

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

HIDROGEOLOGÍA Y MODELACIÓN DEL ACUÍFERO PIFO – EL QUINCHE

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA GEÓLOGA

CATALINA SUSANA DELGADO CHECA
vitrofiro@yahoo.es

DIRECTOR: ING. RENÁN CORNEJO
rcornejo@server.epn.edu.ec

Quito, Marzo del 2008

DECLARACIÓN

Yo, Catalina Susana Delgado Checa, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

CATALINA SUSANA DELGADO CHECA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Catalina Susana Delgado Checa, bajo mi supervisión.

Ing. RENÁN CORNEJO O.

DIRECTOR DE PROYECTO

CONTENIDO

CONTENIDO	I
INDICE DE FIGURAS	III
INDICE DE TABLAS	V
INDICE DE MAPAS.....	VII
INDICE DE FOTOS	VIII
INDICE DE ANEXOS	IX
RESUMEN.....	X
ABSTRACT	XI
1. GENERALIDADES.....	2
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. ÁREA DE ESTUDIO	2
1.3. OBJETIVOS.....	3
1.4. ALCANCE.....	4
1.5. METODOLOGÍA	5
1.6. ESTUDIOS PREVIOS	6
1.7. CONTENIDO.....	8
1.8. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	9
1.8.1. FISIOGRAFÍA.....	9
1.8.2. ACCESIBILIDAD.....	10
1.8.3. HIDROGRAFÍA.....	11
1.8.4. CLIMA.....	11
1.8.5. VEGETACIÓN.....	11
CAPITULO II.....	13
2 GEOLOGÍA	14
2.1 INTRODUCCIÓN.....	14
2.2. GEOLOGÍA REGIONAL	15
2.2.1. CORDILLERA REAL.....	16
2.2.2. VALLE INTERANDINO (VIA).....	16
2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	18
2.4. GEOLOGÍA LOCAL	23
2.4.1. INTRODUCCION.....	23
2.4.2. ESTRATIGRAFIA.....	27
2.4.3. INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	37
2.5. MODELO GEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	44
CAPÍTULO III	46
3. HIDROMETEOROLOGÍA.....	47
3.1. VALIDACIÓN DE LA INFOMACIÓN	48
3.2. CLIMA	52
3.2.1. CLASIFICACIÓN DEL CLIMA.....	52
3.2.2. TEMPERATURA	55
3.2.2. PRECIPITACIÓN.....	56
3.2.3. METEOROLOGÍA	57
3.2.4. TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN MEDIAS MULTIANUALES.....	58
3.2.5. EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	61
3.2.6. ESCORRENTÍA SUPERFICIAL.....	69
3.2.7. PERCOLACIÓN O INFILTRACIÓN PROFUNDA.....	71
3.3. BALANCE HÍDRICO.....	72

CAPÍTULO IV	75
4. HIDROGEOLOGÍA.....	76
4.1. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA.....	77
4.2. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS	80
4.2.1. NIVELES PIEZOMÉTRICOS Y DIRECCIÓN DE FLUJO	80
4.2.2. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K)	83
4.2.3. DESCARGA.....	88
CAPÍTULO V.....	89
5. HIDROQUÍMICA	90
5.1. BASE DE DATOS DE PARÁMETROS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BACTERIOLÓGICOS	91
5.2. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	93
5.2.1. COMPOSICIÓN FÍSICO - QUÍMICA Y BACTERIOLÓGICA DEL AGUA Y COMPARACIÓN CON LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES VIGENTES	93
5.2.2. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA DEL AGUA.....	100
5.2.3. EVOLUCIÓN DEL AGUA EN EL ESPACIO, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA Y SU VARIACIÓN EN DIRECCIÓN DEL FLUJO.	105
5.2.4. EVOLUCIÓN DEL AGUA EN EL TIEMPO	107
CAPÍTULO VI	109
6. MODELACIÓN.....	110
6.1. MODELO CONCEPTUAL.....	111
6.2. MODELO MATEMÁTICO	113
6.2.1. ECUACIÓN DE FLUJO DE AGUA EN MEDIOS POROSOS.....	114
6.2.2. DIFERENCIAS FINITAS COMO METODO DE SOLUCIÓN NUMERICA DE ECUACIONES DIFERENCIALES EN DERIVADAS PARCIALES	115
6.3. MODELO NUMÉRICO- DIGITAL.....	116
6.3.1. DESCRIPCIÓN BÁSICA DEL CÓDIGO NUMÉRICO VISUAL MODFLOW.....	116
6.3.2. METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN HIDROGEOLÓGICA	117
6.4. MODELO NUMÉRICO PRELIMINAR DEL ACUÍFERO PIFO – EL QUINCHE	121
CAPÍTULO VII.....	136
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	137
7.1. CONCLUSIONES.....	137
7.2. RECOMENDACIONES	139
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	141

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación de la zona de estudio (Modificado de Google Earth, 2006).....	3
Figura 1.2. Diagrama de flujo de las etapas seguidas en este trabajo.....	6
Figura 2.1. Correlación entre las columnas levantadas para este trabajo y el pozo de investigación YT-1.....	26
Figura 2.2. Perfil geológico P-P'.....	40
Figura 2.3. Perfil geológico Y-Y'.....	41
Figura 2.4. Perfil geológico Q-Q'.....	42
Figura 2.5. Perfil geológico A - A'.....	43
Figura 2.6. Modelo geológico conceptual.....	45
Figura 3.1. Curva de regresión construida con los datos de las estaciones Tumbaco y La Tola, ecuación de la recta y coeficiente de correlación.	49
Figura 3.2. Curva de dobles acumulaciones.	53
Figura 3.3. Variación de la temperatura media mensual en la estación Puenbo.....	56
Figura 3.4. Variación de las precipitaciones medias mensuales en la estación de Yaruquí.....	58
Figura 5.1. Diagrama de Piper representado los análisis de las estaciones que captan agua de los horizontes que corresponden al acuífero estudiado.	103
Figura 5.2. Diagrama de Piper representado los análisis de las estaciones que mezclan las aguas con niveles acuíferos de la Fm. Guayllabamba.....	104
Figura 5.3. Representación de la variación en la composición química del agua.....	108
Figura 6.1. Modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero Pifo – El Quinche.....	113
Figura 6.2. Metodología para la elaboración de un modelo de simulación hidrogeológica.....	118
Figura 6.3. Ventana del Visual MODFLOW mostrando las coordenadas del dominio del área a modelarse.....	122

Figura 6.4. Área a modelar discretizada.....	123
Figura 6.5. Ventana del programa en donde se observan los requerimientos del programa para ingresar las superficies estructurales.....	124
Figura 6.6. Superficies estructurales de la base y del techo del sistema acuífero.....	125
Figura 6.7. Conductividades hidráulicas utilizadas para la modelación.....	126
Figura 6.8. Perfil que muestra la zona de riego pintada en color azul.....	127
Figura 6.9. Vista en planta de la cuenca hidrogeológica modelada, señalando el área de riego en azul.....	127
Figura 6.10. Formato del programa para el ingreso de los pozos.....	128
Figura 6.11. Ubicación de los pozos de bombeo y observación en el modelo.....	129
Figura 6.12. Balance de masas resultante del modelo.....	130
Figura 6.13. Imagen de los resultados del balance de masas luego de corrido el modelo.....	131
Figura 6.14. Curvas equipotenciales, dirección del flujo resultantes de la modelación.....	132
Figura 6.15. Perfil Oeste – Este del acuífero, representando la dirección del flujo, la tabla de agua, las curvas equipotenciales y un pozo.....	133
Figura 6.16. Vista tridimensional del sistema acuífero desde el Suroeste, resultado de la modelación.....	133
Figura 6.17. Calibración del modelo numérico.....	134
Figura 6.18. Resultados de la calibración del modelo.....	135

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Resumen de las fuentes de información más relevantes utilizadas en el estudio de la geología local.....	23
Tabla 2.2. Resumen de la información más relevante de los registros técnicos de perforación, incluye el pozo de investigación.....	25
Tabla 3.1. Estaciones meteorológicas utilizadas.....	48
Tabla 3.2. Precipitaciones anuales en las estaciones Tumbaco y La Tola.....	50
Tabla 3.3. Precipitación y temperatura multianual de cada estación meteorológica real.....	58
Tabla 3.4. Resumen de los valores de precipitación y temperatura medios multianuales.....	60
Tabla 3.5. Distribución de las precipitaciones medias anuales en el año, comparadas con la estación de referencia Yaruquí-INAMHI.....	64
Tabla 3.6. Variación de las temperaturas medias anuales en el año, comparadas con la estación de referencia Puembo.....	65
Tabla 3.7. Cálculo de la ETP por el método de Thornthwaite para el área de Recarga lateral.....	66
Tabla 3.8. Cálculo de la ETP por el método de Thornthwaite para el área de Riego.....	67
Tabla 3.9. Cálculo de la ETP por el método de Thornthwaite para el área acumulación.....	68
Tabla 3.10. Resultados del cálculo de la evapotranspiración real por el método de Thornthwaite.....	69
Tabla 3.11. Resultados del cálculo de la escorrentía superficial para cada área.....	71
Tabla 3.12. Resultados del cálculo de los parámetros hidrometeorológicos para cada área.....	72
Tabla 3.13. Caudales de recarga del acuífero.....	73
Tabla 3.14. Caudales de descarga del acuífero.....	74
Tabla 4.1. Resumen del inventario de puntos de agua.....	78

Tabla 4.2. Niveles estáticos reportados en los informes y medidos en el campo.....	81
Tabla 4.3. Conductividades hidráulicas ponderadas de tomadas de informes, calculadas y asumidas.....	87
Tabla 5.1. Norma NTE INEN 1 108:2006 para agua potable.....	95
Tabla 5.2. Resumen de la base de datos físico –química y bacteriológica.....	96
Tabla 5.3. Resultados estadísticos de los parámetros característicos en las vertientes.....	101
Tabla 5.4. Resultados estadísticos de los parámetros característicos en los puntos de agua del acuífero estudiado.....	102
Tabla 5.5. Resultados estadísticos de los parámetros característicos en los puntos de agua que toman aguas de niveles de la Fm. Guayllabamba.....	103

INDICE DE MAPAS

Mapa 1.1. Fisiografía de la zona de estudio.....	10
Mapa 1.2. Uso del suelo en la cuenca de estudio.....	12
Mapa 2.1. Mapa estructural simplificado del Ecuador con énfasis en la estructura IAV.....	15
Mapa 2.2. Mapa geológico con la localización de las columnas levantadas en campo, pozos, estructuras y ubicación de los cortes geológicos.....	22
Mapa 3.1. Clasificación del clima en la cuenca de estudio.....	55
Mapa 3.2. Isoyetas e isotermas en la cuenca de estudio.....	60
Mapa 4.1. Puntos de agua recopilados en la zona de estudio.....	79
Mapa 4.2. Mapa de Isopiezas.....	82
Mapa 5.1. Mapa de diagramas de Stiff, con distribución de puntos de agua que toman las aguas del acuífero.....	106
Mapa 5.2. Mapa de diagramas de Stiff, con distribución de puntos de agua que toman aguas de la Fm. Guayllabamba.....	107

INDICE DE FOTOS

Foto 2.1. Flujos de lava de la Fm. Guayllabamba que subyacen a flujos piroclásticos de la Fm. Chiche. Quebrada El Quinche (UTM: 798500, 9991500).....	28
Foto 2.2. Mb. Lahar (Fm. Chiche), en el puente del río Chiche (UTM: 792885, 9977230).....	32
Foto 2.3. Mb. Fluvio-Lacustre II, en el cauce del río Guambi.....	33
Foto 2.4. Mb. Chiche s.s., en el cauce del río Guambi.....	35
Foto No.2.5. Paleocanal en el Miembro Chiche s.s.....	36

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Columnas estratigráficas levantadas para este estudio.

Anexo 2. Pozo de investigación YT-1

Anexo 3. Columnas estratigráficas en el Nuevo aeropuerto internacional de Quito-parroquia Tababela (Tomado de Beate B. – Corporación Quiport, 2003).

Anexo 4. Resumen de los informes técnicos de pozos recopilados

Anexo 5. Datos anuales de precipitación y temperaturas llenados en las estaciones meteorológicas correspondientes al área de estudio.

Anexo 6. Aplicación del método de doble masa para validar los datos de las estaciones en comparación con la estación de confianza “Yaruquí- INAMHI”.

Anexo 7. Variación de parámetros heliofanía, velocidad y humedad relativa en la cuenca

Anexo 8. Isoyetas e isotermas de la cuenca del río Guayllabamba, elaborados por Santillán G. y Burbano N. (1980)

Anexo 9. Ubicación de estaciones meteorológicas virtuales utilizadas en este proyecto.

Anexo 10. Caudales medidos en la Qda. Sigsipugro y cálculo de la escorrentía superficial.

Anexo 11. Inventario de puntos de agua.

Anexo 12. Cálculo de conductividad hidráulica en un pozo de la zona, mediante los métodos Acuífer Test y Alulema R. - EMAAP (2005).

Anexo 13. Gráfico del área de acumulación, mostrando las áreas asignadas por el Método de polígonos de Thiessen para el cálculo de la conductividad hidráulica ponderada.

Anexo 14. Inventario físico, químico y bacteriológico.

Anexo 15. Mapas estructurales de la base de las formaciones Chiche y Cangahua.

RESUMEN

Este proyecto trata la hidrogeología del acuífero denominado Pifo – El Quinche y su modelación numérica - digital. El acuífero lleva el nombre mencionado precisamente porque se encuentra ubicado entre las parroquias Pifo y El Quinche, al oriente de la ciudad de Quito, en el Valle Interandino Central, abarca un área de 386.1 km² y el límite vertical de estudio es el contacto entre las formaciones Guayllabamba y Chiche. En ésta zona existe déficit de agua potable y de riego, situación agravada por el incremento vertiginoso de la población debido a la construcción del Nuevo Aeropuerto de Quito. La escasez del recurso superficial es solventada, aunque de manera desordenada, con el agua del acuífero que se encuentra en la cuenca de estudio. El desorden se debe entre otras causas al desconocimiento del funcionamiento del sistema acuífero, por lo que se estudia su comportamiento hidrogeológico, se cuantifican los caudales de recarga y descarga, se analiza la calidad del agua y se lo representa mediante un modelo preliminar utilizando el programa Visual MODFLOW. El estudio se realizó partiendo de información primaria, que se inventarió, actualizó, monitoreó mediante el trabajo de campo. El resultado es la identificación de un acuífero que tiene una disposición espacial subhorizontal, que se extiende fuera de los límites propuestos en éste trabajo y que se acuña en la Cordillera Real; se trata de un acuífero multicapa, anisótropo y libre, cuya superficie freática está entre las cotas 2515.5 m.s.n.m. al Este y 2271.0 m.s.n.m. al Oeste. La recarga proviene tanto de la percolación de agua lluvia como de riego, el valor total calculado es 3881.39 l/s y la descarga dentro de la cuenca se produce mediante vertientes y explotación de pozos, resultando 240.0 l/s, lo que corresponde al 6.18 % de la recarga; el agua restante se estaría descargando mediante puntos de agua que se ubican en la Formación Chiche fuera de la cuenca de este estudio y a profundidades mayores en la Formación Guayllabamba. Del análisis hidroquímico se determinó que el agua presenta concentraciones de fosfatos mayores que las permitidas por la norma para agua potable, podría pensarse que el compuesto proviene de los fertilizantes utilizados en la zona de riego, mas ésta suposición está sujeta a comprobación. El sistema se modeló con dos capas, cuyas conductividades asumidas durante la calibración del modelo, permitieron obtener un error de 9.69.

ABSTRACT

This project deals the hydrogeology of named Pifo – El Quinche aquifer and its numerical – digital modeling. The aquifer has the name from it is placed among Pifo and El Quinche districts, at Quito's eastern, in the middle Interandean Valley, It is 286.1 km² and the vertical boundary of to study is the contact against Guayllabamba and Chiche formations. It is lacking in potable and irrigation water; besides new settlements have lately increased because of Quito's New International Airport building and have worsened the water deficit. Nowadays, the problem is solved disorderly with the aquifer located at the studied basin. This imperfect solution is a result, between other factors, of ignoring how to manage the aquifer system. The following procedure was therefore implemented: an analysis of hydrogeology behavior, a calculation of aquifer charge and discharge, an analysis of water chemistry quality and preliminary model with Visual MODFLOW software. The research was based on field – work primary information which was inventoried, monitored and refresh. Thus, it is known that the aquifer has an under – horizontal spatial disposition, which extends beyond the research's borders and introduces inside the Real Cordillera. It is a multilayer, anisotropic and free aquifer, which static level fluctuates since 2515.5 m.a.s.l. to East to 2271.0 m.a.s.l. to West. The aquifer charge comes from both rain and irrigation water percolation, which total value, is 3881.39 l/s. The discharge into the basin comes from slops and exploitation's wells, with an outcome of 240 l/s, which represents 6.18 % of recharging. The hydro – chemical analysis determined that phosphate components exceed potable water level. It would be possibly an effect of fertilizers, even though this assumption has to be proved yet. Two layers were created in the preliminary model, which made possible o obtain an error level of 9.69%, due to the layers assumed conductivity.

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

El área de estudio se ubica en el Valle Interandino, en la cuenca Quito-Guayllabamba, a 12 km. al oriente de la ciudad de Quito, en una zona de parroquias rurales cuyos pobladores desarrollan fundamentalmente actividades agrícolas, ganaderas y avícolas a pesar del déficit de agua potable y de riego. Por otra parte el incremento vertiginoso de la población, debido a la construcción del nuevo aeropuerto de Quito ubicado en la parroquia de Tababela, implica mayor demanda de agua ocasionando que el déficit se agrave.

Para aplacar este déficit tanto empresas públicas como privadas captan las aguas que brotan de vertientes y explotan pozos de agua que indican la existencia de un acuífero cuyas características hidrogeológicas se desconocen, por lo que se consume el agua sin un plan de manejo. Por consiguiente la Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable del Distrito Metropolitano de Quito consideró importante realizar el estudio hidrogeológico del acuífero y simular su funcionamiento para plantar las bases de una futura gestión adecuada del agua subterránea; lo que repercutirá positivamente en lo social, económico y administrativo del área de estudio.

1.2. ÁREA DE ESTUDIO

Es una planicie que se localiza entre la coordenadas 9994000 – 9974000 Norte y 789883 – 804440 Este, comprende las parroquias de Pifo, Puembo, Yaruquí, Tababela, Checa y El Quinche; está limitada al Norte por la quebrada El Quinche la misma que aguas abajo toma el nombre de río Coyago que desemboca en el río Guayllabamba; al Sur está limitada por la quebrada Paluguillo que aguas abajo toma los nombres de Guarmihuaycu, Churoloma y Chupahuaycu y desemboca en el río Chiche; al Este se encuentran las estribaciones de la Cordillera Real y el límite Oeste corresponde a los ríos Chiche y Guayllambamba; el área total de estudio es 386.1 km². En la figura 1.1., se muestra la ubicación de la zona.

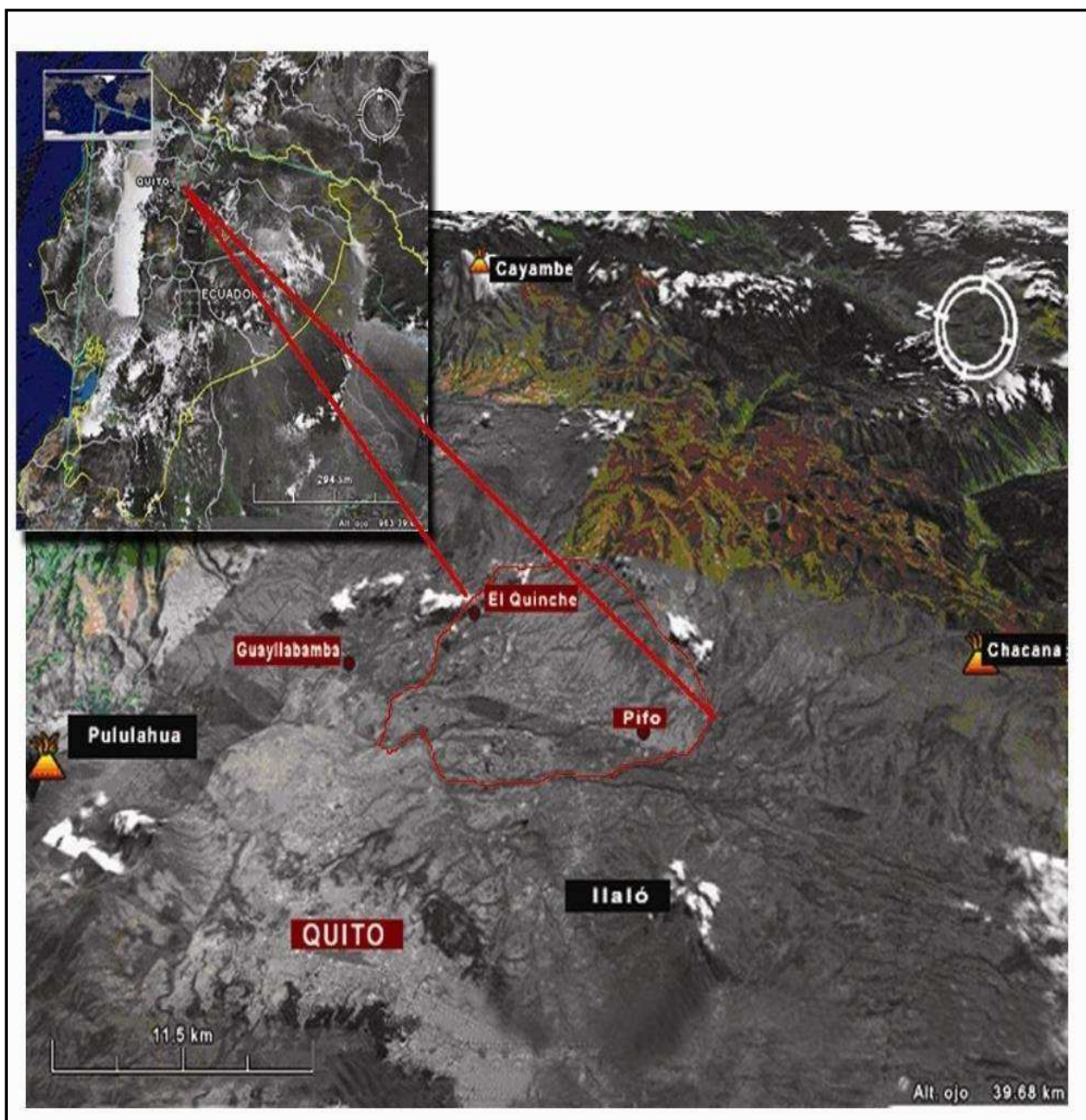


Figura 1.1. Ubicación de la zona de estudio (Modificado de Google Earth, 2006).

1.3. OBJETIVOS

a) Objetivos Generales

- Estudiar el comportamiento hidrogeológico del acuífero para cuantificar sus caudales de recarga y descarga.
- Describir el comportamiento del acuífero mediante un modelo preliminar utilizando el software Visual MODFLOW.

b) Objetivos Específicos

- Validar la geología local y proponer un modelo conceptual geológico en el que se identifiquen los potenciales niveles acuíferos.
- Determinar las características hidrogeológicas de dichos niveles.
- Determinar las zonas de recarga y cuantificar el caudal que estaría recargando al acuífero.
- Determinar la zona de descarga natural y los caudales totales de descarga.
- Conocer la calidad física, química y bacteriológica del agua en el acuífero y su evolución en el espacio y en el tiempo.
- Plantear el modelo hidrogeológico conceptual y con los datos resultantes modelar el acuífero mediante el uso del software Visual MODFLOW 3.1.0.

1.4. ALCANCE

Para la elaboración de este proyecto se contó con el auspicio de la Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable de Quito (EMAAP-Q), cuyo aporte principal fue la perforación de un pozo de investigación sumado a la información que la empresa facilitó.

También se recopiló información archivada en el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), Corporación regional del Desarrollo de la Sierra Norte (CORSINOR), Consejo Nacional de Recursos Hídricos – Agencia de Aguas de Quito (CNRH), Sistema de Información Geográfica y Agropecuaria (SIGAGRO), Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), informes técnicos de perforación de pozos de agua elaborados por las empresas HIGGECO, GEOSISA, SERVIAGUA, CAPTAGUA, PERFOCONSUL, ASUBSA, PERFOJAPAN y EMAAP-Q.

Para la delimitación vertical de la zona de estudio, se consideró la profundidad de 300 m, que es la máxima reportada en los informes técnicos de las perforaciones de los pozos, y de acuerdo a la bibliografía que indica las formaciones que están involucradas en ese rango, se estableció que los pozos no atravesarían estratos

más profundos que los de la Formación Chiche, por lo tanto el límite vertical de estudio es el contacto entre las formaciones Chiche y Guayllabamba.

El trabajo de campo incluyó la actualización y complementación de la información mediante el levantamiento de columnas estratigráficas, monitoreo de las características físico - químicas del agua y de los niveles piezométricos y el estudio de los testigos de perforación del pozo de investigación elaborado por la EMAAP-Q.

Con el trabajo de gabinete se interpretó la estratigrafía por medio de los registros de perforación de pozos y se elaboró perfiles geológicos. Se efectuó además el inventario de puntos de agua, la cuantificación de los caudales de recarga y descarga del acuífero, la estimación de la conductividad hidráulica de las formaciones Chiche y Cangahua, la identificación de la cuenca hidrogeológica mediante la elaboración de un mapa de isopiezas, el levantamiento de una base de datos de las condiciones físico - químicas y bacteriológicas del agua, y finalmente se elaboró el modelo numérico del acuífero que tiene un carácter preliminar puesto que la información utilizada para su diseño fue limitada; sin embargo fue suficiente para realizar la representación básica del sistema.

1.5. METODOLOGÍA

Para llegar a comprender y visualizar el comportamiento del sistema acuífero se siguió un procedimiento de 10 etapas (Ver figura 1.2.):

- Identificación del problema.
- Definición del área de interés.
- Análisis bibliográfico, incluida la cartografía, informes técnicos y temas afines al proyecto planteado.
- Inventario de la información útil.
- Trabajo de campo, reconocimiento del área de estudio y puntos de agua, validación de la información geológica, levantamiento de columnas estratigráficas, medición de niveles piezométricos en pozos, monitoreo de la calidad del agua.

- Perforación de un pozo de investigación.
- Estudio hidroquímico del agua.
- Elaboración del modelo conceptual hidrogeológico del acuífero mediante el estudio de sus componentes.
- Aplicación numérica y simulación digital del sistema acuífero mediante el uso del programa disponible.
- Informe de los resultados.

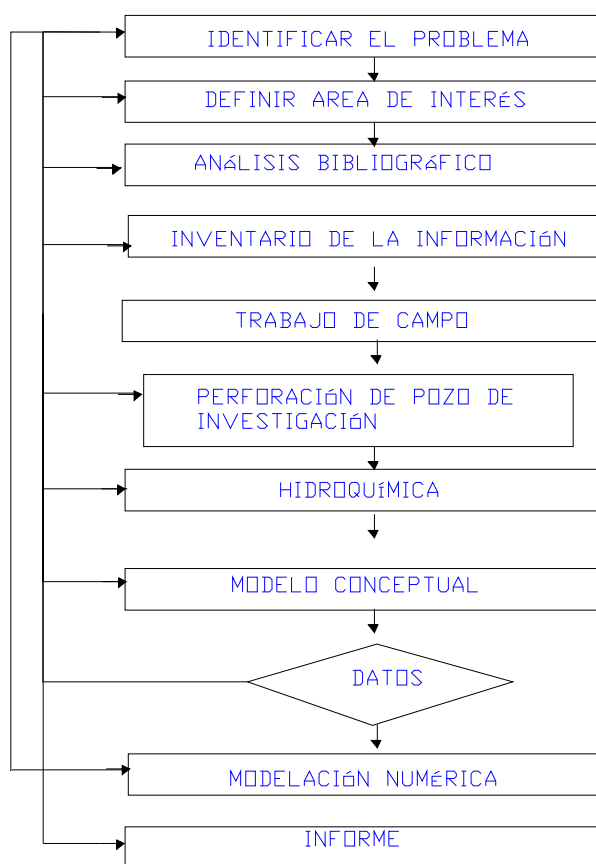


Figura 1.2. Diagrama de flujo de las etapas seguidas en este trabajo

1.6. ESTUDIOS PREVIOS

A continuación se presenta en orden cronológico los trabajos más relevantes que tienen relación con la zona de estudio:

Geología

- Sauer W. (1943), “Memoria explicativa del Mapa Geológico de Quito”.

- DGGM (1980), mapas geológicos, en escala 1.50000, hojas “El Quinche” y “Sangolquí”.
- DGGM (1982), mapa geológico, en escala 1:25000, hoja “Yaruquí”.
- Vera R. (1983), “Características petrográficas y paleogeográficas de conglomerado Chiche en los alrededores del Ilaló”.
- Clapperton Ch. y Vera R. (1986), “The Quaternary glacial sequence in Ecuador: a reinterpretation of the work of Walter Sauer”.
- Tibaldi A. y Ferrari L. (1992^a), “From latest Miocene thrusting to Quaternary transpression and transtension in the Interandean Valle, Ecuador”.
- Tibaldi A. y Ferrari L. (1992^b), “Latest Pleistocene-Holocene tectonics of the Ecuadorian Andes”.
- Ego F. y Sebrier M. (1996), “The Ecuadorian Inter.-Andean Valley, a major and complex restraining bend and compressive graben since late Miocene”.
- Hall M. y Mothes P. (1996), “El origen y la edad de la cangahua superior, valle de Tumbaco (Ecuador)”.
- Villagómez D. (2003), “Evolución Geológica Plio-Cuaternaria del Valle Interandino Central en Ecuador (Zona de Quito-Guayllabamba-San Antonio) Tesis de grado, EPN.
- Corporación Quiport S.A. (2003), “Geological analysis of the Caraburo Plateau. The new Quito international airport site”, Quito – Ecuador.

Hidrometeorología

- Porrou P.-IRD, 1995. “Estudios de Geografía”, Vol. 7, Editora Nacional, Quito-Ecuador.

Hidrogeología

- Santillán G. & Burbano N., (1980). “Estudio Hidrogeológico De La Cuenca Del Río Guayllabamba”. Proyecto previo a la obtención del Título de Ingenieros geólogos. UCE.
- Hernández T., (1982). “Estudio De Recursos Hidrológicos En La Zona De Pifo Y Puenbo”. Proyecto previo a la concesión de aguas.

- De Miguel Fernández C. – EMAAP-Q, (2005), “Caracterización Hidrogeológica De Los Acuíferos San Antonio De Pichincha, Valle De Los Chillos Y Pifo – Puembo”, Informe técnico de consultoría para el Departamento Acuífero de Quito.
- De Miguel Fernández C. – EMAAP-Q, (2006), “Detallamiento De Características De Los Acuíferos: San Antonio, Los Chillos, Pifo – Puembo Y Pronostico Con Propuesta De Trabajos Investigativos De La Cuenca Alta Del Río Pita”. Informe técnico de consultoría para el Departamento Acuífero de Quito.

Hidroquímica

- Martínez D. – EMAAP-Q., (2005). “Análisis de la información hidrogeoquímica de los Valles de los Chillos, Pifo-El Quinche y Pusuquí-San Antonio” Informe de consultaría para el Departamento Acuífero de Quito.

1.7. CONTENIDO

Este trabajo consta de seis capítulos en cada uno de los cuales se estudió los componentes del sistema acuífero:

El primer capítulo proporciona una visión general de las características fisiográficas del área de estudio.

El segundo capítulo aborda a la geología regional y local de la zona además se efectúa el reconocimiento de la capacidad del subsuelo para constituir un acuífero.

En el tercer capítulo, se tratan las condiciones hidrometeorológicas de la zona de estudio como son el clima y el balance hídrico efectuado para cuantificar los caudales de recarga y descarga del acuífero.

El cuarto capítulo trata de las características hidrogeológicas del acuífero y la interrelación del agua subterránea con el medio geológico.

En el quinto capítulo se estudió la hidroquímica del agua mediante la cual se identificó su calidad, los cambios químicos en el recorrido desde la zona de recarga hasta la zona de descarga y su variación en el tiempo mediante el análisis en un punto.

En el sexto capítulo se obtuvo un modelo conceptual del funcionamiento del sistema y se lo representó a través de un modelo numérico preliminar.

En el séptimo capítulo se detallan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

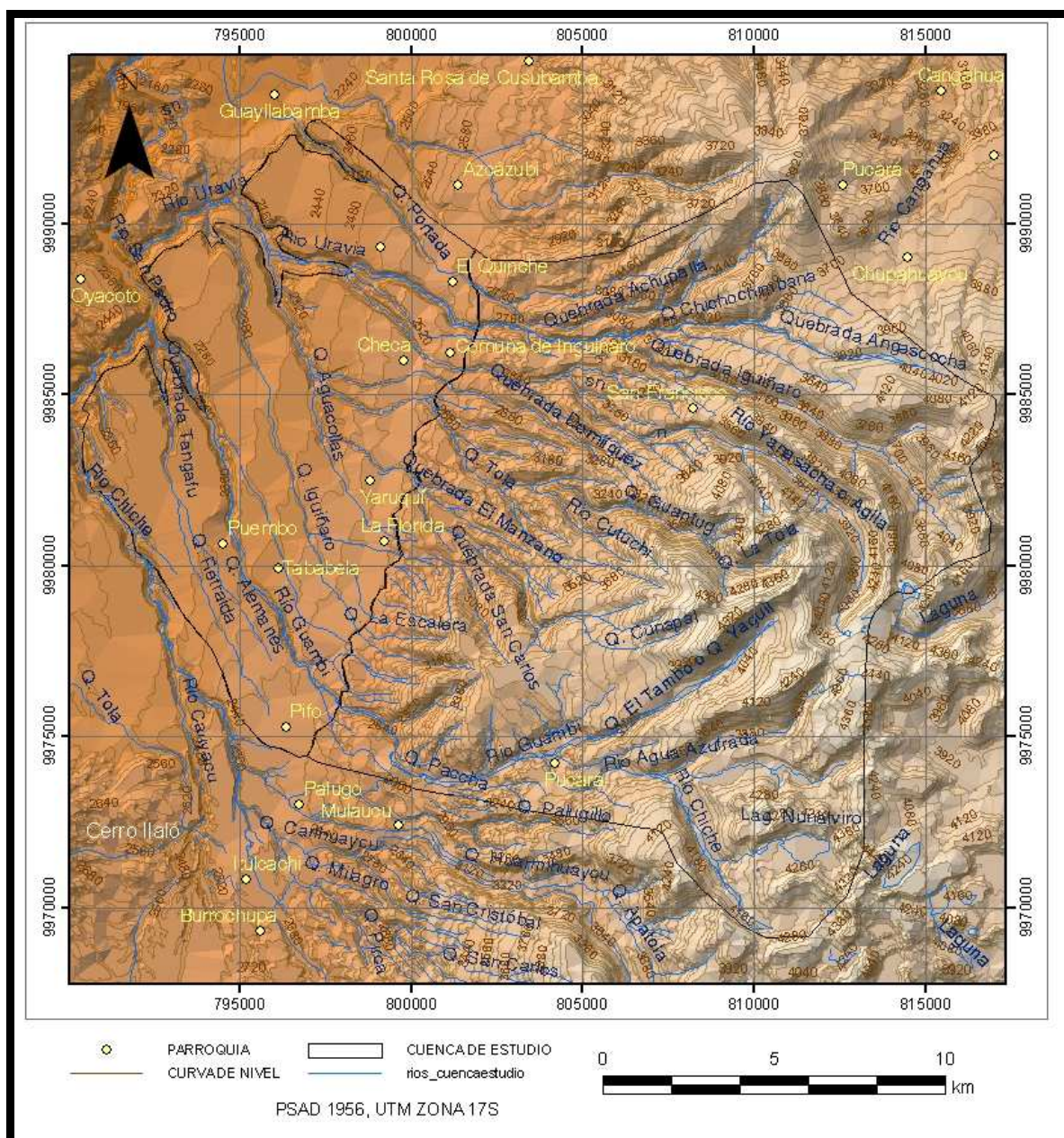
1.8. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.8.1. FISIOGRAFÍA

La cuenca de estudio está delimitada con base en las divisorias de aguas y varios límites físicos, además fue dividida en dos zonas morfológicas:

La una presenta una fisiografía plana con cotas desde 2200 m. hasta 2600 m.; su extensión es de 119.8 km², al oriente está limitada por abruptas pendientes y al occidente se encuentra el río Chiche. Está atravesada por quebradas de hasta 200 m de profundidad que dan lugar a la formación de taludes casi verticales; hacia el Noroeste la topografía cambia y empieza a descender a la depresión de Guayllabamba.

La segunda zona está ubicada al oriente, en las estribaciones de la Cordillera Real, por lo tanto su relieve es montañoso y sus cotas varían entre 2600 m. a 4200 m., en la parte más alta nacen los ríos que descienden hasta la planicie de la primera zona; su extensión es de 266.3 km². En el mapa 1.1. se expone la topografía y las dos zonas involucradas en este estudio.



Mapa 1.1. Fisiografía de la zona de estudio. (Fuente topográfica: IGM – EMAAP-Q)

1.8.2. ACCESIBILIDAD

Se accede desde la ciudad de Quito a través de las carreteras pavimentadas de primer orden, vías Interoceánica e Intervalles; además, en la zona existen vías de segundo orden y caminos vecinales mediante los cuales se accede a varios de los puntos mencionados en este estudio.

1.8.3. HIDROGRAFÍA

La red hidrográfica es densa con quebradas que se profundizan hacia el Noroeste en donde aparece la depresión de Guayllabamba (Ver mapa 1.1.).

Entre los ríos y quebradas principales de Sur a Norte se encuentran: río Chiche, río Guambi, Qda. Santa Rosa, Qda. Lalagachi, río Urvia y Qda. El Quinche.

El río más importante es el Chiche, se encuentra al Norte de la subcuenca del río Pita y se forma en las estribaciones de los volcanes Antisana y Sincholagua (Santillán S. y Burbano O, 1980); la mayor parte de su recorrido es en dirección Sur a Norte, atraviesa el flanco Este del cerro Ilaló para luego desembocar en el río San Pedro a la altura de Nayón.

El resto de ríos se originan en la Cordillera Real y desembocan en el río Guayllabamba.

1.8.4. CLIMA

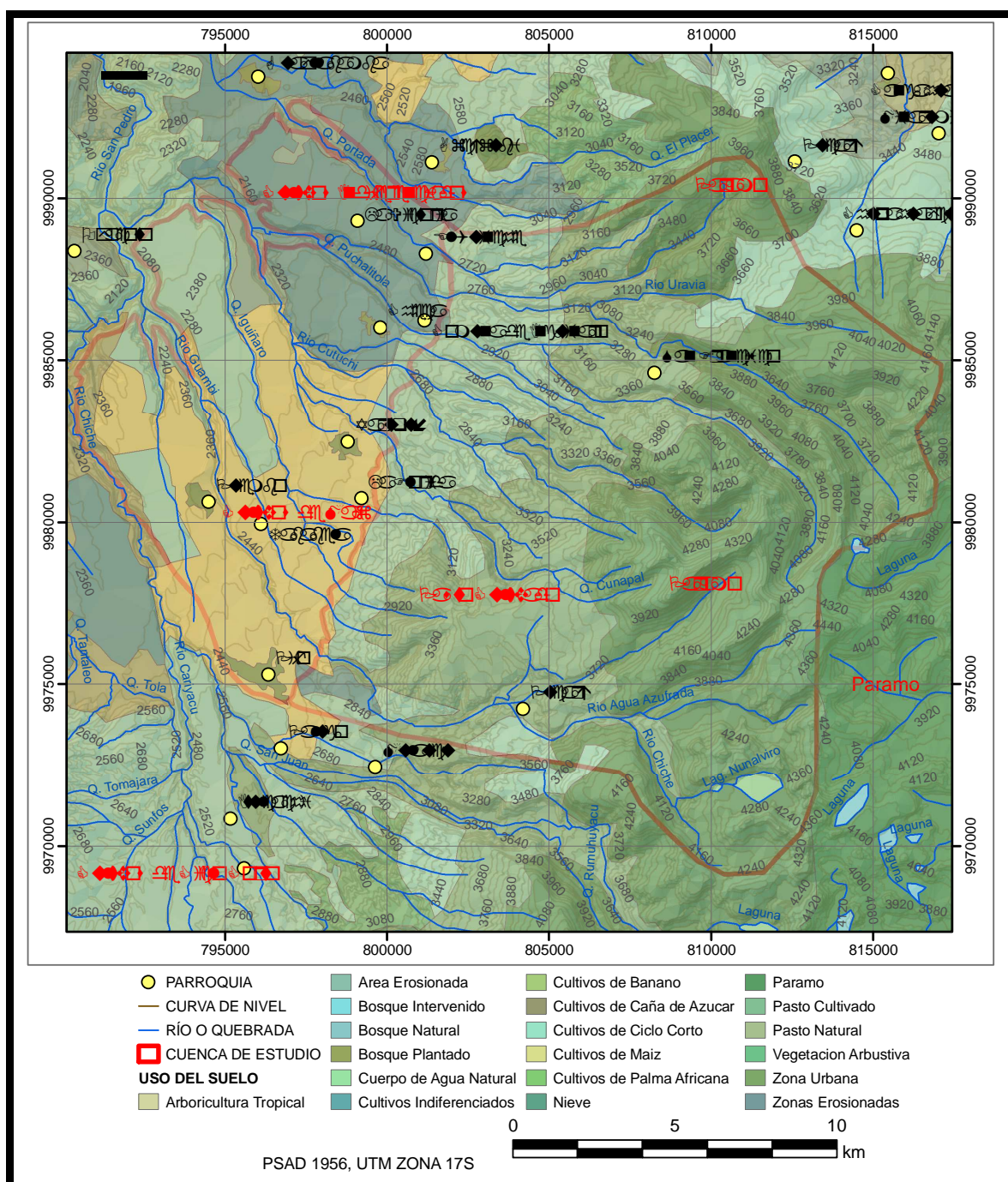
En las partes más altas que están ubicadas al Este de la cuenca (estribaciones de la Cordillera Real) el clima es Ecuatorial de alta montaña, en la parte central que es casi plana desciende a Ecuatorial mesotérmico semi húmedo y hacia el Norte de la cuenca el clima es Ecuatorial mesotérmico seco (Hernández T., 1982).

