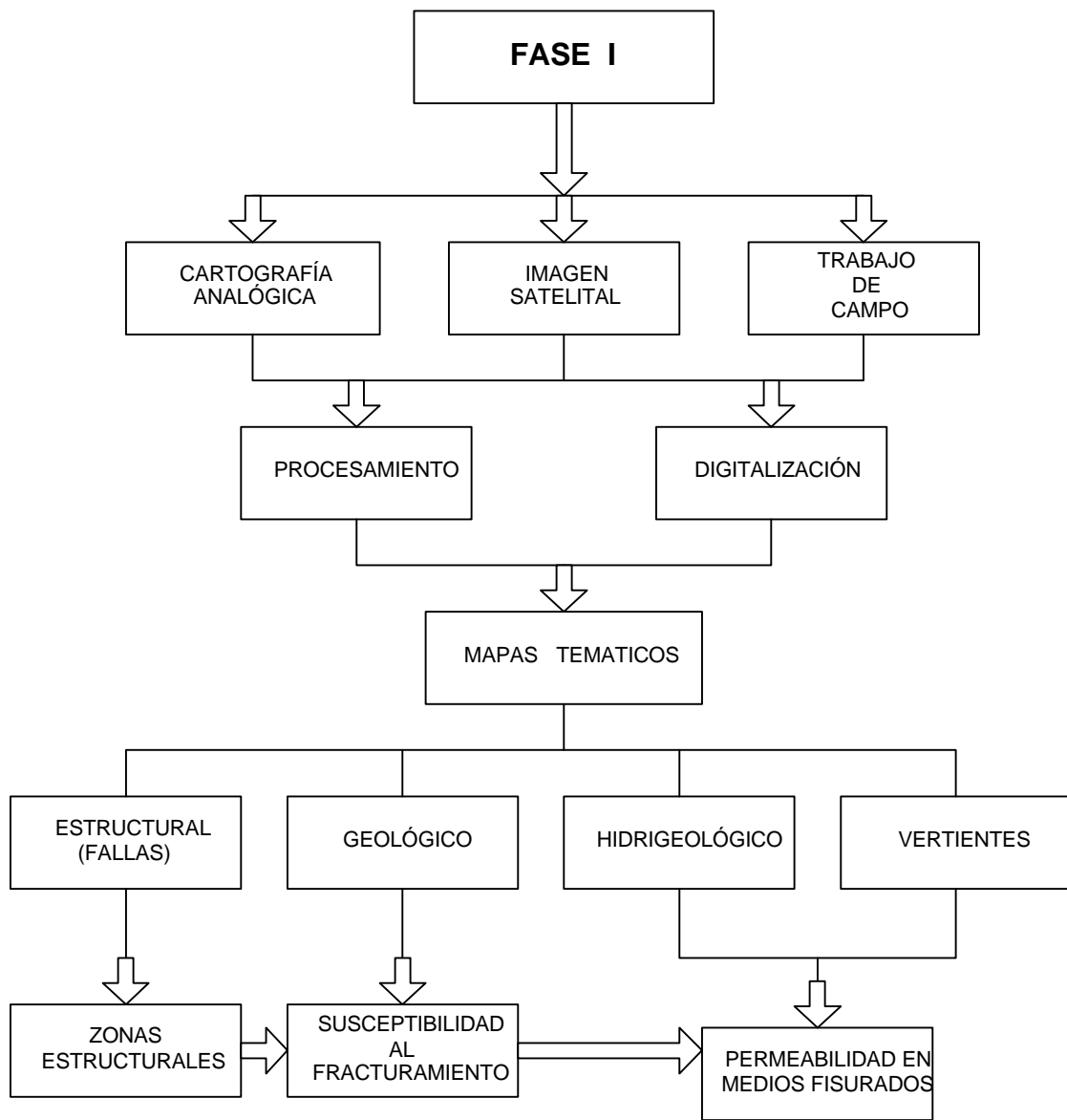


Figura N°6. Representación esquematizada de la Fase I

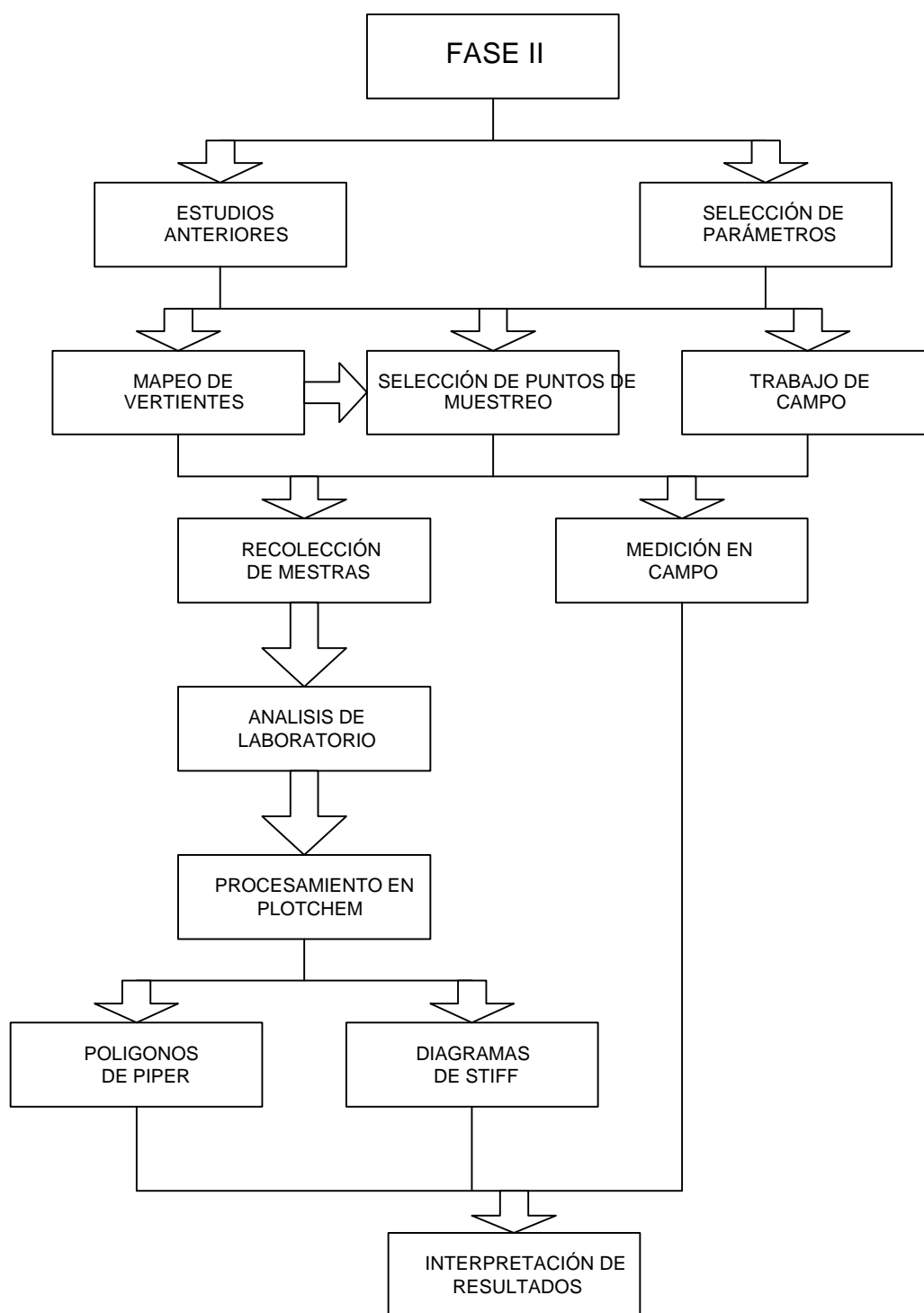


Figura N°7. Representación esquematizada de la Fase II

Nº	X	Y	Observación	Nº	X	Y	Observación
1	787589.00	8101985.32	Seca	22	787939.87	8101796.44	Seca
2	787653.45	8102017.54	Seca	23	787630.72	8102003.82	Seca
3	787881.97	8102152.31	Seca	24	787692.84	8102014.47	Seca
4	787874.64	8102092.25	Seca	25	788026.50	8101906.20	con agua
5	788116.34	8102093.71	Seca	26	787517.41	8101969.51	con agua
6	786877.08	8104211.88	Seca	27	788144.30	8102105.75	Seca
7	786888.80	8104288.05	Seca	28	787949.98	8101782.25	Seca
8	789393.69	8103985.56	con agua	29	788154.75	8101494.74	con agua
9	789237.99	8103565.00	con agua	30	788022.75	8101763.28	con agua
10	788306.04	8101596.40	con agua	31	788028.45	8101770.38	con agua
11	788288.83	8101610.32	con agua	32	788096.38	8101570.25	con agua
12	788213.02	8101583.95	con agua	33	788025.85	8101804.31	Seca
