

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**“MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO
LIBRE MEDIANTE SOFTWARE MODFLOW EN LA COLPA”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO GEÓLOGO**

AUTOR:

Bach. BOÑÓN ALCÁNTARA, Cristhian Wilmer

Asesor:

M.Cs. Ing. GONZALES YANA, Roberto Severino

CAJAMARCA – PERÚ

2024

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

- Investigador:** BOÑÓN ALCÁNTARA, Cristhian Wilmer
DNI: 47865625
Escuela Profesional: ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
- Asesor:** M. Cs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino
Facultad: Ingeniería
- Grado académico o título profesional**
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
- Tipo de Investigación:**
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
- Título de Trabajo de Investigación:**
"MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO LIBRE MEDIANTE SOFTWARE MODFLOW EN LA COLPA"
- Fecha de evaluación:** 04/06/2024
- Software antiplagio:** TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)
- Porcentaje de Informe de Similitud:** 15%
- Código Documento:** oid:3117:359224963
- Resultado de la Evaluación de Similitud:**
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 05/06/2024

| | |
|--|--|
|  |  |
| <hr/> FIRMA DEL ASESOR Roberto Severino Gonzales Yana DNI: 29441681 | <hr/> UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI |

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023

DEDICATORIA

A mis padres: José Boñón Cachi e Ynocenta Alcántara Mantilla por su apoyo constante brindado durante mi formación académica, profesional y personal.

AGRADECIMIENTO

A mi alma mater, la Universidad Nacional de Cajamarca, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica, A mis docentes por sus enseñanzas impartidas en las aulas; contribuyeron con gran tesón y ahínco la realización de este trabajo, por su apoyo y paciencia, en especial a mi asesor M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.

ÍNDICE GENERAL

| Ítems | Pág. |
|---|-----------|
| DEDICATORIA | ii |
| AGRADECIMIENTO | iii |
| RESUMEN..... | xi |
| ABSTRACT..... | xii |
| | |
| CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| | |
| CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO..... | 4 |
| | |
| 2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN | 4 |
| 2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES. | 4 |
| 2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES. | 4 |
| 2.1.3. ANTECEDENTES LOCALES..... | 4 |
| 2.2. BASES TEÓRICAS | 5 |
| 2.2.1. Acuífero | 5 |
| 2.2.2. Tipos de acuíferos: | 5 |
| 2.2.3. Ecuación diferencial del flujo en medios porosos:..... | 6 |
| 2.2.4. Ciclo hidrológico del agua | 8 |
| 2.2.5. El proceso de modelación | 10 |
| 2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS..... | 18 |
| | |
| CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS..... | 20 |
| | |
| 3.1. UBICACIÓN | 20 |
| 3.2. ACCESIBILIDAD | 20 |
| 3.3. CLIMA | 21 |
| 3.4. METODOLOGÍA | 22 |
| 3.4.1. TIPO, NIVEL, DISEÑO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN..... | 22 |
| 3.4.2. POBLACIÓN DE ESTUDIO | 22 |
| 3.4.3. MUESTRA..... | 22 |
| 3.4.4. UNIDAD DE ANÁLISIS | 22 |
| 3.4.5. METODOLOGÍA DE RECOLECCIÓN DE DATOS. | 22 |
| 3.4.6. DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS | 25 |
| 3.4.7. FICHAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS:..... | 26 |