1.8.5. VEGETACIÓN

La vegetación nativa que predomina en el área de estudio está conformada por: tunas, cabuyos, sábila, algarrobo, sigse, guarango, faique, purga, chilca, molle, chamano, mosquera, higuera y otras especies xerofíticas (Hernández T., 1982).

Según el CORSINOR (2007), la vegetación agrocomercial está caracterizada por cultivos de fréjol, tomate, hortalizas (lechuga, col, cebolla, ajo, coliflor, zambo y zapallo) con el 24.3% de la superficie cultivada; maíz y fréjol con el 20%; papas con el 15.6%; frutales (chirimoyas, cítricos y aguacates) con el 15.6%; rosas con el 10%; espárragos con el 2.1%; pastos cultivados con el 5%, pastos naturales con el 5.4% y flores de verano con el 5%, ésta es la zona agrocomercial con

mayores exportaciones de flores en el país. En el mapa 1.2. se muestra la distribución del uso del suelo.



Mapa 1.2. Uso del suelo en la cuenca de estudio. (Fuente: SIGAGRO-MAG, 2005).

CAPITULO II

2 GEOLOGÍA

2.1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo la geología fue orientada al reconocimiento del acuífero y al planteamiento del modelo geológico conceptual.

Este reconocimiento se realizó enmarcando la zona de estudio dentro de un contexto geodinámico regional, confirmando la geología expuesta en los estudios previos a este trabajo y mediante la identificación y descripción de las formaciones que conforman el acuífero.

Para ampliar el detalle de la geología local y verificar la geología estudiada en la literatura, se levantaron 3 columnas estratigráficas; se comprobaron las 4 columnas levantadas por Beate B. – Corporación Quiport (2003) en la zona del nuevo aeropuerto en la parroquia de Tababela, se recopilaron 20 informes técnicos de perforaciones de pozos en donde constan las descripciones litológicas y se realizaron visitas de campo a la cuenca del río Guayllabamba (UTM: 797000-9992500) en donde se expone la estratigrafía completa de los límites de estudio.

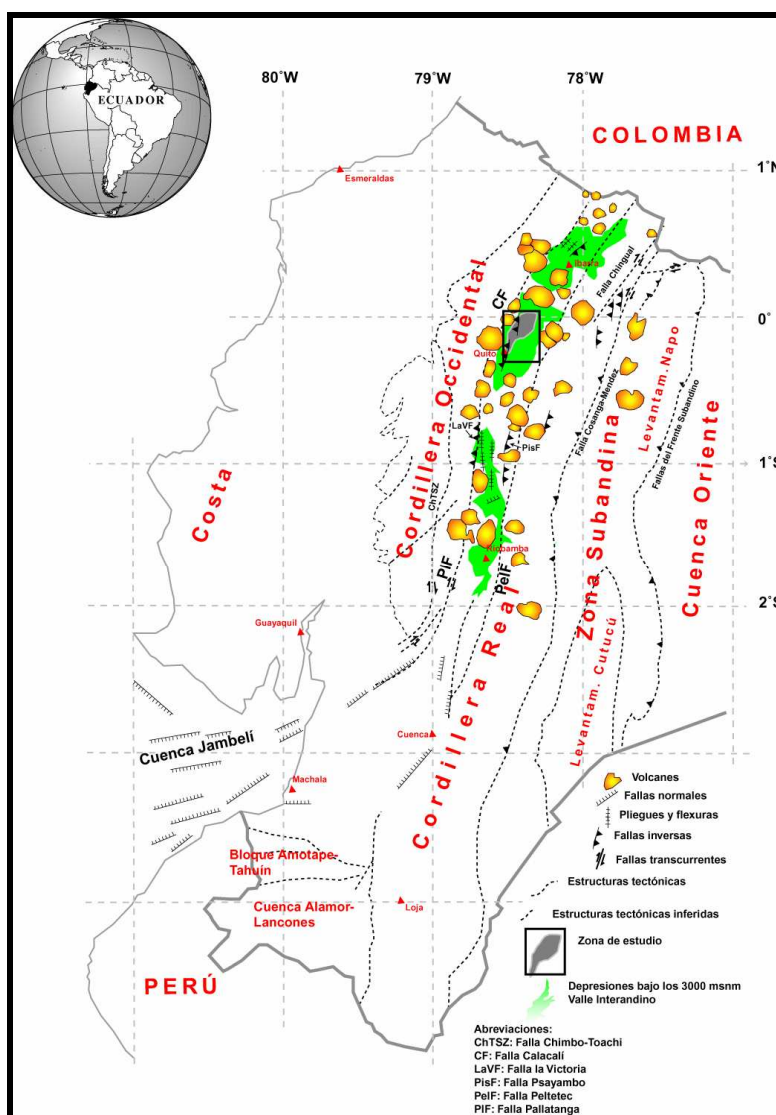
El mapa Geológico con el que se trabajó fue digitalizado en ArcGis y fue tomado de las hojas Geológicas Sangolquí y El Quinche a escala 1:50000 correspondientes al año 1980, se digitalizaron también las estructuras correspondientes al área de estudio tomando como base los mapas realizados por Quiport para el Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito (NQIA) en el año 2003; además se trabajó con la hoja geológica de Yaruquí a escala 1:25000 del año 1982, la que facilitó la interpretación de los cortes geológicos.

Con la información recopilada se identificaron las diferentes litologías, se efectuaron correlaciones, se establecieron las Unidades litológicas y se definieron sus espesores; lo que permitió determinar la disposición espacial de los estratos en la zona.

El resultado de este trabajo se presenta en cuatro cortes geológicos y en un modelo geológico conceptual que muestran los componentes del sistema y su configuración.

2.2. GEOLOGÍA REGIONAL

Desde el Oligoceno tardío, las deformaciones Nor-Andinas han sido controladas por la interacción convergente de las placas Nazca, Caribe y Sud América. Estas deformaciones desarrollaron en Ecuador las cadenas montañosas sub-lineares Cordillera Occidental y Cordillera Real con dirección aproximada N-S y separadas por el Valle Interandino (Ego F. & Sebrier M., 1996). (Mapa 2.1.)



Mapa 2.1. Mapa estructural simplificado del Ecuador con énfasis en la estructura IAV (Modificado de Winkler et. al., 2002) tomado de Villagómez D., 2003.

2.2.1. CORDILLERA REAL

La Cordillera Real es el cinturón más antiguo de los Andes ecuatorianos, está compuesta esencialmente por rocas metamórficas asignadas al pre-Cretácico superior y se encuentran cubiertas por depósitos volcánicos del Cenozoico.

Durante el Mesozoico ocurrieron eventos de acreción repetitivos y la transpresión dextral fue muy importante en la evolución tectónica de ésta parte de los Andes ecuatorianos.

Esta Cordillera ha sido definida por Aspden y Litherland (1992) en términos de cinco divisiones litotectónicas; de Oeste a Este son: Guamote, Alao, Loja, Salado y Zamora; los límites que estarían separando a éstas divisiones son las fallas regionales Peltetec, Frente Baños, Falla LLanganates y Falla Cosanga-Méndez.

Tomando en cuenta que el basamento de la zona de estudio estaría conformado por la división más occidental de la cordillera Real, se la describe a continuación:

La división Guamote está conformada por una secuencia sedimentaria continental constituida por ortocuarzitas intercaladas con pizarras o filitas de bajo grado. Las cuarcitas a veces son feldespáticas y varían de grano medio a grueso, hasta conglomerados guijarrosos; a veces ocurren clastos de cuarzo azul (Aspden J. & Litherland M., 1992).

2.2.2. VALLE INTERANDINO (VIA)

El VIA es la principal depresión tectónica intracordillera ecuatoriana, tiene 25 km. de ancho y 300 km. de largo, con una dirección N-S a NNE; está localizada entre 2º S y la frontera Colombiana (Ego E. & Sebrier M., 1996).

El Valle Interandino está dividido en tres segmentos: segmento Otavalo – Chota denominado Valle Interandino Norte, segmento Quito – Guayllabamba llamado Valle Interandino Central y segmento Latacunga – Riobamba nombrado como Valle Interandino Sur. El valle interandino central está limitado al Sur y al Norte por dos nudos; estos marcan cambios importantes en la dirección del valle. El nudo Norte está constituido por los volcanes Mojanda y Cusín y el Sur está

compuesto por los volcanes Rumiñahui, Pasochoa, Cotopaxi e Illiniza (Villagómez D., 2003).

Basamento

El basamento del VIA es complejo y pobremente conocido; la ocurrencia de rocas parecidas tanto a las de la Cordillera Real como a las de la Cordillera Occidental ha dado lugar a varias interpretaciones acerca de su origen.

En Villagómez (2003) se resume una de las teorías planteadas por Hughes & Pilatasig (2002) quienes proponen que las rocas de la Cordillera Real continúan bajo el VIA; esta deducción la hacen con base en:

- a) Anomalías negativas de Bouguer en el VIA (Feininger & Seguin, 1983)
- b) Presencia de rocas metamórficas en el flanco Este de la Cordillera Occidental (BGS-CODIGEM, 1997)
- c) Presencia de rocas metamórficas entre el melange Pujilí, en el margen Oeste del VIA (Hughes & Pilatasig, 2002)
- d) Presencia de xenolitos metamórficos en lavas del complejo volcánico Pichincha localizado en el margen occidental del VIA (Bruet, 1949)

“Sin embargo, es más probable que el basamento sea tectónicamente más complejo (Egüez, comm pers) y que involucre a rocas de Cordillera Occidental y Real en una cuña de acreción producida por el desmembramiento de parte de la Cordillera Real en el Jurásico Tardío-Cretácico Temprano (Egüez & Aspden, 1993) y a los procesos de acreción indicados” (Villagómez D., 2003).

Hipótesis

La apertura del VIA probablemente se dio hacia el Plioceno Tardío en respuesta a desplazamientos dextrales mayores a lo largo de su borde W. Los depósitos más antiguos que discordantemente cubren las rocas del basamento fueron derivados principalmente de la Cordillera Occidental. La secuencia inferior del relleno

sedimentario fue depositada en un leve régimen extensional E-O desde el Plioceno Tardío al Pleistoceno Temprano. La secuencia superior fue depositada principalmente durante el Pleistoceno Medio al Holoceno y fue derivada de una importante actividad volcánica en el área, la que acompañó a una inversión en el régimen de esfuerzos a compresión E-O (Villagómez D., Egüez A., Winkler W., 2002).

Relleno

El basamento está cubierto por depósitos volcano continentales y volcano sedimentarios de edades Oligoceno a Holoceno (Ego E. & Sebrier M., 1996).

El relleno sedimentario se ha dividido en dos secuencias principales, separadas por una discordancia mayor.

- **En la cuenca de Quito-Guayllabamba**

El relleno sedimentario consiste de complejas series de depósitos volcánicos y volcanoclásticos (Winkler et. al. 2002), que se encuentra dividido en dos secuencias: inferior y superior (Villagómez D., 2003).

En la secuencia inferior prevalecen facies lacustres, deltáicas, fluviales y de abanicos aluviales correspondientes a las formaciones Pisque y San Miguel (Winkler et. al. 2002). La secuencia superior consiste de depósitos volcánicos primarios, lahares, flujos hiperconcentrados y depósitos fluviales que corresponden a las formaciones Guayllabamba, Chiche, Machángara, Mojanda y Cangahua. (Villagómez D., 2003).

2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El VIA está limitado estructuralmente por fallas tanto al Este como al Oeste; al Este se encuentran la falla Peltetec y al Oeste se localizan las fallas Calacalí y Pallatanga.

Internamente el VIA está afectado por una gran cantidad de fallas con direcciones preferenciales Noreste - Suroeste resultado de la interacción entre las placas tectónicas continental y oceánica.

La estructura del VIA ha sido estudiada por varios autores los cuales han planteado modelos hipotéticos que explican su origen. En Villagómez D. (2003), se resumen cuatro modelos que explican la estructura del VIA:

1.- Hall & Yépez (1980), consideran que el VIA se había formado por procesos tectónicos extensivos E-O en el Mio-Plioceno.

2.- En 1992, Tibaldi y Ferrari con base en estudios de geotectónica realizados principalmente por Soulas et al (1991) y otros datos de campo, llegan a la conclusión de que el VIA es una cuenca de "piggyback" y que su deformación es producida por movimientos diferenciales entre la Cordillera Occidental y la Cordillera Real, durante el Plio-Cuaternario.

3.- Ego & Sebrier (1996), consideran al VIA como una banda comprimida (restraining bend) y a los Andes septentrionales ecuatorianos como una gran zona transpresiva dextral. Este modelo está basado en el análisis de mecanismos focales de sismos someros (Ego et al, 1993, 1996; Ego & Sebrier, 1996). Los análisis indican que el estado de esfuerzos actual en los andes septentrionales ecuatorianos, es homogéneo, y con un esfuerzo principal E-O. A partir del trabajo de campo, Ego & Sebrier concuerdan en que el esfuerzo compresivo regional no ha cambiado significativamente desde el Pleistoceno Temprano hasta la actualidad en todo el VIA, pero que el acortamiento E-O no ha sido constante siendo mayor en el Sector Sur que en el Sector Central del VIA.

4.- Recientes trabajos que incluyen nuevas edades proponen un modelo en donde el VIA se formó como resultado de desplazamiento a lo largo de la banda comprimida (restraining bend) formando una cuenca de tipo "spindle shaped", que se abrió y cerró como movimiento de tijeras entre las dos cordilleras (Winkler et al, in press) desde hace unos 6 Ma., presumiblemente en respuesta a un incremento en el acoplamiento de la subducción del Ridge Carnegie.

- **Cuenca Pifo – El Quinche**

En Julio del 2003, la Corporación Quiport, llevó a cabo un programa de mapeo estructural en el área correspondiente al Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito (NQIA) al cual denominaron “Plateau Caraburo”. El objetivo de este programa fue identificar estructuras como fallas o sistemas de fracturas que pudieran constituir un foco de colapsos estructurales en el NQIA.

Para ello usaron fotografías aéreas, mediante las que identificaron lineamientos que verificaron en el campo; además realizaron análisis de fracturas mediante diagramas de rosas. Las estructuras principales identificadas fueron:

- Al Oeste del NQIA: lineamiento del río Guambi
- Al Norte del NQIA: lineamiento del río Uravia
- Rasgo curvilíneo Santa Rosa
- Lineamiento del río San Pedro

En las fotografías aéreas identificaron varios lineamientos continuos subparalelos a lo largo del río Guambi, sin embargo, en el mapeo de campo no encontraron evidencias de los lineamientos y tampoco fallamientos mayores ni desplazamientos de estratos sedimentarios en las unidades expuestas (Formación Chiche y Formación Cangahua), lo que significa que no ha ocurrido desplazamiento alguno en sentido vertical, que afecte a éstas unidades.

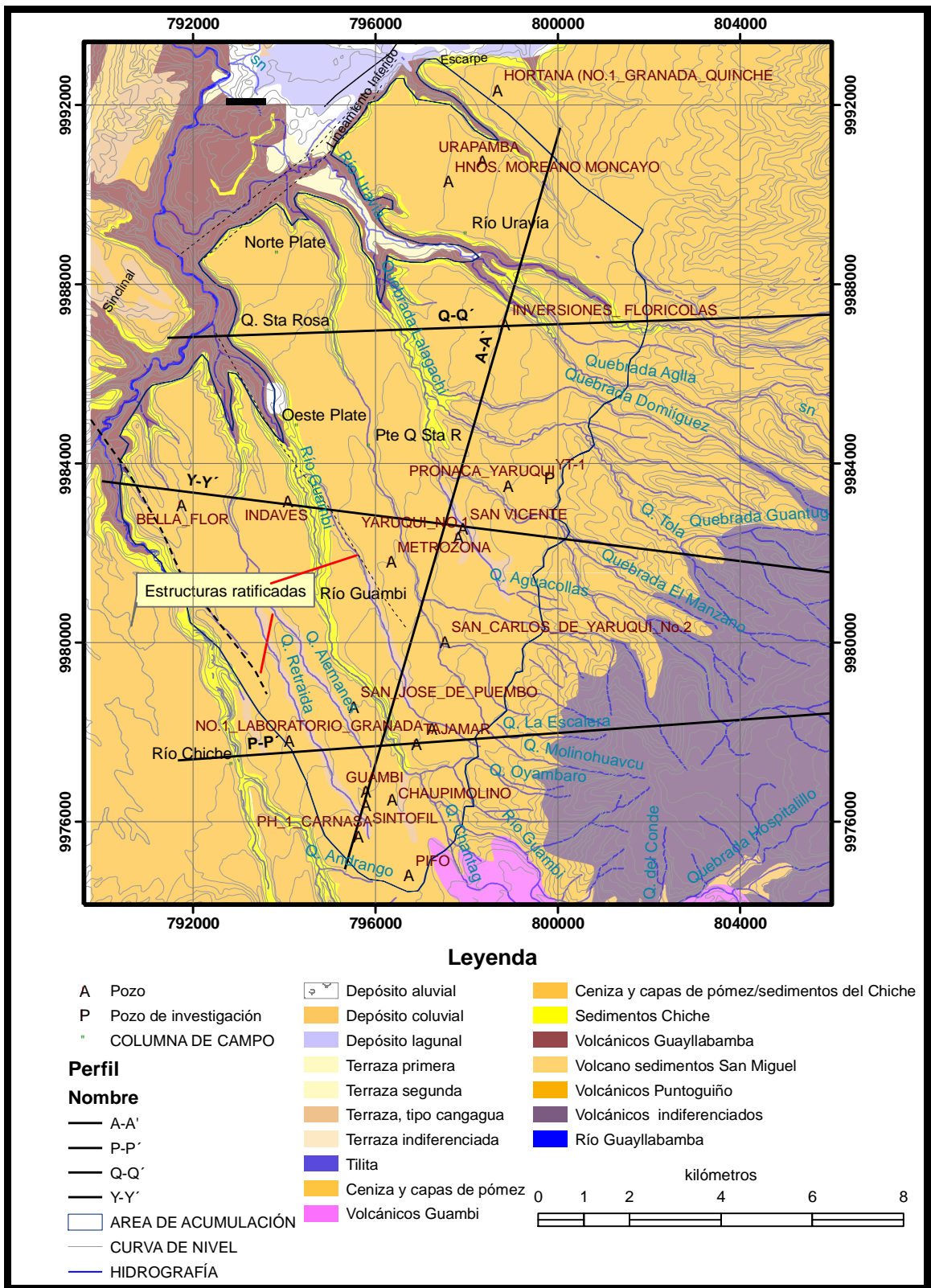
Realizaron el mapeo del río Uravia en la parte Noreste del NQIA, en donde encontraron escarpes de fallas conjuntamente con depósitos no consolidados de tobas retrabajadas, arenas, limos y brechas locales presentes en aproximadamente cien metros de extensión a lo largo de las laderas del valle; los depósitos eran bloques caóticos de sedimentos pobremente consolidados con varias orientaciones estructurales. El material encontrado presentaba litologías parecidas a las formaciones Chiche y Cangahua por lo que dedujeron que provino de la erosión de éstas formaciones; además los bloques de material sedimentario eran similares a los materiales depositados en la depresión Guayllabamba descritos por Villagómez et. al. (2003). Siendo la depresión Guayllabamba una

estructura de colapso, interpretaron a este rasgo como el probable límite Sur de ésta estructura.

Determinaron que el rasgo curvilíneo de la Quebrada Santa Rosa identificado en las fotografías aéreas podría ser una característica de la forma del lecho del río, ya que en el campo no evidenciaron ningún desplazamiento entre los contactos de las formaciones Chiche y Cangahua. Las únicas estructuras halladas fueron dos fracturas casi verticales en la parte más baja de la quebrada Santa Rosa (UTM: 794100, 9990000) de las que no encontraron rastros en las localidades cercanas, entonces interpretaron a éstos rasgos como estructuras más antiguas que la formación expuesta (Formación Chiche).

En los mapas geológicos de la DGGM (1980 y 1982), hojas El Quinche y Sangolquí, se presentan varias fallas inferidas. Villagómez y Quiport en el año 2003 revisaron parte de éstas estructuras y los resultados fueron la ratificación de los lineamientos en el río Guambi y en el río Chiche (Ver mapa 2.2.). Estos estudios abarcaron solo la parte Oeste del área de este proyecto, por lo que la parte restante quedó sin estudio. Los mapas geológicos de la DGGM presentan tres fallas inferidas principales cerca de la Cordillera Real; pero con la información recopilada de los pozos de agua, pozo de investigación, mapas topográficos y observaciones de campo, no se logró confirmar la existencia de éstas fallas.

Alulema - EMAAP-Q (2005), basado en observaciones cartográficas y alineación de vertientes sugiere la existencia de una falla con dirección Noreste que estaría cruzando el NQIA cuyas coordenadas en la parte Sur son (UTM: 790974 E; 9981542 N) y en la parte Norte son (UTM: 799443 E; 9992804 N), ésta estructura sería la prolongación de una falla inferida ubicada al Suroeste de la zona de estudio y que se presenta en el Mapa geológico de la DGGM (1980), hoja El Quinche. En los estudios realizados por Villagómez y Quiport (2003) no se presenta ningún lineamiento relacionado con esta supuesta falla. Mediante observaciones de campo y análisis cartográfico realizado en este trabajo, tampoco se encontraron evidencias de la supuesta falla, por lo tanto, por falta de sustento no será tomada en cuenta como rasgo estructural.



Mapa 2.2. Mapa geológico (Fuentes: geológica DGM, 1980 y topográfica IGM-EMAAP-Q, 2005).

2.4. GEOLOGÍA LOCAL

2.4.1. INTRODUCCION

La estratigrafía de la zona de estudio está conformada por tres de las cinco Formaciones (Fm.) de la secuencia superior sedimentaria del VIA: Fm. Guayllabamba, Fm Chiche y Fm. Cangahua. La nomenclatura utilizada fue tomada del trabajo de Villagómez D. (2003).

El estudio lito-estratigráfico se realizó mediante observaciones de campo, estudio de los testigos de perforación de un pozo de investigación, análisis de las descripciones litológicas registradas en informes técnicos de perforación de pozos de agua de la zona y el análisis de la bibliografía disponible. En la tabla 2.1. se presenta un resumen de las fuentes de información utilizadas para este trabajo:

Fuente	Tipo	Ubicación	Nombre	UTM	Cota (m)	Profundidad (m)	Ubicación en el texto
Observaciones de campo	Columnas estratigráficas	Tumbaco	Puente del río Chiche	792885, 9977230	2395.5	85	Anexo 1
		Puembo	Qda. del río Guambi	794685, 9980830	2440	150.8	
		El Quinche	Qda. del río Uravia	798013, 9989078	2435.9	127.2	
EMAAP-Q, 2005	Pozo de investigación	Checa	YT-1 (La Tola)	799820, 9983658	2597	300	Anexo 2
Beate B., 2003	Columnas estratigráficas	Tababela	Qda. Santa Rosa	795072, 9986888	2360.6	75.8	Anexo 3
			Puente de la Qda. Santa Rosa	795896, 9984341	2440	27.9	
			Norte del Plateau Caraburo	793875, 9988641	2350.5	36.5	
			Oeste del Plateau	794319, 9984790	2386.5	67.98	
Varias empresas perforadoras	Informes técnicos de perforación de pozos de agua	Varios	Varios	Varios	-	Varias	Anexo 4 y Tabla 2.2.
DGGM, 1980	Hoja geológica	-	El Quinche	-	-	-	Mapa 2.2.
			Sangolquí				

Tabla 2.1. Resumen de las fuentes de información más relevantes utilizadas en el estudio de la geología local.

Para el reconocimiento y definición de la configuración de las formaciones se utilizaron 19 registros de perforación; en la tabla 2.2. se resumen las

características principales de 21 pozos identificados en la zona de estudio, incluido el pozo de investigación.

Es necesario indicar que todos los pozos fueron perforados utilizando un mecanismo de rotación destructiva. De acuerdo a ésta situación, a más de que las descripciones litológicas corresponden a los rípios de perforación, en general son pobres y utilizan términos generalizados; esto constituyó un limitante durante la interpretación de la información.

Para visualizar la distribución de las formaciones en el área de estudio se digitalizaron las hojas geológicas El Quinche y Sangolquí, escala 1:50000 de la DGGM (1980); sobre este mapa se ubicó toda la información útil que permitiera un mejor entendimiento de la geología de la zona (Ver mapa 2.2.).

Con estos antecedentes se definió la geología local determinando las potencias de las formaciones en los registros de perforación con base en las descripciones litológicas expuestas tanto en las columnas levantadas en el campo como en el pozo de investigación y la correlación estratigráfica entre sus capas, la misma que se presenta en la figura 2.1.

No.	CÓDIGO	NOMBRE PUNTO DE AGUA	Fecha	PARROQUIA	X	Y	COTA DE SUPERFICIE	PROFUNDIDAD (m)	ESPESOR FM. CANGAHUA	ESPESOR FM CHICHE	ESPESOR FM. GUAYLLABAMBA
					UTM	UTM					
1	Pi1	SINTOFIL	01/07/1988	PIFO	795788.10	9976363.90	2560.00	201.17	66.00	134.00	-
2	Pi2	GUAMBI	21/02/1990	PIFO	795788.20	9976671.30	2560.00	184.00	40.00	144.00	-
3	Pi3	PIFO (ESTADIO CALLUMA)	17/11/2004	PIFO	796738.00	9974806.00	2621.19	224.00	57.00	167.00	-
4	Pi4	PH 1 CARNASA	01/12/2004	PIFO	795629.00	9975673.00	2560.00	252.00	50.00	202.00	-
5	Pi5	CHAUPIMOLINO	01/06/2003	PIFO	796362.00	9976492.00	2560.00	207.26	61.00	?	40?
6	Pu1	SAN JOSE DE PUEMBO	01/09/2004	PUEMBO	795529.00	9978562.00	2520.00	200.00	58.00	142.00	-
7	Pu2	INDAVES	01/09/1994	PUEMBO	794082.00	9983164.00	2400.00	280.42	60.96	219.46	60.90
8	Pu3	BELLA FLOR	01/08/1998	PUEMBO	791744.90	9983064.90	2360.00	300.00	70.00	154.00	76.00
9	Pu4	NO.1 LABORATORIO GRANADA	01/07/2004	PUEMBO	794112.00	9977814.00	2482.57	213.36	57.91	155.45	-
10	T1	METROZONA (Textiles Nacionales)	25/09/1987	TABABELA	796345.90	9981804.10	2480.00	172.00	58.00	114.00	-
11	Y1	COOP. TAJAMAR	01/03/1994	YARUQUI	796904.00	9977737.00	2560.00	183.00	52.00	131.00	-
12	Y2	TABABELA	01/06/2004	YARUQUI	797242.00	9978068.00	2576.30	213.36	70.10	143.26	-
13	Y3	YARUQUI NO.1	01/11/1989	YARUQUI	797813.00	9982359.00	2519.58	238.00	52.00	168.00	18.00
14	Y4	SAN CARLOS DE YARUQUI No.2	01/11/1998	YARUQUI	797525.00	9980023.00	2520.00	165.00	49.00	116.00	-
15	Y5	PRONACA YARUQUI	-	YARUQUI	798913.0	9983507.0	2573.0	-	-	-	-
16	Y6	YARUQUI NO.1A (San Vicente)	01/08/2001	YARUQUI	797924.10	9982541.60	2519.20	237.74	49.00	152.00	37.00
17	CH1	INVERSIONES FLORICOLAS	01/08/1992	CHECA	798851.00	9987102.00	2520.00	276.00	64.00	146.00	66.00
18	CH2	YT-1 (La Tola)	01/12/2005	CHECA	799820.00	9983658.00	2597.90	300.00	85.20	114.00	100.80
19	Q1	HNOS. MOREANO MONCAYO	01/09/2000	EL QUINCHE	797600.00	9990300.00	2441.10	305.00	55.00	148.00	102.00
20	Q2	URAPAMBA	17/11/2006	EL QUINCHE	798350.00	9990750.00	2467.00	288.00	42.00	128.00	118.00
21	G1	HORTANA (NO.1 GRANADA QUINCHE)	01/08/1993	GUAYLLABAMBA	798673.00	9992340.00	2447.80	170.69	42.67	128.02	-

Tabla 2.2. Resumen de la información más relevante de los registros técnicos de perforación, incluye el pozo de investigación.

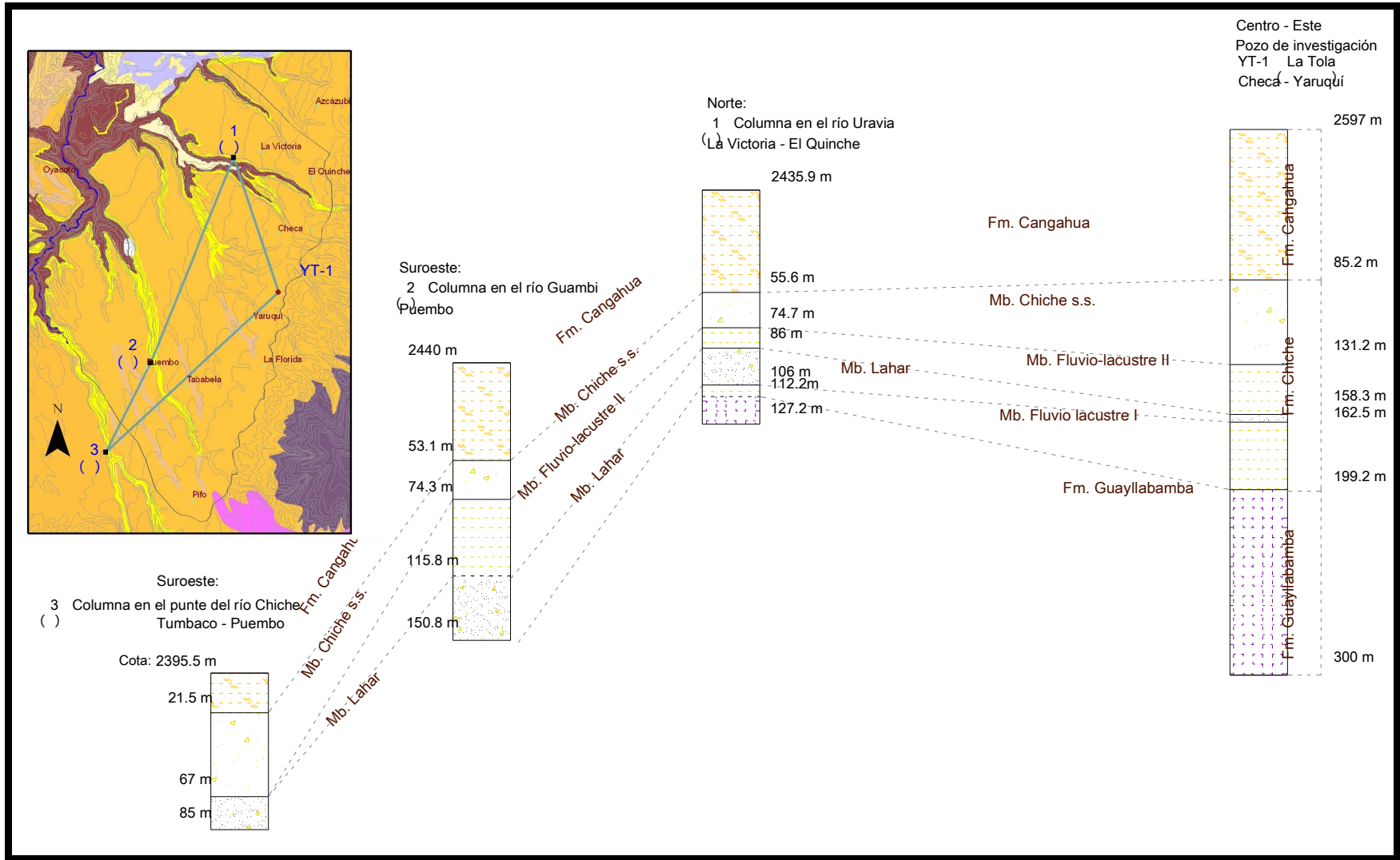


Figura 2.1. Correlación estratigráfica entre las columnas levantadas para este trabajo y el pozo de investigación YT-1 (La tola).

2.4.2. ESTRATIGRAFIA

2.4.2.1. Formación Guayllabamba

Esta formación (Fm.) se encuentra bajo el límite inferior de estudio pero es importante conocer su composición litológica para entender la función que cumple en el sistema estudiado.

Registra varias facies como depósitos laharíticos (**Miembro Lahar**), domos volcánicos (**Miembro Domos**), depósitos de flujos de lava, flujos piroclásticos, y avalanchas (**Miembro Volcánico**), y depósitos de abanicos aluviales (**Miembro Aluvial**) que son evidencia de volcanismo intenso y actividad tectónica compresiva durante su depositación (Villagómez D, 2003).

De ésta formación, dos miembros se presentan en el área de estudio, al Norte se encuentra el Miembro (Mb.) Lahar mientras que en el centro y Sur se encuentra el Mb. Volcánico. El contacto entre estos dos miembros es transicional.

Su espesor no está bien definido pero tiene al menos 300 m (Corporación Quiport S.A., 2003).

Mb. Lahar (*Posiblemente Pleistoceno Medio*)

Aflora al Norte de la zona de estudio, se presentan buenos afloramientos en la Qda. El Quinche (UTM: 798500, 9991500). En el mapa geológico de Villagómez (2003) aparece a la altura de San Miguel del Común y está limitado a lo que es la actual depresión Guayllabamba y zonas aledañas.

Según Villagómez (2003) consiste de bancos métricos de flujos de lodo conteniendo clastos volcánicos intermedios generalmente oxidados, de color rojo, clastos pumíticos, clastos de limolitas y areniscas; además señala que hacia el S de la depresión Guayllabamba, es más común la presencia de clastos volcánicos de composición intermedia típicamente oxidados con colores rojos y en menor cantidad clastos de composición ácida.

El espesor varía entre 30 y 60 m dentro de la actual depresión de Guayllabamba y 100 m hacia Oyacoto (Villagómez D., 2003).

En Oyacoto está sobreyacida por la Fm. Chiche, con una ligera discordancia erosional.

En el campo se ratificó que este miembro se presenta en bancos métricos de flujos de lodo con intercalaciones de areniscas y de lavas andesíticas fracturadas. En la foto 2.1. se muestran los flujos de lava presentes bajo la Fm. Chiche.



Foto 2.1. Flujos de lava de la Fm. Guayllabamba que subyacen a flujos piroclásticos de la Fm. Chiche. Quebrada El Quinche (UTM: 798500, 9991500)

En los registros de perforación de los pozos Hnos. Moreano Moncayo (ASUBSA, 2000) y Urapamba (EMAAP-Q, 2006) se describe a este miembro como: roca dura, material volcánico, gravilla con presencia de arena, arena gruesa, arena gruesa más lentes de arcilla, arena media, arcilla, arena media más gravilla, arena fina consolidada con trazas de gravilla, arcilla globular (Anexo 4.).

De acuerdo a la descripción litológica, los centros de emisión de los productos son varios; así las obsidias y lavas encontradas al Noreste sugieren un origen en la Cordillera Real.; la presencia de flujos de lodo hacia el Norte y Noroeste se debieron a la intensa actividad volcánica (Mb. Volcánico de la Fm. Guayllabamba)

cuyas fuentes podrían ser el Proto-Rucu Pichincha y el Ilaló (Villagómez D., 2003).

Mb. Volcánico (*Pleistoceno Medio*)

En el mapa geológico de Villagómez (2003) aparece a la altura de San Miguel del Común en contacto transicional con el Mb. Lahar de la Fm. Guayllabamba.

Su espesor sobrepasaría los 200 m hacia el Sur, y hacia San Miguel del Común no llegaría a 60 m (Villagómez D., 2003).

Villagómez (2003) indica que no se ha logrado una buena discriminación de este miembro debido a la existencia de una gran variedad de litologías; consta de varios productos volcánicos primarios, como flujos de lava junto con flujos piroclásticos de tipo block & ash, además incluye depósitos de avalanchas.

En el pozo de investigación (YT-1), los testigos de perforación indican que este miembro está conformado por un conglomerado cuyos clastos constituyen el 70% del conjunto, los líticos son andesitas de color gris-oscuro y rojo, de formas subredondeadas, con tamaños de hasta 70 cm., predominando los tamaños entre 0.5 y 3 cm. El 30% restante es una matriz arenosa de color gris. El conjunto en general está bien consolidado y se encuentra intercalado con tobas gris verdosas de grano fino a medio, bloques andesíticos vesiculares y pómez con tamaños menores a 3 mm

En los registros litológicos de perforación de pozos los contactos han sido inferidos y las descripciones que se presentan en los pozos Chaupimolino (EMAAP-Q, 2003) y Bella flor (PERFOJAPAN, 1998) en la parroquia Puembo, se resumen en; lava fracturada, lava ácida, lavas con arena, piroclastos, aglomerado volcánico, clastos en matriz limosa.

Según Villagómez D., (2003), los productos volcánicos hacia el Sur y Oeste son más proximales, provienen de los volcanes Ilaló y Rucu Pichincha (o una estructura pre-Rucu Pichincha según Geotermia Italiana, 1989) y hacia el Este lo más probable es que la fuente estuvo en la Cordillera Real.

2.4.2.2. Formación Chiche

El nombre de ésta formación ha sido tomado del río Chiche (DGGM, 1980).

Esta caracterizada por contener depósitos Fluvio-lacustres interestratificados con depósitos volcánicos. La parte más baja de la formación comprende sedimentos fluvio-lacustres (**Mb. Fluvio-Lacustre I**) depositados sobre una superficie topográfica muy irregular; este a su vez está sobreyacido por depósitos laharíticos (**Mb. Lahar**); y el Mb. Lahar está sobreyacido por depósitos fluvio-lacustres (**Mb. Fluvio-Lacustre II y Chiche sensu strictu**). La potencia del conjunto llegaría hasta 200 m (Corporación Quiport S.A., 2003).

Según los registros de perforación, en la zona de estudio la potencia de ésta formación varía entre 114 m (Pozo YT-1) a 219 m (Pozo Indaves)

Un fósil reportado por Lavenue et al. (1996) en el tope de la formación indica una edad Pleistoceno tardío (~0.5 Ma).

La fuente de los materiales de ésta formación es distinta para los sectores Norte (Sector Guayllabamba) y Sur (Villagómez D., 2003).

Mb. Fluvio-Lacustre I (*Pleistoceno Superior*)

“Su límite Oeste es el borde oriental de la loma Calderón-Catequilla y va pinchándose hacia ésta (al igual que toda la Formación Chiche)” (Villagómez D., 2003).

El espesor es variable, disminuye hacia el Sur de Oyacoto, y aumenta hacia el Norte, con espesores entre 10 a 15 m hacia el Sur y 60 m hacia el Norte. Estos cambios bruscos de espesor pueden deberse a la topografía irregular dejada por la depositación de la Fm. Guayllabamba (Villagómez D., 2003).

Sus contactos inferior con la Fm Guayllabamba y superior con el Mb. Lahar (Fm. Chiche) son erosivos en los dos casos (Villagómez D., 2003).

Consiste de limolitas cremas, tobas blancas intercaladas con areniscas grises en capas centimétricas, algunas tienen concreciones oxidadas. Hacia la base ocurren micro conglomerados con líticos andesíticos y pómez. Hacia el tope prevalecen niveles arenosos finos que presentan estratificación cruzada.

Los testigos del pozo de investigación YT-1 (EMAAP-Q, 2005) indican que este miembro comprende sedimentos fluvio lacustres compuestos de intercalaciones de arenas grises de grano fino a medio con finas capas de toba gris verdosa, lapilli y micro conglomerados con líticos andesíticos medianamente consolidados; la estratificación es fina y subhorizontal.

La descripción litológica en el registro de perforación del pozo Yaruquí 1 (EMAAP-Q, 1989) indica que también existen capas de arcillas caoliníticas.

Basado en la geometría de este miembro y en las figuras de corriente (ondulitas), Villagómez D. (2003) propone que la fuente estuvo en el Norte.

Mb. Lahar (*Pleistoceno Superior*)

Anteriormente conocido como “Toba aglomerática” (DGGM, 1982)

Este miembro es considerado como un horizonte marcador puesto que es constante en toda el área de estudio; así se lo encuentra en las parroquias Tumbaco-Puembo (columna del río Chiche), Puembo (columna río Uravia), Yaruquí (pozo Yaruquí 1), Checa (pozo YT-1) y El Quinche (Qda. El Quinche).

Se encuentran buenos afloramientos en la Qda. El Quinche (UTM: 797000, 9992500) y en la Qda. del río Chiche (UTM: 792885, 9977230). (Ver foto 2.2.).

Su espesor es variable, tiene 10 m de potencia al Norte de la depresión Guayllabamba y de 30 a 40 m hacia el centro y Sur de la depresión (Villagómez D., 2003).

El contacto inferior (con el Mb. Fluvio Lacustre I) y el superior (con el Mb. Fluvio Lacustre II) corresponden a discordancias erosionales (Villagómez D., 2003).



Foto 2.2. Mb. Lahar (Fm. Chiche), en el puente del río Chiche (UTM: 792885, 9977230).

Este miembro se presenta en grandes bancos masivos de color gris claro o crema; se le puede denominar como “Brecha laharítica” matriz soportada, intercalada con finas capas de arena fina a media y a veces tefra fina blanca-amarillenta. En realidad son flujos de lodo con clastos (5-40%) angulares a subredondeados de composición andesítica, andesitas oxidadas, pómez y obsidianas y con 60 % de matriz limo arenosa fina.