13	788048.96	8101652.06	con agua	34	788048.24	8101706.14	con agua
14	788043.10	8101725.31	con agua	35	788195.68	8101597.11	Seca
15	786811.17	8103913.05	con agua	36	788265.45	8101614.87	con agua
16	786295.54	8103738.00	con agua	37	788254.88	8101631.96	Seca
17	786600.23	8104083.70	con agua	38	788994.22	8100316.11	Seca
18	788007.98	8101700.79	con agua	39	789095.80	8100388.47	Seca
19	787919.98	8101782.22	con agua	40	789002.66	8100249.76	con agua
20	787917.84	8102166.55	con agua	41	788964.87	8100197.50	con agua
21	787908.42	8102139.27	con agua				

Tabla Nº 2. Inventario de vertientes.

Superficie (Vertientes)			Interior Túnel	
Cod. Lab. Umss	X	Y	Cod. Lab. Umss	Progresiva
1812	788213	8101584	1885	K0+970/977
1813	788289	8101610	1886	K2+150/162
1814	786811	8103912	1887	K2+612/617
1815	789393	8103982	1888	K5+660/680
1816	789238	8103565		
1889	788291	8101610		
1890	786813	8103914		

Tabla Nº 3. Ubicación espacial y al interior del Túnel de los puntos muestreados.