| | Pág. |
|---|---------------|
| 3.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN..... | 27 |
| 3.5.1. DEFINICIÓN DE VARIABLES | 27 |
| 3.5.2. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES | 27 |
| 3.6. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL..... | 27 |
| 3.6.1. DELIMITACIÓN HIDROGRÁFICA DE LA MICROCUENCA | 27 |
| 3.6.2. GEOLOGÍA LOCAL..... | 31 |
| 3.6.3. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS..... | 37 |
| 3.6.4. BALANCE HÍDRICO DEL ACUÍFERO | 40 |
| 3.6.5. PROFUNDIDAD DE LA NAPA FREÁTICA..... | 43 |
| 3.6.6. CONDICIONES DE BORDE..... | 45 |
| 3.7. SIMULACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO | 47 |
| 3.7.1. ELABORACIÓN Y DISCRETIZACIÓN DE LA MALLA..... | 48 |
| 3.7.2. IMPUT DE DATOS..... | 51 |
| 3.7.3. RUN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO..... | 53 |
| CAPÍTULO IV:..... | 57 |
| PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 57 |
| 4.1. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN..... | 57 |
| 4.1.1. ANÁLISIS DEL BALANCE HÍDRICO | 59 |
| 4.1.2. ANÁLISIS DE LAS ZONAS DE RECARGA Y DESCARGA..... | 63 |
| 4.1.3. RELACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN SOBRE EL ACUÍFERO | 68 |
| 4.2. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS..... | 71 |
| CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 72 |
| 5.1. CONCLUSIONES..... | 72 |
| 5.2. RECOMENDACIONES..... | 72 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 73 |
| ANEXOS | 76 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Tipos de acuíferos, donde A representa un acuífero libre y B un acuífero confinado..... | 6 |
| Figura 2. Ciclo hidrológico ideal que presenta el agua..... | 9 |
| Figura 3. Esquema para generar el modelo conceptual de un modelo hidrogeológico..... | 10 |
| Figura 4. Discretización del acuífero en una malla rectangular..... | 13 |
| Figura 5. Tipos de condiciones de borde, donde: k (conductividad hidráulica), b (espesor de capa) y H (Carga hidráulica)..... | 17 |
| Figura 6. Ubicación del centro poblado La Colpa..... | 20 |
| Figura 7. Accesibilidad de la zona de investigación. Línea azul representa el tramo Cajamarca – La Colpa utilizando la carretera al distrito Jesús, línea roja representa el tramo Cajamarca – La Colpa utilizando la Av. San Martín de Porres..... | 21 |
| Figura 8. Ubicación de la microcuenca de estudio dentro de la cuenca Crisnejas..... | 29 |
| Figura 9. Ubicación de la microcuenca la Colpa; la línea azul es el borde de la microcuenca la Colpa, en donde se realizó la toma de datos..... | 30 |
| Figura 10. Columna estratigráfica de Cajamarca..... | 33 |
| Figura 11. Ubicación de pozos donde se muestra la profundidad del nivel freático en la microcuenca de La Colpa..... | 44 |
| Figura 12. Pozos de agua subterránea en la microcuenca La Colpa..... | 46 |
| Figura 13. Discretización de la Malla para la microcuenca La Colpa, donde se considera un tamaño de celda menor en los nodos de la quebrada y para los pozos de agua subterránea..... | 49 |
| Figura 14. Interfaz gráfica del software ModFlow, donde se procesa el modelo hidrogeológico, mostrando las condiciones de borde y malla discretizada..... | 50 |
| Figura 15. Procesamiento de datos en software ModFlow, que ejecutará la simulación del modelo conceptual..... | 52 |
| Figura 16. Porcentaje de discrepancia (0.01%) entre los datos reales y los calculados del modelo, para la calibración del modelo..... | 55 |
| Figura 17. Balance hídrico del acuífero La Colpa..... | 58 |
| Figura 18. Topografía de la microcuenca, donde se muestra las zonas altas de color amarillo y naranja, que actúan como zonas de recarga..... | 64 |
| Figura 19. Se muestra el acuífero libre con sus líneas equipotenciales..... | 65 |
| Figura 20. Perfil Longitudinal A-A', corte longitudinal del modelo hidrogeológico de la microcuenca la Colpa..... | 67 |
| Figura 21. Perfil Longitudinal B-B', corte longitudinal del modelo hidrogeológico de la microcuenca la Colpa..... | 67 |