En los testigos del pozo de investigación YT-1 (EMAAP-Q, 2005) se encontró que este miembro corresponde a una toba brechosa con 60% de matriz de grano fino, 40% de clastos rojizos, grises claros y oscuros, con tamaños de hasta 4 cm; en general el conjunto está bien consolidado. Además la litología expuesta en el registro de perforación del pozo Yaruquí 1 (EMAAP-Q, 1989) indica que este miembro está compuesto por cantos rodados andesíticos con obsidianas, gravas y arenas, intercalados con tobas.

La presencia de obsidiana en estas facies indica que hubo un aporte importante desde la Cordillera Real.

Mb. Fluvio lacustre II (*Pleistoceno Superior*)

Está más desarrollado hacia el NE de la cuenca Quito-Guayllabamba y limitado al Oeste por la Loma Calderón-Catequilla (Villagómez D., 2003).

Existen buenos afloramientos en los cauces de los ríos Urvia (UTM: 798013; 9989078) y Guambi (UTM: 794685; 9980830). (Ver foto No. 2.3.)



Foto 2.3. Mb. Fluvio-Lacustre II, en el cauce del río Guambi.

En la columna del río Chiche no está presente, lo que indica que hacia el Sur este miembro pierde potencia. Según Villagómez D. (2003) hacia el centro de la depresión Guayllabamba el espesor varía entre 20 y 40 m y hacia Oyacoto no supera los 15 m; el mismo autor supone que la irregularidad del espesor se debe a la irregularidad de la paleotopografía dejada por el Mb Lahar de la Fm Chiche.

Los contactos son ligeramente erosivos en la base y en el techo, con los Mb. Lahar y Mb. Chiche s.s. respectivamente (Villagómez D., 2003).

Está conformado por capas de arena gruesa de color gris, arena conglomerática gris, tefra fina blanca-amarillenta y negra, capas centimétricas de pómez; el conjunto en general se encuentra estratificado con un ligero buzamiento de aproximadamente 5° al Este. Las areniscas presentan estratificación cruzada.

En los testigos de perforación del pozo de investigación YT-1 (EMAAP-Q, 2005) se observan alternancias de areniscas de grano fino a medio de colores marrón y gris, con estratificación cruzada; en los sedimentos grises aparecen bandeamientos milimétricos claros; el material tiene alta consolidación. Este conjunto está intercalado con tobas (a veces pumíticas) de grano fino a medio, bien soldadas con oxidación en forma de manchas y vetas centimétricas, con pómez oxidadas de hasta 2 cm.

Mb. Chiche s.s. (*Pleistoceno Superior*)

Su localidad tipo es en el puente del río Chiche (UTM: 792885, 9977230) y existen buenos afloramientos en los cauces de los ríos Guambi (UTM: 794685; 9980830) y Urvia (UTM: 798013; 9989078).

Su potencia llega hasta 100 m en su localidad tipo, mientras que hacia el límite N de la depresión Guayllabamba, no llega a 10 m (Villagómez D., 2003).

El contacto en la base es erosional, mientras que en el techo es concordante con la Fm. Cangahua.

Consiste de capas de conglomerado volcánico (hacia el Sur) y fluvial (hacia el Norte) intercaladas con arenas grises, tobas y flujos piroclásticos. Localmente se observan estructuras gradadas normales que cambian a inversas en el mismo estrato. En la foto 2.4. se muestra la intercalación existente entre conglomerados, y tobas en el cauce del río Guambi.



Foto 2.4. Mb. Chiche s.s., en el cauce del río Guambi.

El conglomerado está compuesto por clastos subangulares de andesitas piroxénicas, traquiandesitas con biotita y andesitas basálticas, también están presentes en cantidades pequeñas fragmentos de riolitas, cherts, obsidianas y grawacas. La matriz es arenosa y consiste de cristales primarios de plagioclasas, piroxenos, anfíboles, biotita, magnetita y material lítico volcánico fino; el cemento es de carbonato de calcio y óxidos de hierro (Vera R., 1983). Análisis sedimentológicos en su localidad tipo indican que los conglomerados parecen ser más bien flujos de lodo (lahares) (Clapperton Ch. & Vera R., 1986); sin embargo hacia el Norte éstos conglomerados van gradando a fluviales.

Localmente se identifican paleocanales (Foto No.2.5.) los mismos que estarían indicando múltiples cambios en la dirección de las corrientes durante la depositación de éstos sedimentos.



Foto No.2.5. Paleocanal en el Miembro Chiche s.s.

En resumen las descripciones de los registros de perforación de pozos indican que este miembro corresponde a la intercalación de gravas con tobas de grano fino a tobas pumíticas, y depósitos de arena media; además el conjunto tiene una consolidación de ligera a media.

Estudios de éstos depósitos realizados por Vera R. (1983) señalan que los Lahares probablemente provinieron de varias fuentes al Sur como el Cotopaxi, Pasochoa y Rumiñahui. En cuanto a la tefra fina intercalada, lo más probable es que represente el material fino de caída del volcanismo explosivo que generó los lahares (Clapperton Ch. & Vera R., 1986).

2.4.2.3. Formación Cangahua

Esta formación está presente en toda el área de estudio, consiste de cenizas de color caqui amarillento, de grano grueso intercalada con capas de tefra blanca (ceniza y pómez blanca). En la descripción de los pozos la denominan como arcilla limosa, limo arenoso, arenas de gruesa a fina, toba soldada con intercalaciones de ceniza volcánica y lapilli de pómez. Está consolidada y endurecida por los factores climáticos.

La cangahua está compuesta principalmente de vidrio volcánico alterado, más minerales volcánicos tales como plagioclasa, hornblenda, piroxenos, magnetita,

biotita, feldespato de potasio y cuarzo. El vidrio se altera con el paso del tiempo y forma minerales arcillosos (Maldonado, 1973; Vera y López, 1986; Maclellan, 1995 en Hall M. & Mothes P., 1996).

La cangahua nunca va a presentar una composición idéntica al material original, pues la naturaleza de este último puede ser escondido rápidamente por los procesos de meteorización (Hall M. & Mothes P.; 1996)

La cangahua característicamente tiene una depositación periclinal y las capas individuales de cangahua muestran espesores uniformes sobre grandes extensiones (Hall M: & Mothes P., 1996).

El espesor determinado en los registros de perforación varía entre 40 a 60 m aunque en el pozo de investigación YT-1 de la EMAAP-Q ubicado en la parroquia de Checa a la cota de 2597.72 m se estableció un espesor de 85 m.

Los depósitos de cangahua Post-Chiche tendrían una edad Pleistoceno Superior a Holoceno puesto que existen varias edades radiométricas en ella y en cenizas que están dentro de la formación (Villagómez D., 2003).

El origen de la Cangahua aún no ha sido establecido pero las capas de ceniza blanca intercalada corresponden a varios orígenes volcánicos como los volcanes Chacana, Chalupas y Guagua Pichincha. Estas capas han sido datadas arrojando edades de 0.6 Ma. a 0.01 Ma. (Hall M. & Mothes P., 1996).

2.4.3. INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Con base en las hojas geológicas de la DGGM (1980), el mapa de Villagómez D. (2003), las columnas levantadas en el campo, el pozo de investigación, las columnas levantadas por Beate B. (2003) y los registros litológicos de perforación de pozos que aparecen en los anexos 1, 2, 3 y 4 respectivamente, se elaboró cuatro perfiles geológicos, uno longitudinal y tres transversales al área de estudio, ubicados en la parte Sur, Centro y Norte de la misma (Ver mapa 2.2.); éstos perfiles permitieron interpretar la configuración geológica de la cuenca que finalmente se representó en un modelo geológico conceptual.

Este modelo fue construido tomando en cuenta únicamente los espesores de cada formación, la delimitación de cada miembro en toda el área de estudio no fue factible debido a las limitaciones presentadas en la información.

Perfil geológico P-P'

Ubicado en la parte Sur de la zona de estudio, a la altura de la parroquia de Pifo (Figura 2.2.), tiene una dirección Suroeste-Noreste, y va desde el río Chiche hasta el cerro Coto Urcu localizado en la Cordillera Real. En este corte se correlacionan la columna estratigráfica levantada en el puente del río Chiche, los pozos Laboratorio Granada, San José de Puembo, Tajamar y Tababela.

En el perfil se observa la disposición estratigráfica de las formaciones, su configuración subhorizontal con tendencia al acuñamiento en la Cordillera Real, la mayor potencia de la Fm. Chiche con respecto a la Fm. Cangahua, se nota también que ninguno de los pozos llega al contacto con la Fm. Guayllabamba por lo que se lo ha inferido.

Perfil geológico Y-Y'

Localizado en el centro del área de estudio, a la altura de la parroquia de Yaruquí (Figura 2.3.), tiene una dirección Oeste-Este, y va desde el río Chiche hasta el cerro Coto Urcu localizado en la Cordillera Real. En este corte se correlacionan las columnas de los pozos Bella flor, Indaves, Metrozona, San Vicente, Yaruquí 1, el pozo de investigación YT-1 y la columna Oeste del Plateau; de éstos pozos 5 llegan al contacto con la Fm. Guayllabamba.

En este perfil se observa la disposición periclinal y subhorizontal de las capas, su acuñamiento en la Cordillera Real y, la aparición de la Fm. Guayllabamba en la quebrada del río Chiche.

Si bien el límite vertical de estudio es el contacto entre las Fm. Chiche y Guayllabamba, por efectos visuales se ha tomado en cuenta a la formación subyacente a la Fm. Guayllabamba que es la Fm. San Miguel (Fuente: DGGM, hoja El Quinche, 1982).

Corte geológico Q-Q'

Localizado a la altura de la parroquia El Quinche (Figura 2.4.), con dirección Oeste - Este y va desde el río Guambi hasta la loma La Máquina en la Cordillera Real. En este corte se observa que la configuración de las capas se mantiene subhorizontal y con acuñamiento hacia la Cordillera Real. En este corte se correlacionan las litologías de los pozos Hnos. Moreano Moncayo, Hortana, Inversiones florícolas y las columnas Norte del Plateau y Qda. Sta. Rosa. De éstos apenas dos llegan al contacto con la Fm. Guayllabamba.

Con el fin de mostrar la estratigrafía, en este perfil se presentan las formaciones subyacentes a la Fm. Guayllabamba determinadas mediante la interpretación realizada del mapa geológico de la DGGM (1982).

Perfil geológico longitudinal A-A'

Cruza longitudinalmente la zona de estudio, con dirección Suroeste-Noreste, bajo la cota 2600 m, corta la sección comprendida entre El pozo Carnasa localizado en Pifo hasta el pozo Inversiones Florícolas, cerca del río Urvia en la parroquia El Quinche (Figura 2.5.).

El perfil fue construido con los pozos Carnasa, Sintofil, Guambi, San José de Puembo, Yaruquí 1A e Inversiones florícolas, cuyo resultado muestra una vez más que la configuración tanto de las formaciones Chiche y Cangahua es subhorizontal a lo largo de la cuenca de estudio; además se observa la mayor potencia de la Fm. Chiche con respecto a la Fm. Cangahua.

En los perfiles se observa que existen dos zonas morfológicas distintas, una plana y otra cuya pendiente aumenta hacia la Cordillera Real; lo que indica que las características geológicas de estas zonas son distintas; sin embargo el agua que cae sobre la zona de altas pendientes desciende hasta la zona plana por lo que existe una relación directa entre las dos. Debido a que se contó con información concierne a la zona plana, el estudio se enfocó en el acuífero localizado bajo ella. De acuerdo a esto, a la zona plana se le denominó "Zona de acumulación" y a la de altas pendientes "Zona de recarga lateral".

Figura 2.2. Perfil P-P'

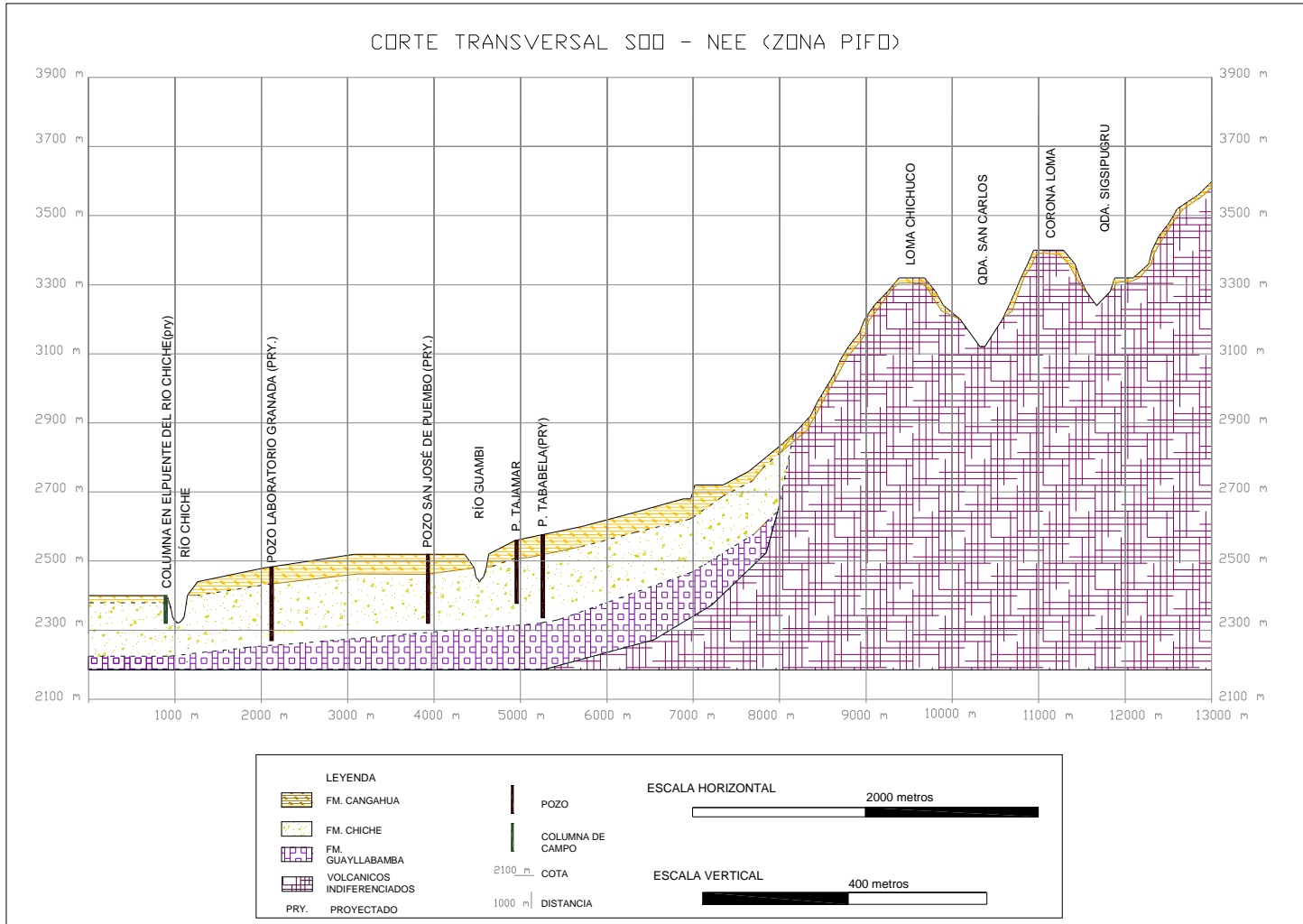


Figura 2.3. Perfil Y-Y'

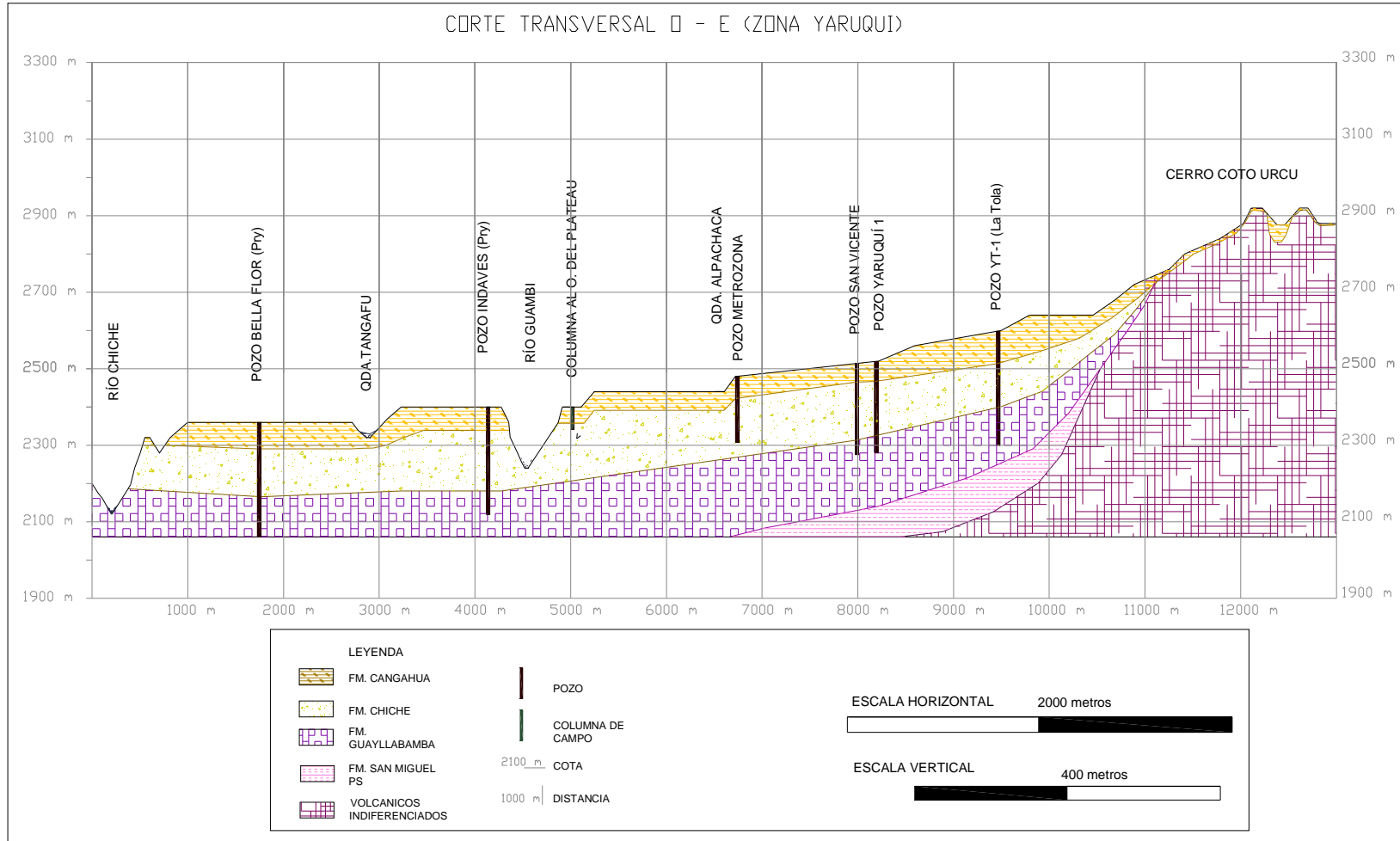


Figura 2.4. Perfil Q -Q'

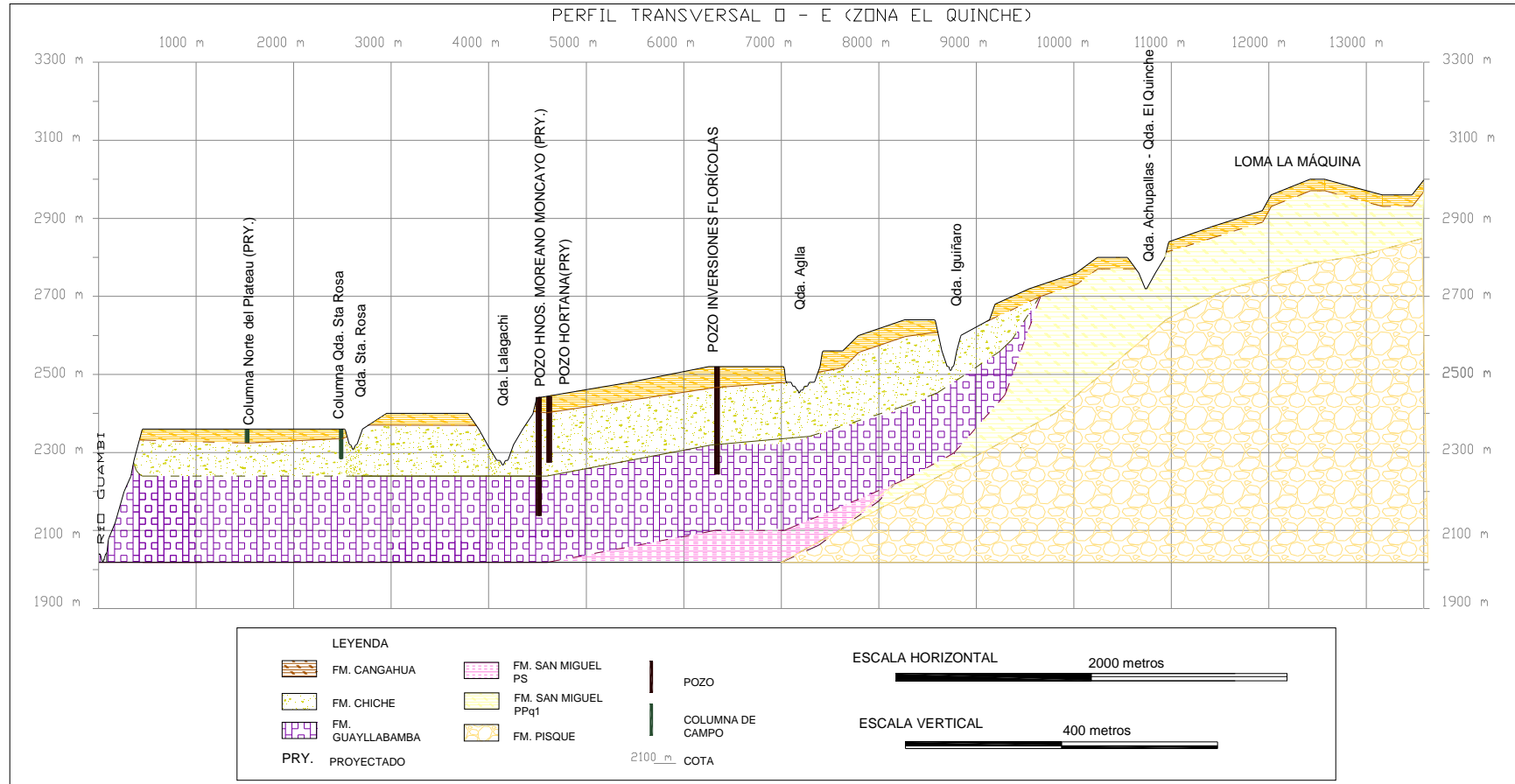
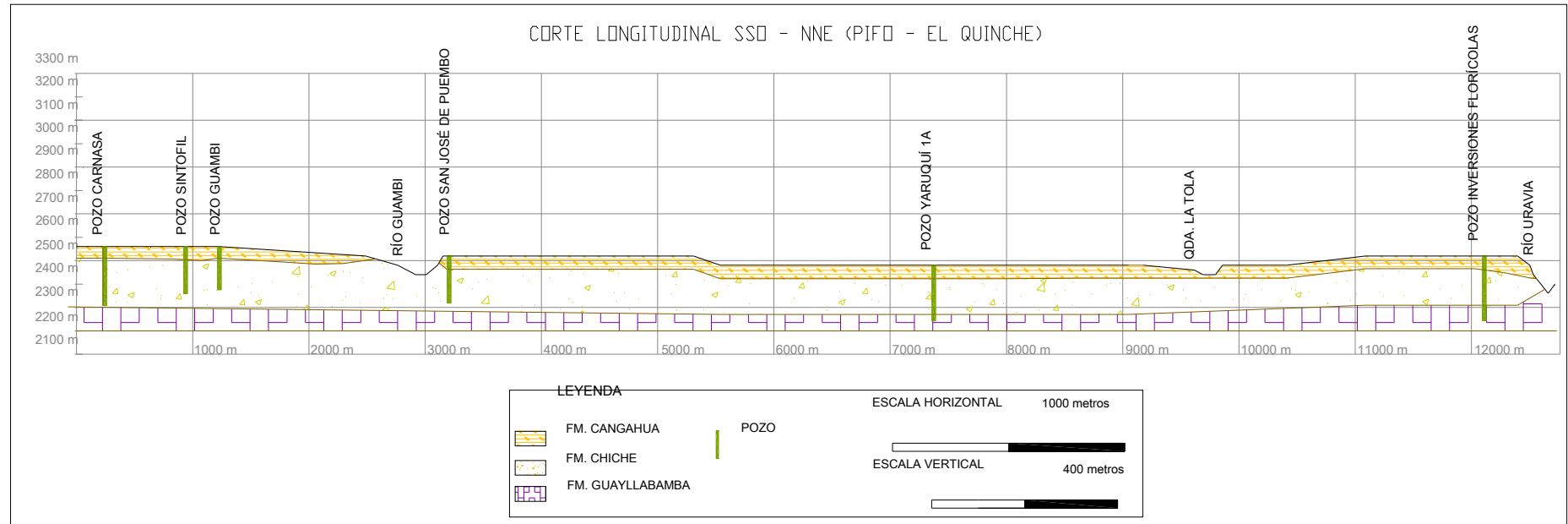


Figura 2.5. Perfil A – A'



2.5. MODELO GEOLÓGICO CONCEPTUAL

El sistema estudiado está conformado geológicamente por las formaciones Chiche y Cangahua, que se disponen espacialmente de forma subhorizontal con acuñamiento hacia el Este. La Fm. Chiche tiene un espesor que puede llegar a los 200 m y la Fm. Cangahua tiene un espesor promedio de 50 metros aunque puede llegar a los 85 m como sucede en el caso del pozo de investigación YT-1.

La Fm. Chiche está conformada por cuatro miembros cuyos componentes principalmente se originaron en ambientes volcánicos y fluvio lacustres. Estos miembros son: Mb. Fluvio-lacustre I, Mb. Lahar, Mb. Fluvio-lacustre II y Mb. Chiche s.s. Las propiedades físicas de estos, indican que cada horizonte representa acuíferos buenos, medios y malos.

Los Miembros Fluvio – lacustre I y II presentan características litológicas similares, son sedimentos que granulométricamente van de arena fina a gruesa y están intercalados con niveles de ceniza volcánica. El conjunto presenta varios grados de consolidación que van desde deleznable hasta consolidación media y en menor proporción consolidación alta. Estas características permiten identificar a éstos horizontes como buenos acuíferos.

El Miembro Lahar presenta una composición granulométrica con un porcentaje de matriz de casi el 60%, los clastos corresponden al 40% del conjunto, además este miembro se encuentra de mediana a altamente consolidado; con todo, los elementos finos de la matriz tienen el tamaño de limo por lo que se cree que este horizonte es un acuífero medio.

El Miembro Chiche s.s. tiene una composición granulométrica variada pues está compuesto de la intercalación de conglomerados, tobas, arenas de grano fino a medio y flujos piroclásticos, con un grado de compactación medio; por lo tanto se supone que este conjunto está compuesto de niveles acuíferos buenos (arenas), medios (flujos piroclásticos) y medio malos (tobas).

La Fm. Cangahua está compuesta por la intercalación de tobas retrabajadas de grano fino a medio con capas de lapilli y esporádicas capas de arena fina limosa, la secuencia tiene un grado de compactación de alto a medio, por lo que se la ha clasificado como un horizonte acuífero de malo a medio malo.

De este análisis se concluye que en la zona de estudio existen varios niveles u horizontes acuíferos con características que les permiten ser de buenos a malos en ésta categoría.

Por otro lado es importante notar que, por las propiedades físicas de la Fm. Guayllabamba, esta es clasificada como un buen a medio acuífero ya que está compuesta por conglomerados con el 70% a 80% de clastos y del 30% a 20% de matriz arenosa (Mb. Volcánico), flujos de lodo con intercalaciones de areniscas y lavas andesíticas fracturadas (Mb. Lahar), además el conjunto está altamente consolidado. Esto indica que los niveles de la Fm. Guayllabamba que yacen bajo el contacto con la Fm. Chiche no son impermeables. En la figura 2.6. se presenta la representación del sistema geológico de la zona de estudio.

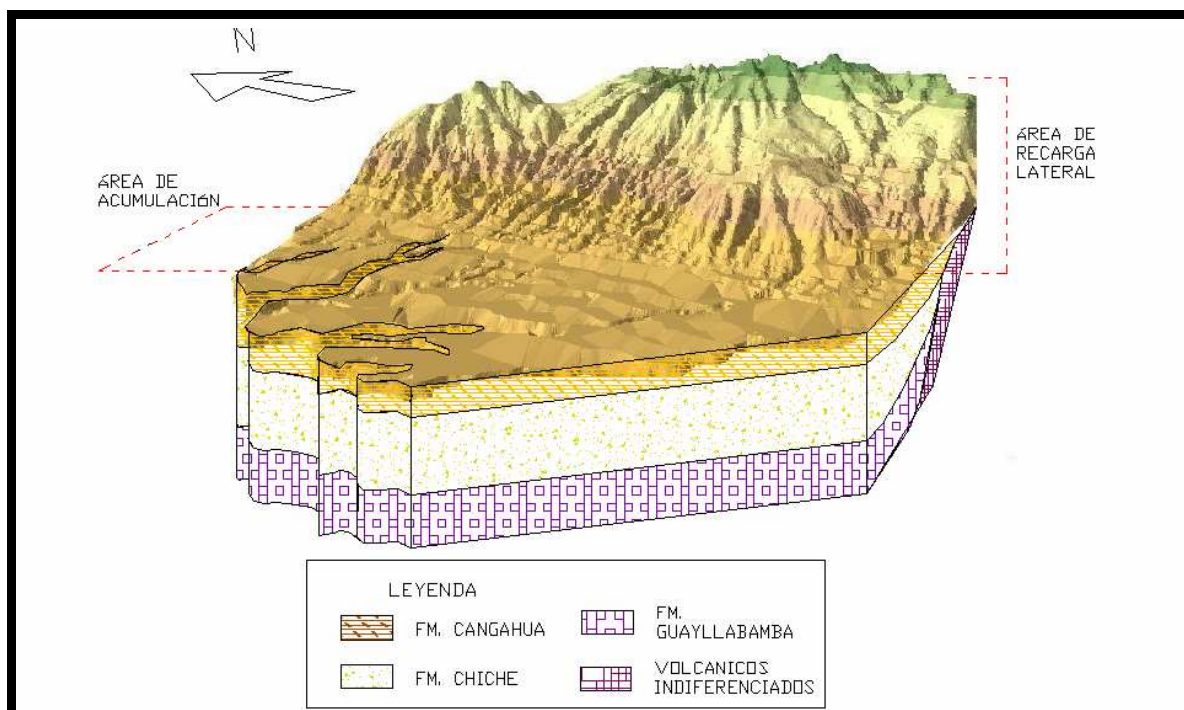


Figura 2.6. Modelo geológico conceptual.

CAPÍTULO III

3. HIDROMETEOROLOGÍA

Con el fin de realizar el balance hídrico de la cuenca estudiada, se estimaron los parámetros directamente relacionados con el ciclo hidrológico como son la precipitación, evapotranspiración, escorrentía superficial e infiltración, a partir de los cuales se estableció la distribución del agua en el sistema.

Este capítulo consta de 4 subcapítulos que tratan de la validación de la información registrada en las estaciones meteorológicas, las condiciones climáticas de la cuenca de estudio (Clima), del análisis de los parámetros hidrometeorológicos (Meteorología) y del análisis de la distribución del agua en el sistema (Balance hídrico).

El estudio se realizó mediante un procedimiento que constó de siete pasos:

- Recopilación bibliográfica.
- Análisis y validación de la información meteorológica.
- Clasificación del clima.
- Análisis de la variación del clima durante el año.
- Elaboración de mapas temáticos.
- Cálculo de los parámetros hidrometeorológicos.
- Cálculo del balance hídrico.

La información utilizada provino de:

- Ocho estaciones meteorológicas instaladas en la cuenca del río Guayllabamba por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI).
- Estudio hidrogeológico de la cuenca del río Guayllabamba realizado por Santillán & Burbano en el año 1980.
- Clasificación climática del Ecuador publicada por el Institut de recherche pour le Développement (IRD), 1995.
- Mapas climáticos del SIGAGRO, 2005.
- Historial de aforos de la cuenca del río Guayllabamba que cubren el periodo de 32 años, comprendido entre 1970 y 2002, EMAAP-Q, 2007.

- Once informes técnicos de perforación de pozos privados y nueve informes técnicos de la EMAAP-Q.

En el desarrollo de este capítulo el principal limitante fue la escasez tanto de estaciones meteorológicas como de estaciones hidrométricas; es así que en el área de acumulación apenas se contó con tres estaciones meteorológicas con registros confiables y ninguna estación hidrométrica, mientras que en el área de recarga no existen estaciones meteorológicas y se contó con una estación hidrométrica cuyo historial registra caudales instantáneos, no continuos.

3.1. VALIDACIÓN DE LA INFORMACIÓN

De las ocho estaciones meteorológicas, cinco están dentro de la zona de estudio y las restantes en los valles de Tumbaco y Cumbayá. En la tabla 3.1. se presenta los nombres de las estaciones, sus códigos en el INAMHI, sus ubicaciones y se indica mediante los periodos de registro, las estaciones que tienen datos de temperatura y de precipitación.

ESTACIÓN	CODIGO INAMHI	PERIODO (Datos de precipitación)	PERIODO (Datos de temperatura)	COTA	LONGITUD	LATITUD
		AÑOS	AÑOS		m	UTM
La Tola	M002	1980 -1998	1981 - 1999	2480	793000	9974600
Tumbaco	M114	1970 -1994	1980 - 1997	2348	787850	9974150
Pifo	M260	1971- 1981	1975 - 1981	2583	796850	9975750
Yaruquí-INAMHI	M346	1970 -2002	-	2600	798850	9982100
Puembo	M347	1970 -1994	1980 - 2000	2460	794200	9980500
Cumbayá	M572	1970 -1980	-	2370	786300	9978750
Yaruquí-INNERHI	M264	1981 -1983	-	2544	798296	9982941
El Quinche	M343	1970 -2002	-	2605	800184	9988689

Tabla 3.1. Estaciones meteorológicas utilizadas

Llenado de datos anuales faltantes

Existen estaciones pluviométricas con datos faltantes en sus registros, debido entre otros factores, a la negligencia del operador o a la ausencia del aparato medidor durante determinado tiempo. Como en hidrología se trabaja con datos continuos se debe completar dichos datos faltantes.

De las ocho estaciones pluviométricas, la estación “Yaruquí – INAMHI” fue la única que presentó un registro continuo de datos, los registros de las estaciones restantes presentaron vacíos, los mismos que fueron llenados (Ver anexo 5).

El llenado se realizó partiendo del cálculo del coeficiente de correlación (R) entre una estación de confianza (X) (estación que registró los datos en el mismo periodo en el que le faltan datos a otra estación) y la estación que presentó vacíos (Y). En los casos en los que el coeficiente fue mayor o igual que 0.8, se pudo completar la información.

Por ejemplo, la estación La Tola (Y) presentó vacíos desde el año 1970 hasta 1979, por otro lado, la estación Tumbaco (X) si registró los datos correspondientes a ese período (Ver tabla 3.1.); entonces se calculó el coeficiente de correlación entre las dos estaciones (que fue igual a 0.8), se trazó la curva de regresión con los valores de precipitación de las dos estaciones y se determinó la ecuación de la recta (Ver figura 3.1.).

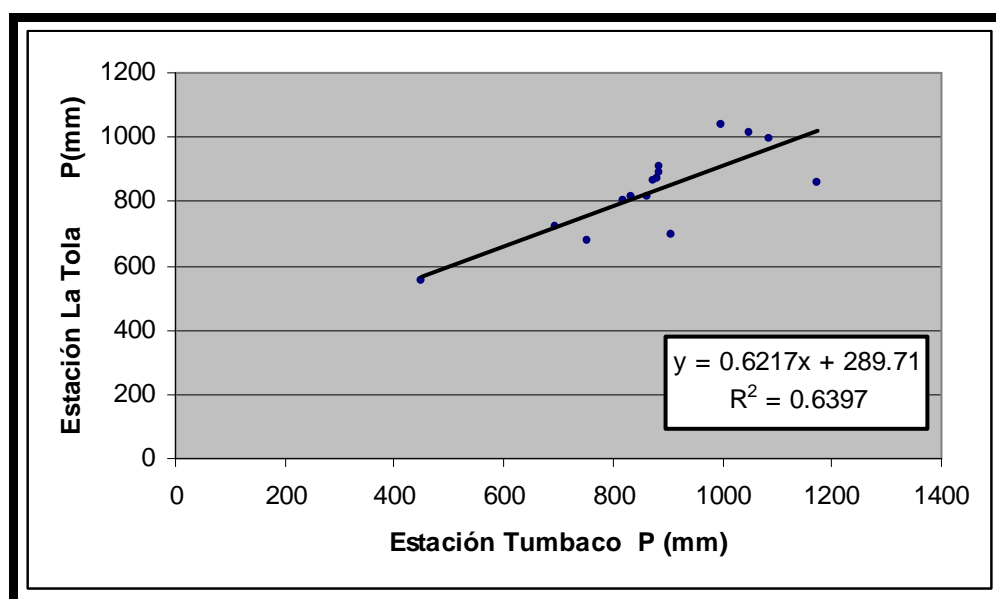


Figura 3.1. Se muestra la curva de regresión construida con los datos medidos en el campo de las estaciones Tumbaco y La Tola, ecuación de la recta y coeficiente de correlación entre las dos estaciones.

Finalmente, en la ecuación, se sustituyó (x) con un valor de precipitación de la estación Tumbaco a partir del cual se encontró el valor correspondiente de

precipitación (y) de la estación La Tola en el mismo año. En la tabla 3.2. se resalta en azul los valores llenados.

AÑO	ESTACIÓN (X)	ESTACIÓN (Y)
	TUMBACO	LA TOLA
	Precipitación (mm./año)	Precipitación (mm./año)
1970	733.5	744.5
1971	1370.3	1139.3
1972	1079.9	959.2
1973	1313.8	1104.3
1974	2412.3	1785.3
1975	1095.4	968.9
1976	886.3	839.2
1977	715	733.0
1978	671.6	706.1
1979	801.6	786.7
1980	885.3	887.9
1981	873.7	864.2
1982	998.1	1041.1
1983	1049.6	1014.1
1984	1172.9	860.1
1985	905.3	693.4
1986	834.4	816.1
1987	752.5	676.3
1988	883	908.9
1989	819.6	804.7
1990	694.9	722.1
1991	864.4	813.8
1992	448.2	553.3
1993	1084.1	994.4
1994	881.6	869.4

Tabla 3.2. Precipitaciones anuales en las estaciones Tumbaco y La Tola, los valores en negro fueron medidos en el campo y los valores en azul fueron los rellenados a partir de los correspondientes en la estación Tumbaco.

De las ocho estaciones meteorológicas, en cinco se efectuó el relleno con datos de precipitación y a pesar de que la estación Yaruquí presenta un registro hasta el año 2006, solo se pudo hacer el relleno de los datos hasta el año 1994 dado que los coeficientes de correlación entre las estaciones fueron menores a 0.8 (Ver anexo 6).

Por otro lado, de las 4 estaciones que registran temperaturas, 3 fueron rellenadas hasta el año 1999 (Ver anexo 6).

Método de dobles acumulaciones o doble masas

A los datos hidrometeorológicos se los denomina como *consistentes* cuando las series de valores observados no presentan errores de medición. Las inconsistencias de los datos medidos ocurren en la mayoría de los casos cuando:

- El mal estado de la estación o un cambio en la localización de la misma no fue registrado,
- El mal funcionamiento de los instrumentos no fue detectado,
- Existe falta de cuidado y experiencia en la ejecución de las mediciones,
- Los datos fueron transferidos por los sistemas de monitoreo automático en forma incorrecta,
- Los árboles crecieron en las cercanías de un pluviómetro en modo tal de ocasionar una interferencia para la medición correcta.

Los factores enunciados afectan las mediciones en forma sistemática y por lo tanto hacen que los datos presenten errores sistemáticos.

El método de dobles acumulaciones se aplica generalmente a datos de lluvia para estimar errores sistemáticos; es decir, se utiliza para analizar las consistencias de los datos de una estación por comparación con los datos confiables de otra estación de referencia (estación de confianza).

Por ejemplo en la figura 3.2., se presenta la curva de dobles acumulaciones construida a partir de los valores acumulados de las precipitaciones anuales correspondientes a las estaciones Puembo y Yaruquí (estación de confianza). Se observa que el coeficiente de correlación es mayor que 0.8 y que la mayoría de los datos se encuentran dentro de la recta, lo que significa que los datos de la estación son consistentes.

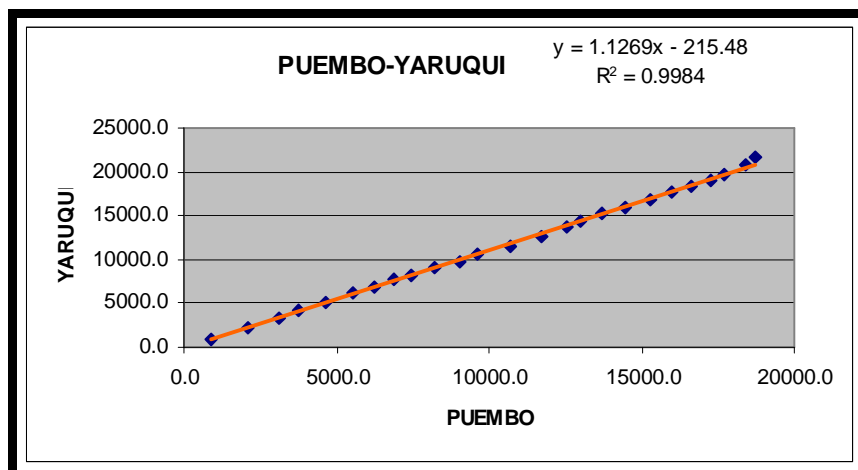


Figura 3.2. Verificación de datos pluviométricos de la estación Puembo a partir de la información de la estación de confianza Yaruquí, mediante la curva de dobles acumulaciones.