Los puntos seleccionados para el muestreo fueron georeferenciados con navegador GPS. Ver Anexo 3.2. Una vez seleccionados dichos puntos se realizaron dos visitas de campo.

La primera, el 30 de octubre de 2001 en la que se tomaron muestras en 5 puntos, todos ellos en superficie con las siguientes características cantidad volumétrica de 2 litros con testigo de 500 ml para ser analizadas en el Lab. de aguas de la UMSS: Los parámetros fueron seleccionados de acuerdo a:

- ❑ Disponibilidad y calidad de los datos.
- ❑ La aplicación y conexión con los problemas analizados.
- ❑ La cobertura geográfica.
- ❑ La importancia para el análisis.

Estos parámetros se muestran en la Tabla N.4.

Parámetro	Tipo de parámetro	
	Físico	Químico
Temperatura (°C)	X	
Conductividad (S/cm)	X	
Acidez		X
Alcalinidad		X
Cationes: K ⁺ , Cl ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Li SO ₄ , HCO ₃ , CO ₃ .		X
pH		X

Tabla Nº 4. Parámetros seleccionados para comparar composición mineralógica de las aguas de las vertientes y del túnel

De estos parámetros seleccionados La temperatura, la conductividad y el pH fueron también medidos en campo, debido a que sus valores cambian y/o son susceptibles de cambiar en el tiempo y a la posibilidad de ser expuestos a la atmósfera lo que podría hacer variar los valores.

El día 8 de noviembre de 2001 se realizó la segunda visita de campo donde se hizo el muestreo de 6 puntos, 2 de ellos en superficie que coinciden con 2 de los puntos muestreados en la primera visita y los 4 puntos restantes fueron muestreados al interior del Túnel.

Las muestras fueron colectadas en 2 recipientes de 500 ml c/u por cada punto, uno de los cuales estaba preparado con reactivos químicos (HNO_3) para ser analizadas en el laboratorio del ITC de Holanda.

En esta segunda visita se recogieron muestras adicionales en cada punto para ser analizadas en el laboratorio de la UMSS, las características y parámetros analizados de estas muestras fueron las mismas de la primera visita.

Una vez obtenidos los resultados de los análisis (ver Tabla N° 7 N° 8 y 9¹ y Anexo 7²) se procedió a introducir los datos en el Software PLOTCHER con el fin de obtener representaciones gráficas del tipo de agua mediante los diagramas de Piper y Stiff (Ver Anexo 6) para su posterior interpretación.

En el Laboratorio de la UMSS se realizaron análisis Físico-Químicos básicos a los siguientes parámetros (Conductividad, Acidez, Alcalinidad, Ca, Cl, Mg, K, Na, SO_4 , CO_4 , HCO_4) como se muestra en la Tabla N.4.

En el laboratorio del ITC, a las muestras con HNO_3 se les realizó análisis de acuerdo a los parámetros (Ca, Na, K, Mg, Cl, SO_4 y Li), mientras que a las que fueron enviadas sin reactivos se les analizó (T° , CE, pH y TDS), con el método Espectrometría de Emisión Atómica en Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP).

Como etapa final se relaciono la parte de análisis espacial con la parte hidrogeoquímica para dar respuesta al planteamiento del problema

¹ Análisis hecho en el laboratorio de aguas del ITC, Holanda

² Análisis hecho en el laboratorio de aguas de la UMSS

5 ANALISIS Y RESULTADOS.

5.1 Geológico Estructural.

Para realizar este análisis se elaboraron dos perfiles o cortes geológicos, uno longitudinal desde bocatoma hasta pozo intermedio y el otro transversal en la progresiva K4+830, buscando relacionar en ambos casos las vertientes con agua en zonas de fallas.

En el primer perfil longitudinal, ver Anexo 2.3., se muestran las fallas que a consideración del autor son las más relevantes. Se puede citar el caso de la vertiente N° 1890³ la cual se encuentra entre dos fallas⁴ normales, perpendiculares al eje del túnel. En ella la proyección de estas fallas a profundidad aparecen aproximadamente entre las progresivas K1+800 (X1) y K2+400 (X2) que de acuerdo con la descripción geológica corresponde a una zona fracturada con relleno de material brechado fino, lo cual explica las bajas infiltraciones mencionadas en la descripción hecha por la empresa consultora.

En el segundo perfil A-A' K4+830, ver Anexo 2.4., se muestra una falla normal paralela al eje del Túnel muy cerca de varias vertientes con agua,. En la proyección hacia profundidad se puede ver que la falla pasa por un lado del Túnel sin contacto directo, lo que indica que la perforación no afectó estas vertientes debido a que en la descripción geológica del Túnel de la empresa consultora no se hace mención de fallas de este tipo.