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 22. Balance hídrico donde se observa la distribución de la recarga según la topografía de la microcuenca La Colpa. | 70 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Rutas de acceso hacia la zona de trabajo. | 21 |
| Tabla 2. El clima en Cajamarca 2022 (Estación Weber Bauer, 7°10'2.98" S, 78°29'35.14" W, 2673 msnm). | 22 |
| Tabla 3. Ficha técnica para ensayos de infiltración. | 26 |
| Tabla 4. Características hidrográficas de la cuenca Crisnejas. | 28 |
| Tabla 5. Parámetros geomorfológicos de la microcuenca La Colpa. | 31 |
| Tabla 6. Valor de la conductividad hidráulica de los ensayos de infiltración realizados en campo. | 40 |
| Tabla 7. Cuadro de datos meteorológicos anuales de la cuenca Cajamarca. | 41 |
| Tabla 8. Cuadro de recarga anual desde los últimos 5 años. | 42 |
| Tabla 9. Cuadro de balance hídrico anual de la microcuenca. | 42 |
| Tabla 10. Cuadro de balance hídrico mensual de la microcuenca. | 43 |
| Tabla 11. Parámetros de simulación para el solucionador NWT. | 54 |
| Tabla 12. Balance Hídrico del acuífero libre, en L/m ³ | 56 |
| Tabla 13. Balance Hídrico, Precipitación vs recarga para valores diarios en mm/día. | 60 |
| Tabla 14. Balance Hídrico, Precipitación vs recarga para valores mensuales en mm/mes. | 61 |
| Tabla 15. Balance Hídrico, Precipitación vs recarga para valores anuales en mm/año. | 62 |
| Tabla 16. Relación entre Precipitación, evapotranspiración y recarga con la elevación topográfica del acuífero. | 69 |

ÍNDICE DE FOTOS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Foto 1. Afloramiento de estratos de arenisca de la Formación Chimú. | 34 |
| Foto 2. Depósito coluvio-aluvial en la falda del cerro Collpa margen este, donde se aprecia sedimentos de arcilla, limos, gravas y cantos, mostrando clastos subangulosos a sub redondeados. | 35 |
| Foto 3. Se observa la presencia de clastos heterogéneos de tamaño entre 5cm a 40cm, mal clasificados y con clastos angulosos a subangulosos. | 35 |
| Foto 4. Depósito coluvio-aluvial en la falda del cerro Collpa margen oeste, donde se aprecia sedimentos de arcilla, gravas y cantos, siendo el predominante la matriz arcillosa. | 36 |
| Foto 5. Depósito aluvio-fluvial ubicado en la quebrada Agocucho, conformado por sedimentos de limos, gravas y cantos heterogéneo subangulosos a subredondeados. | 36 |
| Foto 6. Estratos de areniscas fracturadas, que presentan alta conductividad hidráulica. | 37 |
| Foto 7. Acuífero poroso en sedimentos no consolidados, donde se observa la profundidad de la napa freática a 0.6m de profundidad. | 38 |
| Foto 8. Ensayo de infiltración, para determinar la conductividad hidráulica en depósitos no consolidados. | 39 |
| Foto 9. Ensayo de infiltración sobre la Formación Chimú, que presenta estratos fuertemente fracturados. | 39 |
| Foto 10. Ensayo de infiltración, sobre sedimentos de origen fluvial en la quebrada Agocucho. | 40 |
| Foto 11. Manantial de régimen permanente, siendo una zona de descarga del acuífero, indicando que el nivel freático se encuentra cerca la superficie, ubicado dentro de la Hacienda La Colpa. | 68 |

LISTA DE ABREVIATURAS.

| | |
|-------------------|--|
| ALA | : Siglas de Administración Local del Agua |
| ANA | : Siglas de Autoridad Nacional del Agua |
| °C | : Unidad de medida de temperatura expresada en centígrados. |
| % | : Representación de un número como fracción que tiene como denominador 100. |
| cm | : Unidad de medida de la longitud expresada en centímetros. |
| C.P | : Abreviatura de centro poblado. |
| FAO | : Siglas de Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. |
| Fm | : Abreviatura de formación geológica. |
| Has | : Unidad de medida del área expresada en hectáreas. |
| Hum | : Abreviatura de humedad. |
| IN | : Representación de ingreso de agua en modelo hidrogeológico. |
| K | : Conductividad hidráulica. |
| Km | : Unidad de medida de la longitud expresada en kilómetros. |
| Km ² | : Unidad de medida del área expresada en kilómetros cuadrados. |
| L/m ³ | : Unidad de medida del almacenamiento de agua de un acuífero expresado en litro por metro cúbico. |
| m | : Unidad de medida de la longitud expresada en metros |
| MD | : Solucionador de flujo del software ModFlow que emplea cálculos mediante método de matrices lineales. |
| min | : Unidad de medida del tiempo expresada en minutos |
| mm | : Unidad de medida de la precipitación expresada en milímetros de columna de agua por metro cuadrado. |
| msnm | : Metros sobre el nivel del mar. |
| m/s | : Unidad de medida de la velocidad expresada en metros sobre segundos. |
| m ³ /s | : Unidad de medida del caudal expresada en metro cubico sobre segundos. |
| Mm/año | : Unidad de medida de la precipitación expresada en milímetros de columna de agua acumulada por año. |
| OUT | : Representación de salida de agua en modelo hidrogeológico |
| SENAMHI | : Siglas de Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú |
| Temp | : Abreviatura de temperatura. |