Este procedimiento se siguió con las ocho estaciones meteorológicas disponibles (Ver anexo 6), de las cuales solo la estación El Quinche presentó problemas de inconsistencia en el periodo comprendido entre 1982 y 1994; la gráfica Yaruquí – El Quinche presentada en el anexo 6 lo demuestra; este error fue corregido asumiendo inexistencia de información en ese periodo, luego se procedió al relleno de vacíos.

Por lo tanto, la información meteorológica de las ocho estaciones en el período comprendido entre 1970 y 1994, fue la utilizada para el estudio de la hidrometeorología de la cuenca de estudio.

3.2. CLIMA

3.2.1. CLASIFICACIÓN DEL CLIMA

El clima es el resultado del conjunto de condiciones atmosféricas que se presentan típicamente en una región. (Díaz et. al., 2005).

Según Pourrut P. et al., (1995), en el la zona de estudio los agentes responsables de los regímenes hidroclimáticos que juegan un papel determinante son:

- La latitud: puesto que el Ecuador está situado sobre la línea equinoccial, los mecanismos que rigen los climas y las precipitaciones se sujetan a las reglas de la circulación atmosférica propia de las regiones de baja latitud; éstas

reglas son el desplazamiento del Frente Intertropical (FIT) y la influencia de corrientes oceánicas (desplazamientos de la corriente fría de Humboldt, alteración climática ocasionada por el fenómeno “El Niño”).

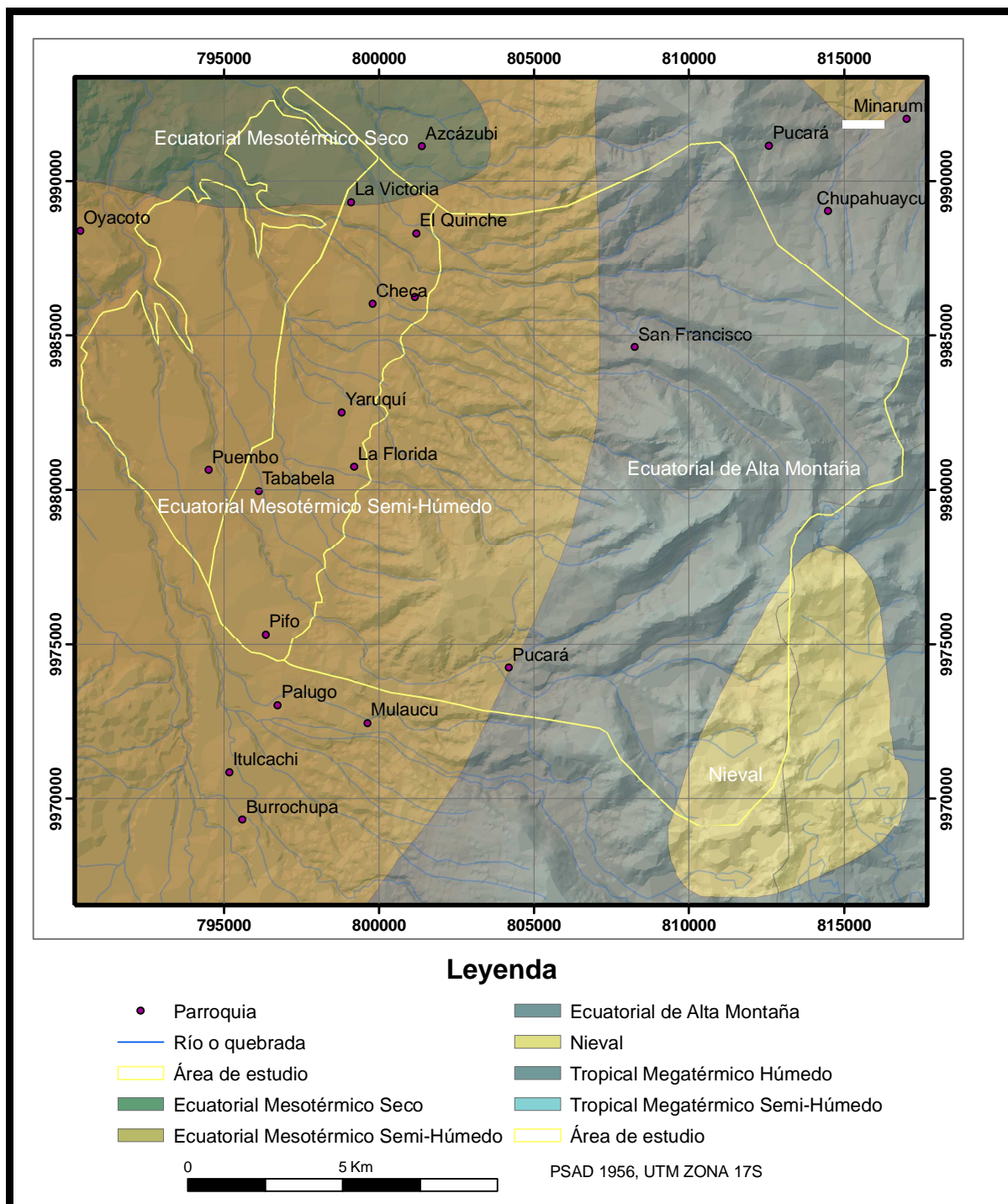
- El relieve y la altitud: el efecto de la cordillera andina desempeña un papel preponderante en la génesis, aislamiento y repartición de masas de aire cuyas características influyen en la formación de precipitaciones además son factores que condicionan la existencia de regiones naturales muy autónomas.
- El Océano Pacífico: generador de masas de aire cuyas características habituales se ven a veces perturbadas por la influencia de corrientes oceánicas.

Pourrut P. et al., (1995), basado en criterios de confiabilidad en datos de insolación, temperaturas y precipitación, propuso una clasificación climática para el Ecuador; los tipos de climas asociados a la cuenca de este estudio son:

- Ecuatorial mesotérmico seco, se lo encuentra en la parte Noroeste de la zona de estudio, está asociado a valles interandinos abrigados, caracterizado por tener temperaturas anuales de 12 a 20°C y precipitaciones anuales menores a 500 mm.
- Ecuatorial mesotérmico semi húmedo a húmedo, es el más característico del Valle Interandino y de la cuenca de estudio puesto que ocupa la mayor extensión de la zona de acumulación y una parte de la zona de recarga lateral, bajo los 3200 m. La temperatura que está en general ligada a la altura presenta valores anuales entre 12 y 20 °C, la humedad relativa varía entre 65 a 85% y la insolación anual dura entre 1000 a 2000 horas/año, el régimen pluviométrico se caracteriza por tener dos estaciones lluviosas, una en febrero hasta mayo y otra entre octubre hasta noviembre; la primera estación seca más marcada ocurre entre junio y septiembre mientras que la segunda generalmente tiene lugar en diciembre y es mucho menos acentuada. La precipitación fluctúa entre 500 a 2000 mm.
- Ecuatorial frío de alta montaña, se encuentra por encima de 3000 m., la altura y la exposición son los factores que condicionan los valores de temperatura y precipitación. Las temperaturas máximas rara vez son

mayores que 20 °C, las mínimas sin excepción son menores a 0 °C y las medias anuales están entre 4 a 8 °C; las precipitaciones anuales varían entre 800 a 2000 mm, la humedad relativa es mayor al 80%.

En el mapa 3.1. se muestra la clasificación climática en el área de estudio propuesta por el SIGAGRO (2005), ésta no presenta gran variación con respecto a la clasificación propuesta por Pourrut P. et al. (1995); aumenta solamente un tipo de clima que es el nieval y que corresponde a las zonas más altas de la cordillera.



Mapa 3.1. Clasificación del clima en la cuenca de estudio. (Fuente: SIGAGRO, 2005).

3.2.2 TEMPERATURA

La estación “Puembo” no es la más completa pero está dentro de la zona de estudio y tiene un registro en el período comprendido entre 1980 y 2000; el gráfico de la temperatura media mensual vs. el tiempo muestra la variación de la temperatura durante el año.

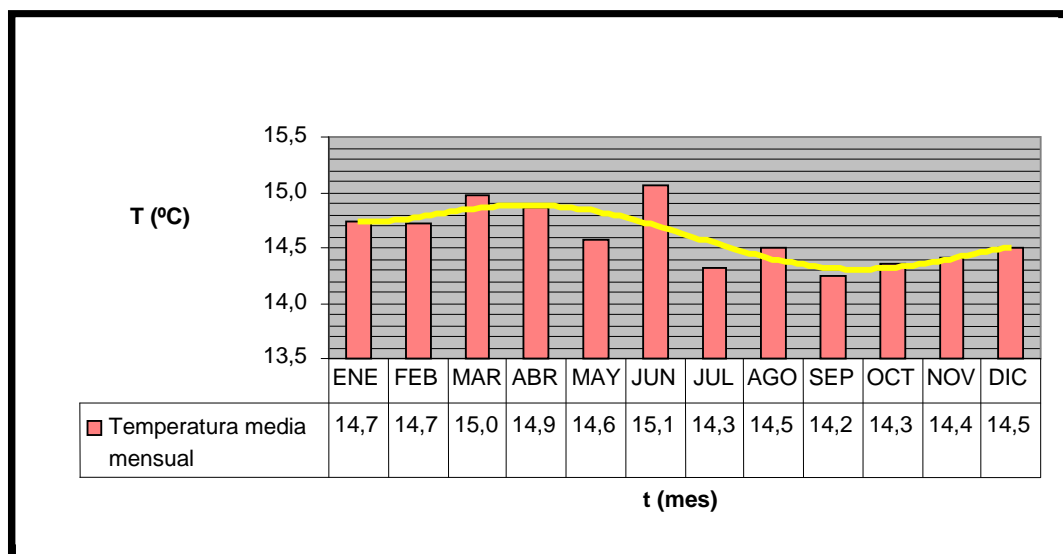


Figura 3.3. Variación de la temperatura media mensual en la estación Puumbo en el período 1980 -2000 (20 años).

En la figura 3.3., se observa que la temperatura no varía significativamente en el transcurso del año; el valor más alto es en Junio con 15.1 °C y el valor más bajo es 14.3 °C en el mes de Julio cuando ocurre la temporada más fría hasta diciembre.

3.2.2. PRECIPITACIÓN

La estación “Yaruquí – INAMHI” contiene el historial de precipitaciones más completo dentro del área de estudio, son 32 años registrados en el período comprendido entre 1970 y 2002. En la figura 3.4., se grafican sus valores.

Como se observa en la figura 3.4., la precipitación varía de forma bimodal; a principio de año en los meses de Enero a Mayo ocurren las mayores precipitaciones con valores entre 66.9 a 130 mm y al final del año desde Septiembre hasta Diciembre se registran lluvias con valores entre 61.6 a 91.4 mm.

Los meses con menor cantidad de lluvias son Junio, Julio y Agosto cuando se presentan precipitaciones de 14.3 a 28.5 mm.

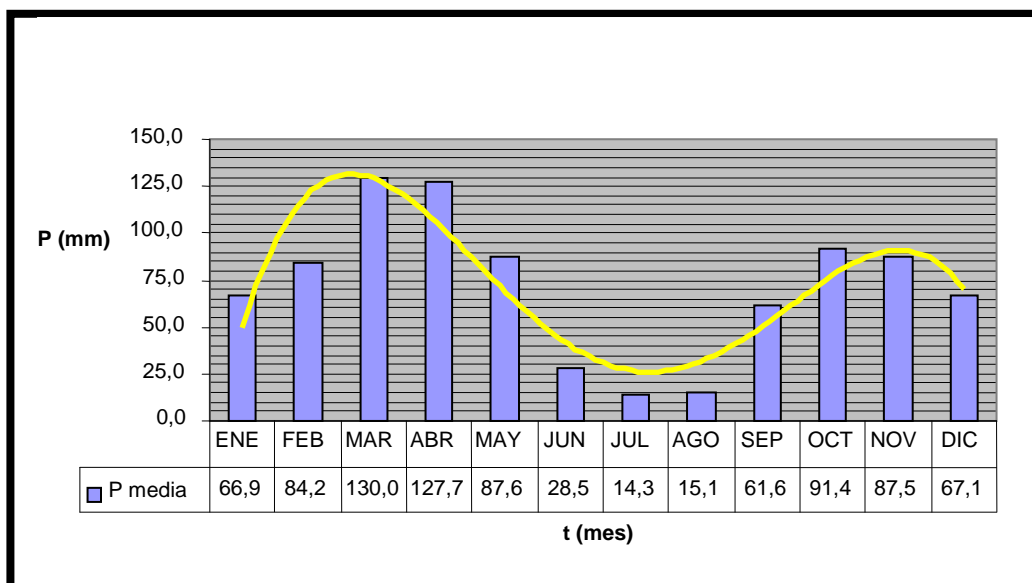


Figura 3.4. Variación de las precipitaciones medias mensuales en la estación Yaruquí – INAMHI en el periodo comprendido entre 1970a 2002 (32 años).

Según la estación “La Tola”, en los períodos con mayores precipitaciones ocurre la disminución de la heliofanía hasta 146 horas, descenso en la velocidad del viento hasta 8.19 Km. /h y aumento de la humedad relativa hasta 79%; en cambio en los meses menos lluviosos, la heliofanía aumenta hasta 225 horas, se incrementa la velocidad del viento hasta 9.73 Km. /h y la humedad relativa disminuye hasta 65% (Ver anexo 7.).

3.2.3. METEOROLOGÍA

La recarga de los acuíferos se ve condicionada principalmente a la geología y a las características de la precipitación. El agua que cae y se deposita en el suelo, queda retenida en él hasta que se evapora, se filtra o se escurre.

Para determinar el porcentaje de agua que se infiltra y recarga el acuífero, se estudió la distribución del agua precipitada mediante el análisis de los parámetros meteorológicos precipitación, evapotranspiración, escorrentía superficial e infiltración y con ellos se planteó el balance hídrico.

Para la elaboración de este estudio se siguió un procedimiento de cinco etapas:

- Obtención de los valores de precipitación y temperatura medios multianuales para las zonas de acumulación y recarga.

- Cálculo de la evapotranspiración a través del método de Thornthwaite.
- Cálculo del coeficiente de escurrentía.
- Determinación del caudal de recarga del acuífero.
- Cálculo del caudal de descarga.

La información utilizada para el cálculo del caudal de recarga provino de los registros de las estaciones meteorológicas presentadas en la tabla 3.1., también se utilizaron los mapas de isoyetas e isotermas de la cuenca del río Guayllabamba construidos por Santillán G. y Burbano N. en 1980.

El caudal de descarga se determinó a partir de la información contenida en informes técnicos de perforación de pozos, en la base de datos de la EMAAP-Q e información obtenida de la comunicación personal con los administradores de los pozos privados.

3.2.4. TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN MEDIAS MULTIANUALES

Con el fin de determinar el balance hídrico en la cuenca de estudio, se cuantificaron las precipitaciones y temperaturas medias multianuales utilizando el método de isoyetas e isotermas respectivamente.

La precipitación y temperatura media multianual en cada estación recopilada se expone en la tabla 3.3., estas son el resultado de los promedios de precipitación y temperatura anuales en el periodo comprendido entre 1970 y 1994, la información base para la determinación de estos valores se expone en el anexo 5.

ESTACIÓN	COTA	PRECIPITACION MEDIA MULTIANUAL	TEMPERATURA MEDIA MULTIANUAL
La Tola	2480	891.5	15.5
Tumbaco	2348	969.1	16.7
Cumbayá	2370	934.3	-
Puembo	2460	747.9	14.6
Pifo	2583	909.2	14.8
Yaruquí- INAMHI	2600	870.6	-
Yaruquí- INERHI	2544	735.2	-
El Quinche	2605	864.3	-

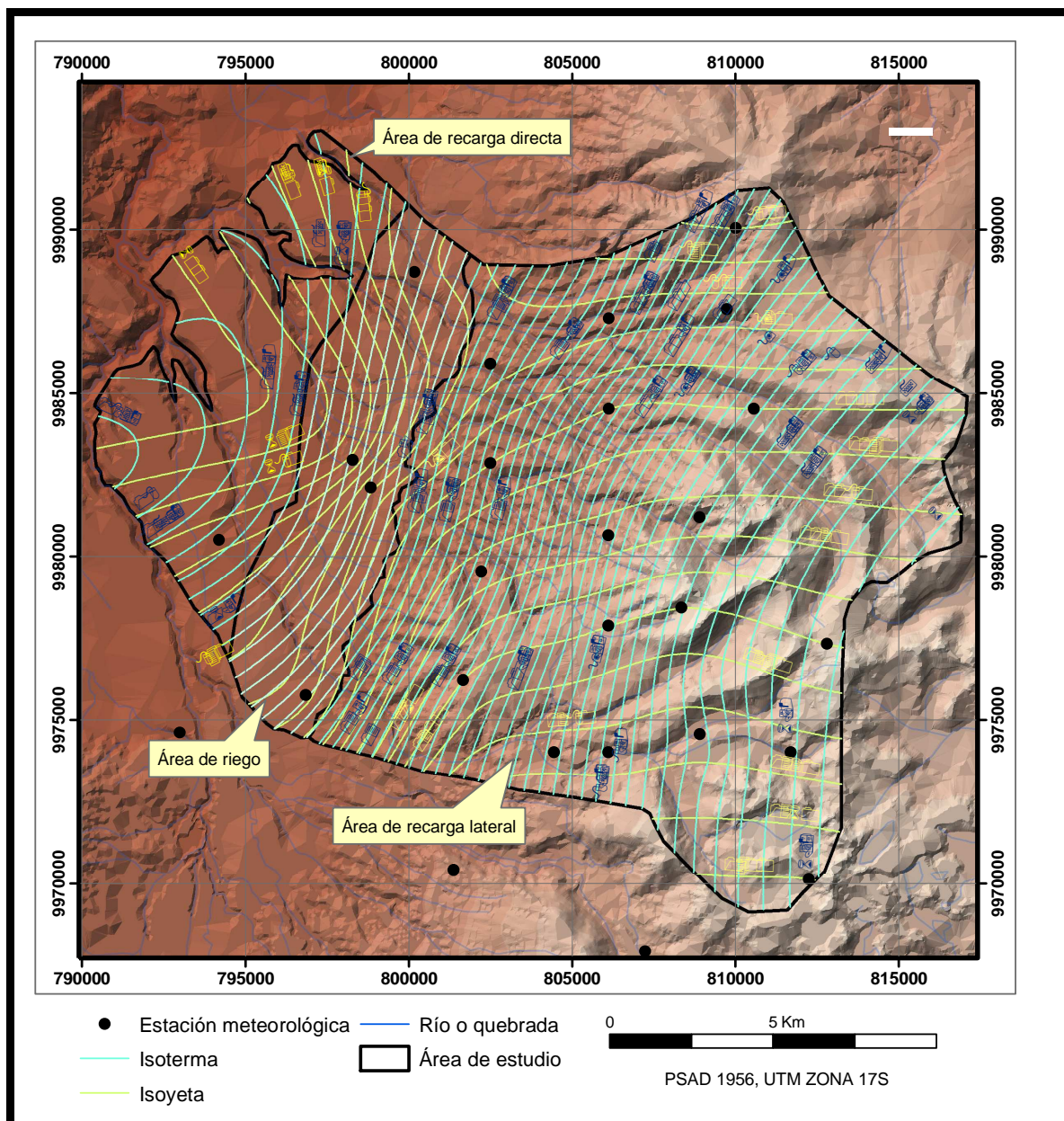
Tabla 3.3. Precipitación y temperatura multianual de cada estación meteorológica real.

Previo a este proyecto, Santillán G. y Burbano N. en 1980 habían realizado un estudio hidrogeológico de la cuenca del río Guayllabamba, en el que habían construido un mapa de isoyetas y uno de isotermas para dicha cuenca (Ver anexo 8), tomando como base, datos de precipitaciones y temperaturas multianuales de los años 1964 hasta 1976. De las estaciones recopiladas para el estudio del Acuífero Pifo – El Quinche, Santillán y Burbano trabajaron solo con la estación Tumbaco, cuyos valores de precipitación y temperatura son homogéneos y consistentes con los valores de los años posteriores hasta 1994 (Ver anexo 6).

Para aumentar el detalle de la información en la cuenca Pifo – El Quinche, se elaboró un mapa de isoyetas e isotermas (Ver mapa 3.2.), tomando como base 29 estaciones meteorológicas (8 reales y 21 virtuales) y sus respectivos valores de precipitación y temperatura media multianual. Como en el área de recarga lateral no existen estaciones reales, se procedió a implantar estaciones virtuales sobre las curvas definidas por Santillán G. y Burbano N. (1980), así cada estación virtual adoptó un valor de precipitación media multianual y un valor de temperatura media multianual. Las coordenadas de estas estaciones y sus respectivos valores de precipitación y temperatura se muestran en el anexo 9.

El trazado de las isoyetas e isotermas se realizó en toda la cuenca de estudio mediante el programa ArcGis, el mismo que interpoló los datos de lluvias y temperaturas registrados en las distintas estaciones.

En el capítulo II, se dividió a la cuenca de estudio en zona de acumulación y zona de recarga lateral, en función de sus condiciones geológicas y morfológicas. Dentro de la zona de acumulación existe un área de riego (CORSINOR, 2007), a la que estaría llegando a más del agua lluvia un aporte extra de agua, por lo tanto en función de la cantidad de agua que recibe cada área se subdividió a la zona de acumulación en área de riego y área de recarga directa. Así la cuenca de estudio quedó dividida en tres partes y para cada una se calculó los valores de precipitación y temperatura media multianual. Los resultados se muestran en la tabla 3.4.



Mapa 3.2. Isoyetas e isotermas en la cuenca de estudio

Nombre del área	Dimensión	Precipitación media multianual	Profundidad de agua de riego	Temperatura media multianual
	km ²	mm/año	mm/año	°C
Recarga lateral	266.3	1115.8	-	10.2
Riego	55.6	720	2522.88	15.6
Recarga directa	64.2	720	-	17.3

Tabla 3.4. Resumen de los valores de precipitación y temperatura medios multianuales.

3.2.5. EVAPOTRANSPIRACIÓN

“Evapotranspiración (ET) es el proceso por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso directamente y/o a través de las plantas vuelve a la atmósfera en forma de vapor” (Díaz, Esteller y López-Vera, 2005).

Desde el punto de vista hidrológico, la evapotranspiración entra en el balance hídrico como pérdida.

La evapotranspiración depende, entre otros, de dos factores muy variables y difíciles de medir; el contenido de humedad del suelo y el estadio de desarrollo de las plantas, así se introduce el concepto de Evapotranspiración potencial o pérdidas por evapotranspiración, en el doble supuesto de que hay suficiente disponibilidad de agua tanto para las plantas como para la humedad del suelo.

La evapotranspiración real es la cantidad efectiva de agua que se pierde del agua precipitada.

Los métodos para calcular la evapotranspiración se pueden agrupar en teóricos (los basados en física teórica del microclima), medidas directas y métodos empíricos. Tanto los métodos teóricos como las medidas directas son de delicada y costosa aplicación.

Los métodos empíricos tienen la ventaja de ser más económicos, pues, en general se basan en datos meteorológicos obtenidos de las estaciones climatológicas.

Método de Thornthwaite

Por las características de la información con la que se contó para este estudio, se utilizó el método empírico de Thornthwaite, que calcula la Evapotranspiración potencial a intervalos mensuales basándose fundamentalmente en la temperatura, pero también considera el número máximo de horas de sol según la latitud del lugar. El cálculo se lleva a cabo con la siguiente fórmula:

$$Em = 16(10 * T / I)^a$$

En donde:

E_m : Evapotranspiración mensual en mm, para un mes ficticio de 30 días y una insolación teórica durante 12 de las 24 horas del día.

T : Temperatura media mensual en °C

I : Índice calórico anual obtenido como la suma de 12 índices mensuales del año considerado; expresados por la fórmula:

$$I = \sum_{i=1}^{12} i$$

$$i = (Ti/5)^{1.514}$$

a : Exponente que es función del índice calórico anual (I), su fórmula es:

$$a : 675 \cdot 10^{-9} I^3 - 771 \cdot 10^{-7} I^2 + 1972 \cdot 10^{-5} I + 0.49239$$

Finalmente se tiene en cuenta que la duración real del mes es de 30 días y el número máximo de horas de sol son 12, según la latitud del lugar, llegando a la expresión:

$$ETP = k_t E_m$$

El coeficiente K_t se encuentra tabulado en Custodio Llamas, 1975, tabla 6.7.

Este método consiste en calcular primero para cada mes la evapotranspiración potencial que puede asimilarse al poder evaporante de la atmósfera en la cuenca considerada.

Orsolini H. et. al, (2000) describen al cálculo de la evapotranspiración real, el déficit agrícola y la escorrentía, de la siguiente manera:

Evapotranspiración Real

- a. Si las precipitaciones del mes (P) son superiores a la evapotranspiración potencial:
- La evapotranspiración real (ETR) es igual a la evapotranspiración potencial.
 - El excedente de las precipitaciones (ΔR) sobre la evapotranspiración potencial es almacenado en la humedad del suelo, cuyas reservas de agua utilizable por las plantas (R) aumentan hasta que el suelo es saturado (la saturación está en función del perfil de suelo que interactúa con la atmósfera por lo que este valor es adaptado para cada caso particular).
 - La parte del “excedente” (Exc.) que rebasa eventualmente la reserva acumulada, está disponible para la alimentación del escurrimiento superficial y de las capas profundas según una distribución que puede presuponerse.
- b. Si las precipitaciones del mes son inferiores a la evapotranspiración potencial; la evapotranspiración real es la suma de las precipitaciones del mes y de toda o parte de la reserva de agua del suelo; ésta se supone movilizadora como sigue:
- Si la reserva anterior de humedad del suelo es bastante fuerte para colmar la insuficiencia de las precipitaciones, la evapotranspiración real es todavía igual a la evapotranspiración potencial; la reserva del suelo es entonces deducida de la diferencia entre la evapotranspiración potencial y las precipitaciones del mes considerado.
 - Si la reserva de humedad del suelo es insuficiente para satisfacer la evapotranspiración potencial, la evapotranspiración real es inferior a aquella y es igual a la suma de las precipitaciones del mes y de las reservas disponibles.

Déficit agrícola

El déficit agrícola es la cantidad de agua suplementaria que habría podido ser utilizada por las plantas (y el suelo) si las disponibilidades en agua hubieran podido ser artificialmente completadas por un sistema de riego. Este parámetro se obtiene de la diferencia entre la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real.

- **Cálculo de la Evapotranspiración y sus resultados**

Para el cálculo de la evapotranspiración real se utilizaron los valores de precipitaciones y temperaturas medias multianuales reportados en la tabla 3.4. La precipitación de cada área fue distribuida en doce meses tomando como referencia la distribución mensual de las precipitaciones en la estación Yaruquí – INAMHI (estación de confianza que se encuentra dentro de la cuenca de estudio).

Como en el área de riego se emplea constantemente una dotación de 0.8 L/s/Ha, lo que significa 2522.88 mm. /año (CORSINOR, 2007), se distribuyó el agua de riego en doce meses con un valor constante de 210.21 mm. /mes; este valor sumado a las precipitaciones mensuales, dan un aporte total de 3367.7 mm. /año sobre el área de riego. En la tabla 3.5. se presentan los cálculos.

Estación Yaruquí - INAMHI													
Precipitación (mm./año)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
En la estación	66.9	84.2	130.0	127.7	87.6	28.5	14.3	15.1	61.6	91.4	87.5	67.1	861.8
%	7.8	9.8	15.1	14.8	10.2	3.3	1.7	1.7	7.1	10.6	10.2	7.8	100
En el área de recarga lateral	86.7	109.0	168.3	165.3	113.4	36.9	18.5	19.5	79.7	118.3	113.3	86.8	1115.8
En el área de acumulación directa	55.9	70.3	108.6	106.7	73.2	23.8	12.0	12.6	51.4	76.3	73.1	56.0	720.0
En el área de Riego	65.6	82.5	127.4	125.2	85.9	27.9	14.0	14.8	60.3	89.6	85.8	65.8	844.8
Agua de riego	210.2	210.2	210.2	210.2	210.2	210.2	210.2	210.2	210.2	210.2	210.2	210.2	2522.9
Precipitación + Riego	275.8	292.8	337.7	335.4	296.1	238.2	224.3	225.0	270.6	299.8	296.0	276.0	3367.7

Tabla 3.5. Distribución de las precipitaciones medias anuales en el año, comparadas con la estación de referencia Yaruquí-INAMHI.

Por otro lado se determinaron los valores de temperaturas mensuales en cada cuenca partiendo de las variaciones presentadas en la estación de referencia Pumbo. En la tabla 3.6. se muestran los cálculos de éstos valores.

Estación Pumbo													
Temperatura media (°C)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
En la estación	14.7	14.7	15.0	14.9	14.6	15.1	14.3	14.5	14.2	14.3	14.4	14.5	14.6
%	100.7	100.7	102.7	102.1	100.0	103.4	97.9	99.3	97.3	97.9	98.6	99.3	100
En el área de recarga lateral	10.3	10.3	10.5	10.4	10.2	10.6	10.0	10.2	9.9	10.0	10.1	10.2	10.2
En el área de acumulación directa	17.4	17.4	17.7	17.6	17.3	17.8	16.9	17.1	16.8	16.9	17.0	17.1	17.3
En el área de Riego	15.7	15.7	16.0	15.9	15.6	16.2	15.3	15.5	15.2	15.3	15.4	15.5	15.6

Tabla 3.6. Variación de las temperaturas medias anuales en el año, comparadas con la estación de referencia Pumbo.

Con estos valores se calculó la evapotranspiración real (ETR) en las tres áreas; en las tablas 3.7, 3.8 y 3.9 se presentan los cálculos respectivos:

Para el área de recarga lateral:

(Temperatura media en la cuenca)														
Mes	Temperatura del aire °C	Evapotranspiración Thornthwaite (mm)												
		i	Em	kt	ETP									
Ene	10.3	2.987	53.1	1.04	55.2									
Feb	10.3	2.987	53.1	0.94	49.9									
Mar	10.5	3.080	54.3	1.04	56.5									
Abr	10.4	3.048	53.9	1.01	54.4									
May	10.2	2.956	52.7	1.04	54.8									
Jun	10.6	3.111	54.7	1.01	55.3									
Jul	10.0	2.865	51.5	1.04	53.5									
Ago	10.2	2.925	52.3	1.04	54.4									
Sep	9.9	2.834	51.1	1.01	51.6									
Oct	10.0	2.865	51.5	1.04	53.5									
Nov	10.1	2.895	51.9	1.01	52.4									
Dic	10.2	2.925	52.3	1.04	54.4									
Medio	10.2		632.1		645.7									
		35.478	= I											
		1.125	= a	Reserva Máx. =	111.8	mm/mes								
Balance Medio Mensual (mm)														
Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual	
ETP	55.2	49.9	56.5	54.4	54.8	55.3	53.5	54.4	51.6	53.5	52.4	54.4	645.7	
P	86.7	109.0	168.3	165.3	113.4	36.9	18.5	19.5	79.7	118.3	113.3	86.8	1115.8	
P - ETP	31.5	59.1	111.8	110.9	58.7	-18.4	-35.0	-34.8	28.1	64.8	60.9	32.5	470.1	
Delta R	31.5	59.1	111.8	110.9	58.7	-18.4	-35.0	-34.8	28.1	64.8	60.9	32.5		
R	111.8	111.8	111.8	111.8	111.8	93.4	58.5	23.6	51.8	111.8	111.8	111.8		
ETR	55.2	49.9	56.5	54.4	54.8	55.3	53.5	54.4	51.6	53.5	52.4	54.4	645.7	
Def.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Exc.	31.5	59.1	111.8	110.9	58.7	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7	60.9	32.5	470.1	

ETP= Evapotranspiración potencial, P= Precipitación media; Delta R= Variación de la reserva, R= Reserva,
ETR= Evapotranspiración real, Def.= Déficit agrícola, Exc.= Excedente.

Tabla 3.7. Cálculo de la ETP por le método de Thornthwaite para el área de Recarga lateral; los valores resaltados en negrilla son la precipitación y la temperatura medias multianuales calculadas mediante las isoyetas e isotermas en la cuenca, también son la evapotranspiración real y el excedente que será utilizado posteriormente para el cálculo de la escorrentía y percolación.

Para el área de Riego:

(Temperatura media en la cuenca)													
Mes	Temperatura del aire °C	Evapotranspiración Thornthwaite (mm)											
		i	Em	kt	ETP								
Ene	15.7	5.669	66.4	1.04	69.0								
Feb	15.7	5.669	66.4	0.94	62.4								
Mar	16.0	5.845	68.6	1.04	71.4								
Abr	15.9	5.786	67.9	1.01	68.5								
May	15.6	5.610	65.6	1.04	68.2								
Jun	16.2	5.904	69.4	1.01	70.1								
Jul	15.3	5.437	63.4	1.04	65.9								
Ago	15.5	5.552	64.8	1.04	67.4								
Sep	15.2	5.379	62.6	1.01	63.2								
Oct	15.3	5.437	63.4	1.04	65.9								
Nov	15.4	5.494	64.1	1.01	64.7								
Dic	15.5	5.552	64.8	1.04	67.4								
Medio	15.6		787.3		804.2								
		67.334	= I										
		1.677	= a	Reserva Máx. =	267	mm/mes							
Balance Medio Mensual (mm)													
Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
ETP	69.0	62.4	71.4	68.5	68.2	70.1	65.9	67.4	63.2	65.9	64.7	67.4	804.2
P	275.8	292.8	337.7	335.4	296.1	238.2	224.3	225.0	270.6	299.8	296.0	276.0	3367.7
P - ETP	206.8	230.4	266.3	266.9	227.9	168.1	158.4	157.6	207.3	233.9	231.3	208.6	2563.5
Delta R	206.8	230.4	266.3	266.9	227.9	168.1	158.4	157.6	207.3	233.9	231.3	208.6	
R	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	266.9	
ETR	69.0	62.4	71.4	68.5	68.2	70.1	65.9	67.4	63.2	65.9	64.7	67.4	804.2
Def.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Exc.	206.8	230.4	266.3	266.9	227.9	168.1	158.4	157.6	207.3	233.9	231.3	208.6	2563.5

Tabla 3.8. Cálculo de la ETR por le método de Thornthwaite para el área de Riego

Para el área de acumulación directa:

(Temperatura media en la cuenca)														
Mes	Temperatura del aire °C	Evapotranspiración Thornthwaite (mm)												
		i	Em	kt	ETP									
Ene	17.4	6.588	72.0	1.04	74.9									
Feb	17.4	6.588	72.0	0.94	67.7									
Mar	17.7	6.793	74.8	1.04	77.8									
Abr	17.6	6.724	73.9	1.01	74.6									
May	17.3	6.520	71.1	1.04	73.9									
Jun	17.8	6.861	75.8	1.01	76.5									
Jul	16.9	6.318	68.4	1.04	71.1									
Ago	17.1	6.453	70.2	1.04	73.0									
Sep	16.8	6.252	67.5	1.01	68.1									
Oct	16.9	6.318	68.4	1.04	71.1									
Nov	17.0	6.385	69.3	1.01	70.0									
Dic	17.1	6.453	70.2	1.04	73.0									
Medio	17.3		853.4		871.8									
		78.253	= I											
		1.887	= a	Reserva Máx.=	32.1	mm/mes								
Balance Medio Mensual (mm)														
Parámetro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual	
ETP	74.9	67.7	77.8	74.6	73.9	76.5	71.1	73.0	68.1	71.1	70.0	73.0	871.8	
P	55.9	70.3	108.6	106.7	73.2	23.8	12.0	12.6	51.4	76.3	73.1	56.0	720.0	
P - ETP	-19.0	2.6	30.8	32.1	-0.7	-52.7	-59.1	-60.4	-16.7	5.2	3.1	-17.0	-151.8	
Delta R	0.0	2.6	30.8	32.1	-0.7	-31.4	0.0	0.0	0.0	5.2	3.1	-8.4		
R	0.0	2.6	32.1	32.1	31.4	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2	8.4	0.0		
ETR	55.9	67.7	77.8	74.6	73.9	55.2	12.0	12.6	51.4	71.1	70.0	64.4	686.6	
Def.	19.0	0.0	0.0	0.0	0.0	21.4	59.1	60.4	16.7	0.0	0.0	8.6	185.2	
Exc.	0.0	0.0	1.3	32.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.4	

Tabla 3.9. Cálculo de la ETR por le método de Thornthwaite para el área acumulación

Para el cálculo de la evapotranspiración se asumió la reserva máxima requerida por el suelo, así en cada área se evapotranspiró un porcentaje de la lluvia quedando un excedente que se dividió entre escorrentía superficial y percolación. También se debe observar en las tablas 3.7. y 3.8. que no hay déficit agrícola en las áreas de recarga lateral riego, mientras que en el área de recarga directa existe déficit en los meses de junio a septiembre que de acuerdo a la estación meteorológica Yaruquí - INAMHI, son los meses con menores precipitaciones. En la tabla 3.10. se presenta la evapotranspiración real y los excedentes resultantes para cada área:

Nombre del área	Reserva máxima	ETR	ETR traducida a % de la precipitación	Excedente
	mm/mes	mm/año		mm/año
Recarga lateral	111.8	645.7	57.9	470.1
Riego	267	804.2	24	2563.5
Recarga directa	32.1	686.6	95.4	33.4

Tabla 3.10. Resultados del cálculo de la evapotranspiración real por el método de Thornthwaite.

3.2.6. ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

Se entiende por escorrentía superficial, al movimiento del agua que por influencia de la gravedad se moviliza sobre la superficie del suelo de acuerdo con la pendiente del terreno. En un primer tiempo, se produce la saturación progresiva del terreno y no hay escurrimiento mientras la tasa de precipitación no supere la capacidad de infiltración del suelo. Si la intensidad de la lluvia supera dicha capacidad, el agua corre a lo largo de las pendientes. Esta es una de las formas cómo el agua procedente de las precipitaciones alcanza los lechos de los ríos (Díaz A. et. al., 2005).

Para cuantificar la escorrentía superficial es necesario partir de estaciones de aforos o puntos de control en donde se realizan mediciones de caudales; los datos registrados deben ser fiables y continuos, así, mediante el análisis de un hidrograma del río se podrá determinar su caudal base y el excedente vendría a ser la escorrentía superficial (Díaz A. et. al., 2005).

Para calcular la escorrentía superficial se debe establecer relaciones que permitan pasar de las lluvias al escurrimiento y luego proceder al análisis estadístico del escurrimiento mediante la comparación con estaciones pluviométricas de referencia situadas en la misma zona.

Para aplicar el método propuesto, el departamento Unidad Ejecutora Proyecto Ríos Orientales (UEPRO) de la EMAAP-Q entregó 22 historiales de fuentes aforadas en la zona de estudio; de éstos puntos de control solo uno fue útil para el cálculo aproximado de la escorrentía superficial.

El punto de aforo está ubicado en la quebrada Sigsipugro o Lalagachi, en la zona de recarga lateral, recoge las aguas de un área de 15.95 km² y su historial contiene valores de caudales instantáneos medidos una vez por mes en los años 1989, 1995, 1996 y desde el 2000 al 2005; además en ninguno de estos años se habían realizado las 12 medidas correspondientes a cada mes del año, puesto que se encontraron registradas máximo 10 mediciones, una vez por mes. Aunque ésta información no tuvo todas las características requeridas para este tipo de cálculo, fue la única información disponible, con la que se pudo obtener un coeficiente de escorrentía aproximado de la cuenca (Los caudales aforados se presentan en el anexo 10).

Con estos antecedentes y realizando algunas simplificaciones se calculó la escorrentía superficial, tomando la estación climatológica Yaruquí – INAMHI como referencial. Los valores utilizados de ésta estación fueron las precipitaciones medias de cada año, que son el promedio de las precipitaciones de cada mes. Se tomaron estos valores como referenciales puesto que al compararlos con los caudales instantáneos se atenúan los valores más altos y más bajos durante el año.

El cálculo se realizó asumiendo que los caudales instantáneos medidos en cada mes correspondían a los caudales medios mensuales, luego se calculó el caudal medio ponderado en cada año, realizando la sumatoria de los caudales mensuales multiplicados por el número de días de cada mes y dividido para el número total de días considerado. Los coeficientes de escorrentía para cada año

se determinaron dividiendo los caudales mensuales ponderados para el área de la cuenca (15.95 km²) y para el valor de precipitación medio anual de cada año de la estación meteorológica. Finalmente el valor promedio de los coeficientes de escurrimiento en cada año fue el valor asumido para toda la cuenca de estudio. (Los cálculos se exponen en el anexo 10). Por lo tanto, la escorrentía resultante representa el 30 % de la precipitación media multianual en cada área. En la tabla 3.11. se muestran los resultados.

Nombre del área	Precipitación media multianual	Excedente de la evapotranspiración real	Escorrentía superficial
	mm/año	mm/año	mm/año
Recarga lateral	1115.8	470.1	334.74
Riego	3367.7	2563.5	1010.31
Recarga directa	720.0	33.4	33.4

Tabla 3.11. Resultados del cálculo de la escorrentía superficial para cada área.

3.2.7. PERCOLACIÓN O INFILTRACIÓN PROFUNDA

El agua subterránea de una región tiene como supuesto previo para su existencia, que se haya producido percolación.