La Falla Jatun Huaykho que da origen al río del mismo nombre, es una falla normal perpendicular al eje del Túnel con un alto ángulo de inclinación entre 70 y 80° NW y cerca de un gran numero de vertientes secas. La proyección de esta falla a profundidad se sitúa aproximadamente entre K4+400 y K4+550, en el informe geológico del túnel se describe como una zona bastante fracturada, considerando estos aspectos se puede afirmar que los caudales de infiltración apreciables observados son un alto indicador del efecto de perforación del Túnel sobre la perdida de aguas de algunas vertientes.

La proyección de las fallas desde superficie a profundidad se hizo utilizando la formula:

$$\text{Tan } \alpha = \text{Tan } \beta * \text{Sen } \varpi \quad \text{eq. 1}$$

Donde:

α = Angulo de buzamiento aparente

β = Angulo de buzamiento real

ϖ = Angulo de sección.

³ Vertiente muestreada, ubicada en las coordenadas X:786813 y Y:8103914

⁴ Denominadas en el mapa geológico de esta investigación como X1 y X2

5.2 Modelo Espacial de Permeabilidad en medios fisurados

El objetivo de esta sección es mostrar el modelo utilizado para encontrar áreas o zonas en la cuales la permeabilidad se vea favorecida por la perforación del Túnel Misicuni.

La densidad, concentración y tipo de las fallas permitieron generar el mapa “**Zonas Estructurales**” el cual toma en cuenta el análisis de cada uno de los parámetros antes mencionados para su clasificación. Ver Tabla N° 3.

MAPA DE ZONAS ESTRUCTURALES	
Densidad	Descripción
Alta	Esta zona comprende básicamente la falla Misicuni por ser dicha estructura la que domina tectónicamente la zona de estudio. Y un grupo concentrado de Fallas diagonales y perpendiculares a la falla Misicuni y al eje del túnel. Esta zona se ubica en la parte norte de la área de estudio sobre el eje del túnel y a lo largo del Río Misicuni así como en otras zonas aisladas.
Media	A este grupo pertenecen zonas de falla o cercanas a fallas pero que no están Concentradas.
Baja	A este grupo pertenecen zonas cercanas a fallas que no están directamente influenciadas por ellas.
Nula	En esta zona se encuentran grupos de fallas aisladas o sin presencia de fallas

Tabla N.5 Descripción de la clasificación del mapa de Zonas Estructurales.

El cruce del mapa de “**Zonas Estructurales**” con el mapa **Geológico** permitió relacionar las unidades temáticas de cada uno de ellos en función del grado de fracturamiento asociado. Donde de acuerdo a la combinación entre las unidades geológicas y las zonas de estructurales se reclasificó en otro mapa el cual indica la **susceptibilidad al fracturamiento**. (Muy Alta, Alta, Moderada, Baja y Muy baja). Ver Anexo 5.1.

Esta reclasificación se hizo teniendo en cuenta la descripción de las formaciones hecha en el capítulo de geología, de modo que el cruce de una roca competente con una zona de Alta densidad de fallas que en la mayoría de casos debería dar una susceptibilidad Alta o Muy alta requiere de un análisis complementario que tome en cuenta el tipo de material que rellena las fracturas según la descripción de interior Túnel, es decir que si la fractura con las características antes mencionadas esta rellena de material fino arcilloso la susceptibilidad debe ser clasificada como baja a Moderada y en ocasiones hasta muy baja. La Tabla N.6. Muestra un resumen de los tipos de susceptibilidad seleccionados para este trabajo.

MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD AL FRACTURAMIENTO	
Susceptibilidad	Descripción
Muy alta	las zonas afectadas directamente por la falla Misicuni, que corresponde básicamente al cuaternario aluvial (Qa) y la formación San Benito (A) en profundidad.
Alta	Resulta de combinar una concentración alta en el mapa de zonas estructurales con rocas competentes de la formación San Benito (A) y algunos niveles de las formaciones (Sc) y Anzaldo (B1).
Moderada	Asociación de rocas competentes algunos niveles de las formaciones San Benito (A), Cancañiri (Sc), Uncía (Su), con zonas de media a baja concentración de fallas.
Baja	Niveles de pizarras, lutitas y arcillas de cualquier formación combinados con densidad o concentración de fallas moderada o alta.
Muy baja	Se presenta generalmente en niveles arcillosos, independientemente del tipo de densidad o concentración de fallas

Tabla N° 6. Descripción de las unidades del mapa de susceptibilidad al fracturamiento

Tomando en cuenta el tipo de Susceptibilidad al Fracturamiento, las unidades hidrogeológicas, y los puntos de infiltración al interior del túnel⁵, se estableció una relación en cuanto a la permeabilidad de esta unidad, esto permitió generar el mapa final de “**Permeabilidad en medios fisurados**”, en la que se clasifica la permeabilidad como (Muy permeable, Permeable, Moderadamente permeable y Baja permeabilidad).

Para ilustrar como se clasificó este mapa se puede observar que la zona aledaña al Pozo Intermedio fue clasificada como muy permeable debido a que en el mapa Hidrogeológico representa un buen acuífero, en el mapa de Susceptibilidad al Fracturamiento representa una Muy alta susceptibilidad y es una de las zonas en las cuales se presenta mayor infiltración en el interior del Túnel como lo indica el perfil longitudinal del Túnel (Anexo 2.3 y la Tabla N° 8.).