RESUMEN

Cajamarca actualmente atraviesa un déficit de abastecimiento de agua en los meses de mayo a setiembre, por ello surge la necesidad de buscar una alternativa capaz de cubrir con esta demanda, siendo el agua subterránea una alternativa viable, pero se está explotando desordenadamente. Por ello la investigación tiene como objetivo saber cómo es el modelamiento hidrogeológico del acuífero libre en el centro poblado de la Colpa, determinando las zonas de recarga, descarga, la precipitación y evapotranspiración. El modelo hidrogeológico se realizó mediante el modelo conceptual y la simulación del acuífero. El modelo conceptual se realizó teniendo en cuenta el balance hídrico de la microcuenca, la geología, la hidrogeología, la conductibilidad hidráulica de las unidades hidrogeológicas; determinándose las principales zonas de recarga, descarga del acuífero y parámetros hidrogeológicos. La simulación se trabajó en el software ModFlow donde se determinaron las características del acuífero. Resultando que la principal zona de recarga se encuentra ubicado en el borde suroeste de la microcuenca, con cotas mayores a los 2900msnm., y la descarga sucede en las partes bajas de la microcuenca, de cotas menores a 2800msnm. También se determinó que el nivel freático se encuentra por debajo de los 2700msnm. y cercana a la superficie en la parte central de la microcuenca. Se concluye que el acuífero tiene geometría irregular con dirección sur-oeste a nor-este, una gradiente hidráulica de 0.66° , y un almacenamiento de $12.32E-3 \text{ L/m}^3$.

PALABRAS CLAVES: Modelamiento hidrogeológico, balance hídrico, recarga, descarga, acuífero libre.

ABSTRACT

Cajamarca is currently experiencing a water supply deficit in the months of May to September, which is why there is a need to look for an alternative capable of covering this demand, with groundwater being a viable alternative, but it is being exploited in a disorderly manner. Therefore, the research aims to know what the hydrogeological modeling of the free aquifer in the populated center of La Colpa is like, determining the recharge, discharge, precipitation and evapotranspiration zones. The hydrogeological model was carried out through the conceptual model and the simulation of the aquifer. The conceptual model was made taking into account the water balance of the micro-basin, the geology, hydrogeology, and hydraulic conductivity of the hydrogeological units; determining the main recharge zones, aquifer discharge and hydrogeological parameters. The simulation was worked on in the ModFlow software where the characteristics of the aquifer were determined. Resulting in that the main recharge zone is located on the southwest edge of the micro-basin, with elevations greater than 2900 meters above sea level, and the discharge occurs in the lower parts of the micro-basin, with elevations lower than 2800 meters above sea level. It was also determined that the water table is below 2700 meters above sea level. and close to the surface in the central part of the microbasin. It is concluded that the aquifer has an irregular geometry with a south-west to north-east direction, a hydraulic gradient of 0.66 ‰, and a storage of 12.32E-3 L/m³.

KEY WORDS: Hydrogeological modeling, water balance, recharge, download, free aquifer.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Todos conocemos la importancia del agua para el desarrollo poblacional, agua superficial y subterránea, siendo la segunda la de especial interés por ser considerada como la fuente futura de sustento hídrico, por ello surge la necesidad de comprender su comportamiento debajo de la tierra, y generar opciones de aprovechamiento. Cajamarca no es la excepción porque existe problemática por el abastecimiento de agua, pues el agua subterránea es el único sustento de agua en las partes más aledañas de la ciudad, por ello surge la necesidad de analizar el comportamiento del agua subterránea y crear un modelo hidrogeológico para posteriores proyectos de explotación de esta.