Infiltración es el proceso por el cual, el agua atraviesa la interfase atmósfera - suelo para luego quedar retenida en él o alcanzar el nivel acuífero incrementando el volumen acumulado anteriormente. Cuando el agua retenida supera la capacidad de campo del suelo, el agua desciende por la interacción de las fuerzas capilares y la gravedad; esta parte del proceso recibe la denominación de percolación (Custodio E. y Llamas M., 1975).

La infiltración se ve afectada por las características del terreno o medio permeable; es decir, tanto las condiciones de superficie (cubierta por vegetación, áreas urbanizadas, terrenos fracturados sin formación de suelo), como el tipo de suelo y las condiciones ambientales son factores que intervienen directamente en el proceso de infiltración (Custodio E. y Llamas M., 1975).

Restando de la precipitación media multianual la evapotranspiración real y la escorrentía superficial calculadas con anterioridad, queda el agua que se percola; en la zona de recarga lateral la percolación es el 12.1% de la precipitación, en el área de riego es el 46% y de acuerdo al coeficiente de escorrentía en el área de recarga directa, no se produce percolación puesto que, todo el excedente se convierte en escorrentía superficial. En la tabla 3.12. se muestra los resultados de éstos cálculos.

Nombre del área	Precipitación media multianual		Evapotranspiración real		Escorrentía superficial		Percolación	
	%	mm/año	%	mm/año	%	mm/año	%	mm/año
Recarga lateral	100	1115.8	57.9	645.7	30	334.74	12.1	135.36
Riego	100	3367.7	24	804.2	30	1010.31	46	1553.19
Recarga directa	100	720.0	95.4	686.6	4.6	33.4	0	0

Tabla 3.12. Resultados del cálculo de los parámetros hidrometeorológicos para cada área.

3.3. BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico es el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado.

Realizar un balance hídrico no es más que aplicar el principio de conservación de masas con respecto al flujo de agua en un sistema determinado.

Las entradas naturales de agua se efectúan gracias a que parte de las precipitaciones se percolan y alimentan el flujo subterráneo de agua y las pérdidas se deben esencialmente a la evapotranspiración y escorrentía superficial.

La expresión general del balance hídrico es la siguiente:

$$P = R + ETR + I$$

Donde:

P = altura de precipitación en mm

R = escorrentía superficial expresada en mm

ETR = evapotranspiración real en mm

I = infiltración en mm

Tomando en cuenta que en la cuenca de estudio existe una zona de riego y que el porcentaje de agua percolada en ésta zona es significativo, el sistema tiene un aporte artificial importante que se suma a las percolaciones de las aguas provenientes de las lluvias. La suma de las aguas percoladas constituye la recarga del acuífero. En la tabla 3.13. se muestran las entradas o recargas del sistema.

Nombre del área	Dimensión	Recarga		
	km ²	mm/año	l/s	m ³ /día
Recarga lateral	266.3	135.36	1143.02	98757.17
Riego	55.6	1553.19	2738.37	236595.51
Recarga directa	64.2	0	0	0
Caudal total de recarga			3881.39	335352.68

Tabla 3.13. Caudales de recarga del acuífero

En cambio la descarga del sistema está representada por los caudales salientes de los pozos en explotación, sumados a los caudales que brotan de cinco sistemas de vertientes conocidos; en la tabla 3.14. se detallan éstos valores, el resultado de la sumatoria de los caudales salientes es. 240.0 l/s.

De la comparación entre los caudales de recarga y descarga (Ver tablas 3.13. y 3.14.), se observa que, solo el 6.18 % del agua que percola y recarga el acuífero, se descarga dentro de los límites propuestos en este estudio.

Como la formación Chiche se extiende fuera de los límites fijados en este trabajo, deben haber puntos de agua no identificados precisamente por encontrarse fuera de estos límites; por lo tanto el agua que no se descarga dentro de la cuenca de estudio, debe descargarse mediante esos puntos, esto significa que el acuífero no termina en los límites propuestos sino que se extiende fuera de ellos.

Nombre punto de agua		Caudal explotación (l/s)
SINTOFIL	5.0	CAUDAL EXPLOTADO EN POZOS: 77 l/s
PH 1 CARNASA	4.0	
CHAUPIMOLINO	12.0	
BELLA FLOR	10.0	
NO.1 LABORATORIO GRANADA	3.0	
SAN CARLOS DE YARUQUÍ NO. 2	5.0	
PRONACA YARUQUI	5.0	
YARUQUI NO.1A (SAN VICENTE)	7.0	
INVERSIONES FLORÍCOLAS	11.0	
URAPAMBA	15.0	
APANGORAS	12.0	CAUDAL DE LAS VERTIENTES: 163,0 l/s
CALERAS	21.0	
CARTAGENA LALAGACHI	60.0	
URAVIA BD	10.0	
NUEVO AEROPUERTO	60.0	
Total caudal de descarga		240,0 l/s o 20736 m³/día

Tabla 3.14. Caudales de descarga del acuífero

CAPÍTULO IV

4. HIDROGEOLOGÍA

Hasta el inicio de este proyecto los estudios realizados estaban orientados a establecer el uso del agua por lo que no se había efectuado ningún estudio concreto del acuífero como sistema. En este trabajo se planteó estudiar las características hidrogeológicas del área de estudio mediante un procedimiento que consistió de cinco etapas:

- Recopilación bibliográfica.
- Elaboración de un inventario de puntos de agua
- Determinación y monitoreo de la profundidad de la superficie piezométrica.
- Establecimiento de la dirección del flujo mediante la elaboración del mapa piezométrico.
- Obtención de la conductividad hidráulica de las unidades litológicas que conforman el sistema.

En la fase de recopilación bibliográfica se supo que en la zona existen 21 pozos de agua de los que se obtuvieron 20 informes técnicos de perforación (9 pertenecen a la EMAAP-Q y 11 a instituciones privadas), en los que se detallan las fases de construcción, diseño del pozo y en algunos casos se presentan datos de pruebas de bombeo; además se accedió a la base de datos de la EMAAP-Q referente a las vertientes. Las principales fuentes de información fueron la EMAAP-Q, el INAMHI, el CNRH y empresas privadas perforadoras de pozos de agua.

La información bibliográfica fue validada con las columnas estratigráficas levantadas para este trabajo y con el estudio de los testigos de perforación del pozo de investigación (YT-1) perforado por la EMAAP-Q; también se verificó y actualizó parcialmente la información de los puntos de agua (pozos y vertientes) mediante comunicación personal con los administradores de los puntos.

4.1. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

Con el fin de visualizar el manejo de los recursos hídricos subterráneos en la zona de estudio se inventarió la información útil de los pozos y vertientes, conocidos como puntos de agua.

En total se sistematizaron 40 puntos, de los cuales 21 son pozos (1 de investigación, 10 en explotación y 10 fuera de operación) y cinco grupos de vertientes que contienen a 19 puntos de agua en total.

Para el levantamiento del inventario, se realizaron visitas de campo a los puntos de agua para verificar la información recopilada; en algunos casos se redefinió la cota, las coordenadas, la parroquia, el uso, el caudal de explotación y el nombre de la empresa que administra el punto; también se tomaron medidas de las profundidades de los niveles estáticos en cuatro pozos, en los restantes no fue posible realizar las mediciones debido a varias razones, entre ellas, el funcionamiento constante del pozo, la falta de autorización para realizar la medición y a la limitada longitud de la sonda disponible que llegaba hasta 150 m de profundidad como máximo. Cabe indicar que la información concerniente a los puntos Pi2 y Q1 no fue actualizada debido a que no se logró localizarlos.

Mediante los trabajos de campo, se constató, que la información de este inventario no es un reflejo fiel de la realidad del aprovechamiento del agua subterránea en el sector, dado que existen vertientes y pozos que no constan en las bases de datos de las entidades que regulan el uso del agua.

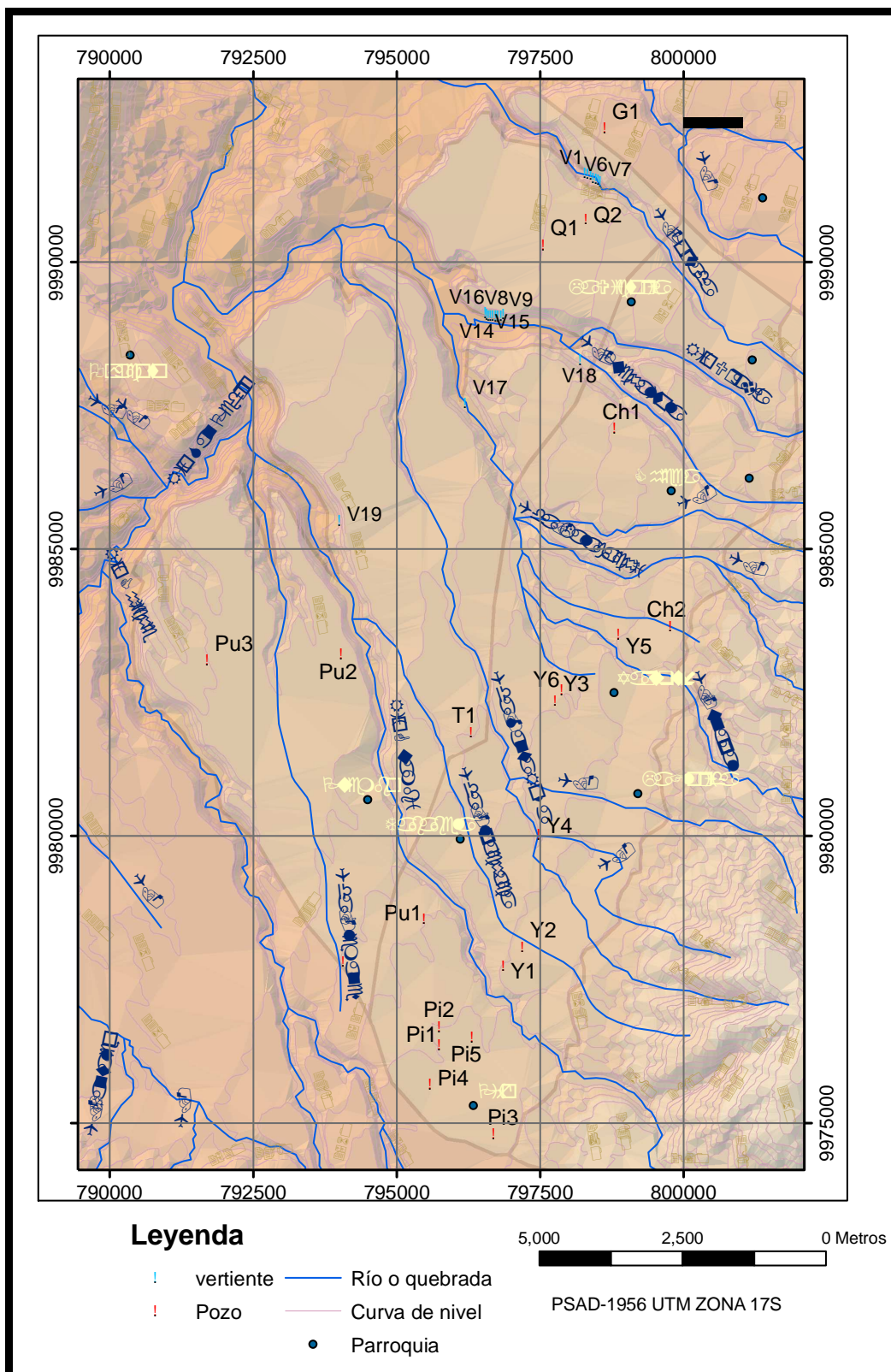
En el anexo 11 se presenta el inventario completo cuyos campos son la profundidad del punto de agua, las potencias de las formaciones geológicas, los niveles estáticos, dinámicos y de abatimiento, los caudales de explotación, la sumatoria de los espesores de las cribas, etc. En la Tabla 4.1., se presenta un resumen del inventario.

Con base en este inventario se ubicaron los puntos de agua en el mapa de la zona de estudio (Mapa 4.1.), en donde se nota que la mayoría de pozos está

distribuida en la parte Sur del área de acumulación mientras que las vertientes ocurren al centro y Norte de la misma área.

No.	Código	Parroquia	Nombre del punto de agua	Cota superficial (m.)	Profundidad del nivel estático (m)	Cota del nivel estático (m.)	Caudal de explotación (l/s)	TOTAL
1	Pi1	PIFO	SINTOFIL	2560.00	98,0	2462.00	5,0	Q TOTAL EXPLOTADO EN POZOS: 77 l/s
2	Pi2	PIFO	GUAMBI	2560.00	100,0	2459.96	-	
3	Pi3	PIFO	PIFO (CALLUMA)	2621.19	105,7	2515.51	-	
4	Pi4	PIFO	PH 1 CARNASA	2560.00	104,7	2455.32	4,0	
5	Pi5	PIFO	CHAUPIMOLINO	2560.00	103,5	2456.50	12,0	
6	Pu1	PUEMBO	SAN JOSE DE PUEMBO	2520.00	106,2	2413.80	-	
7	Pu2	PUEMBO	INDAVES	2400.00	111,0	2289.00	-	
8	Pu3	PUEMBO	BELLA FLOR	2360.00	89,0	2271.00	10,0	
9	Pu4	PUEMBO	NO.1 LABORATORIO GRANADA	2482.57	45,0	2437.57	3,0	
10	T1	TABABELA	METROZONA (TEXTILES NACIONALES)	2480.00	104,0	2376.00	-	
11	Y1	YARUQUI	COOP. TAJAMAR	2560.00	111,4	2448.59	-	
12	Y2	YARUQUI	TABABELA	2576.30	155,4	2420.88	-	
13	Y3	YARUQUI	YARUQUI NO.1	2519.58	89.1	2430.48	-	
14	Y4	YARUQUI	SAN CARLOS DE YARUQUI No.2	2520.00	101.1	2418.90	5,0	
15	Y5	YARUQUI	PRONACA YARUQUI	2573.0	?		5,0	
16	Y6	YARUQUI	YARUQUI NO.1A (SAN VICENTE)	2519.20	101,1	2418.10	7,0	
17	CH1	CHECA	INVERSIONES FLORICOLAS	2520.00	163,2	2356.83	11,0	
18	CH2	CHECA	YT-1 (LA TOLA)	2597.90	89,8	2508.10	-	
19	Q1	EL QUINCHE	HNOS. MOREANO MONCAYO	2441.10	135,5	2305.59	-	
20	Q2	EL QUINCHE	URAPAMBA	2467.00	136.2.0	2330.80	15,0	
21	G1	GUAYLLABAMBA	HORTANA NO.1 GRANADA QUINCHE)	2447.80	105,0	2342.80	-	
22	V1	EL QUINCHE	Q1_APANGORAS	2315,0	0,0	2315,0	12,0	Q TOTAL VERTIENTES: 163,0 l/s
23	V2	EL QUINCHE	Q2_APANGORAS	2320,0	0,0	2320,0		
24	V3	EL QUINCHE	Q3_APANGORAS	2330,0	0,0	2330,0		
25	V4	EL QUINCHE	Q4_APANGORAS	2318,0	0,0	2318,0		
26	V5	EL QUINCHE	Q5_APANGORAS	2317,0	0,0	2317,0		
27	V6	EL QUINCHE	Q6_APANGORAS	2314,0	0,0	2314,0		
28	V7	EL QUINCHE	Q7_APANGORAS	2314,0	0,0	2314,0		
29	V8	EL QUINCHE	CALERAS_1	2345,0	0,0	2345,0		
30	V9	EL QUINCHE	CALERAS_2	2345,0	0,0	2345,0		
31	V10	EL QUINCHE	CALERAS_3	2340,0	0,0	2340,0		
32	V11	EL QUINCHE	CALERAS_4	2340,0	0,0	2340,0		
33	V12	EL QUINCHE	CALERAS_5	2343,0	0,0	2343,0		
34	V13	EL QUINCHE	CALERAS_6	2343,0	0,0	2343,0		
35	V14	EL QUINCHE	CALERAS_7	2345,0	0,0	2345,0		
36	V15	EL QUINCHE	CALERAS_8	2345,0	0,0	2345,0		
37	V16	EL QUINCHE	CALERAS_9	2348,0	0,0	2348,0		
38	V17	CHECA	CARTAGENA LALAGACHI	2270,0	0,0	2270,0	60,0	
39	V18	EL QUINCHE	URAVIA BD	2280,0	0,0	2280,0	10,0	
40	V19	TABABELA	NUEVO AEROPUERTO	2330,9	0,0	2330,9	60,0	

Tabla 4.1. Resumen del Inventario de puntos de agua en la cuenca de estudio



Mapa 4.1. Puntos de agua recopilados en la zona de estudio (Fuente topográfica IGM – EMAAP-Q, 2005).

4.2. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS

Para que una formación geológica sea denominada como acuífera, es necesario que esté situada en la zona saturada, que sea capaz de almacenar y transmitir agua y que sea susceptible de ser explotada en cantidades económicamente apreciables para atender diversas necesidades (Díaz et. al, 2005)

Con la geología descrita en el capítulo II se identificaron los potenciales niveles acuíferos y en la hidrogeología se estudió la interrelación del medio geológico con el agua.

4.2.1. NIVELES PIEZOMÉTRICOS Y DIRECCIÓN DE FLUJO

Como se observa en la tabla 4.1., los niveles estáticos registrados en los pozos se encuentran a una cota máxima de 2515.5 m. en el pozo Pi3 y a una cota mínima de 2271.0 m. en el pozo Pu3; de acuerdo a la distribución de los pozos y a la profundidad de la tabla de agua en ellos, se deduce que la cota de los niveles disminuye hacia el Noroeste (Ver tabla 4.1 y Mapa 4.2).

El rango de profundidades del nivel varía entre 89 m y 136.2 m; los niveles más profundos que están fuera de este rango son 163 m y 155.4 m que corresponden a los pozos CH1 en Checa y Y2 en Yaruquí respectivamente; se podría pensar que existe una alteración en la profundidad del nivel pero al intentar comprobar éstos valores, resultó que el instrumento de medición no alcanzó la profundidad del nivel estático en éstos pozos, por lo tanto la profundidad del nivel en éstas zonas es mayor a 150 m y probablemente sean los reportados en los informes técnicos.

Los niveles menos profundos que están fuera del rango promedio se encuentran en los pozos Y3 y CH2 con profundidades de 35 m en los dos casos. A estas profundidades la descripción litológica indica que estos niveles se sitúan en la Fm. Cangahua en donde esporádicamente se hallaron lentes de arenas y conglomerados (Ver anexos 2 y 4); como apenas fueron dos los niveles reportados con estas profundidades se dedujo que se ubican en la Fm. Cangahua como niveles colgados.

La medición de los niveles estáticos fue posible en los pozos Y3 y Q2, un resumen se muestra en la tabla 4.2.

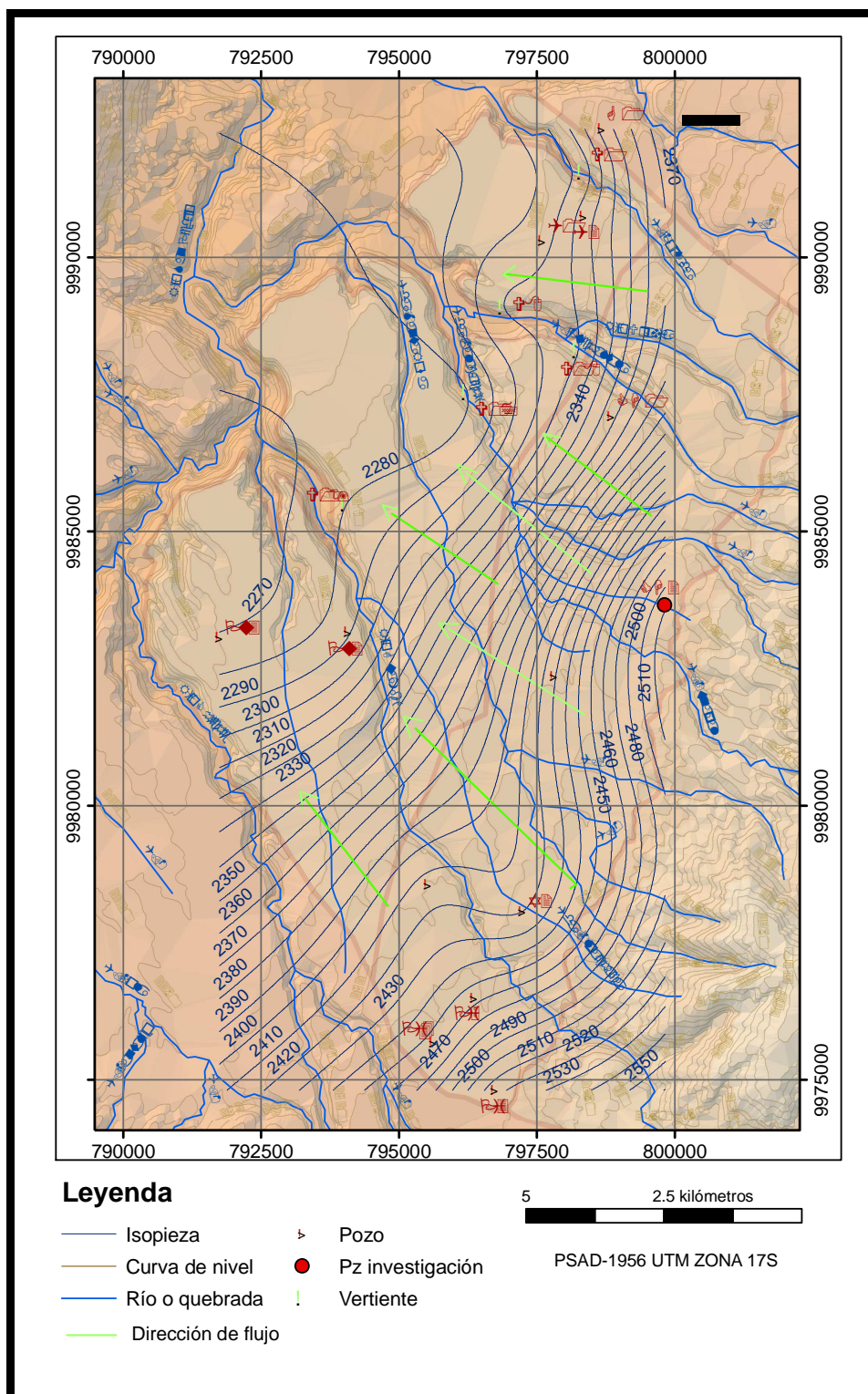
- En el pozo Y3 se hicieron 2 mediciones, una en marzo y otra en junio (invierno y verano respectivamente) y la variación entre estas dos medidas fue de (+/-) 3.8 m, pero se debe tomar en cuenta que este pozo se ubica a 26 m de distancia del pozo Y6 que bombea agua constantemente con un caudal de 7 l/s por lo que el nivel medido del pozo Y3 es un nivel perturbado por encontrarse dentro del radio de influencia del pozo bombeado; además en la tabla 4.2. se nota que el nivel estático registrado durante la construcción del pozo Y3 es más profundo que los niveles medidos en las dos campañas siguientes, esto indica que, desde el año 1989 el acuífero se ha recargado al punto de subir el nivel estático, o que el nivel registrado en el informe de perforación, sea erróneo, esto pudo suceder si es que después de construido el pozo no se esperó el tiempo prudencial para la recuperación del nivel. De todas maneras el valor utilizado para la elaboración del mapa de isopiezas fue la cota promedio de los niveles medidos (89.1 m de profundidad cuya cota es 2430.48 m.) que se muestran en la tabla 4.2.
- En el pozo Q2 se realizó una medición antes de su equipamiento cuyo resultado (136.2 m) varía 5.5 m con respecto al nivel reportado en la fecha de su construcción (141.7 m). Las dos mediciones se realizaron en épocas invernales (noviembre y marzo) pero la época más lluviosa es la de marzo que es la fecha en la que se tomó la última medida, sin embargo por ser la única medición realizada después de la construcción del pozo, se utilizó su cota (2330.8 m.) para la elaboración del mapa piezométrico.

Pozo	Construcción del pozo			Campaña 1			Campaña 2		
	Nivel estático			Nivel estático			Nivel estático		
	Fecha	Profundidad (m)	Cota (m.)	Fecha 1	Profundidad 1 (m)	Cota (m.)	Fecha 2	Profundidad 2 (m)	Cota (m.)
Y3	nov-89	96.0	2423.6	jun-05	87.2	2432.4	mar-07	91	2428.6
CH1	ago-92	163.2	2356.8	jun-05	> 150	> 2356.8	-	-	-
Y2	jun-04	155.4	2420.9	jun-05	> 150	> 2420.9	mar-07	> 150	> 2420.9
Q2	nov-06	141.7	2325.3	-	-	-	mar-07	136.2	2330.8

Tabla 4.2. Niveles estáticos reportados en los informes y medidos en el campo.

Con la limitación de no contar con datos actualizados de los niveles estáticos de la mayoría de los puntos de agua, se realizó el mapa piezométrico con las cotas

de las vertientes, las cotas de los niveles estáticos medidos y con los niveles de los puntos de agua registrados en los informes a partir del año 2000 (Ver Mapa 4.2.).



Mapa 4.2. Mapa de Isopiezas elaborado con los niveles estáticos de puntos de agua que reportan datos a partir del año 2000.

El mapa de isopiezas indica que las líneas de flujo tienden hacia el Noroeste y que la descarga se encuentra en esa dirección; que los gradientes hidráulicos son homogéneos ya que el espaciamiento entre las isopiezas en general es regular, además muestra que la cuenca hidrogeológica tiene una forma distinta a la cuenca morfológica fijada al principio de este estudio.

4.2.2. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K)

La conductividad hidráulica es un parámetro que se puede obtener en el campo, efectuando ensayos Le franc, de cuchareo y pruebas de bombeo; otra opción es realizar ensayos de laboratorio; en el caso de no contar con valores medidos, se puede recurrir a los valores de conductividad reportados en los libros, los mismos que serán más acertados si previamente se conoce la geología de la zona.

Pruebas de bombeo

Este tipo de ensayos pueden servir para dos objetivos principales, uno es para determinar las características hidráulicas de los acuíferos por lo que se les denomina como *test de acuífero*; otro objetivo es proporcionar información sobre el rendimiento y el descenso del nivel del agua en el pozo y se los denomina *test de pozo*. El primer objetivo es el que interesa para este estudio; sin embargo los costos de los tests acuíferos son altos porque se deben instalar piezómetros en las cercanías del pozo bombeado, sin embargo se pueden utilizar los datos de test de pozo para obtener una aproximación de las características del acuífero siempre que se acepte un cierto error, a veces apreciable (Kruseman G. y De Redder N, 1975).

Las pruebas de bombeo arrojan datos de todo el paquete litológico asimilado por la tubería ranurada o cribas del pozo; las cribas se ubican en los estratos que se consideren buenos niveles acuíferos a lo largo del pozo hasta su base independientemente del nombre de la formación que atraviese, por lo tanto las conductividades hidráulicas determinadas a partir de estas pruebas son un valor medio de los estratos considerados permeables (de los que tienen cribas) y que se encuentran bajo del nivel estático.

Del inventario de puntos de agua (Anexo 11), fueron 3 los informes técnicos de pozos (Pi2, T1 y Q2) que presentaron el valor de conductividad hidráulica resultante de pruebas de bombeo, pero no presentaron la información base del cálculo para validar los resultados. De las tres conductividades, dos (Pi2 y T1) corresponden a la Fm. Chiche, la restante incluyó a una parte de la Fm. Guayllabamba (Ver Tabla 4.3).

En cambio fueron 9 los informes que presentaron los datos de las pruebas de bombeo y con tiempos de bombeo menores a 72 horas. Con este antecedente se utilizaron los datos para trazar las curvas de descenso y determinar la conductividad hidráulica mediante los programas: Acuífer Test y un programa desarrollado por Alulema R.-EMAAP-Q (2005); un ejemplo de estos cálculos se presenta en el anexo 12. Los resultados de los cálculos por los dos métodos son muy parecidos entre sí (Ver tabla 4.3), y presentan valores 3 veces menores a los valores teóricos y no corresponden a la litología descrita en los pozos, la misma que ha sido validada con las litologías de las columnas levantadas en el campo y los testigos de perforación del pozo de investigación YT-1. Se debe tomar en cuenta que 6 de éstos resultados (Pu3, Y4, Y6, CH1, Q1, y Q2) corresponden al análisis de un paquete litológico que incluye a estratos de la Fm. Guayllabamba, la misma que no fue objeto de este estudio, quedando apenas 3 pozos que captan aguas de niveles correspondientes a la Fm. Chiche cuyas conductividades resultaron ser 15 veces menores al valor teórico, por lo tanto se optó por asumir las conductividades hidráulicas para el paquete estudiado a partir de la bibliografía.

Cabe mencionar que a los usuarios y a los contratistas de los pozos les interesa obtener de las perforaciones de pozos el mayor caudal de explotación, por lo que las técnicas que aplican van encaminadas a ese propósito, por ésta razón se evidenció la falta de atención tanto a las descripciones litológicas como a los métodos para discriminar niveles acuíferos y para calificar los estratos más productivos, los resultados son informes con un enfoque puntual cuyo aporte para el estudio del acuífero perforado es vago con relación al aporte que podrían brindar acerca de las características geológicas e hidrogeológicas.

Datos de literatura

A falta de información de campo confiable, concerniente a la zona saturada estudiada en este trabajo, se procedió a comparar los niveles acuíferos de 12 pozos con litologías cuya conductividad hidráulica está expuesta en la literatura.

Los valores de conductividad hidráulica utilizados como referencia fueron asumidos a partir de los datos presentados por Freeze & Cherry (1979) y De Miguel Fernández C. (1999).

Se procedió a discriminar los niveles acuíferos y sus respectivas potencias en cada pozo, luego mediante la comparación de la litología de cada nivel con las descripciones litológicas de los autores antes citados, se establecieron las respectivas conductividades hidráulicas ponderadas (Ver anexo 4), las que fueron el resultado de multiplicar la potencia de cada nivel por su respectivo valor de conductividad asumido, finalmente para obtener la conductividad hidráulica ponderada de la zona saturada en cada pozo, se sumaron las conductividades ponderadas de cada nivel y se dividieron para la potencia de la zona saturada. Mediante el método de los polígonos de Thiessen se asignó un área de influencia a cada valor de conductividad, luego se determinó la conductividad ponderada para el área de acumulación que es la sumatoria del producto entre la conductividad ponderada de cada pozo por su respectiva área, dividida para el área total de la cuenca de acumulación (Ver anexo 13), así la conductividad hidráulica ponderada resultante para el zona saturada de la Fm. Chiche es $K=1.23$ m/día. El mismo procedimiento se siguió para determinar las conductividades hidráulicas de la zona saturada influenciada por la Fm. Guayllabamba, de la zona de aireación, de la Fm. Chiche y de la Fm. Cangahua. Las conductividades hidráulicas ponderadas de cada zona hidrogeológica y de cada formación en cada pozo en el área de acumulación, se presentan en la tabla 4.3 y en el anexo 4.

De acuerdo a la geología de la cuenca descrita en el capítulo II, se trata de un acuífero multicapa y anisótropo que ha sido simplificado en un solo paquete litológico debido a que no se contó con información más detallada de la zona.

Según De Miguel Fernández, C. (1999), la conductividad ponderada del acuífero cae en el campo de acuíferos con conductividad hidráulica media.

Además se debe destacar que en la zona de estudio no se han registrado pozos artesianos por lo que no existen evidencias de acuíferos a presión; además la litología de la zona de aireación tiene una conductividad hidráulica ponderada (0.8 m/día) menor a la de la zona saturada, calificada por De Miguel Fernández C. (1999) de baja a media; con éstas condiciones se deduce que el acuífero es libre.

De acuerdo a la tabla 4.3., existen pozos que atraviesan el límite vertical de estudio, estos pozos tienen una zona saturada influenciada por la Fm. Guayllabamba y la mayoría de ellos arrojan los más altos caudales de explotación conocidos en la cuenca de estudio. La zona saturada de los pozos que están bajo la influencia de la Fm. Guayllabamba, tiene mayor conductividad hidráulica que la zona saturada que tiene influencia solo de la Fm. Chiche; esto confirma que los niveles de la Fm. Guayllabamba, están interconectados con los niveles de la Fm. Chiche, por lo tanto, la Fm. Guayllabamba al menos en su parte superior es también un nivel acuífero.

Código	Nombre del punto de agua	Caudal de explotación (Q)	Esesor Fm. Chiche	Esesor Fm. Guayllabamba	Informes	Método Alulema – EMAAP-Q	Método ACUIFERTEST	Valores asumidos de la literatura			
		l/s	m	m	Conductividad hidráulica (K)	K con base en el diseño del pozo		K Fm. Cangahua	K Fm. Chiche	K Zona saturada Chiche	K Zona saturada Chiche + Guayllabamba
					m/día	m/día	m/día	m/día	m/día	m/día	m/día
Pi1	SINTOFIL	5.00	134.00	-	-	-	-			NO	-
Pi2	GUAMBI	-	144.00	-	7.78E-02	-	-			NO	-
Pi3	PIFO (CALLUMA)	-	167.00	-	-	2.44E-02	1.57E-02	1.01E-01	1.18E+00	1.22E+00	
Pi4	PH-1 CARNASA	4.00	202.00	-	-	9.48E-02	7.55E-02	7.04E-01	1.46E+00	1.09E+00	-
Pi5	CHAUPIMOLINO	12.00	107?	40?	-	-	-	1.28E-01	4.41E+00	-	4.63E+00
Pu1	SAN JOSE DE PUEMBO	-	142.00	-	-	7.98E-02	8.52E-02	2.91E-01	8.52E-01	1.05E+00	-
Pu2	INDAVES	-	158.54	60.90	-	-	-	3.11E-01	7.26E-01	7.19E-01	7.36E-01
Pu3	BELLA FLOR	10.00	154.00	76.00	-	1.09E-01	1.65E-01	3.11E-01	1.68E+00	1.61E+00	1.35E+00
Pu4	NO.1 LABORATORIO GRANADA	3.00	155.45	-	-	-	-	6.04E-01	3.94E-01	1.84E+00	-
T1	METROZONA (Textiles Nacionales)	-	114.00	-	2.37E+00	-	-			NO	-
Y1	COOP. TAJAMAR	-	131.00	-	-	-	-			NO	-
Y2	TABABELA	-	143.26	-	-	-	-	8.82E-01	1.15E+00	3.83E-01	-
Y3	YARUQUI No.1	-	168.00	18.00	-	-	-			no	-
Y4	SAN CARLOS DE YARUQUI No.2	5.00	116.00	-	-	2.93E-01	-			1.16E+00	
Y5	PRONACA YARUQUI	5.00	-	-	-	-	-			-	-
Y6	YARUQUI No.1A (San Vicente)	7.00	152.00	37.00	-	2.02E+00	1.38E+00			NO	-
CH1	INVERSIONES FLORICOLAS	11.00	146.00	66.00	-	7.07E-01	4.72E-01			NO	NO
CH2	YT-1 (LA TOLA)	-	114.00	100.80	-	NO	-	1.13E-01	8.58E-01	8.92E-01	1.42E+00
Q1	HNOS. MOREANO MONCAYO	-	148.00	102.00	-	1.98E+00	1.91E+00			2.43E+00	4.96E+00
Q2	URAPAMBA	15.00	128.00	118.00	1.74E+00	1.77E+00	-			7.00E-01	6.82E-01
G1	HORTANA (NO.1 GRANADA QUINCHE)	-	128.02	-	-	-	-	6.61E-01	1.29E+00	8.99E-01	
Conductividad ponderada (m/día)					8.8 E-1		4.15 E-01	1.45 E+00	1.23 E+00	2.72 E+00	

Tabla 4.3. Conductividades ponderadas (Kp) tomadas de informes, calculadas y asumidas. Las Kp son las que se utilizaron en la modelación del acuífero.

4.2.3. DESCARGA

La descarga del acuífero se produce mediante cuatro mecanismos:

- Naturalmente, mediante las vertientes localizadas dentro de la cuenca de estudio, ubicadas en la parte Oeste y Noroeste. El agua que brota de ellas se une al agua de los ríos y quebradas Guambi, Lalagachi, Urvia, La Portada y Coyago, que finalmente desembocan en los ríos Chiche y Guayllabamba.
- Artificialmente, a través de los pozos de explotación ubicados dentro de la cuenca. La suma de los caudales descargados de las vertientes y de los pozos localizados en la cuenca es 240 l/s, lo que significa 20736 m³/día. (Ver tabla 4.1.).
- Como el acuífero se extiende fuera de la cuenca de estudio, la descarga puede producirse mediante puntos de agua desconocidos que se ubican en la Fm. Chiche.
- El cuarto mecanismo de descarga, debe tener un origen más profundo y está relacionado con el flujo de agua que se produce en la Fm. Guayllabamba.

CAPÍTULO V

5. HIDROQUÍMICA

“La hidrogeoquímica es ante todo una disciplina hidrogeológica que no puede separarse de la visión global del medio físico ni de las peculiaridades hidrodinámicas del mismo. La interacción del agua y el medio físico es intensa y cambiante, espacial y temporalmente; depende de la naturaleza del medio, de la composición del agua original, de las características de la zona no saturada, de la temperatura, de las afecciones antrópicas, de los mecanismos de recarga y descarga y de tantos otros parámetros que cada acuífero es un caso particular y debe abordarse con metodología propia y específica” (www.agua.uji.es).

El objetivo de este estudio fue conocer la calidad del agua del acuífero para el consumo humano, además de conocer la evolución de los parámetros físicos y químicos en el espacio y en el tiempo.

Para alcanzar el objetivo propuesto se siguió un procedimiento de ocho etapas citadas a continuación:

- Recopilación bibliográfica
- Muestreo de agua en pozos y vertientes conocidos de la zona de estudio y análisis en el laboratorio.
- Elaboración de una base de datos con los parámetros físicos, químicos y bacteriológicos correspondientes a los puntos de agua conocidos.
- Comparación de los resultados de los análisis del agua con los límites máximos permisibles establecidos en la Norma NTE INEN para agua potable.
- Interpretación del origen de los componentes físicos, químicos y bacteriológicos y el significado de su presencia en las aguas.
- Caracterización hidroquímica del acuífero mediante el análisis de los parámetros químicos representados en diagramas de Piper.
- Estudio de la evolución del agua en el espacio, mediante el estudio de la composición química y su variación en dirección del flujo.
- Estudio de la evolución del agua en el tiempo, mediante la comparación de análisis de diferentes campañas para un mismo punto.

Para lograr los fines propuestos, se trabajó con la información físico – química y bacteriológica que consta en los informes técnicos de perforación de pozos, también se contó con los análisis de puntos de agua de la EMAAP-Q desde el año 2003 hasta 2007 y un informe del análisis de la información hidrogeoquímica de las aguas del acuífero Pifo-El Quinche elaborado por Martínez D. - EMAAP-Q, 2005.

5.1. BASE DE DATOS DE PARÁMETROS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BACTERIOLÓGICOS

Es conocido que la dinámica de las aguas subterráneas obliga a un control permanente de la calidad del agua de los acuíferos; sin embargo el control de la calidad del agua del acuífero Pifo – El Quinche no ha sido sistemático ni permanente, puesto que los muestreos han sido aleatorios, además no se localizó ninguna base de datos con los parámetros físicos, químicos y bacteriológicos de las aguas de la cuenca.

Desde el año 2005 el Departamento Acuífero de Quito (DAQ) de la EMAAP-Q emprendió el monitoreo de la calidad de las aguas de los acuíferos del Distrito Metropolitano de Quito realizando como mínimo dos campañas anuales; sin embargo, aún existen falencias en el monitoreo ya que no se ha establecido una base de datos con los puntos de agua escogidos para el seguimiento, en cada campaña se han muestreado puntos distintos y de estos, varios fueron muestreados más de una vez pero se los identificó cada vez con nombres distintos.

Entre los años 2005 y 2007, el Departamento de Gestión Ambiental de la EMAAP-Q, monitoreó seis puntos de agua ubicados dentro de la cuenca de estudio, con campañas de muestreo realizadas cada dos meses. Los puntos de agua monitoreados en esas campañas no abarcan toda el área de estudio sin embargo en el año 2006 se realizó para este trabajo una campaña de muestreo en 10 puntos o estaciones de muestreo que son representativas de la cuenca, con esto se complementó la información que consta en el monitoreo.

Con estos antecedentes se construyó la base de datos de las condiciones físico - químicas y bacteriológica del acuífero Pifo – El Quinche siguiendo tres pasos:

- Importación de la estructura de la base de datos desde el software AQUACHEM 4.0.
- Relleno de la base de datos con todos los análisis recopilados independientemente del error resultante del balance iónico (son dos las muestras que sobrepasan el 10% de error; esto se señala en la base de datos en el anexo 14). Los parámetros que el AQUACHEM no reconoce (Sb, Co, Sn, Se, V, DBO5, P-PO4) también fueron incluidos en dicha base.
- Organización de la base de acuerdo a la fecha de muestreo y al nombre de la estación.

No fue factible recopilar análisis de los pozos Indaves, Laboratorio Granada, Yaruquí N.1, Hortana ni de la vertiente Nuevo aeropuerto; sin embargo los análisis físico-químicos recopilados permiten realizar el estudio de la calidad del agua que circula por la cuenca de acumulación.

La base de datos resultante se expone en el anexo 14; consta de 23 puntos de agua denominados estaciones de los cuales 17 son pozos, 4 vertientes y 2 ríos, con 110 muestras de las cuales 21 corresponden a la fecha de construcción de los pozos y las muestras restantes corresponden a varias campañas de monitoreo efectuadas en el período 2005 – 2007.

La base de datos es compatible con el programa AQUACHEM 4.0, lo que significa que a medida que nueva información se integre, podrá ser exportada (con formato *.txt) y sus valores representados gráficamente (diagramas de Piper, Stiff, etc.) en el AQUACHEM para su análisis e interpretación.