Cabe aclarar que no se esta hablando de permeabilidad como producto de porosidad primaria (espacios intergranulares), sino de la permeabilidad producto de la porosidad secundaria (espacios debido a fisuras, diaclas, fracturas en general).

⁵ Parametro que se utilizo sobre todo para las zonas aledañas al eje del tunel

MAPA DE PERMEABILIDAD EN MEDIOS FISURADOS	
Permeabilidad	Descripción
Muy permeable	Zonas de intenso fallamiento y cuaternarios aluviales (Qa), esta zona se encuentra directamente asociada con la falla Misicuni.
Permeable	Material competente bastante fracturado como resultado de concentración de fallas en determinadas zonas y con escaso material fino rellenando las fracturas.
Moderadamente Permeable	Material con tamaño de grano medio a fino que impide el libre flujo del agua por el fracturamiento y cizallamiento producto de la actividad tectónica en la zona, este tipo de permeabilidad no está asociado a una sola formación.
Baja Permeabilidad	Generalmente se presenta en pizarras, lutitas cuyas fracturas están rellenas de material arcilloso que actúa como sello.

Tabla N.7. Descripción de las unidades del mapa de Permeabilidad en Medios Fisurados.

Los mapas de Zonas Estructurales, Susceptibilidad al Fracturamiento y Permeabilidad en Medios Fisurados, se pueden observar en el Anexo 5.1.

5.3 Hidrogeología e Hidrogeoquímica

5.3.1 Hidrogeología

Durante la visita que se realizó al Túnel se encontraron infiltraciones con aportes de agua de relativa consideración, se encontró un caudal bombeado a la fecha de aproximadamente 200 l/s en bocatoma de embalse. En la Tabla N°8. Se muestran las progresivas de los puntos en el interior del Túnel en las cuales se encontraron infiltraciones con los caudales aproximados de mayor importancia.

Progresiva	Q.aprox (l/s)	Progresiva	Q.aprox (l/s)
K0+970/977	1	K5+460/470	5
K2+150/162	0.5	K5+630	10
K2+612/617	20	K6+660/680	5
K2+236/242	5	K5+970/980	20
K3+819/840	4	K6+070/090	10
K4+285	5	K6+270/295	20
K4+539/545	15	K6+470/80	10
K4+590/600	5	K6+800	10

Tabla N°8. Caudales aproximados de infiltración en el interior del Túnel.

De acuerdo con la descripción litoestratigráfica del interior del Túnel la roca atravesada está constituida básicamente por 2 formaciones geológicas, cuya descripción ya ha sido hecha en el capítulo de geología, sin embargo se puede decir que el túnel atraviesa en general por areniscas gris blanquecinas y gris verdosa, de grano fino a medio, matriz arcillosa. Limolita gris verdosa micácea. Pertenecientes a la formación San Benito (A) y limolitas gris verdosas muy micáceas formando paquetes masivos y gruesos, intercalados con bancos de areniscas también gris verdosas correspondientes a la formación Anzaldo (B1). Que debido a la intensa actividad tectónica de la cordillera se presentan fuertes variaciones de porosidad eficaz y de permeabilidad, que son características específicas para la infiltración, movimiento y formación de acuíferos controlados por la litología.

Se observa que los resultados de ITC y los de la UMSS varían en cuanto a sus concentraciones, dicha variación se debe posiblemente a la diferencia en la fecha tanto de recolección como de análisis, a las condiciones de envío de las muestras a Holanda, cambios climáticos y a muchos otros factores. Pero básicamente la tendencia de los análisis hidroquímicos es similar. Ver Anexo 4.4.

En general se analizaron los mismos parámetros en las dos partes, pero en el ITC se analizaron adicionalmente el Litio (Li) y el Total de Sólidos Disueltos (TDS), parámetros que junto con el Cloro son buenos indicadores para encontrar la relación entre las aguas superficiales y las de interior Túnel.

Los resultados de los análisis se pueden apreciar en la Tablas N° 9, N° 10 y N° 11.

16/11/2001		SUPERFICIE (VERTIENTES)							INTERIOR TUNEL			
Cod.Lab.UMSS		1812	1813	1814	1815	1816	1889	1890	1885	1886	1887	1888
Parámetro	Unidades											
pH Campo		7,1	7,3	9,1	5,6	8	7,6	9,9	7,8	8	7,9	8
Conduc. Campo	μ/s	32,2	80	70	26,3	25,5	74	58,6	130	170	191	169
Conduc. Lab	μ/s	30,9	66	49,6	24,9	23,7	64,5	44,1	150,3	142,5	157,3	143,3
Acidez	mg/l	11,22	3,39	0	3,04	5,43	4,21	0	14,73	5,38	5,61	5,14
Alcalinidad	mg/l	5,63	23,81	14,28	5,01	5,76	19,8	15,8	43,61	53,13	53,63	54,13
Ca	mg/l	1	5,2	3,6	1,7	1,5	5,81	3,8	17,63	20,84	23,25	12,02
Cl	mg/l	1,34	0,98	1,1	2,08	1,65	1,11	1,11	1,24	1,36	1,24	1,36
Mg	mg/l	0,73	3,96	1,22	0,79	0,31	3,17	1,22	1,95	3,42	5,86	2,44
K	mg/l	0,85	1,17	3,46	0,75	1,18	0,98	3,57	0,46	0,51	0,59	0,53
Na	mg/l	5,12	4,08	2,75	2,59	4	1,72	1,1	5,91	8,43	5,01	18,15
SO4	mg/l	2	5	ND	2	ND	5	1	8	13	18	11
CO3	Mg/l	0	0	8,41	0	0	0	18,7	0	0	0	0
HCO3	Mg/l	6,87	29,05	8,87	6,11	7,03	24,16	0,31	53,2	64,82	65,43	66,04