Como sabemos, el agua subterránea tiene un comportamiento complejo que genera incertidumbre sobre su distribución y geometría, por ello su interpretación se realiza mediante software's de modelamiento finito; en el centro poblado de la Colpa surge la necesidad de definir el comportamiento del agua subterránea para abastecer de agua a los pobladores que tienen esta necesidad. Debido a esta problemática, se plantea una interrogante que nos ayudará a dirigir nuestro tema de investigación, la cual se formula a continuación:

¿Cómo es el modelamiento hidrogeológico del acuífero libre en el Centro Poblado de la Colpa?

El modelo hidrogeológico del acuífero libre en el Centro Poblado de la Colpa, está relacionado con la precipitación, evapotranspiración, y las zonas de recarga y descarga.

Esta pregunta surge por la importancia de conocer el modelamiento hidrogeológico del acuífero para poder solucionar la problemática que enfrenta Cajamarca sobre el tema de abastecimiento hídrico en la zona sureste de la ciudad, pues el modelo hidrogeológico es importante para poder interpretar el comportamiento que presenta el agua subterránea mediante las épocas húmedas y secas, así como también determinar zonas de recarga y descarga que influyen en el almacenamiento del acuífero libre. En el centro poblado de La Colpa los pobladores usan este recurso

para sus necesidades, siendo importante conocer en este lugar como se comporta los flujos de agua subterránea hacia el acuífero y cuál sería el aporte de la precipitación en época húmeda hacia el acuífero libre de la microcuenca La Colpa, también la influencia que tendría los pozos de explotación.

Como se menciona para este trabajo se tomará como universo al Centro Poblado de la Colpa, ubicado en la sierra norte de nuestro país, en el distrito de Jesús, provincia Cajamarca y departamento de Cajamarca, el área de estudio abarca una extensión de 45.7611km.² aproximadamente, donde realizaremos el modelamiento hidrogeológico, basándonos en los parámetros hidrogeológicos que presenta esta zona. Estos parámetros estudiados abarcan condiciones físicas tales como relieve, topografía, aspectos hidrogeológicos y parámetros climatológicos como precipitación y temperatura.

Cabe resaltar que existen limitaciones de información para generar el modelo hidrogeológico, pues no se tiene información en hidrogeología de esa zona, no se tiene información de la secuencia estratigráfica de los pozos, limitando la interpretación en profundidad del modelo.

Para la realización de esta investigación, se plantean los siguientes objetivos:

- Determinar el modelamiento hidrogeológico del acuífero libre en el Centro Poblado de la Colpa.
- Determinar las zonas de recarga y descarga que controlan el balance hídrico del acuífero libre.
- Determinar la relación de la precipitación y evapotranspiración sobre el acuífero libre de la Colpa.

La tesis se encuentra estructurada en cinco capítulos y sus correspondientes epígrafes y subapartados: Capítulo I: Introducción, donde se verá todo lo referente al problema de nuestro trabajo, Capítulo II: Marco Teórico, se presentan los antecedentes y bases teóricas del trabajo, Capítulo III: Metodología de la Investigación, se presentara la ubicación de la zona de investigación además de todos los métodos utilizados para la recolección de información y simulación del modelo hidrogeológico, Capítulo IV: Presentación y Discusión de Resultados, donde se analizan los resultados y

verificaremos la hipótesis y Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones productos de la investigación. Finalmente se presentan las referencias bibliográficas y anexos.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES.

- **Baechler (2012)** en su trabajo del modelamiento hidrogeológico del río Mataquito, genera su modelo ayudándose de los datos de la geofísica (gravimetría), precipitación, caudales y nivel freático, su modelo presenta caudal teórico explotable de 9.9 como máximo.
- **Molina et al. (2014)** realizan una comparación entre los resultados obtenidos de su modelamiento del acuífero de provincia la Grama – Cuba, con dos softwares: ModFlow y AQÜIMPE, demostrando que, a pesar de tener un resultado correcto en ambos modelos, no existe mucha similitud en los resultados, del cual deducen algunos criterios para tomar en cuenta en la modelación para un mejor resultado.

2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES.

- **Rojas (2008)** realiza su modelo para el acuífero de la Yarada – Tacna, en el cual se basa de 3 hipótesis, las cuales son bombeando a tres caudales diferentes para determinar si hay contaminación por intrusión de aguas marinas, a causa del descenso de la capa freática por sobreexplotación de pozos. Mediante el modelamiento en ModFlow pudo demostrar que es posible la contaminación del acuífero con agua salada por la sobreexplotación.