5.2. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

5.2.1. COMPOSICIÓN FÍSICO - QUÍMICA Y BACTERIOLÓGICA DEL AGUA Y COMPARACIÓN CON LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES VIGENTES

El agua de lluvia que recarga un acuífero tiene escaso contenido iónico. Va adquiriendo sales que pasan a disolución a lo largo de su recorrido a través de la zona no saturada y de la zona saturada; esta disolución comienza incluso antes de que se incorpore al sistema de flujo subterráneo propio de cada acuífero. Gases, aerosoles, polvo y sales diversas, presentes en la atmósfera, reaccionan con el agua marcando el primer esbozo del quimismo del agua de infiltración. La incorporación de los constituyentes al agua es debida a su elevado poder disolvente y a sus propiedades de combinación, los factores que influyen en la disolución de sales solubles son: la superficie de contacto, longitud del trayecto recorrido, concentración de sales en la roca, tiempo de contacto, temperatura y presión (www.agua.uji.es).

“Los iones disueltos en las aguas subterráneas se suelen dividir en mayoritarios, minoritarios y trazas. Los iones mayoritarios son Cl, HCO₃, SO₄, Ca, Mg, Na y K. los iones minoritarios son aquellos que se encuentran habitualmente formando menos del 1% del contenido iónico total. Los más importantes son: Br, I, SiO₂, Li, Sr, P-PO₄, NO₂, Fe, Mn, Al, NH₄, SO₄, F. Los elementos traza son los que se encuentran en cantidades inferiores y que requieren técnicas muy resolutivas para su determinación. Son metales pesados y otros.

Así mismo deben considerarse los gases disueltos que son, esencialmente CH₄ Y O₂.

Entre los elementos físicos, es notable la importancia de la temperatura, densidad y conductividad. Características físico-químicas de interés son el pH, residuo seco, alcalinidad dureza, acidez, DQO, materia orgánica y DBO” (www.agua.uji.es).

La aptitud del uso del agua está determinada por la cantidad y tipo de sustancias disueltas en ella. Siendo el área de estudio fundamentalmente agrícola, conociendo que el agua de riego proviene del Canal del río Pisque aunque también existen pozos ubicados en empresas florícolas y avícolas, se puede establecer que el agua del acuífero se destina principalmente al consumo humano y doméstico, la calidad para dicho consumo se estableció comparando los resultados de los análisis físicos, químicos y bacteriológicos con los límites máximos permisibles establecidos en la norma NTE INEN 1 108:2006 para agua potable; la norma se presenta en la tabla 5.1.

PARÁMETRO	UNIDAD	Límite máximo Permissible
Características físicas		
Color	Unidades de color verdadero (UTC)	15.00
Turbiedad	NTU	5.00
Olor	--	no objetable
Sabor	--	no objetable
pH	--	6.5 - 8.5
Sólidos totales disueltos	mg/l	1000
Inorgánicos		
Aluminio, Al	mg/l	0.25
Amonio (N-NH ₃)	mg/l	1.00
Antimonio, Sb	mg/l	0.005
Arsénico, As	mg/l	*0.01
Bario, Ba	mg/l	0.70
Boro, B	mg/l	0.30
Cadmio, Cd	mg/l	0.003
Cianuros, CN	mg/l	0.00
Cloro libre residual	mg/l	0.3 -1.5
Cloruros, Cl	mg/l	250
Cobalto, Co	mg/l	0.20
Cobre, Cu	mg/l	1.00
Cromo, Cr (Cromo hexavalente)	mg/l	0.05
Dureza total, CaCO ₃	mg/l	300
Estaño, Sn	mg/l	0.10
Flúor, F	mg/l	1.50
Fósforo, (P-PO ₄)	mg/l	0.10
Hierro, Fe	mg/l	0.30
Litio, Li	mg/l	0.20
Manganeso, Mn	mg/l	0.10
Mercurio, Hg	mg/l	0.00
Níquel, Ni	mg/l	0.02
Nitratos, N-NO ₃	mg/l	10.00
Nitritos, N-NO ₂	mg/l	0.00
Plata, Ag	mg/l	0.05
Plomo, Pb	mg/l	0.01
Potasio, K	mg/l	20.00
Selenio, Se	mg/l	0.01
Sodio, Na	mg/l	200
Sulfatos, SO ₄	mg/l	200
Vanadio, V	mg/l	0.10
Zinc, Zn	mg/l	3.00

Tabla 5.1. Norma NTE INEN 1 108:2006. *Según el Registro oficial No.231 del 17/03/2006 con disposición transitoria, el límite máximo permisible de As es 0.05.

Los resultados de los análisis se presentan en el anexo 14, donde consta la base de datos levantada para este estudio. En la tabla 5.2.; se presenta las 24 estaciones con los resultados de los análisis correspondientes a la última fecha de muestreo de cada punto y las sustancias que exceden las concentraciones máximas permitidas fijadas por la norma.

ID	Fecha de muestreo	Nombre del punto de agua o estación	ID de la muestra o número de muestra	Ubicación	Fe	Mn	Al	F	Coliformes totales	P-PO ₄
					mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	NMP/100ml	mg/l
Pu3	12/09/1998	Bella Flor	Bella flor1	Puembo	0.3	0.5		0.9		
Pi3	17/11/2004	Pifo (Calluma)	Pifo2	Pifo	0.2	0				
Pi4	13/09/2006	Carnasa	Carnasa3	Pifo	<0.015	0.014	0.05	<0.5	1	
Pi5	13/06/2007	Chaupimolino	Chaupimolino5	Pifo	0.04	<0.013	0.14	1.25	0	
Pi2	16/02/1990	Guambi	Guambi1	Pifo	1.9	0.4		1.1		
Q1	14/09/2000	Hnos. Moreno Moncayo	Hnos Moreno Moncayo1	Quinche	0.5	0				
CH1	25/08/1992	Inversiones florícolas	Inversiones florícolas1	Checa	0	0.1				
T1	25/09/1987	Metrozona (Textiles nacionales)	Textiles Nacionales1	Yaruquí		1		0.4		
Y5	13/09/2006	Pronaca Yaruquí	Pronaca Yaruquí2	Yaruquí	<0.015	0.024	0.04	<0.5	0	
V20-RL	15/08/2006	Río Lalagachi	Río Lalagachi	Checa	0.58	0.054	0.54	2.36	2419	
V21-RU	15/08/2006	Río Uravia	Río Uravia1	El Quinche	1.394	0.105	0.9	3.31	2419	
Y4	10/09/2007	San Carlos de Yaruquí	San Carlos de Yaruquí21	Yaruquí						
Pu1	09/01/2004	San José de Puembo	San José de Puembo1	Puembo	0.3	0				
Pi1	30/09/1988	Sintofil	Sintofil1	Pifo		0				
Y2	30/09/2004	Tababela	Tababela2	Tababela	0.1	0				
Y1	25/03/1994	Tajamar	Tajamar3	Tababela	0.2	0		0.6		
V1	10/09/2007	Vertiente Apangoras	Vertiente Apangoras18	El Quinche	<0.015				98	0.14
V8	10/09/2007	Vertiente Caleras	Vertiente Caleras17	El Quinche	<0.015				86	0.24
V17	15/08/2006	Vertiente Cartagena	Vertiente Cartagena1	Checa	<0.015	0.024	<0.03	2.74	43	
V18	15/08/2006	Vertiente Uravia	Vertiente Uravia1	El Quinche	0.118	0.055	0.08	16.76	488	
Y6	10/09/2007	Yaruquí 1A	Yaruquí 1A 22	Yaruquí						
CH2	06/12/2005	YT-1 (La Tola)	YT-1-1	Checa	0.12	0			2.40E+06	0.31
Q2	17/11/2006	Urapamba	Urapamba1	El Quinche	<0.3					
NORMA NTE INEN 1 108:2006 (Segunda revisión)					0.3	0.1	0.25	1.5	<2	0.1

Tabla 5.2. Resumen de la base de datos físico – química y bacteriológica, presenta las 23 estaciones con sus respectivos análisis en su último muestreo. Solo se presentan las sustancias cuya concentración en el agua excede los límites máximos permitidos para agua potable. En rojo se resaltan los valores que están en exceso, y en azul se resalta la norma.

En la tabla 5.2., se aprecia que de las 23 estaciones, 12 rebasan los límites máximos permitidos por la norma en diferentes parámetros; así 4 exceden en hierro total, 4 en manganeso, 1 en plomo, 2 en aluminio, 4 en flúor, 6 en coliformes totales y 3 en fósforo.

Exceso de Fe

De las cuatro estaciones en las que el hierro excede los límites máximos permitidos por la norma vigente, dos son pozos y dos ríos; los análisis de los pozos corresponden a los muestreos realizados durante su construcción, y fueron los únicos con los que se contó, ya que la administración de ellos está bajo supervisión privada, por lo que no fue posible hacer el seguimiento respectivo.

En el historial de la calidad del agua del acuífero (Ver anexo 14), se observa que en los análisis de los pozos Pi4, Y4 y Y6, alguna vez hubo concentración de hierro que excedió el límite fijado en la norma, sin embargo en los dos últimos muestreos la concentración de hierro está bajo la reglamentación.

El agua del acuífero, en general, ha presentado concentración de hierro bajo el límite permisible por la norma, por lo que se cree que los valores de hierro reportados esporádicamente, no son representativos del agua del acuífero.

Exceso de Mn

Son cuatro puntos de agua los que excedieron la norma en cuanto a la concentración de manganeso, tres de los puntos coinciden con aquellos que presentaron exceso de hierro durante su construcción y el punto restante es el río Urvia.

Del historial del agua del acuífero, los análisis de los puntos de agua Pi4 y Y6 alguna vez registraron exceso de manganeso, sin embargo, al igual que el hierro, el manganeso se ha presentado esporádicamente en concentraciones que rebasan la norma, pero en general, ha estado bajo los límites permisibles.

La presencia en exceso tanto de hierro como de manganeso, probablemente se debió a que los pozos no fueron desarrollados el tiempo suficiente como para ser purgados, por lo tanto las muestras resultaron contaminadas por agentes externos al acuífero, como por ejemplo por el filtro de grava que se coloca alrededor del pozo, entonces estas muestras no fueron representativas de la calidad del agua del acuífero. De acuerdo con esto, el agua es apta para el consumo humano con respecto al hierro y manganeso.

Exceso de F

En la tabla 5.2. se muestran los resultados de los análisis de la última fecha de muestreo en todas las estaciones. Como se observa, no en todas se ha incluido análisis de flúor.

En concordancia con la base de datos físico - química, apenas en ocho campañas de muestreo se analizó el flúor; de ellas solo la del 15/08/2006 arrojó valores extremadamente anómalos en todos los puntos muestreados (valores diez veces más grandes que los históricamente reportados); es decir la concentración solo en ésta campaña estuvo sobre la norma. Esto sugiere que la metodología utilizada para analizar el flúor en esta campaña, fue inadecuada, por lo que los resultados de este elemento fueron ignorados. Siendo así, la concentración de flúor, está bajo los límites máximos permitidos por la norma.

Exceso de coliformes totales

Los puntos que presentan exceso de coliformes son vertientes y ríos, esto es bastante común ya que son aguas que están a la intemperie, por lo que las partículas resultantes de la desintegración de materia fecal, por acción del viento, pudieron depositarse en el agua, también pudo existir contacto directo con los animales de la zona. Las consecuencias de consumir estas aguas contaminadas con coliformes es la probabilidad de que existan patógenos en ellas y ocasionen enfermedades estomacales. Por lo tanto, para consumir el agua de estos puntos, debe haber previa desinfección.

Exceso de P-PO₄

Al igual que el flúor, los análisis de fosfatos no han sido realizados con frecuencia, es así que en la tabla 5.2. se muestra que, solo en tres puntos de agua se analizó el fosfato, en su último muestreo.

En el historial del agua del acuífero (Anexo 14), se observa que en apenas tres pozos (Y4, Y6 y CH2) y dos vertientes (Caleras y Apangoras) se ha realizado análisis de fosfatos; los pozos se ubican bajo la zona de riego y las vertientes en la zona de descarga, por lo que los puntos de agua son estratégicos para determinar la evolución del compuesto en todo el acuífero. Los resultados de los análisis indican que la concentración de fosfatos excede el límite máximo permitido por la norma en todos los puntos. En las vertientes, la concentración es menor que en los pozos, esto se debe al tiempo y espacio que tiene el agua para purificarse hasta llegar a los puntos indicados.

Los fosfatos en el agua son un indicativo de dos cosas, del crecimiento de algas o de la presencia de pesticidas.

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, en el área de estudio se utiliza el suelo para la agricultura, existe una zona de 55 Km² que es regada con agua del canal del río Pisque y la mayor cantidad de agua que recarga el acuífero proviene de la percolación del agua de riego. El agua que se infiltra en el suelo, lleva consigo sustancias que se encuentran en la superficie, en el caso de las zonas agrícolas, compuestos que se encuentran en pesticidas, fertilizantes, fungicidas, etc.; sin embargo estas sustancias pueden ser retenidas o no por las capas que se encuentran en la zona de aireación.

Para comprobar el origen de los fosfatos, será necesario realizar análisis de pesticidas, por lo pronto, se debe mencionar que los fosfatos en el agua no son tóxicos y con desinfección pueden ser aptas para el consumo humano; pero si estos provienen de pesticidas, los compuestos que pueden acompañar a los fosfatos, si pueden ser dañinos para la salud.

En conclusión, mientras no se compruebe el origen de los fosfatos y estos persistan en concentraciones que exceden la norma, la calidad del agua del acuífero no es apta para consumo humano.

5.2.2. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA DEL AGUA

Martínez D.- EMAAP-Q (2005), con base en muestras tomadas durante la perforación de 10 pozos, realizó un estudio hidroquímico preliminar del acuífero Pifo – El Quinche. Entre los limitantes encontrados informó que los pozos estudiados captan y mezclan las aguas de todos los niveles, por lo que no pudo realizar la caracterización hidroquímica de cada nivel por separado. De su análisis concluyó que el agua del acuífero es mayormente bicarbonatada con una tendencia evolutiva desde aguas sin catión dominante o magnesianas a aguas sódicas y que la salinidad en la zona de acumulación aumenta de Sur a Norte por lo que la dirección del flujo es Sureste – Noroeste.

Con éstos antecedentes y con la información adicional recopilada, en este proyecto se planteó verificar la hidroquímica del acuífero y compararla con la hidroquímica de la zona saturada que tiene influencia de la Fm. Guayllabamba.

Los datos útiles para la interpretación fueron 16 estaciones cuyos últimos análisis incluyeron de cinco a seis iones mayoritarios, de estas, 7 son pozos que arrojan datos del acuífero estudiado, 3 vertientes que representan la descarga natural y las 6 restantes representan la mezcla de aguas con niveles de la Fm. Guayllabamba (Figura 5.2.). En cada caso se tiene 4 pozos cuyos análisis corresponden a la fecha de su construcción y las restantes presentan análisis del año 2006.

La interpretación hidroquímica se realizó mediante la representación de los análisis en diagramas de Piper, mapas de Stiff y diagramas de Schoeller, todo esto mediante el uso del programa AQUACHEM 4.0.

Resultados

En la tablas 5.3, 5.4 y 5.5 se muestran los parámetros estadísticos de las vertientes, de los pozos que captan los niveles del acuífero en la Fm. Chiche, y de los pozos que mezclan las aguas con niveles más profundos respectivamente. Los valores promedios indican que:

- Las concentraciones de sólidos totales disueltos en todos los casos son menores a 1000 mg/l, por lo tanto el agua es dulce (De acuerdo a la clasificación de Aliokin en De Miguel Fernández C., 1999)
- Como el pH aumenta de 7.06 (agua que tiene influencia de la Formación Guayllabamba) a 7.47 (agua de las vertientes), el agua varía de neutra en la base a débilmente básica en la superficie (Pasoxov E. B., según De Miguel Fernández C, 1999).
- De acuerdo con la dureza, ésta aumenta hacia la superficie y sus valores están entre 1.84 y 2.93 mg. eq. /l, por lo que según la clasificación de Aliokin en De Miguel Fernández C., 1999, el agua es blanda.

Number of Samples: 3						
Parameter	Unit	Min	Max	Average	St. Dev.	Dev. Coef
Ca	mg/l	14.08	36.93	23.62667	11.87918	50.27872
Mg	mg/l	11.92	24.69	19.03667	6.50955	34.1948
Na	mg/l	48.73	140.9	103.83	48.65838	46.86351
Cl	mg/l	6.24	8.64	7.28	1.23159	16.91737
HCO3	mg/l	248.81	376.37	326.1367	67.959	20.83758
SO4	mg/l	8.62	12.05	10.34	1.71502	16.58629
TEMP	°C	18.6	28.0	21.8	5.37029	24.63435
pH		7.13	8.51	7.4719	7.43759	99.54082
Cond	uS/cm	330.0	655.0	497.6667	162.7462	32.70185
Meas_Hardness	mg/l	84.04	176.36	137.1	47.68203	34.77901
TDS	mg/l	172.0	509.0	352.6667	169.8126	48.15103

Tabla 5.3. Resultados estadísticos de los parámetros característicos en las vertientes.

Number of Samples: 7						
Parameter	Unit	Min	Max	Average	St. Dev.	Dev. Coef
Ca	mg/l	13.91	22.5	17.68714	3.0701	17.35778
Mg	mg/l	7.3	23.5	16.01571	5.98457	37.36685
Na	mg/l	21.0	52.0	31.46857	12.14028	38.57906
Cl	mg/l	3.8	11.09	6.43286	2.79238	43.408
HCO3	mg/l	147.0	244.0	189.0029	30.83099	16.31245
SO4	mg/l	7.29	22.0	12.27	5.07336	41.34766
TEMP	°C	19.2	24.0	21.6	3.39411	15.71348
pH		7.0	8.1	7.42565	7.48389	100.7844
Cond	uS/cm	233.0	354.0	277.5714	41.19004	14.83944
Temp	°C	19.2	24.0	21.6	3.39411	15.71348
Meas_Hardness	mg/l	80.8	152.7	110.4729	26.545	24.02852
TDS	mg/l	159.0	266.0	226.1429	35.89071	15.87081

Temp. = Temperatura, Cond. = Conductividad eléctrica, Meas_Hardness = Dureza y TDS = Sólidos totales disueltos

Tabla 5.4. Resultados estadísticos de los parámetros característicos en los puntos de agua del acuífero estudiado.

Number of Samples: 6						
Parameter	Unit	Min	Max	Average	St. Dev.	Dev. Coef
Ca	mg/l	15.52	32.1	24.13	6.63818	27.51006
Mg	mg/l	1.0	42.41	18.14	14.69476	81.00748
Na	mg/l	15.0	100.0	43.44167	31.97129	73.5959
Cl	mg/l	7.92	28.0	14.43667	7.9495	55.06461
HCO3	mg/l	107.3	320.21	197.5417	73.11885	37.01439
SO4	mg/l	7.02	40.01	23.386	14.49315	61.97361
TEMP	°C	16.0	25.0	19.46667	4.84287	24.87773
pH		6.59	7.9	7.06564	7.04278	99.67643
Cond	uS/cm	241.0	460.0	330.6667	72.4256	21.9029
Meas_Hardness	mg/l	84.0	222.73	134.6883	50.83217	37.74059
TDS	mg/l	92.0	368.0	266.5	99.07118	37.17493

Tabla 5.5. Resultados estadísticos de los parámetros característicos en los puntos de agua que toman aguas de niveles de la Fm. Guayllabamba.

En las figuras 5.1 y 5.2 se representan mediante diagramas de Piper la composición éstos puntos de agua:

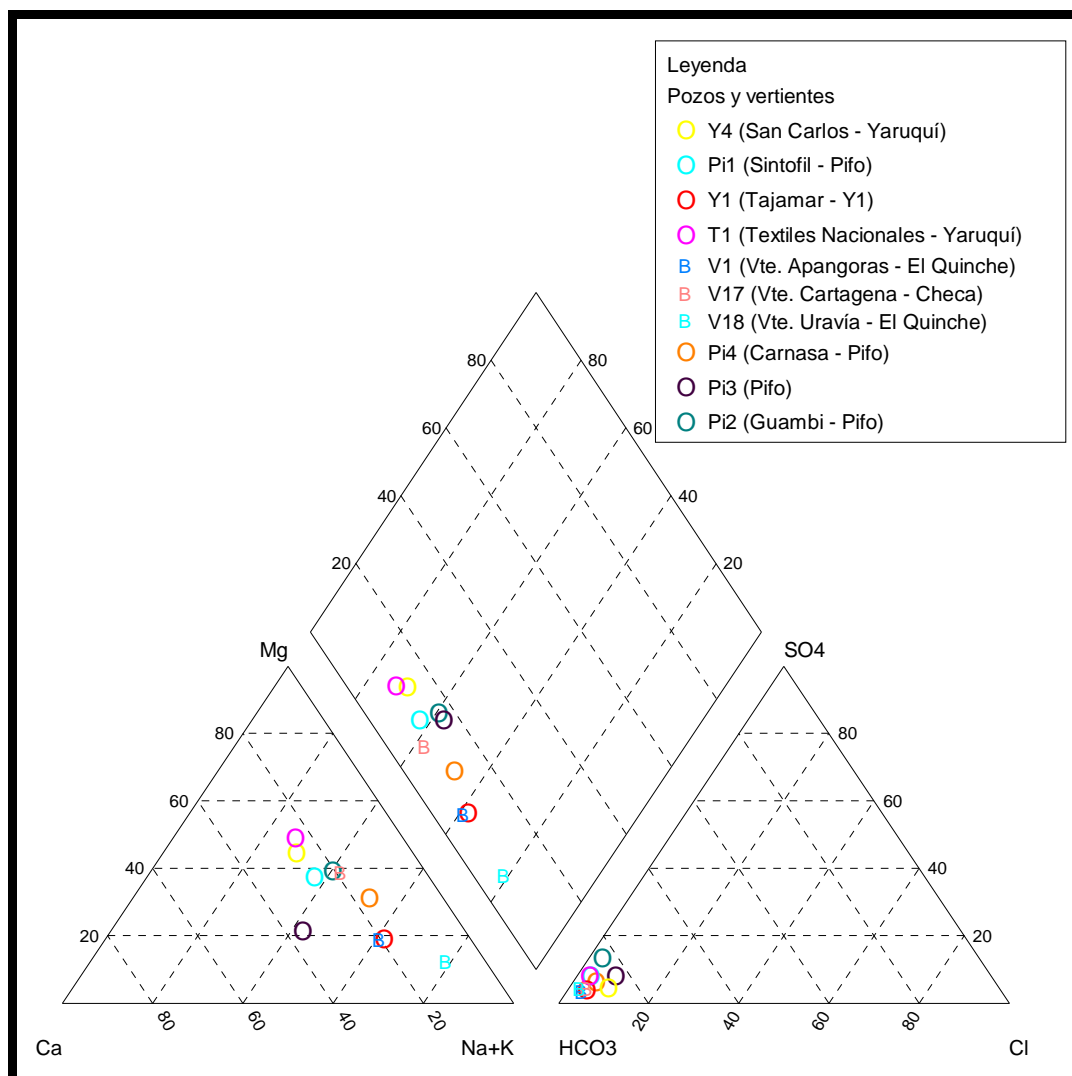


Figura 5.1. Diagrama de Piper representado los análisis de las estaciones que captan agua de los horizontes que corresponden al acuífero estudiado.

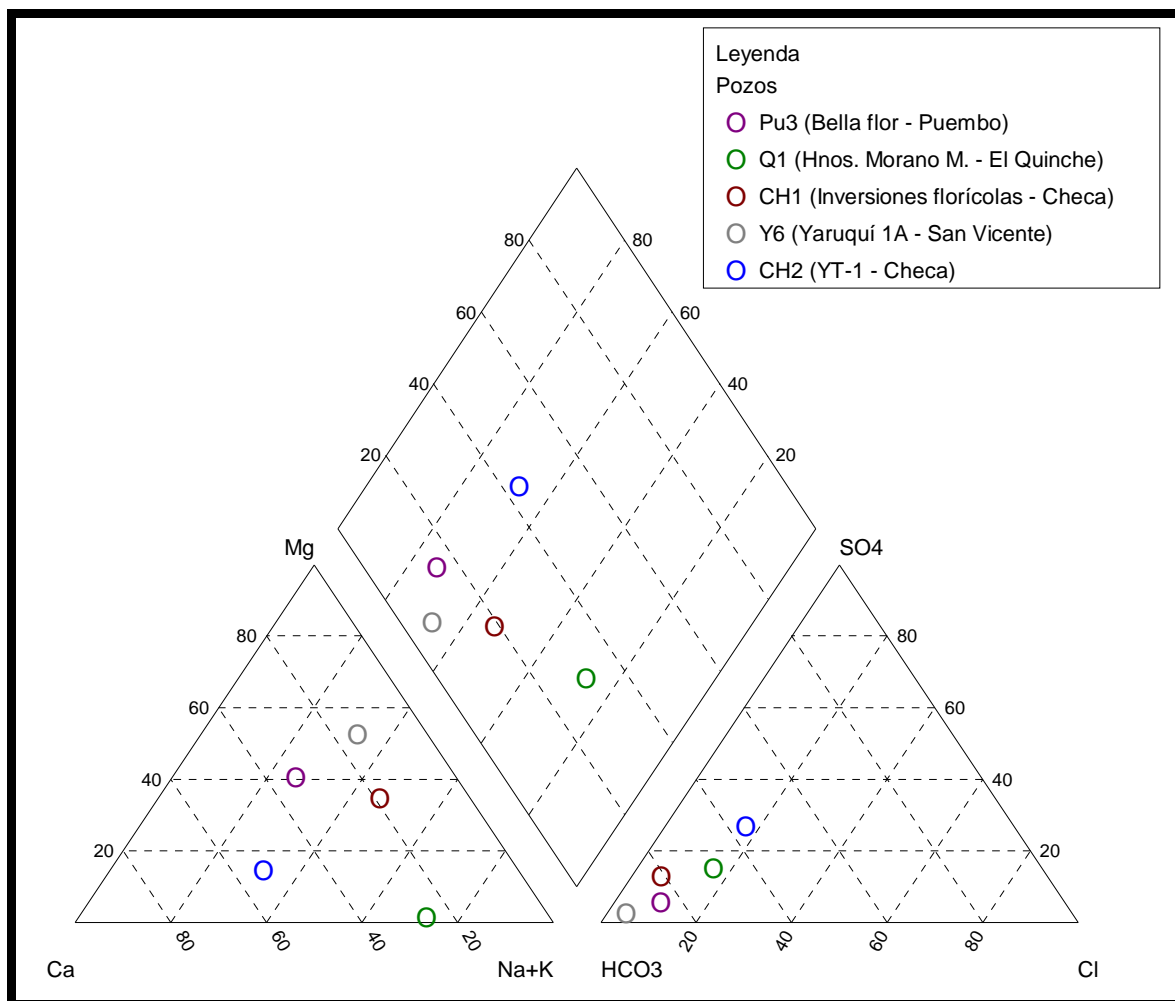


Figura 5.2. Diagrama de Piper representado los análisis de las estaciones que mezclan las aguas con niveles acuíferos de la Fm. Guayllabamba.

De acuerdo a la composición aniónica, se observa que todos los puntos de agua en la figura 5.1 (en la Formación Chiche) caen en el campo de aguas bicarbonatadas, mientras que en la figura 5.2 (en la Formación Guayllabamba) los puntos se encuentran más dispersos, repartidos en tres franjas representando una variación geoquímica de los bicarbonatos que en dos puntos tiende a sulfatada y que de todas formas se mantiene en bicarbonatada, esto se debe a la variación en las profundidades y en litologías presentes en los niveles acuíferos que éstos pozos captan.

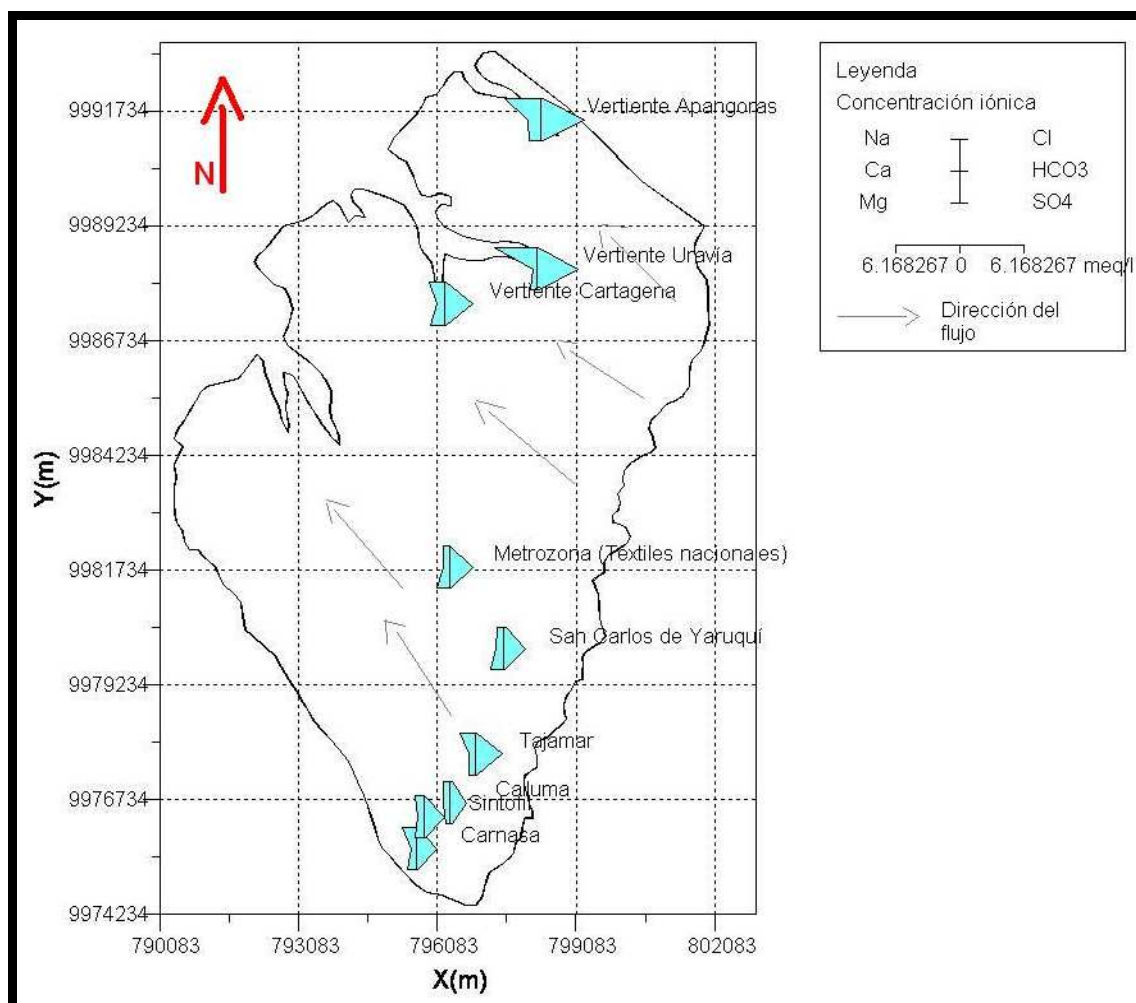
En cuanto a la composición catiónica, se observa en las dos figuras que el agua tiene una composición que varía de magnésicas cálcicas a cálcicas sódicas.

De acuerdo a la base de datos físico - química presentada en el anexo 14, se ha detectado CO_2 disuelto en el agua tanto en pozos que captan aguas del acuífero estudiado como en pozos que captan niveles acuíferos más profundos; este CO_2 puede proceder fundamentalmente de la zona edáfica en donde existe respiración de organismos y descomposición de materia orgánica, la cual produce cierta acidez dando como resultado ácido carbónico que se disocia parcialmente para dar iones carbonato y bicarbonato.

El agua altera por medio de la hidrólisis minerales ricos en Ca como las plagioclasas, ricos en Mg como los piroxenos y anfíboles (que se encuentran difundidos ampliamente en las rocas ígneas de la zona) y también disuelve el vidrio volcánico para transformarlo arcillas; el intercambio iónico que se produce entre el medio y el agua, enriquece al agua en Ca y Mg.

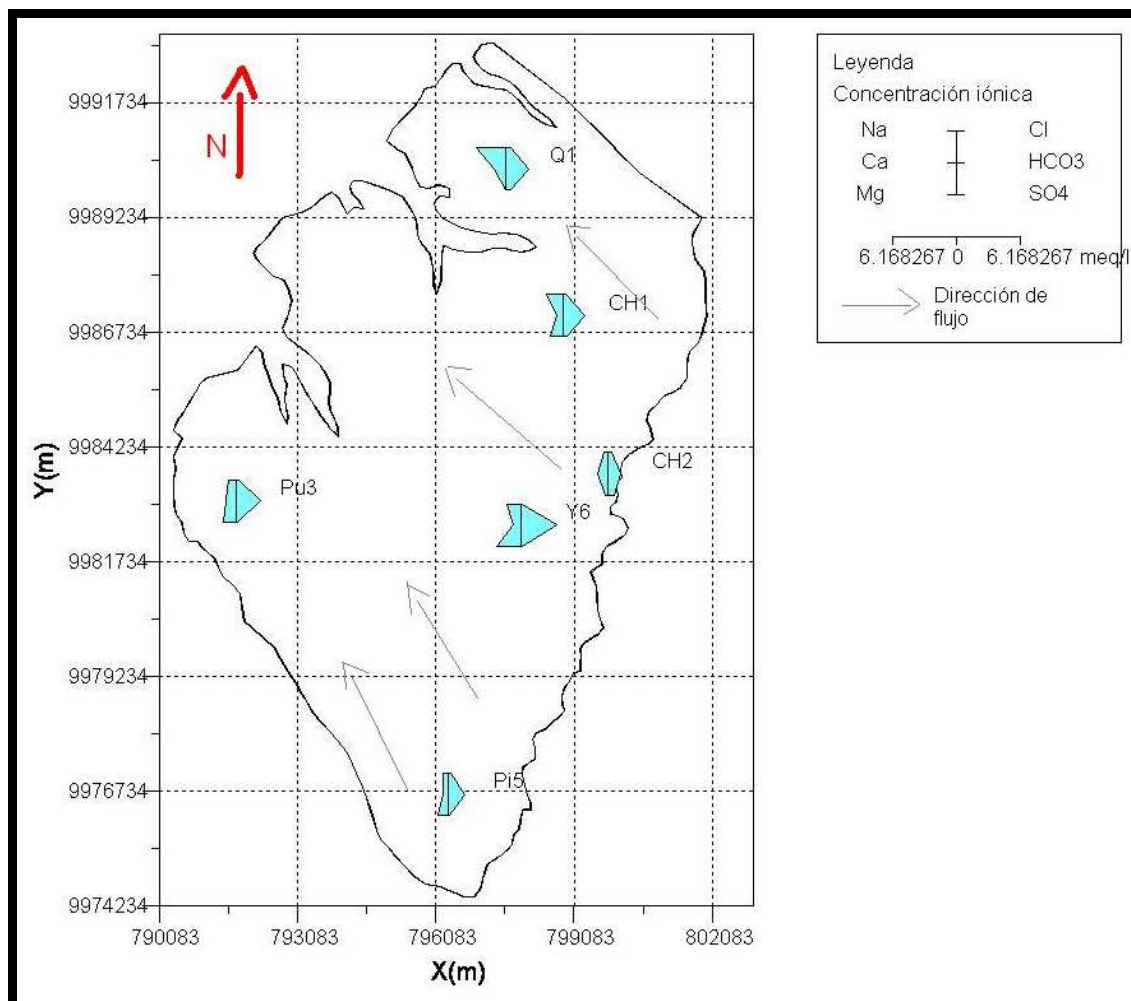
5.2.3. EVOLUCIÓN DEL AGUA EN EL ESPACIO, MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA Y SU VARIACIÓN EN DIRECCIÓN DEL FLUJO.

En el mapa 5.1, se muestra la variación iónica del agua del acuífero de la Formación Chiche desde la zona de recarga hasta la descarga. Se observa que la salinidad aumenta de Sur a Norte y de este a Oeste, en la parte Sur se encuentran pozos bajo la zona de riego y cercanos a la recarga lateral, éstos muestran una composición bicarbonatada que es principalmente magnesiana cálcica aunque en los pozos Carnasa y Tajamar (que también están al Sureste) la composición es más sódica, en el centro se observa que la composición es principalmente magnésica cálcica y en el Norte en la zona de descarga la composición es bicarbonatada magnésico sódica (Vertiente Cartagena) a bicarbonatada sódica. Esta variación iónica desde la zona de recarga hasta la de descarga indica que al agua va intercambiando iones con el medio en su recorrido hasta la zona de descarga, en este caso los iones principales son el Mg por el Na.



Mapa 5.1. Mapa de diagramas de Stiff, con distribución de puntos de agua que toman las aguas del acuífero

Las aguas más profundas (Ver mapa 5.2) tienen un orden más claro aumentando la salinidad de Sur a Norte y de Este a Oeste, así en el Sur un pozo indica que las aguas son bicarbonatadas magnésicas, hacia el centro se presentan 3 muestras con composiciones cálcicas (la muestra que está más cerca de la recarga), magnésica la que está al centro de la cuenca y magnésica cálcica (la muestra que se encuentra más al Oeste de la recarga); al Norte las aguas tienden a ser bicarbonatadas sódico magnésicas.



Mapa 5.2. Mapa de diagramas de Stiff, con distribución de puntos de agua que toman agua de la Fm. Guayllabamba.

5.2.4. EVOLUCIÓN DEL AGUA EN EL TIEMPO

Mediante un diagrama de Schoeller en la figura 5.3. se representó la variación química del agua en 2 muestras de distintos años tomadas en el pozo San Carlos de Yaruquí, este es el máximo número de muestras confiables con iones fundamentales que se obtuvo para un mismo punto. En el gráfico se observa con línea roja la composición química del agua en el año 1998 y de color negro la composición en el año 2006. Del gráfico se puede decir que en 8 años la concentración de calcio y bicarbonato se ha mantenido igual, ha disminuido la de magnesio, aumentado la de sodio, disminuido la de cloruro y aumentado el sulfato. Cambiando la composición del agua de bicarbonatada magnésica cálcica a bicarbonatada sódica magnésica cálcica. Esto indica que con el tiempo las aguas van cambiando su composición y van aumentando su salinidad.

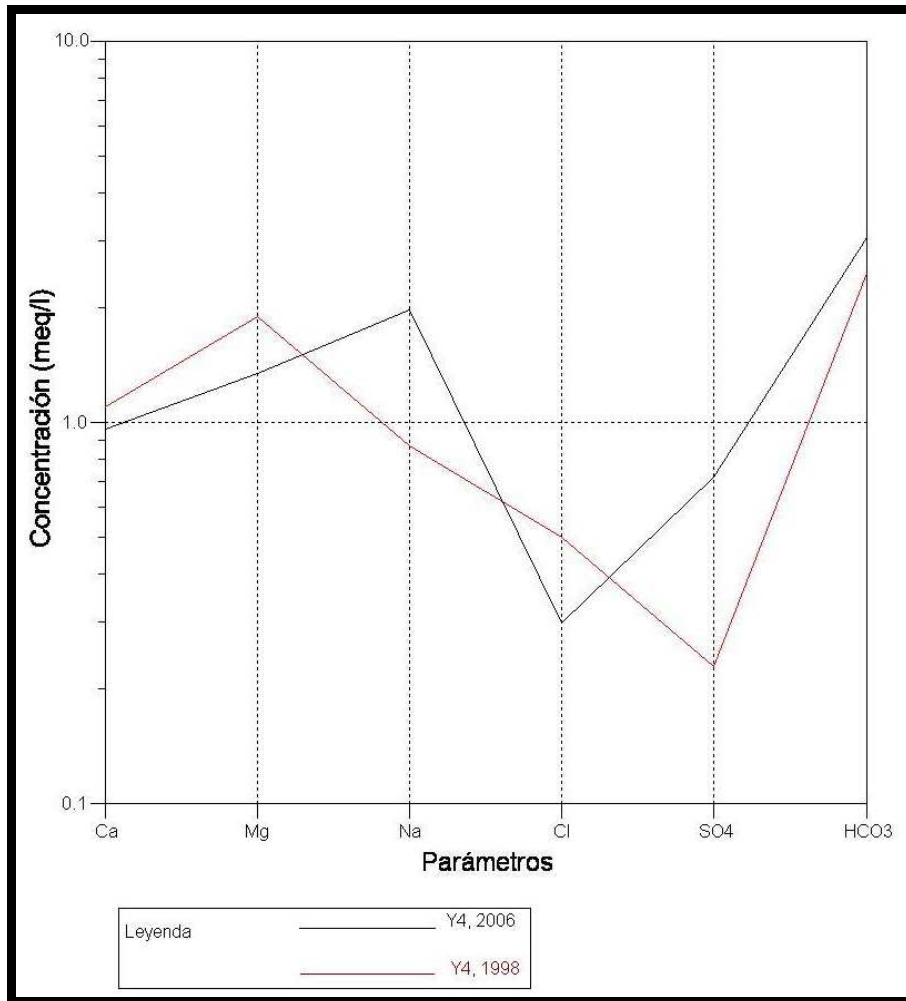


Figura 5.3. Representación de la variación en la composición química del agua de la estación Y4.

CAPÍTULO VI

6. MODELACIÓN

Los modelos son representaciones o simulaciones aproximadas de la realidad, son contruidos con datos que pueden ser reales y/o concebidos con los mejores criterios de sus realizadores.

Es necesario tener presente que la calidad y/o validez de un modelo hidrogeológico, como todo modelo de simulación, es función de la calidad y cantidad de información con la que se lo construye. Dentro de este contexto, el modelo hidrogeológico puede aplicarse fundamentalmente en el entendimiento y cuantificación de la ocurrencia y distribución del agua subterránea, además de poder utilizar el modelo como una herramienta de gestión del agua.

En el caso del acuífero Pifo – El Quinche la información disponible con la que se construyó el modelo tuvo limitaciones que le dieron al modelo el carácter de preliminar.