6* **7

* **

Tabla N° 9. Resultados de los análisis fisicoquímicos básicos elaborados en el Laboratorio de aguas de la UMSS.

⁶ Muestras recogidas en el mismo punto en diferente tiempo

⁷ Muestras recogidas en el mismo punto en diferente tiempo

ICP-AES Bolivia Results 27 Nov 2001								
Sector	Sample Labels	Ca[mg/l] 422.673 nm	K[mg/l] 769.896 nm	Mg[mg/l] 285.213 nm	Na[mg/l] 589.592 nm	Cl [mg/l]	SO4 [mg/l]	Li [mg/l] 670.784 nm
	Blank	0	0	0	0	0	0	0
Túnel	1885-T	5.9	0.32	1.46	2.29	0	8	0.05
Túnel	1886-T	7.77	0.33	1.5	3.11	0	14	0.05
Túnel	1887-T	8.87	0.36	2.3	2.08	0	22	0.05
Túnel	1888-T	5.17	0.36	1.29	6.76	0	11	0.08
Vertiente	1889-V	2.11	0.47	1.71	0.98	0.1	6	0.05
Vertiente	1890-V	1.11	1.58	0.88	0.77	0.6	4	0.05

Tabla N°10. Resultados de análisis químicos elaborados en el Laboratorio de ITC.

Muestra N°	T	EC (uS/cm)	pH	Alkalinity (mmol/l)	TDS [mg/l]
1885-T	19.8	114	6.5	1.1	104
1886-T	19	145	6.6	1.4	110
1887-T	19.5	160	6.6	1.2	120
1888-T	18.1	142	6.7	1.5	110
1889-V	18.2	63	6.4	0.7	54
1890-V	18.2	42	6.4	0.3	43

Tabla N° 11. Resultados de los análisis elaborados en el ITC.

Con el objeto de comparar los resultados de los análisis químicos se utilizó el Software PLOTCHER, mediante el ploteo de los diagramas de Piper y Stiff, para los diferentes puntos de muestreo que se levantaron en la zona de estudio, tanto en superficie como al interior del Túnel.

Como el análisis hecho por los dos laboratorios corresponden a muestras tomadas en los mismos puntos y básicamente se analizaron los mismos parámetros se consideró conveniente graficar en el Plotchem únicamente los resultados de los análisis de la UMSS. Ver Anexo 4.2 y 4.3.

La interpretación según los tipos químicos de aguas, permite obtener una relación de balance entre cationes y aniones que tienen concentraciones porcentuales mayores al 50% en mili equivalentes por litro (meq), de acuerdo con esto se identificó una relación que permite determinar si el agua que se infiltra en el Túnel y el agua superficial presentan similitud en su origen. La Tabla N°12 muestra los resultados de la

interpretación de los diagramas de Piper y Stiff. Y los diagramas se pueden ver el Anexo 4.2. y 4.3.

Superficie (Vertientes)		Interior Túnel	
código	Tipo de Agua	Código	Tipo de agua
1812	Bicarbonatada Sódica	1885	Bicarbonatada Cálcica Sódica
	Magnesica	1886	Bicarbonatada Cálcica Sódica
1813	*Bicarbonatada Magnesica ⁸	1887	Bicarbonatada Cálcica
	Calcica	1888	Magnesica
1814	**Carbonatada Cálcica		Bicarbonatada Cálcica Sódica
	Sódica		
1815	Bicarbonatada Sódica Cálcica		
1816	Bicarbonatada Sódica Cálcica		
1889	*Bicarbonatada Cálcica		
	Magnesica		
1890	**Carbonatada Cálcica		
	Magnesica		

Tabla N° 12. Interpretación de los gráficos de Stiff y Piper

Según los resultados obtenidos de los análisis químicos, es posible señalar que las aguas analizadas que corresponden a superficie son del tipo genético Bicarbonatada Sódica y Bicarbonatada Cálcica, mientras que en las correspondientes al interior del Túnel se encuentra predominio de los tipos de agua Bicarbonatada Cálcica.

5.3.2 Hidrogeoquímica

El origen de las aguas Bicarbonatadas Cálcicas en el interior del Túnel tiene relación directa con el terreno que atraviesan, pues como se mencionó en la geología del interior del túnel las grietas o fracturas presentan calcita asociada al material de relleno.