2.1.3. ANTECEDENTES LOCALES.

- **Peña (2005)** en su trabajo modela el comportamiento que presenta los acuíferos en el valle de Cajamarca, desde su recarga hasta su descarga en el río Crisnejas, demostró la existencia de dos acuíferos del tipo confinado y uno del tipo libre, los confinados se encontraban en las Formaciones Farrat y Chimú, y el acuífero libre se encontraba en el valle de Cajamarca.

- **Ordoñez et al. (2008)** realizaron la caracterización hidrológica de Cajamarca, basados en datos de precipitación y caudales que presenta la región de Cajamarca, para determinar las zonas de amenaza que existen en la región en épocas de elevada precipitación.
- **Mendoza (2015)**, en su trabajo realizó el modelamiento de la microcuenca del río Chailhuagón, donde delimita las condiciones de borde y elabora el modelo mediante el software Groundwater Model System (GMS), los datos se obtienen mediante pozos estratigráficos.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Acuífero

Un acuífero para Vélez et al. (2011), son estratos de roca y/o depósitos de sedimentos no consolidados que, por acción de la fuerza gravitatoria, favorece el tránsito del agua por su interior, y permite su almacenamiento en la misma.

2.2.2. Tipos de acuíferos:

Según Vélez et al. (2011), los acuíferos se dividen según la posición y condición de borde en la que se encuentran, por ello tenemos la siguiente clasificación:

- A) Acuíferos libres, no confinados o freáticos:** son aquéllos en los cuales existe una superficie libre del agua encerrada en ellos, que está en contacto con el aire y, por lo tanto, a presión atmosférica (Figura 1).
- B) Acuíferos cautivos, confinados o a presión:** son aquellos en los que el agua está sometida a una cierta presión, superior a la atmosférica, y ocupa la totalidad de la formación geológica que lo contiene, saturándola completamente.
- C) Acuíferos semiconfinados:** son aquellos acuíferos confinados en los cuales la superficie inferior y/o superior que los encierra no son completamente impermeables, sino acuitardos, permitiendo un paso vertical del agua entre ambos acuíferos y en uno u otro sentido, dependiendo de la diferencia de potencial entre ellos.

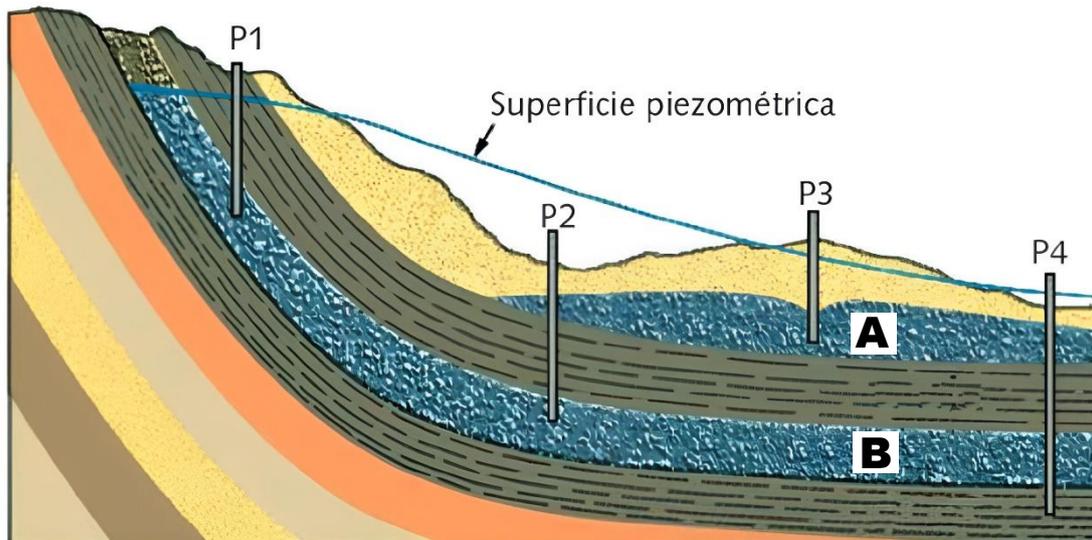


Figura 1. Tipos de acuíferos, donde A representa un acuífero libre y B un acuífero confinado.