Visual MODFLOW es uno de los programas más ampliamente difundidos a nivel mundial para la modelación del flujo de aguas subterráneas y fue el programa que se utilizó para modelar el acuífero.

Con éstos antecedentes se enfrentó la modelación siguiendo un procedimiento de cuatro etapas detalladas a continuación:

- Síntesis de los resultados de los capítulos anteriores y representación gráfica del sistema.
- Resumen de las teorías científicas que sustentan el modelo.
- Síntesis de los procedimientos a seguir para la elaboración de un modelo numérico-digital.
- Síntesis del proceso de modelación del Acuífero Pifo – El Quinche y de los resultados.

6.1. MODELO CONCEPTUAL

El modelo conceptual es una representación de la mejor descripción del sistema hidrogeológico conocido antes de su modelación matemática, basado en datos disponibles y criterios hidrogeológicos (Carrera et al. 1993)

Un modelo solo puede aspirar a ser una buena representación del sistema real si está basado en un modelo conceptual sólido. Distintas conceptualizaciones pueden representar el medio real, pero darán predicciones diferentes.

El área a modelar está entre las cotas 2200 m. hasta 2600 m., presenta una morfología casi plana; está limitada al Norte por la quebrada El Quinche, al Sur por la quebrada Paluguillo, al Este por las estribaciones de la Cordillera Real y al Oeste por el río Chiche. En profundidad el límite es la base de la Fm. Chiche.

Dos formaciones conforman el sistema acuífero, estas son la Fm. Chiche y la Fm. Cangahua. Las unidades litológicas que conforman éstas formaciones se disponen espacialmente de forma horizontal con acuñamiento hacia la Cordillera Real.

De acuerdo a las características hidrogeológicas del sistema, el acuífero es multicapa y anisótropo; sin embargo ha sido simplificado en un solo paquete cuya conductividad ponderada es 1.23 m/día; la zona de aireación está conformada por estratos de las formaciones Chiche y Cangahua, su conductividad ponderada es 0.8 m/día.

Las cotas máxima y mínima de los niveles piezométricos dentro de la zona de estudio son 2515.5 m al Sureste. y 2271.0 m al Oeste. respectivamente, lo que ubica a la zona saturada en la Fm. Chiche.

El gradiente hidráulico, las líneas de flujo y la variación de la composición química de las aguas indican que el flujo se mueve con dirección hacia el Noroeste.

Dentro de la cuenca de estudio existen diez pozos que explotan el acuífero y otros diez que están fuera de operación, ninguno de ellos ha sido reportado como

artesiano por lo que no hay evidencias de presión. Esto indica que la tabla de agua de la zona saturada, tiene una presión igual a la atmosférica, lo que califica al acuífero de libre. El nivel estático puede ser observado mediante el monitoreo en los pozos que están fuera de operación.

El acuífero se recarga mediante la percolación del agua lluvia y agua de riego; el agua lluvia ingresa como recarga lateral por el lado Este, desde la Cordillera Real, y el agua de riego proviene de un área de 55 km², que es regada con el agua de un canal localizado en las estribaciones de la Cordillera Real, en la cota 2600 m. Así, los caudales que ingresan al acuífero son 98757.17 m³/día por la recarga lateral y 236595.51 m³/día por el área de riego, dando como resultado una recarga total de 335352.68 m³/día.

La descarga del acuífero se produce natural y artificialmente a través de cinco grupos de vertientes y diez pozos de explotación; la suma de los caudales salientes del acuífero da como resultado una descarga de 20736 m³/día.

En la figura 6.1. se presenta el modelo conceptual del sistema acuífero; la imagen superficial fue elaborada en ArcGis y el subsuelo en AUTOCAD.

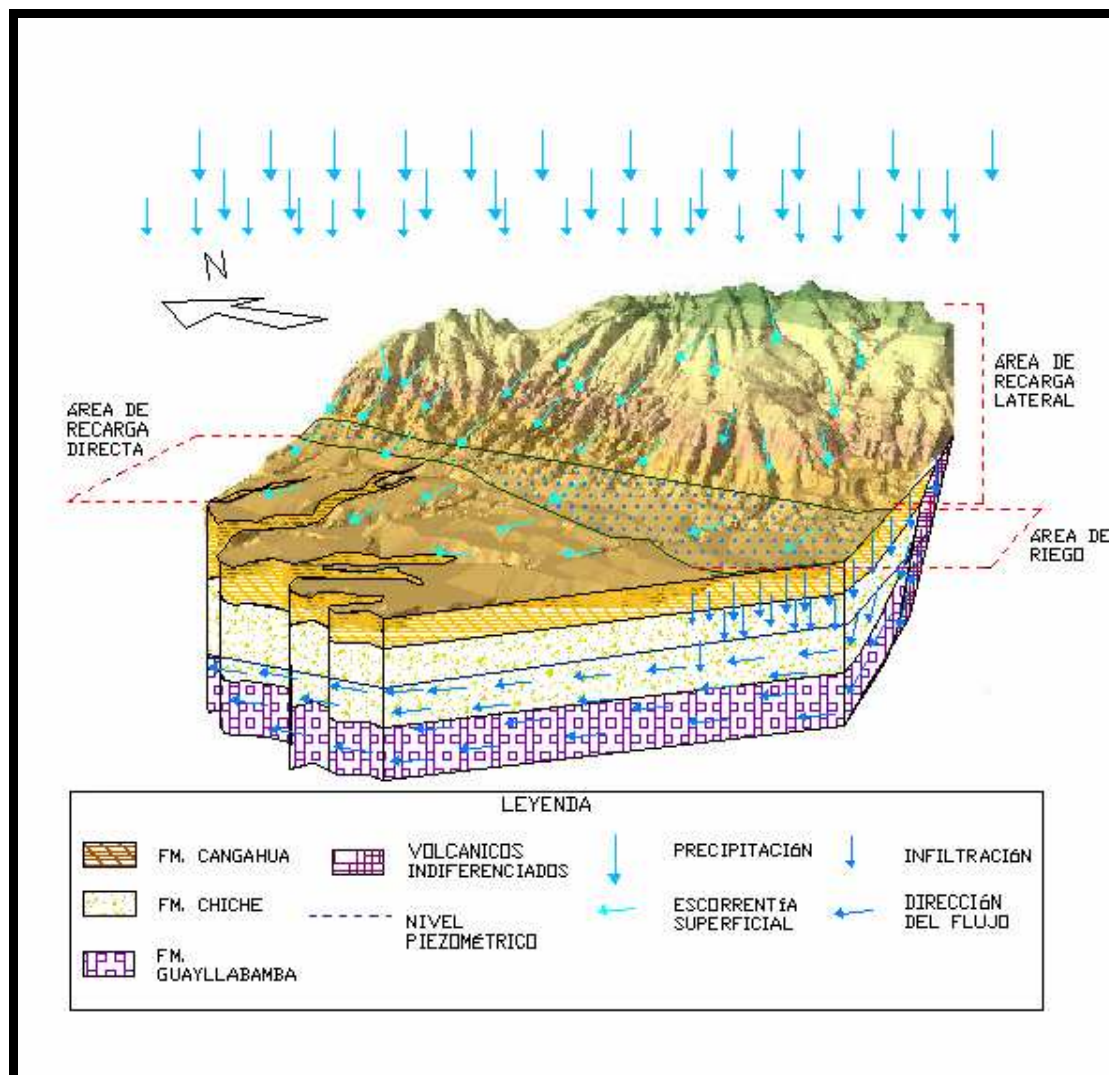


Figura 6.1. Modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero Pifo – El Quinche

6.2. MODELO MATEMÁTICO

Entre los tipos de modelos de aguas subterráneas se tienen modelos de tanques de arena, analógicos y matemáticos; dado el alto desarrollo de las computadoras, este último es el método más usado actualmente, por lo que se representó el sistema acuífero a través de él.

Los modelos matemáticos consisten de un conjunto de ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo de agua subterránea. Las predicciones que pueden hacerse a través de un modelo matemático dependen del grado de acercamiento que exista entre el modelo y la realidad. Para construir el modelo deben realizarse simplificaciones de la realidad, la que es muy compleja como para ser simulada exactamente

Generalmente, las simplificaciones necesarias para resolver analíticamente un modelo matemático son fuertemente restrictivas. Por ejemplo, casi todas las soluciones analíticas requieren que el medio sea homogéneo e isótropo. Para simular situaciones más realistas, en general, es necesario resolver el modelo matemático usando técnicas numéricas.

Tomando como base el Curso de Capacitación en Modelación de Aguas Subterráneas (Proyecto RLA/08/031, mayo 2004) se resumen a continuación las teorías científicas que sustentan la modelación de flujos:

6.2.1. ECUACIÓN DE FLUJO DE AGUA EN MEDIOS POROSOS

La siguiente es la ecuación del flujo de agua subterránea en derivadas parciales para un medio bidimensional (x,y) . Puede agregarse un tercer término (z) en el lado izquierdo de la ecuación para obtener la expresión tridimensional.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

T : transmisividad; S : coeficiente de almacenamiento

El miembro izquierdo de la ecuación representa la variación de los caudales entrantes y salientes del área de interés según x y según y , las dos direcciones ortogonales (en este caso del plano) sobre el cual ocurre el flujo. El lado derecho de la ecuación representa la variación de almacenamiento en un intervalo de tiempo dt . En definitiva, esta ecuación no es más que la aplicación del principio de conservación de la masa y de la ley de Darcy. Si no se produce variación de almacenamiento (condiciones estacionarias) el término derecho de la ecuación es nulo, quedando:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0$$

Esta ecuación es denominada Ecuación de Laplace. Para pasar de una ecuación de derivadas parciales a una ecuación algebraica, la ecuación en derivadas parciales debe ser integrada, lo cual es posible solo en algunos casos muy simples (unidimensionales con condiciones de borde sencillas). Por ello se recurre para su solución a métodos numéricos. (Vives L. y Varni M., 2004).

6.2.2. DIFERENCIAS FINITAS COMO METODO DE SOLUCIÓN NUMERICA DE ECUACIONES DIFERENCIALES EN DERIVADAS PARCIALES

Existen 4 métodos numéricos para resolver ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, éstos son:

- Diferencias finitas.
- Diferencias finitas integradas.
- Elementos finitos.
- Elementos de contorno.

Dado que el programa Visual MODFLOW utiliza el método numérico de Diferencias Finitas, será este método el que se estudie con detenimiento.

El método de diferencias finitas, divide al medio en una malla regular, generalmente rectangular. Las ecuaciones se plantean en función de los valores de la variable en los nudos, centrados en las celdas y la formulación de las ecuaciones se hace sustituyendo los operadores diferenciales por sus aproximaciones en diferencias finitas. De ésta manera se pasa de una ecuación diferencial a un sistema de ecuaciones lineales.

El MODFLOW usa métodos iterativos para obtener la solución del sistema de ecuaciones en cada paso del tiempo. Se parte de un valor arbitrario o estimado para el nivel de cada nudo al fin de cada paso. Estos valores se varían obteniéndose un mejor ajuste del sistema de ecuaciones y así sucesivamente. Lo que se debe especificar es el “criterio de convergencia” que especifica la máxima variación de nivel que puede producirse en una iteración. Obsérvese que no se especifica un nivel de error máximo sino un cambio en los niveles simulados. Como idea grosera, puede pensarse que puede usarse un valor del criterio de

convergencia con un orden de magnitud menor que el error deseado.

También hay un número máximo de iteraciones permitidas por paso de tiempo. O sea, las iteraciones se detienen por alcanzar el criterio de convergencia o realizar el máximo número de iteraciones permitido.

Finalmente debe reconocerse que aunque se obtenga una solución formal de la ecuación diferencial, será sólo una aproximación a las condiciones reales en el campo.

6.3. MODELO NUMÉRICO- DIGITAL

Siendo el método de diferencias finitas la aproximación numérica que resuelve el modelo matemático, este es conocido como el modelo numérico.

El conjunto de comandos utilizados por un ordenador para la solución del modelo numérico constituye el programa o código numérico.

Los paquetes de software para modelación por ordenador pueden suministrar un dibujo cuasi tridimensional de las condiciones de flujo y se pueden utilizar para simular un sistema con detalles sutiles.

6.3.1. DESCRIPCIÓN BÁSICA DEL CÓDIGO NUMÉRICO VISUAL MODFLOW

Este programa es una herramienta computacional muy útil y fácil de operar, por sus características visuales y de manejo de datos.

Se utiliza el código numérico MODFLOW para simular el flujo de agua subterránea en la cuenca con el objeto de evaluar el modelo hidrogeológico conceptual; es decir, se ponen a prueba varios componentes del modelo conceptual así como los límites físicos, parámetros hidráulicos, relación agua superficial – agua subterránea, recarga y dirección del flujo. Los resultados que se esperan observar son:

- Evolución de los niveles de agua subterránea
- Velocidades de flujo en el entorno definido como zona de interés

Las fortalezas de este programa son:

- Corresponde a uno de los programas más utilizados internacionalmente en estudios sobre flujos de aguas subterráneas y es ampliamente aceptado por los sectores industriales y gubernamentales en distintos países.
- El esquema de resolución numérico empleado corresponde a un esquema de diferencias finitas, el cual entrega soluciones aceptables a los problemas modelados, a través de una metodología numéricamente sencilla.
- La representación gráfica de la modelación, facilita la entrada de datos para definir el escenario de simulación, así como la visualización de resultados entregados.
- Al ser un modelo casi tridimensional, está capacitado para representar de una manera más realista los problemas modelados.

Las dos grandes debilidades que el Visual MODFLOW presenta son:

- La imposibilidad de llenar celdas secas, las que se vacían durante el proceso de cálculo, esto es producto de su formulación numérica. Por lo que se pueden cometer errores de cálculo al momento de cuantificar caudales de extracción o direcciones de flujo.
- La resolución numérica al utilizar el método de diferencias finitas trabaja mejor con acuíferos rectangulares o prismáticos y de composición uniforme, por lo que la modelación de acuíferos irregulares o curvos, con propiedades de anisotropía y heterogeneidad es difícil de resolver mediante esta metodología.

6.3.2. METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Previo a la simulación hidrogeológica, existe una etapa (Etapa A) en la que se identifica el problema a resolver, se estudia los componentes del sistema y se sintetiza los resultados en un modelo conceptual. Ésta etapa fue desarrollada en los capítulos anteriores.

Las siguientes dos etapas (B y C) incluyen 8 pasos:

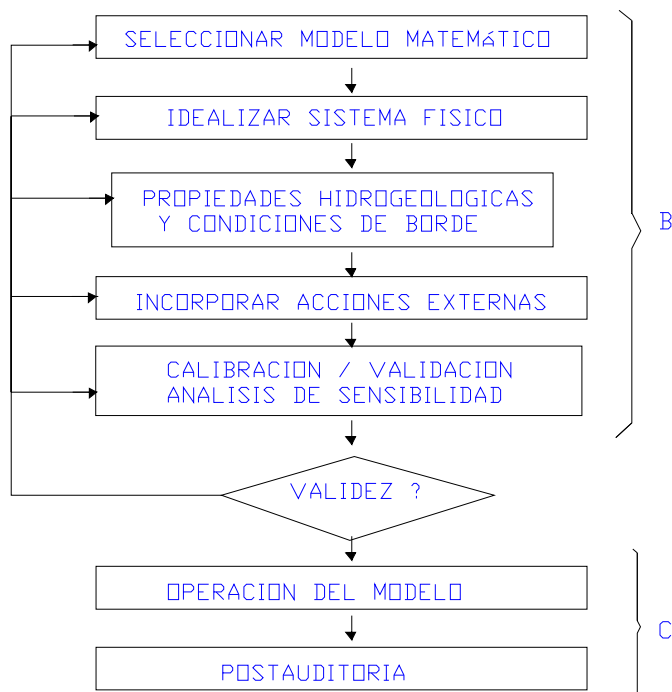


Figura 6.2. Metodología para la elaboración de un modelo de simulación hidrogeológica (Modificado del Curso regional de capacitación en modelación de aguas subterráneas, 2004).

Etapa B: es la elaboración del Modelo Hidrogeológico y se describe a continuación:

Selección Del Modelo Matemático

Consiste en determinar las dimensiones de la modelación (1D, 2D o 3D), el régimen del sistema (estacionario o transitorio), el tipo de modelo (flujo o transporte), fase del fluido (compuestos disueltos, fase líquida, gaseosa), objetivo de la modelación, necesidades o requerimientos, tipos de modelos disponibles, métodos de solución.

Idealización Del Sistema Físico

Consiste en discretizar el dominio espacial, es decir, se crea una malla que ocupe el área a modelar, ésta malla dará mayor estabilidad al modelo si los espaciamientos son uniformes.

La malla puede orientarse en dirección del flujo principal.

En este paso también se importan las elevaciones del fondo (basamento) y la topografía que pueden provenir desde archivos en ASCII o SURFER.

Mayor número de estratos permite reproducir mejor el modelo conceptual, pero también aumentan los requerimientos computacionales.

Aquí también se selecciona el tiempo máximo y el intervalo de tiempo de simulación.

Propiedades Hidrogeológicas y Condiciones de Borde

Las propiedades físicas a describir son:

- Conductividad hidráulica (K)
- Coeficiente de almacenamiento (S) en cada acuífero
- Conductancia hidráulica vertical entre distintos acuíferos
- Porosidad total (N)
- Porosidad efectiva (Ne)
- Dispersión
- Adsorción

Las condiciones de borde son:

- Ríos y lagos
- Drenes del sistema de drenaje
- Divisorias de agua subterránea
- Datos que varían en el tiempo

Todo modelo requiere de al menos una condición de borde de nivel piezométrico.

Incorporación De Acciones Externas

Las dos acciones externas que se deben considerar en un modelo de simulación hidrogeológica son la recarga y la extracción.

La recarga se obtiene mediante el balance hídrico.

La extracción debe obtenerse mediante inspección del área y encuestas cuidadosas. Debe apuntarse la distribución temporal con precisión.

Calibración, Validación y Análisis de Sensibilidad

La calibración es básicamente un proceso en el cual un determinado número de parámetros del modelo hidrogeológico (por ejemplo K) son ajustados (o modificados) para que los resultados del modelo reproduzcan variables de estado medidas en terreno.

A través de la calibración se pueden comparar las propiedades del flujo (dirección por ejemplo), contornos del nivel piezométrico, depresiones o elevaciones, descarga y recarga de agua superficial.

Se debe tomar en cuenta que la calibración no es única, ya que, más de una combinación de parámetros provee un razonable ajuste de los datos observados y para ello se debe validar el modelo finalmente calibrado.

En el proceso de validación se opera el modelo con los parámetros determinados en la etapa de calibración y se verifica la reproducción de datos históricos.

Una vez calibrado el modelo debe ser utilizado para “simular” un segundo conjunto de datos conocidos. El modelo debe ser capaz de reproducir estos valores, de otro modo su validez es cuestionable. Por ejemplo se puede calibrar en la estación seca (verano) y validar en la estación húmeda (invierno)

Luego de completar el modelo hidrogeológico se debe realizar un *análisis de sensibilidad* del modelo, para lo cual se debe analizar los siguientes aspectos:

- Si son válidos los supuestos del modelo
- Si son razonables los datos básicos utilizados
- Cuales son los efectos de pequeñas variaciones en los datos de entrada
- ¿Se puede defender el modelo?

Etapas C: es la etapa posterior a la elaboración del modelo hidrogeológico y se detalla a continuación:

Operación Del Modelo

En ésta etapa se puede evaluar diferentes situaciones de interés como:

- Escenarios hidrogeológicos secos, medios y húmedos
- Aumento de uso de recursos hídricos
- Cambios en tecnologías de riego
- Urbanización

También se puede incorporar el efecto de la incertidumbre de los datos sobre los resultados del Modelo Hidrogeológico a través de diferentes estrategias como:

- Predicción con base en la mejor estimación de parámetros
- Predicción con base en el peor escenario
- Análisis de probabilidades

Postauditoría

Este proceso implica un continuo chequeo o comparación de resultados del modelo y mediciones de determinadas variables de estado.

Lo anterior permitirá “recalibrar” el modelo a medida que nueva información indique que existen cambios en los parámetros que inicialmente se utilizaron o estimaron para este modelo.

Esta etapa ofrece la oportunidad de estudiar la naturaleza y magnitud de los errores pronosticados por un modelo.

6.4. MODELO NUMÉRICO PRELIMINAR DEL ACUÍFERO PIFO – EL QUINCHE

Debido a la calidad de la información con la que se trabajó en este proyecto, las etapas que se alcanzaron fueron la A y la B; la etapa que se describe a continuación es la de la elaboración del Modelo hidrogeológico (Etapa B).

El Visual MODFLOW trabaja con 3 interfaces INPUT (diseño del modelo), RUN (resolución del modelo matemático) y OUTPUT (visualización de los resultados).

Datos de entrada – Diseño del modelo (INPUT)

Discretización del medio

- Con base en el modelo conceptual se inició el proceso de modelación, para ello se creó un nuevo modelo en el programa Visual MODFLOW 3.1.0. y la primera ventana en desplegarse (Figura 6.3.) requirió las coordenadas del dominio a modelar, el número de filas y de columnas y la especificación de las unidades en las que se trabajaría.

El área a modelar fue 119.8 km² que corresponde al área de acumulación.

El dominio del modelo se ubica entre las coordenadas:

(Xmin, Ymin) = (789883.53, 9974168.06)

(Xmax, Ymax) = (802570.8, 9994000.00)

Se creó una malla con celdas uniformes de 100 m x 100 m, por lo que resultaron 127 columnas y 199 filas.

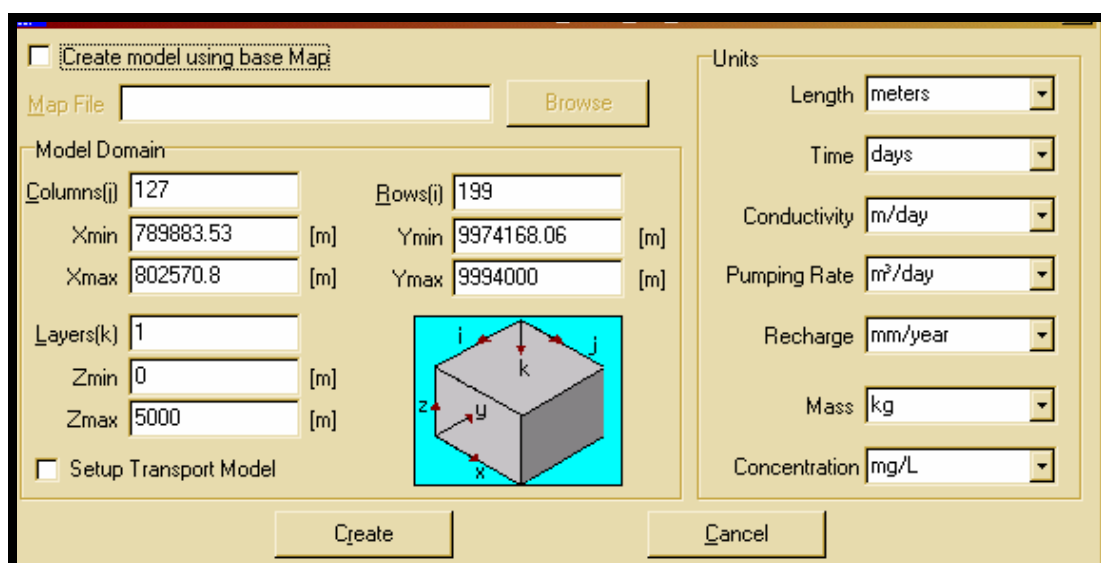


Figura 6.3. Ventana del programa en donde se observan las coordenadas del dominio del modelo, el número de filas y columnas y las unidades en las que se trabajó

- El Visual Modflow permite la importación de archivos con extensión *DXF, los que pueden contener información de los componentes del sistema para su visualización, en este caso se importó la forma del área de acumulación, área de riego, la distribución de los puntos de agua, isopiezas y drenaje, entre los más importantes.
- En la figura 6.4. se presenta un área que contiene celdas activadas (color blanco) que están dentro del dominio de modelación, ésta es la cuenca hidrogeológica definida a partir del mapa de isopiezas elaborado en el capítulo IV; como se observa la cuenca hidrogeológica es diferente a la cuenca morfológica y es la cuenca hidrogeológica la que se modeló.



Figura 6.4. Área a modelar discretizada

Para la modelación numérica se elaboraron los mapas estructurales de la base de la Fm. Chiche y de la base de la Fm. Cangahua (Ver anexo 15). Estas superficies fueron diseñadas a partir de la topografía y la resta de sus potencias determinadas en columnas y pozos.

- Discretizado el medio, se procedió a importar la topografía y las superficies estructurales del modelo que se encontraban en formato SURFER (Ver figuras 6.5 y 6.6).

Es recomendable empezar ingresando la base del acuífero y luego la superficie superior. En este punto debe notarse que desde el inicio existió una imprecisión en la información que se ingresó al modelo, esto se debió al origen de las superficies estructurales.

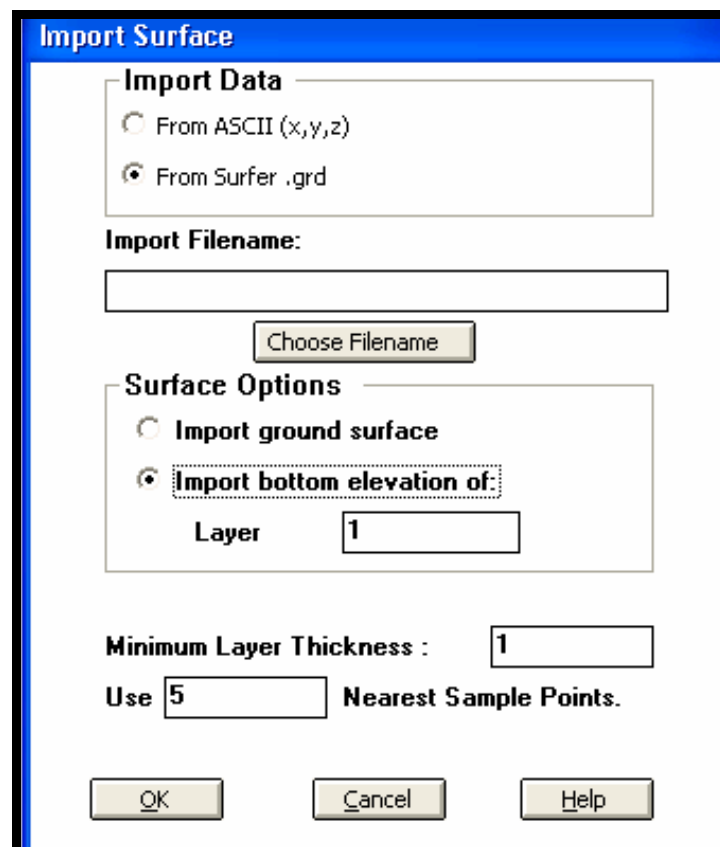


Figura 6.5. Ventana del programa en donde se observan los requerimientos del programa para ingresar las superficies estructurales.

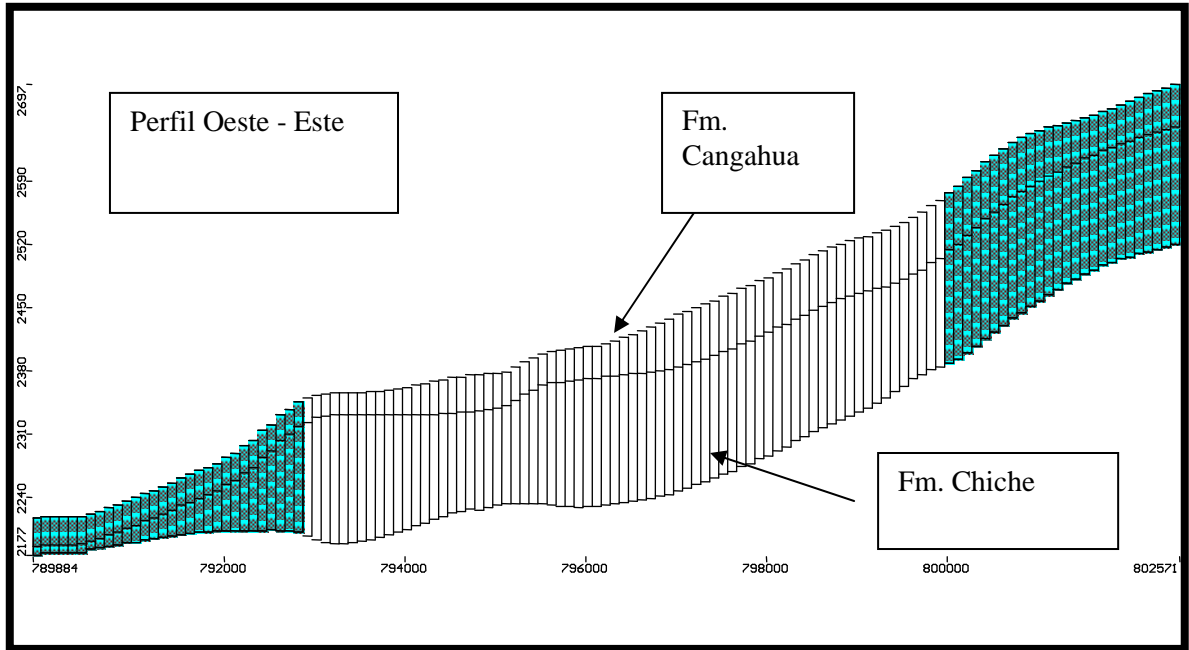


Figura 6.6. Superficies estructurales de la base y del techo de las formaciones Chiche y Cangahua

Propiedades hidrogeológicas y condiciones de borde

- El siguiente paso fue asignar la conductividad hidráulica a las capas modeladas, estos valores se calcularon en el capítulo IV. Para la modelación se utilizaron los valores de la Fm. Chiche (1.45 m/día), de la Fm. Cangahua (0.42 m/día), de la zona saturada de la Fm. Chiche (1.23 m/día) y de la zona de aireación (0.9). Ver figura 6.7
- Los resultados que se presenta más adelante, corresponden a las conductividades con las que se obtuvo la mejor calibración; estas son 1.45 m/día (para la capa inferior) y 0.9 (para la capa superior).

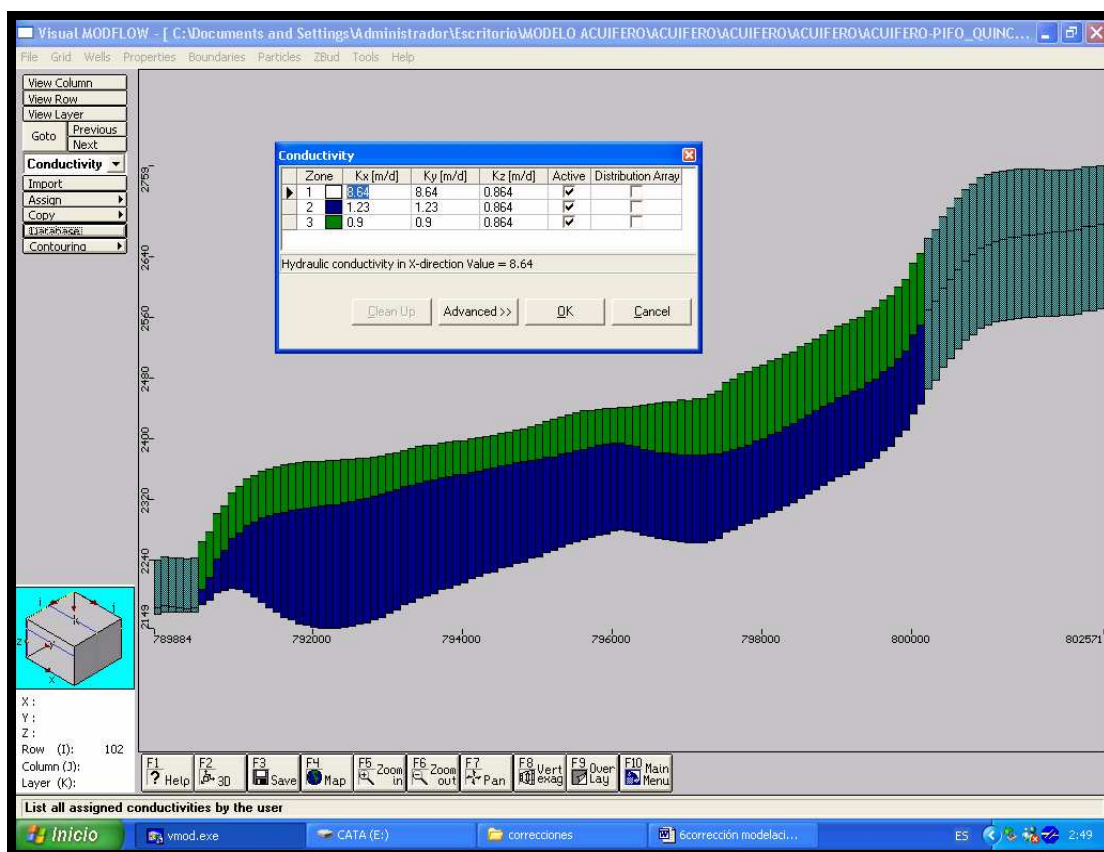


Figura 6.7. Conductividades hidráulicas utilizadas para la modelación.

Incorporación de acciones externas

- Ingreso de los niveles piezométricos: fue conveniente, correr el modelo de la forma más simple posible; modelando el acuífero con los niveles piezométricos (constan head) en la entrada del acuífero desde la zona de recarga lateral y con los niveles piezométricos de salida del sistema (vertientes). El fin de este proceso es calibrar los parámetros hidrogeológicos pertenecientes a dicho acuífero, en este caso las conductividades y luego a partir de este escenario incluir los restantes elementos del sistema real, agua de riego y pozos de bombeo.
- A continuación se incorporó el agua de riego mediante la opción “Recarga”, debido a que no se contó con la información hidrogeológica de una parte de la zona de acumulación, la zona de riego fue delimitada a la cuenca hidrogeológica modelada, así la zona riego quedó de 55.6 km² en 48.9 km², con una recarga de 1553.19 mm/año, valor calculado en el capítulo III, además se dispuso como tiempo de simulación, 365 días. En las figuras 6.8 y 6.9. se

expone pintada de color azul, la zona de riego por donde se percola el volumen de agua calculado para ésta zona.

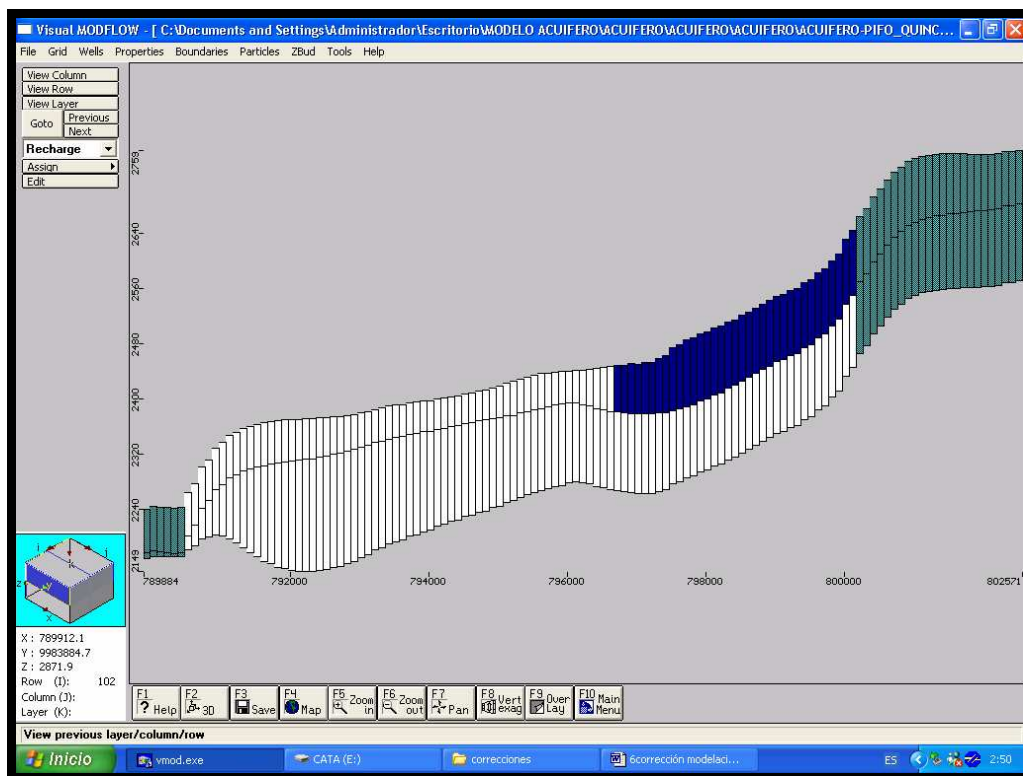


Figura 6.8. Perfil que muestra la zona de riego pintada en color azul

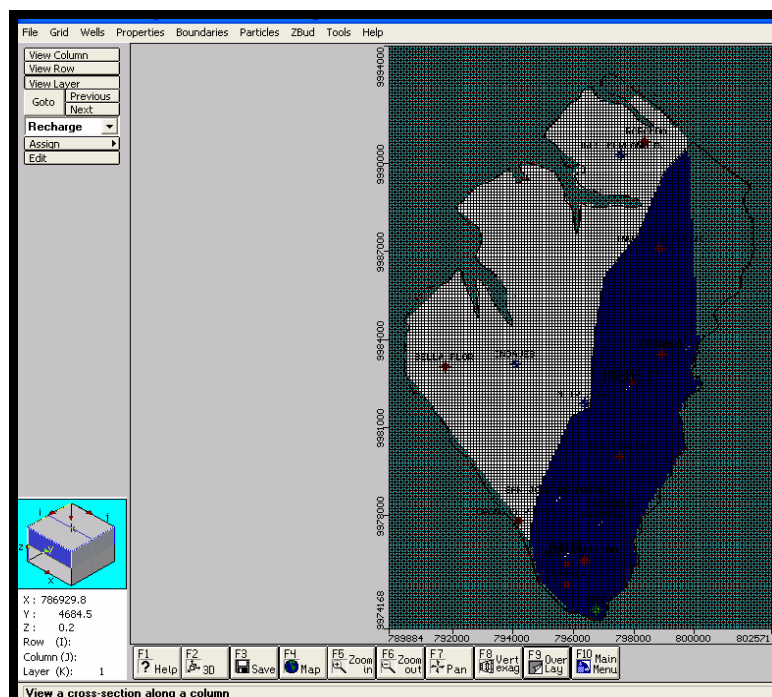


Figura 6.9. Vista en planta de la cuenca hidrogeológica modelada con la zona de riego en azul.

- El paso siguiente fue introducir los pozos de bombeo con sus respectivos diseños (Figura 6.10.); es recomendable trabajar uno a la vez, así se podrá tener un control más riguroso de cómo afecta cada uno al sistema. Los pozos ya introducidos también pueden activarse o desactivarse.

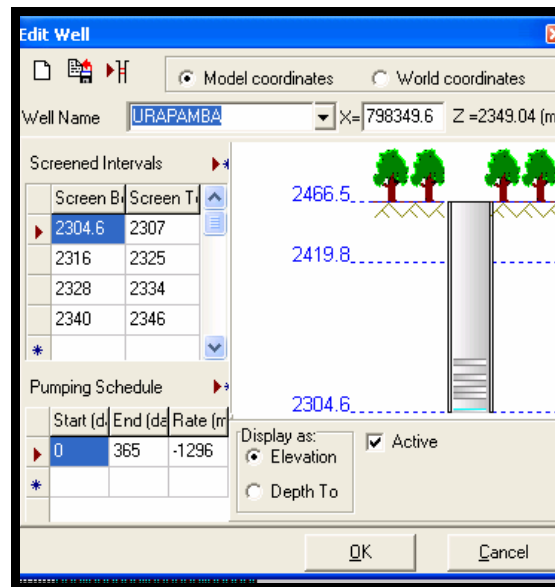


Figura 6.10. Formato del programa para el ingreso de los pozos; en el caso de los pozos de bombeo requiere el diseño del pozo y el caudal de bombeo es negativo porque el agua es extraída del sistema.

- Luego se introducen los pozos de observación, en este caso se consideraron los pozos que no se encuentran en explotación como pozos de observación (Figura 6.11).