Si se tiene en cuenta que dichas fracturas sirven de medio permeable para el agua permiten una mayor infiltración además de una mayor facilidad de intercambio cationico entre Sodio y Calcio, puede afirmarse entonces que existe una relación entre aguas superficiales y de interior túnel. Relación que se ve validada en la medida que en el descenso de las aguas se presenta un enriquecimiento de calcio o mineralización de las mismas.

El Cloro por ser uno de los elementos mas estables en disolución y difícilmente precipitable, no se oxida ni se reduce en aguas naturales y su presencia tanto en aguas superficiales como en profundidad ha permanecido sin ninguna variación considerable o significativa lo que puede ser un indicador del origen común de estas aguas.

⁸ Las muestras 1813 y 1889 corresponden al mismo punto, en diferente fecha de de muestreo

6 CONCLUSIONES

6.1 Geológico Estructurales

- La presencia de calcio en las rocas se debe seguramente al origen marino de las formaciones presentes en el área de estudio, es por esta razón que se presenta un enriquecimiento calcio a medida que se profundiza el agua.
- Es evidente que la geología estructural (fracturas, diaclasas, fallas), favorecen la infiltración del agua ya que las partes altas de la cordillera pueden ser zonas de recarga de acuíferos subterráneos.
- Existe una posible relación entre aguas superficiales y subterráneas, debido a que las aguas que se insumen en sedimentos no consolidados, se infiltran a través de las fracturas de las areniscas cuarzosas de la formación San Benito.
- La formación San Benito (A), presenta una alternancia de areniscas cuarzosas de grano fino con limolitas, por lo tanto zonas donde predominen las areniscas cuarzosas presentan mayor cantidad de fracturas, por esta razón existe mayor cantidad de agua en estas zonas, conformando acuíferos controlados por la litología.
- Debido a la importante actividad tectónica, el macizo tiene una permeabilidad secundaria alta, aunque localmente existen zonas de alteración, con componentes milonitizados que le dan un carácter impermeable.
- Aunque la influencia de la perforación del Túnel sobre la disminución de caudal en las vertientes no es generalizada para todo el tramo de estudio, se puede decir que el efecto es temporal, mientras se impermeabiliza el Túnel, lo anterior no significa que el régimen subterráneo inicial se vaya a reponer en su totalidad.

6.2 Espaciales

- La aplicación del SIG fue el eje central en el desarrollo de esta investigación, el modelo aplicado en este estudio permitió determinar el grado de permeabilidad secundario en zona.
- El SIG permitió que los cálculos aplicados, con la incorporación de los datos no espaciales correspondientes a una zona geográfica específica, se adapte lo mejor posible a la realidad, dando de esta manera la mayor validez al modelo aplicado.
- Las zonas mapeadas como muy permeable y permeables en el análisis espacial coinciden con los sectores de mayor infiltración al interior del Túnel, lo que hace pensar que estas zonas están asociadas a vertientes secas.
- Los esfuerzos tectónicos como el (diaclasamiento, exfoliación, planos de fractura y de plegamiento), combinado con los factores climáticos (Precipitación y Temperatura) condicionan a la alteración superficial de la roca y la creación de mantos permeables (grietas), así como el que dichas grietas estén llenas o libres de materiales poco permeables, permitiendo en esa medida que exista o no infiltración.

6.3 Hidrogeológicas e Hidrogeoquímicas

- Los materiales atravesados por el túnel tienen baja permeabilidad primaria muy baja a nula.
- De acuerdo al análisis geológico estructural se concluye que en la zona entre bocatoma y pozo intermedio existe una ocurrencia de aguas subterráneas debido principalmente a la de permeabilidad secundaria
- Las zonas de recarga de los acuíferos en el área son los ríos y las rocas fracturadas y las zonas de descarga son manantiales y vertientes, en el desarrollo de esta investigación se pudo concluir que la perforación del túnel afectó el ciclo normal del flujo subterráneo.
- La utilización de la hidrogeoquímica fue una fase complementaria que ayudó a esclarecer las dudas que se presentaron en el análisis espacial.
- La relación entre aguas subsuperficiales (vertientes) y a profundidad de acuerdo a los análisis químicos realizados en los laboratorio de la UMSS y el ITC, se hace evidente por la facilidad de intercambio catiónico que se presenta entre de sodio y calcio.
- El hecho de que la concentración en el agua del litio se mantenga constante (0.05/0.08 mg/l) y del cloro con una pequeña variación(1-2 mg/l⁹ y 0-0.6 mg/l¹⁰), tanto en superficie como a profundidad es un indicativo de que las aguas que se infiltran en el Túnel son de origen meteórico, cuya zona de recarga se encuentra en las partes mas fracturadas que afloran en el área de estudio.
- En la descripción geológica del Túnel hecha por la empresa consultora se mencionan fracturas que van desde menos de 1 cm a mayores de 20 cm. El flujo por fracturas estrechas suele ser laminar, con velocidades muy bajas arrastrando todo tipo de material a su paso, esto se ve reflejado en las diferencias de concentraciones de TDS, mucho menores en superficie que en profundidad.