Fuente. Vélez et al, (2011)

2.2.3. Ecuación diferencial del flujo en medios porosos:

La resolución de las ecuaciones diferenciales del flujo en medio poroso requiere determinadas condiciones iniciales y de contorno para cada caso, y en general, sólo es posible su solución para acuíferos muy simples, homogéneos e isotrópicos. Las soluciones conocidas pertenecen a casos unidimensionales o bidimensionales, y aun así las fórmulas son de difícil manejo y a través de procesos de cálculo complicados. La ecuación que regula el flujo bidimensional del agua en un acuífero saturado, anisotrópico es de la forma (Anderson y Woessner, 1992):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) \pm Q(x,y) = S \frac{\partial h}{\partial t} + L$$

Dónde:

$$L = - K_2 \frac{h_{\text{fuente}} - h}{b}$$

2.2.3.1. Métodos numéricos de solución:

Las ecuaciones diferenciales parciales del flujo de agua subterránea en los acuíferos pueden resolverse utilizando dos métodos (Anderson y Woessner, 1992):

- A) Soluciones analíticas: Uso de supuestos simplificados para desarrollar una sola ecuación que represente las cargas hidráulicas, fácil de usar y requiere pocos datos hidrogeológicos.
- B) Soluciones numéricas: Uso de métodos numéricos (elementos finitos) para resolver la ecuación diferencial parcial, requiere más datos y es aplicable en un rango más amplio de evaluaciones hidrogeológicas.

Las distintas metodologías de resolución numérica de la ecuación del flujo, para efectos de modelación del acuífero, se diferencian entre sí en las hipótesis de desratización del medio continuo. En general se supone que está dividido en una malla de elementos prismáticos de base rectangular o poligonal. La malla rectangular puede ser de tamaño uniforme o variable, e igualmente, la malla poligonal puede ser uniforme o asimétrica. (Anderson y Woessner 1992).

2.2.3.2. Acuífero no confinado o libre

Para acuíferos libres el espesor saturado $b_{i,j}$ (i,j son vectores unitarios de los ejes X, Y) es una función de las cargas hidráulicas, en el modelo tanto las cargas hidráulicas como el espesor saturado son desconocidas. Una suposición inicial es requerir del espesor saturado para estimar las transmisividades $T_{xx_{i,j}}$ y $T_{yy_{i,j}}$ (xx, yy representan la a las direcciones de la transmisividad en los planos X, Y). Un proceso iterativo debe ser usado para calcular la distribución de carga hidráulica, actualice las transmisividades y verifique si la discrepancia entre el espesor saturado previamente estimado y actualizada no sea mayor que una tolerancia especificada. Las transmisividades de los nudos adyacentes $T_{xx_{i+1/2, j}}$, $T_{yy_{i, j+1/2}}$ es calculado multiplicando los promedios armónicos de las conductividades hidráulicas por promedios geométricos de espesor saturado (Anderson y Woessner, 1992).

$$T_{xx_{i+1/2, j}} = K_{xx_{i+1/2, j}} \times \sqrt{(h_{i+1, j} - BT_{i+1, j}) \times (h_{i, j} - BT_{i, j})}$$

$$T_{yy_{i,j+\frac{1}{2}}} = K_{yy_{i,j+\frac{1}{2}}} \times \sqrt{(h_{i,j+1} - BT_{i,j+1}) \times (h_{i,j} - BT_{i,j})}$$

Dónde:

$BT_{i,j}$ = Profundidad del basamento en el nudo i,j .