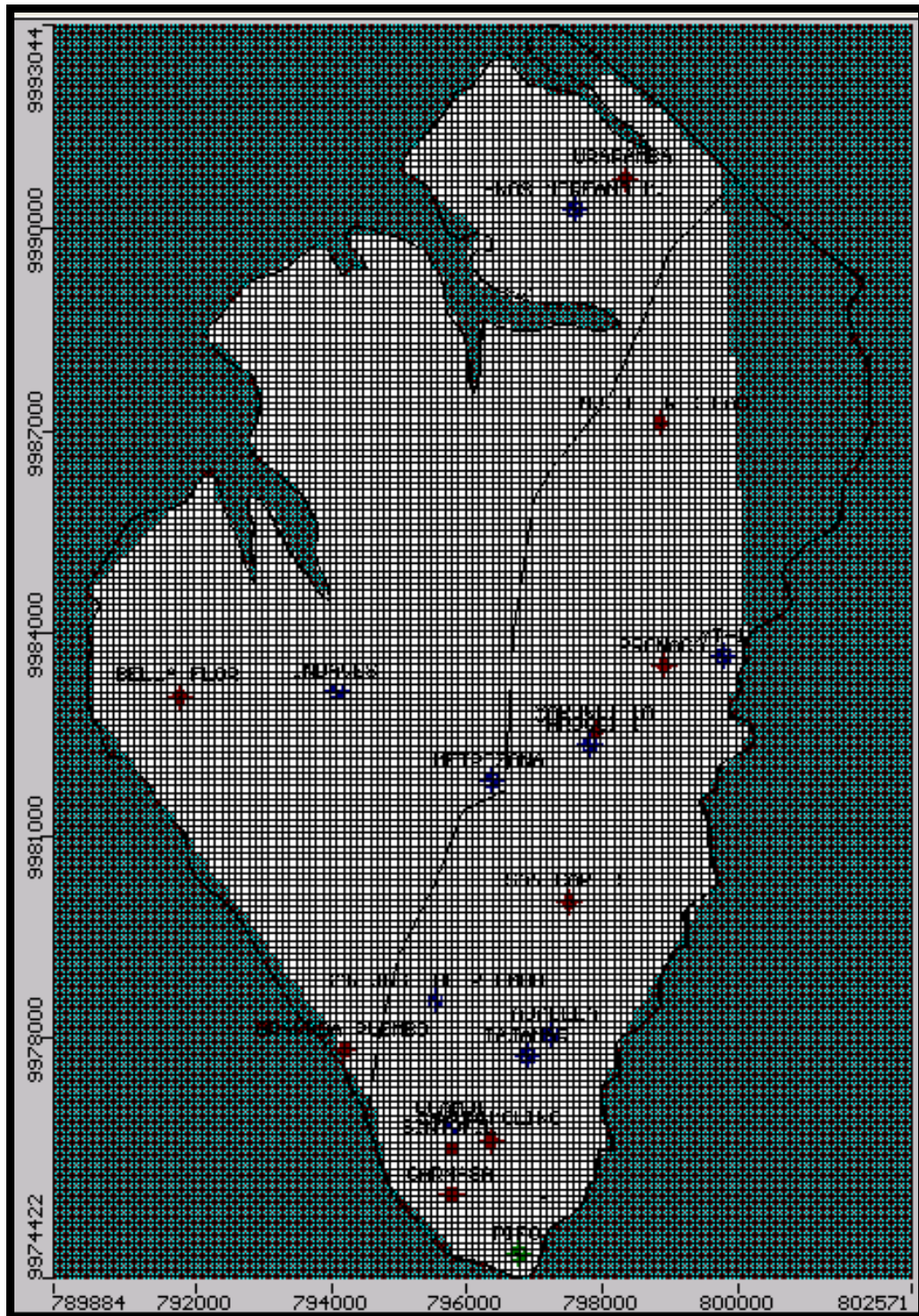


Figura 6.11. Vista en planta de la ubicación de los pozos en el modelo, con color rojo se resaltan los pozos de bombeo, con color azul los pozos de observación y un pozo se encuentra en verde porque está desactivado.

Resolución del modelo matemático – Corrida (RUN)

- Ingresados todos los componentes del sistema, se corrió el modelo y se verificó el balance de masas. El modelo resuelve la ecuación de flujo de Darcy para cada celda dando como resultado dos caudales, uno de entrada y otro de salida, luego los compara. Al estar el sistema en un régimen estacionario, no hay pérdidas de agua por almacenamiento, esto significa que, para que se cumpla el balance de masas el caudal de recarga debe ser igual o mayor al caudal de descarga. En la figura 6.12. se muestra en color verde (In), el caudal total de recarga (agua de riego más agua proveniente de la recarga lateral) que es $306419.6 \text{ m}^3/\text{día}$, y en color azul (Out) el caudal de descarga que es $306418.5 \text{ m}^3/\text{día}$, lo que cumple con el balance de masas.

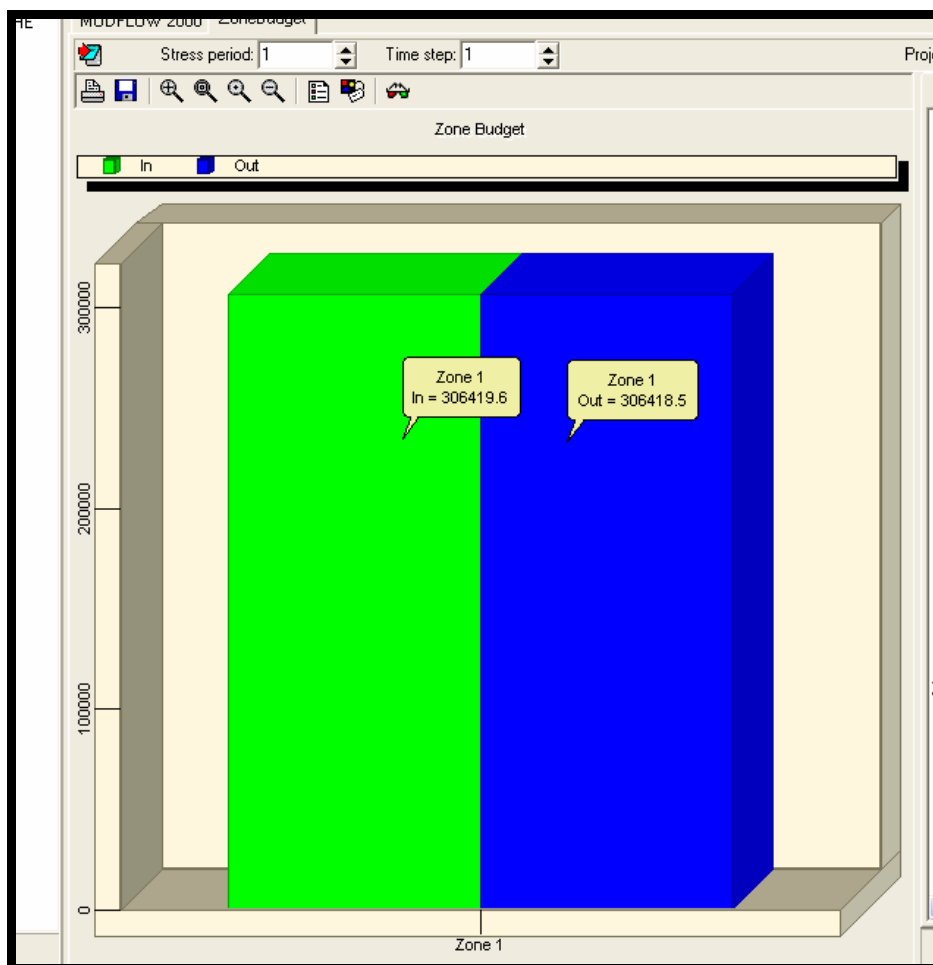


Figura 6.12. Balance de masas resultante del modelo, la barra de color verde representa el caudal de recarga, y la barra de color azul representa el caudal de descarga del sistema en $\text{m}^3/\text{día}$.

- El caudal de recarga que arroja el modelo comparado con el caudal calculado mediante el balance hídrico en el capítulo III ($335352.51 \text{ m}^3/\text{día}$) es cercano en el 91.3 %, esto se explica tomando en cuenta que parte del área de riego (por lo tanto una parte del volumen de agua) y de la entrada de la recarga lateral fueron omitidas por no contar con la información correspondiente a esas áreas.

Visualización de los resultados (OUTPUT)

- En ésta interfase se observa con más detalle los resultados de la modelación. En la figura 6.13 se muestran los componentes del balance de masas, las barras de color azul representan las recargas y las de color rojo las descargas. De los datos de entrada, se observa que por la recarga lateral (constant head – azul) ingresa un caudal $98573.16 \text{ m}^3/\text{día}$ de agua, mientras que por el área de riego (Recharge) entran $207846.4 \text{ m}^3/\text{día}$. El valor de descargas naturales (constant head – rojo) en comparación con las salidas de agua por explotación de pozos (wells) es mayor. Se observa también que el almacenamiento (storage) ha permanecido constante.

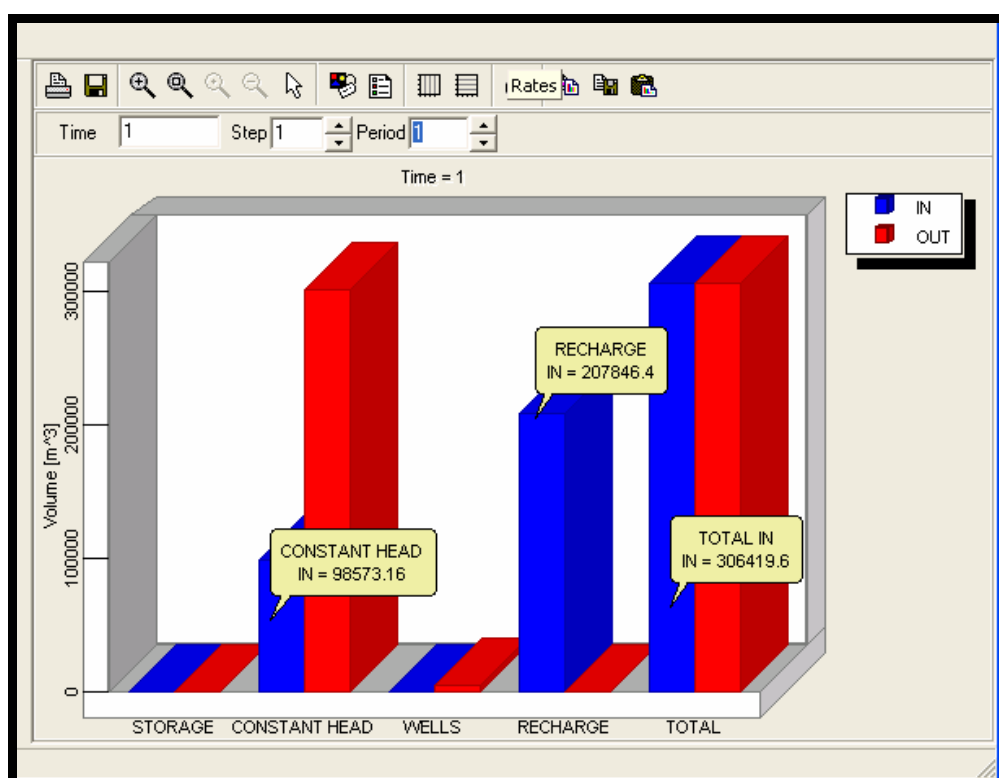


Figura 6.13. Imagen de los resultados del balance de masas luego de corrido el modelo.

- Se debe tomar en cuenta la cercanía de los valores resultantes del modelo con los valores calculados en el capítulo III; la recarga lateral es $98573.16 \text{ m}^3/\text{día}$ (modelado) y $98757.17 \text{ m}^3/\text{día}$ (calculado); la recarga por riego es $207846.4 \text{ m}^3/\text{día}$ (modelado) y $236595.51 \text{ m}^3/\text{día}$ (calculado). Por lo tanto estos resultados coinciden con el modelo conceptual propuesto
- Corrido el modelo, también se verificó que las isopiezas y la dirección de las líneas de flujo coincidan con las obtenidas en el mapa de isopiezas presentado en el capítulo IV (Ver figura 6.14 y 6.15).

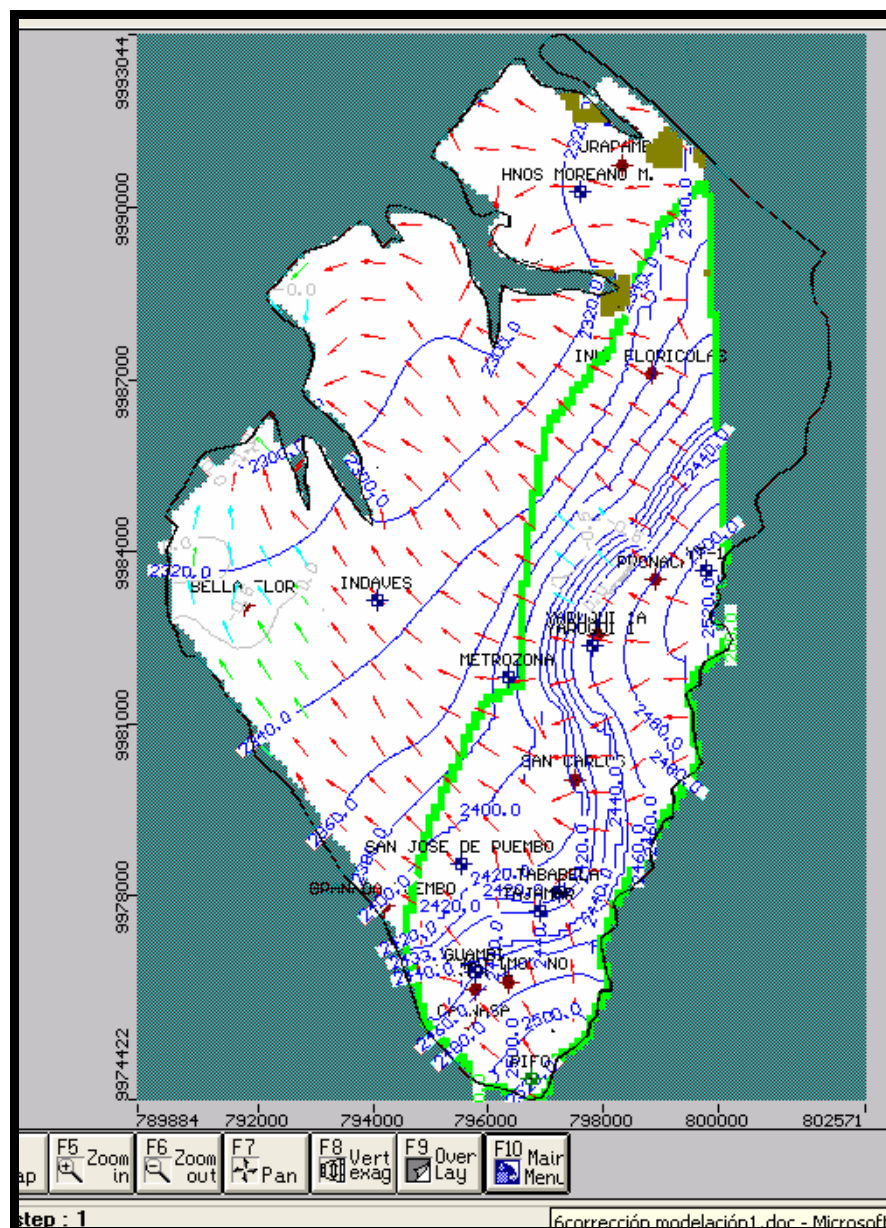


Figura 6.14. Curvas equipotenciales resultantes de la modelación, la zona delimitada con verde es el área de riego y las flechas indican la dirección del flujo.

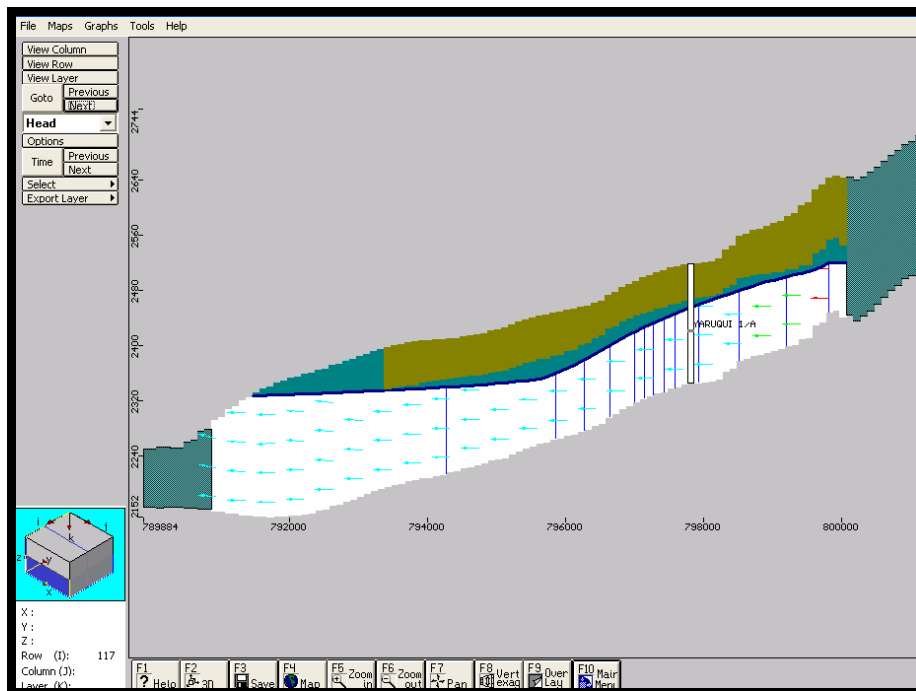


Figura 6.15. Perfil Oeste – Este del acuífero, las flechas indican la dirección del flujo, la línea azul representa la tabla de agua, las líneas azules verticales son las curvas equipotenciales y en color gris se observa el pozo Yaruquí1.

En la figura 6.16., se muestra el modelo en tres dimensiones, este incluye los pozos de bombeo y observación.

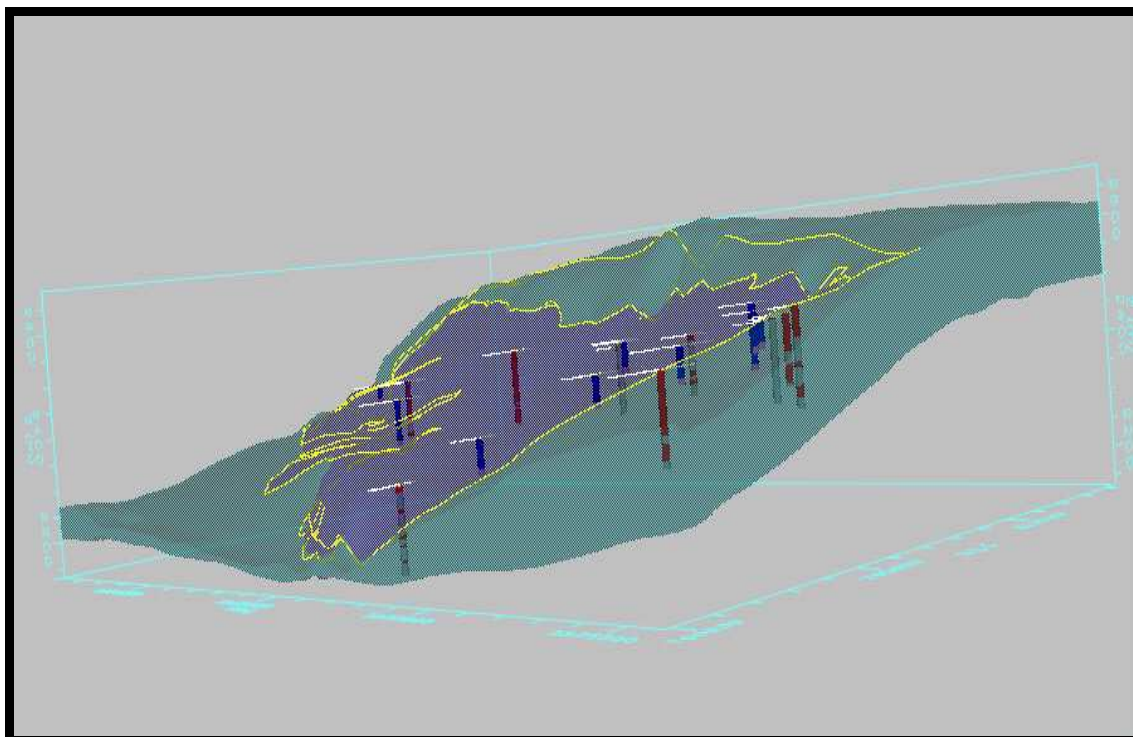


Figura 6.16. Vista del sistema desde el Suroeste; modelo resultante del MODFLOW. Los pozos en azul son los de bombeo y los rojos son los de observación.

Calibración

Para la calibración del modelo, se consideró a los pozos fuera de operación como pozos de observación. En la figura 6.17, la línea continua azul representa el nivel piezométrico calculado por el modelo y las líneas segmentadas rojas y azules representan los rangos de confiabilidad en los que se encuentran los niveles piezométricos de los pozos de observación con respecto al nivel calculado; los pozos que caen en el campo entre las líneas segmentadas rojas, indican que los niveles de esos pozos tiene un porcentaje de confiabilidad del 95% y los que están fuera de ese campo aumentan su porcentaje de error respecto al nivel calculado por el modelo.

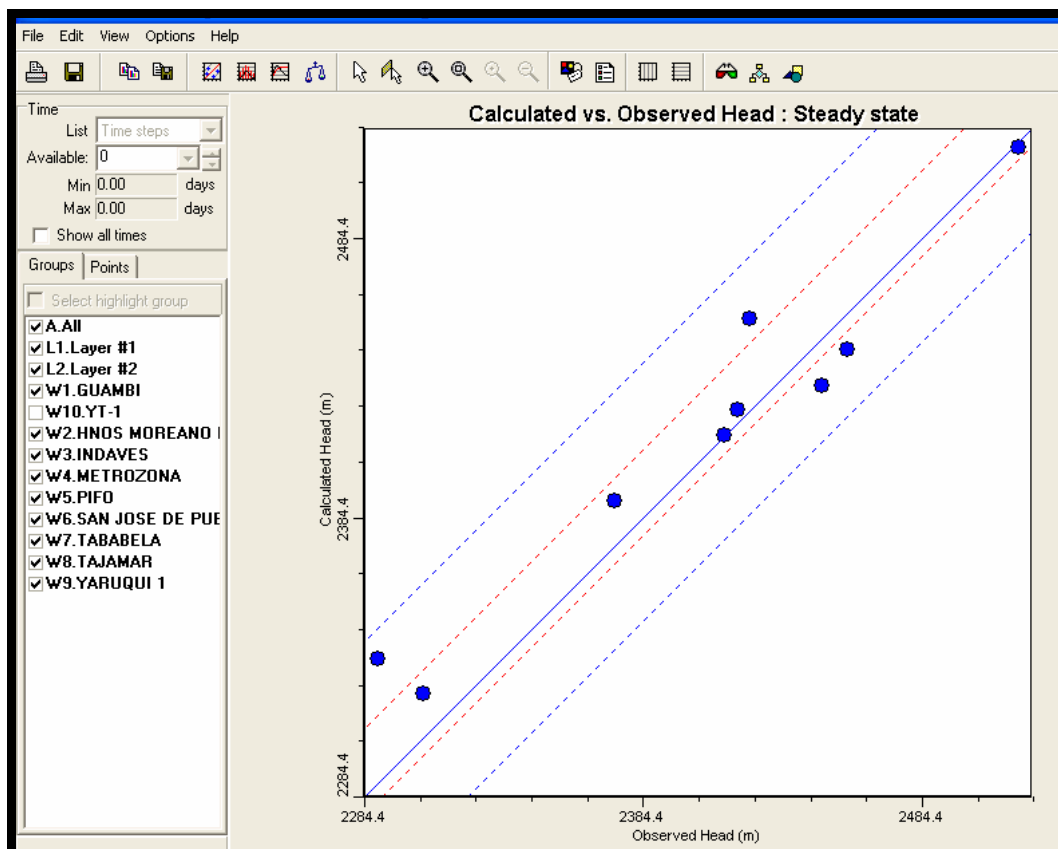


Figura 6.17. Calibración del modelo numérico

Ya que la conductividad hidráulica fue el único parámetro hidrogeológico modificable, se calibró el modelo variando su valor; esta variación permite o impide el paso de agua desde las diferentes recargas hasta llegar a la zona saturada, lo que influye directamente sobre las cotas de los niveles estáticos. Así el programa calcula la diferencia existente entre los niveles medidos en los pozos

de observación y los calculados por el modelo. Esta diferencia representa un error que es reportado por el programa, el que indica que tanto se ajustan los parámetros (K) con las condiciones iniciales del sistema ingresadas al programa

Inicialmente se modeló el sistema con las conductividades asumidas de las formaciones Fm. Chiche 81.45 m/día) y Cangahua (0.42 m/día).

Luego se modeló con las conductividades calculadas para las zonas saturada (1.23 m/día) y de aireación (0.9 m/día). El porcentaje de error con éstos valores fue del 9.69 % y el balance total de masas resultaba erróneo puesto que los caudales de descarga son mayores que los de recarga.

Combinando los valores de conductividad de las zonas hidrogeológicas con los de las formaciones indicadas, se logró la mejor calibración con los valores 1.45 m/día y 0.95 m/día ya que el balance de masas fue coherente (Ver figuras 6.12 y 6.13) y el error reportado es del 9.27 %. En la figura 6.18 se muestran los resultados estadísticos de la calibración del modelo.

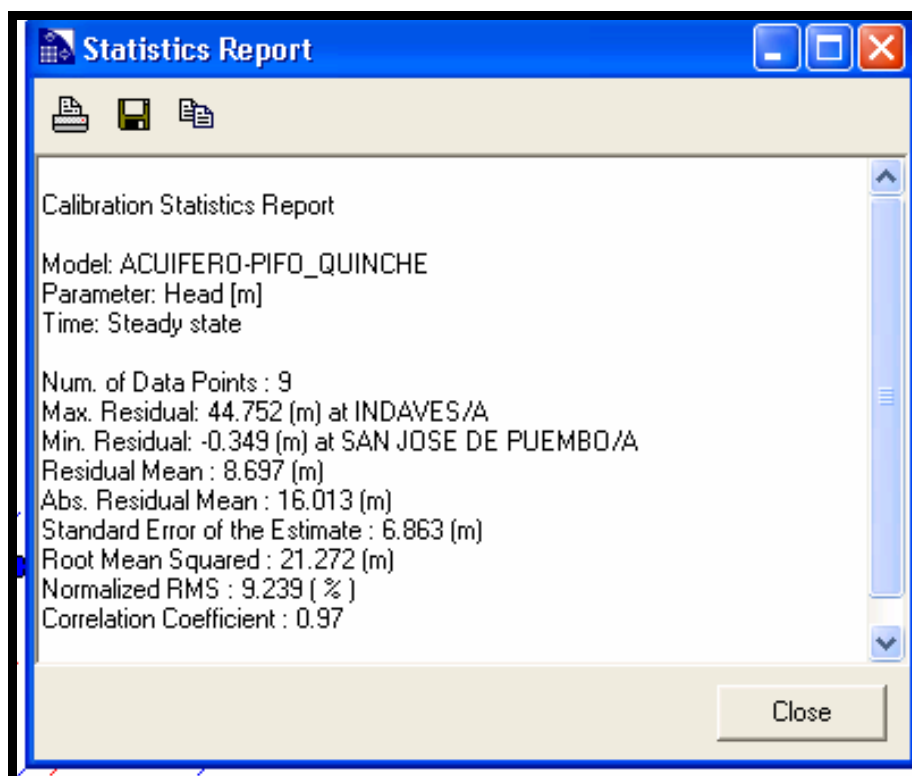


Figura 6.18. Resultados de la calibración del modelo.

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

- El sistema acuífero Pifo – El Quinche está conformado por las formaciones, Chiche y Cangahua. La Formación Chiche consiste de cuatro miembros, Fluvio – lacustre I, Lahar, Fluvio-lacustre II y Chiche s.s., cuya geometría es subhorizontal extendiéndose más allá de los límites propuestos en este estudio; y acuñándose hacia la Cordillera Real.
- Los miembros de la Formación Chiche forman un acuífero multicapa; sin embargo, por falta de información, no fue posible establecer los contactos entre ellos, por lo que fueron tratados como un solo paquete litológico, para el que se asignó una conductividad hidráulica ponderada de 1.45 m/día, que corresponde a una conductividad media
- Las características petrofísicas e hidrogeológicas (conductividad hidráulica de 0.41 m/día a 0.9 m/día) de la Formación Cangahua, permiten concluir que es un paquete litológico permeable que cumple la función de filtro de las aguas que percolan hasta la zona saturada.
- Los estratos de la Formación Guayllabamba, que son subyacentes a la zona estudiada, por sus características petrofísicas e hidrogeológicas (conductividad hidráulica ponderada de 2.72 m/día), están interconectados con los estratos de la Formación Chiche, por lo que se puede concluir que el acuífero estudiado tiene un límite más profundo al establecido en este trabajo.
- De acuerdo a las cotas máxima y mínima de los niveles estáticos del acuífero (2515.5 m.s.n.m. al Este y 2271.0 m.s.n.m. al Oeste.) y a la forma de las curvas en el mapa de isopiezas, se concluye que la dirección del flujo es hacia el Noroeste, además que la forma de la cuenca hidrogeológica es distinta a la cuenca morfológica delimitada en este trabajo.
- Sin haberse reportado pozos artesianos, y por las características hidrogeológicas del acuífero, se concluye que el acuífero es libre.
- El acuífero tiene dos tipos de recarga, una lateral proveniente de las rocas que conforman las estribaciones de la Cordillera Real, y la otra por infiltración de agua de riego, en la zona de “acumulación”, que es casi plana y se ubica bajo

los 2600 m. La recarga lateral calculada es de 98757.17 m³/día, la infiltración por riego alcanza los 236595.51 m³/día, lo que da un total de 335352.68 m³/día equivalentes a 3881.39 l/s.

- La descarga del acuífero se produce de forma natural mediante manantiales ubicados en el límite Noroeste de la zona de estudio; de forma artificial por medio de los pozos que están siendo explotados. En conjunto el caudal descargado por estos dos medios se calcula en 20736 m³/día o 240 l/s. El resto debe corresponder a descargas provenientes de la Formación Chiche, que no han sido contabilizadas por encontrarse fuera de los límites de estudio; también debe existir una descarga de origen más profundo, proveniente de la Formación Guayllabamba; cuya ubicación no ha sido determinada.
- La modelación numérica del acuífero, fue satisfactoria en comparación con el modelo conceptual, ya que se ratificaron los parámetros hidrogeológicos definidos en este trabajo, se comprobó la dinámica del flujo y los caudales de recarga y descarga que fueron calculados a través del balance hídrico.
- Tomando en cuenta que para la elaboración del modelo numérico, se han realizado varias simplificaciones de la realidad, el modelo resultante es preliminar, cuyo error corresponde al 9.23 %; esto significa, que cuando exista información más detallada, esta podrá ingresarse al modelo para perfeccionarlo, teniendo un control previo del sistema. Cabe indicar que en las condiciones actuales, el modelo numérico aún no puede utilizarse como herramienta de gestión.
- En cuanto a la calidad, el agua no cumple con la reglamentación para agua potable expuesta en la norma NTE INEN 1 800:2006; puesto que mientras no se compruebe el origen de los fosfatos y estos persistan en concentraciones que exceden la misma, el agua del acuífero no es apta para consumo humano.
- La composición química del agua cambia durante su recorrido desde la zona de recarga hasta la zona de descarga natural; la variación es principalmente catiónica, así en la zona de recarga lateral el agua es bicarbonatada cálcico magnésica y en la zona de descarga natural es bicarbonatada con tendencia a sódica, lo que indica que la salinidad aumenta hacia el Noroeste; además son aguas dulces y van de neutras a débilmente básicas.

7.2. RECOMENDACIONES

- Puesto que la geología es la base del estudio de los acuíferos ya que proporciona una visión de la configuración de los depósitos en profundidad y tomando en cuenta que la información proveniente de los informes técnicos de perforación de pozos ha sido deficiente, sobre todo en lo que se refiere a las descripciones litológicas; se recomienda que en futuras perforaciones, las descripciones sean realizadas por geólogos, que se utilice la nomenclatura técnica y que el enfoque esté encaminado a determinar las características hidrogeológicas del acuífero, por lo tanto las descripciones deberían incluir el tipo de depósito, tipo de materiales involucrados, porcentaje de componentes, meteorización de los materiales, entre otros.
- Para definir con mayor certeza la existencia o no de estructuras que puedan tener influencia directa sobre el sistema acuífero, se recomienda utilizar métodos geofísicos encaminados al estudio de la geología estructural de la zona.
- Para obtener un balance hídrico más cercano a la realidad, se recomienda implantar estaciones de aforo cuyas mediciones sean continuas y constantes, esto con el objetivo de cuantificar la escorrentía superficial de la zona.
- Para el estudio de los parámetros hidrogeológicos se recomienda realizar el seguimiento de los niveles piezométricos mediante el monitoreo continuo en los pozos; además aprovechar la realización de pruebas de bombeo para determinar la conductividad hidráulica más cercana a la secuencia litológica estudiado, tomando en cuenta el tiempo que se demora el acuífero en estabilizarse después de iniciada la prueba a más de considerar el estudio de cada horizonte acuífero para determinar sus propiedades y el horizonte más productivo.
- Se recomienda controlar el uso de fertilizantes y tomar medidas de mitigación para potabilizar el agua del acuífero.
- En las campañas de monitoreo químico del agua, se recomienda establecer un orden y un cronograma de actividades, señalando los puntos y su nombre, los que se utilizarán en todas las campañas.

- Se recomienda incluir en los análisis químicos del agua, los elementos fundamentales para contar con los elementos necesarios para estudiar la evolución geoquímica del acuífero.
- Realiza el seguimiento de las concentraciones de fosfatos en el acuífero, incluyendo en los análisis, los compuestos que tienen relación con los pesticidas para determinar el origen de la sustancia en exceso.
- Para conocer mejor al acuífero y manejar su explotación de manera controlada, es conveniente hacer el seguimiento del comportamiento del acuífero y seguir alimentando el inventario de puntos de agua y la base de datos física, química y bacteriológica elaborados en este trabajo.
- Para perfeccionar el modelo numérico y realizar simulaciones más cercanas a la realidad, se debería tratar de obtener datos de la Formación Guayllabamba para estudiarla e incluirla en el modelo numérico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASUBSA, Informes técnicos de perforación de los pozos: Guambi, Coop. Tajamar, Inversiones florícolas y Hnos. Moreano Moncayo.
- American Water Works Association 2002, “Calidad y tratamiento del agua”, Manual de suministros de agua comunitaria, McGraw-Hill / Interamericana de España, 5ta edición, 1231p.
- Clapperton Ch. y Vera R. 1986, “The Quaternary Glacial Sequence In Ecuador: A Reinterpretation Of The Work Of Walter Sauer”.
- Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) 2005, Archivo de documentos para la concesión de aguas en las parroquias de Pifo a El Quinche, Quito – Ecuador.
- Coello X. 2002, “Análisis Comparativo De La Vulnerabilidad Del Acuífero Norte De Quito”, Tesis de grado, EPN.
- Corporación Quiport S.A. 2003, “Geological Analysis Of The Caraburo Plateau. The New Quito International Airport Site”, Quito – Ecuador.
- Corporación regional del Desarrollo de la Sierra Norte (CORSINOR) 2007, “Sistema De Riego El Pisque”, Quito – Ecuador.
- Custodio E. y Llamas M. 1976, “Hidrología Subterránea”, Editorial Omega, Barcelona - España.
- Davis S. y De Wiest R. 1971, “Hidrogeología”, Editorial Ariel, Barcelona – España.
- De Miguel Fernández C. 1999, “Hidrogeología Aplicada”, Editorial Félix Varela, La Habana - Cuba.
- De Miguel Fernández C. – EMAAP-Q. 2005, “Caracterización Hidrogeológica De Los Acuíferos San Antonio De Pichincha, Valle De Los Chillos Y Pifo – Puembo”, Informe técnico de consultoría para el Departamento Acuífero de Quito.
- De Miguel Fernández C. – EMAAP-Q. 2006, “Detallamiento De Características De Los Acuíferos: San Antonio, Los Chillos, Pifo – Puembo Y Pronostico Con Propuesta De Trabajos Investigativos De La Cuenca Alta Del Río Pita”. Informe técnico de consultoría para el Departamento Acuífero de Quito.

- DGGM. 1980, Hojas geológicas, a escala 1.50000, hojas “El Quinche” y “Sangolquí”.
- DGGM. 1982, Hoja geológica, a escala 1:25000, hoja “Yaruquí”.
- Díaz H. et al. 2005, “Recursos Hídricos”, Universidad Autónoma del Estado de México (México) y Piriguazú Ediciones (Uruguay)
- Ego F. y Sebrier M. 1996, “The Ecuadorian Inter.-Andean Valley, A Major And Complex Restraining Bend And Compressive Graben Since Late Miocene”.
- Egüez, Alvarado, Yepes, Michael, Machette, Costa y Dart. (2003) “Database And Map Of Quaternary Faults And Folds Of Ecuador And Its Offshore Regions”
- Empresa Municipal de Alcantarillado y Agua Potable de Quito (EMAAP-Q.) 2006, Base de datos referente a las vertientes.
- Empresa Municipal de Alcantarillado y Agua Potable de Quito (EMAAP-Q.), Informes técnicos de perforación de los pozos: Pifo (Calluma), Chaupimolino, San José de Puembo, Tababela, Yaruquí No.1, San Carlos de Yaruquí No.2, Yaruquí 1A (San Vicente), YT-1 (La Tola), Urapamba y Sintofil.
- Freeze. A. y Cherry J. 1979, “Groundwater”
- Hall M. y Mothes P. 1996, “El Origen Y La Edad De La Cangahua Superior, Valle De Tumbaco (Ecuador)”.
- Hernández T. 1982, “Estudio De Recursos Hidrológicos En La Zona De Pifo Y Puembo”. Proyecto previo a la concesión de aguas.
- HIGGECO. 2004, Informe técnico de perforación del pozo PH-1 Carnasa
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) 1987, Informe técnico de perforación del pozo Textiles Nacionales.
- Kruseman G. y De Redder N. 1975, “Analysis And Evaluation Of Pumping Test Data” International Institute For Land Reclamation And Improvement - Holanda (traduced by Miguel Dinosaur).
- Lavenu A., Baudino R., And Ego F. 1996, “Stratigraphie Des Depots Tertiaires Et Quaternaires De La Depression Interandine d'Equateur (Entre 0° Et 2°15S) “. Bulletin Institut Francais d'Etudes Andines, 25, pp. 1-15.

- Layedra H. 1997, "Modelo Hidrodinámico Del Acuífero De Pujilí Con El Uso De Sistema De Modelación GMS" Proyecto previo a la obtención del Título de Ingeniera Geóloga. EPN.
- Martínez D. – EMAAP-Q. 2005, "Análisis De La Información Hidrogeoquímica De Los Valles De Los Chillos, Pifo-El Quinche Y Pusuquí-San Antonio" Informe de consultaría para el Departamento Acuífero de Quito.
- Monsalve G. 1995, " Hidrogeología En La Ingeniería", Editorial Escuela colombiana de ingeniería, Colombia
- Muñoz T. 2005, "Modelación Del Nivel Principal Del Acuífero Centro – Norte De Quito". Proyecto previo a la obtención del Título de Ingeniera Geóloga. EPN.
- Registro oficial No. 231, Norma NTE INEN 1 800:2006 para agua potable
- Orsolini H. et. al. 2000, "Hidrología, Procesos Y Métodos" editora UNR, Rosario – Argentina.
- PERFOJAPAN. 1998, Informe técnico de perforación del pozo Bella flor.
- Porrou P.-IRD, 1995. "Estudios De Geografía", Vol. 7, Editora Nacional, Quito-Ecuador.
- Proyecto RLA/8/31, Manejo Integrado Y Sostenible De Los Recursos Hídricos Subterráneos En América Latina. Curso de Capacitación en Modelación de Aguas Subterráneas, mayo 2004.
- Sáenz M. - PETROECUADOR, "Sistemas De La Naturaleza", Revista I+D Innovación.
- Santillán G. y Burbano N. 1980, "Estudio Hidrogeológico De La Cuenca Del Río Guayllabamba". Proyecto previo a la obtención del Título de Ingenieros geólogos. UCE.
- Sauer W. 1943, "Memoria Explicativa Del Mapa Geológico De Quito".
- SERVIAGUA, Informes técnicos de perforación de los pozos: Indaves, No.1 Laboratorio Granada, No.1 Granada –El Quinche.
- Sistema de Información Geográfica del Ministerio de Agronomía (SIGAGRO) – MAG. 2005, "Cartografía Básica Y Temática Del Ecuador", Quito – Ecuador.

- Taco G. 2000, "Estudio Hidrogeológico De La Cuenca Del Río Cutuchi, Aguas Arriba De La Estación Hidrodinámica Cutuchi A.J. Yanayacu" Proyecto previo a la obtención del Título de Ingeniero Geólogo. EPN.
- Tibaldi A. y Ferrari L. 1992a, "From Latest Miocene Thrusting To Quaternary Transpression And Transtension In The Interandean Valle, Ecuador".
- Tibaldi A. y Ferrari L. 1992b, "Latest Pleistocene-Holocene Tectonics Of The Ecuadorian Andes".
- EMAAP-Q. 2005, Informe sobre afloros en fuentes para las parroquias Orientales del Distrito Metropolitano de Quito.
- Vera R. 1983, "Características Petrográficas Y Paleogeográficas De Conglomerado Chiche En Los Alrededores Del Ilaló".
- Villagómez D. 2003, "Evolución Geológica Plio-Cuaternaria Del Valle Interandino Central En Ecuador (Zona De Quito-Guayllabamba-San Antonio) Tesis de grado, EPN.
- Villagómez D., Winkler W., Egüez A. y Spikings R. 2003a, "Historia Tectónica de Los Andes Ecuatorianos (Norte de 2° S) del Mioceno Tardío al Reciente y Geomorfología Tectónica Cuaternaria". Quintas Jornadas en Ciencias de la Tierra, Quito Ecuador – Abril 2003, pp. 30-33
- Villagómez D.; Winkler, W. y Egüez, A. 2003b, "Evolución Tectónica y Sedimentaria Plio-Cuaternaria del Valle Interandino Central Ecuador Zona de Quito-Guayllabamba-San Antonio". Quintas Jornadas en Ciencias de la Tierra, Quito Ecuador – Abril 2003, pp. 34-37
- Villanueva M. e Iglesias A. 1997, "Pozos y Acuíferos, Técnicas de Evaluación Mediante Ensayos de Bombeo", Instituto Geológico Minero de España.
- Vives L. y Varni M. 2004, "Aplicación De Los Métodos Numéricos En Hidrología Subterránea" Instituto de Hidrología de Llanuras - Argentina.
- Zanafria N. & Paredes D. 2002, Estudio De Las Características Hidrogeológicas Del Valle De Los Chillos Y Del Valle De Cumbayá – Tumbaco. Proyecto previo a la obtención del Título de Ingeniero geólogo. UCE.
- www.bdh.org.ar/azul/common/themes/azul/help/diagramás_hidroquimicos.htm
- www.agua.uji.es/pdf/leccionRH17.pdf
- <http://earth.google.com>