⁹ Analisis en el laboratorio de la UMSS.

¹⁰ Analisis en el laboratorio del ITC.

7 BIBLIOGRAFIA

CASTRO G, (2000). Empresa MISICUNI, Comunicación Interna N°055/00. Cochabamba , Bolivia.

CUSTODIO, E; Llamas, M. (1983). Hidrología Subterránea. 2da Edición. Ediciones Omega, S.A., Barcelona, España.

DAMES & MOORE (1996). Actualización del Estudio de Impacto Ambiental para la Fase MISICUNI I. Cochabamba, Bolivia.

ELECTRWATT, Ingenieros Consultores S.A (1987). Asociación Proyecto Misicuni 1ª Etap. Informe Geológico. Cochabamba, Bolivia.

EMPRESA MISICUNI (2001). Proyecto : Sistema de Agua Potable Uyuni. Cochabamba, Bolivia.

HUARANCA, R.; Neumann, R. (1998). Boletín N°16 del Servicio Nacional de Geología y Minería. Cochabamba, Bolivia.

MONTOYA, R. Estudio Hidrológico de la Cuenca Misicuni (1998). Proyecto de grado para obtener el Título en Ingeniería Civil. UMSS. Cochabamba, Bolivia.

RENNER, S ; Velasco,C. (2000). Boletín N°34 del Servicio Nacional de Geología y Minería. Cochabamba, Bolivia.

REVOLLO, A. (1999). Calidad de Aguas Superficiales en el Valle Alto y su interpretación según M.D.S.M.A. Tesis de Maestría Profesional en "Levantamiento de Recursos Hídricos". CLAS-UMSS. Cochabamba, Bolivia.

SORUCO, W ; Ramirez, I (1999). Estudio Geoeléctrico y Diagnóstico Hidrogeológico En el área del Pozo Intermedio Proyecto MISICUNI. SERGOMIN, Cochabamba, Bolivia.

TAMS-INGETEC-CLAURE PEREIRA, Ingenieros Consultores. Informes técnicos anuales de avance de la obra (1998,1999,2000). Cochabamba, Bolivia.

TAMS-INGETEC-CLAURE PEREIRA, Ingenieros Consultores. Informes técnicos mensuales de avance de la obra (enero-mayo/2001). Cochabamba, Bolivia.

VALENZUELA, C ; Beek, M. Modelo de erosión "Cuenca Khenko Mayu" Sacaba, Caso 26. Cochabamba, Bolivia.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Características del Proyecto “TÚNEL MISICUNI”	2
1.3	Justificación.	3
1.4	Planteamiento del problema.	3
1.5	Objetivos	3
1.5.1	General	3
1.5.2	Específicos	3
1.6	Hipótesis.	4
2	AREA DE ESTUDIO	5
2.1	Ubicación	5
2.2	Accesibilidad.	5
2.3	Geomorfología.	5
2.4	Geología.	6
2.4.1	Geología Regional.	6
2.4.2	Descripción Estratigráfica.	7
2.4.3	Geología Estructural.	12
2.5	Tipos de Terreno.	14
2.5.1	Terreno I	14
2.5.2	Terreno II.	14
2.5.3	Terreno III.	15
2.5.4	Terreno IV.	15
2.6	Hidrogeología.	15
2.6.1	Unidades Hidrogeológicas.	15
3	MARCO TEÓRICO.	18
3.1	Sistema de Información Geográfico SIG	18
3.2	Porosidad.	18
3.3	Infiltración.	18
3.4	Tipo de Acuíferos.	19
3.5	Permeabilidad en Acuíferos Fisurados.	19
3.6	Recarga de Acuíferos.	20
3.7	Composición Mineralógica del Agua.	20
3.7.1	Ion cloruro Cl.	20
3.7.2	Ion calcio Ca.	20
3.7.3	Ion sodio Na.	21
3.7.4	Ion potasio K.	21
3.7.5	Ion Magnesio Mg.	21

3.7.6	Ion Sulfato SO ₄ .	21
3.7.7	Iones Bicarbonato y Carbonato HCO ₃ , CO ₃ .	21
3.7.8	Ion Litio, Li.	22
3.7.9	Acidez.	22
3.7.10	Alcalinidad.	22
3.7.11	Aplicación de los polígonos de Piper.	22
3.7.12	Aplicación de los diagramas de Stiff	22
3.7.13	Espectrometría de Emisión Atómica en Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP).	23
4	METODOLOGIA	24
4.1	Fase I	24
4.2	Fase II.	24
4.2.1	Muestreo y análisis de laboratorio.	24
5	ANALISIS Y RESULTADOS.	30
5.1	Geológico Estructural.	30
5.2	Modelo Espacial de Permeabilidad en medios fisurados	31
5.3	Hidrogeología e Hidrogeoquímica	33
5.3.1	Hidrogeología	33
5.3.2	Hidrogeoquímica	37
6	CONCLUSIONES	38
6.1	Geológico Estructurales	38
6.2	Espaciales	38
6.3	Hidrogeológicas e Hidrogeoquímicas	39
7	BIBLIOGRAFIA	40