$K_{xx_{i+1/2,j}}$, $K_{yy_{i,j+1/2}}$ = Conductividad hidráulica entre las celdas (i, j) , e $(i+1, j)$ y las celdas (i, j) e $(i, j+1)$, respectivamente:

$$K_{xx_{i+\frac{1}{2},j}} = \frac{(\Delta x_{i,j} + \Delta x_{i+1,j}) \times K_{xx_{i+1,j}} \times K_{xx_{i,j}}}{K_{xx_{i+1,j}} \Delta x_{i+1,j} + K_{xx_{i,j}} \Delta x_{i,j}}$$

$$K_{yy_{i,j+\frac{1}{2}}} = \frac{(\Delta y_{i,j} + \Delta y_{i,j+1}) \times K_{yy_{i,j+1}} \times K_{yy_{i,j}}}{K_{yy_{i,j+1}} \Delta y_{i,j+1} + K_{yy_{i,j}} \Delta y_{i,j}}$$

2.2.4. Ciclo hidrológico del agua

La energía solar y la gravedad terrestre son fuerzas que actúan para mantener el agua en constante movimiento y en procesos cambiantes en la naturaleza, lo cual se conoce como ciclo hidrológico (Figura 2). El ciclo hidrológico es la circulación del agua entre los distintos compartimentos de la hidrósfera, el agua solamente se traslada de un lugar a otro o cambia de estado físico; sólido (hielo, nieve entre otros), líquido y gaseoso (Sánchez, 2011).

De manera simplificada se puede decir que la energía solar evapora el agua de cualquier reservorio (suelo, ríos, lagos, océanos y hasta el contenido por las plantas) para incorporarlo a la atmósfera en forma de vapor de agua. Gran parte del vapor incorporado a la atmósfera se condensa y precipita de distintas maneras a la superficie del globo terráqueo. El agua precipitada puede tener como destino los océanos o la superficie terrestre y ésta última puede tener un destino muy variado, entre los que cabe la infiltración y percolación hacia las aguas subterráneas (Sánchez, 2011).

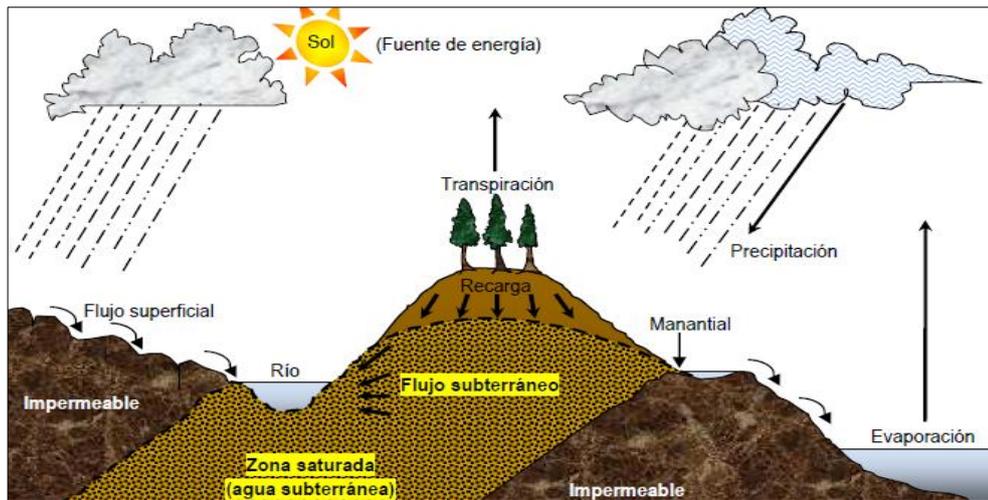


Figura 2. Ciclo hidrológico ideal que presenta el agua.

Fuente. Sánchez, (2011)

▪ **Recarga subterránea**

La energía solar y la gravedad son los factores responsables del movimiento del agua y del equilibrio en todos los sistemas. La gravedad, encargada de mover el agua hacia el centro de la Tierra, y el almacenamiento de agua será poca o mucha de acuerdo con la porosidad de los suelos. Las rocas tienen porosidades diferentes y características permeables diferentes, lo que significa que el agua no se mueve de igual manera en todo tipo de rocas. La recarga se refiere a cualquier volumen de agua que fluye a un acuífero a través de una unidad de tiempo (Sánchez, 2011). La recarga es un proceso hidrológico donde el agua se mueve de la superficie hacia las aguas subterráneas; traducido en un aumento del nivel freático y puede ser natural como artificial. La recarga es uno de los datos más difíciles de calcular con exactitud en un estudio hidrogeológico. Las zonas de recarga suelen ser lugares altos o lugares en los que la precipitación se infiltra con mayor facilidad y esto depende del tipo de suelo, vegetación, topografía, profundidad del nivel freático y tipos de capas confinantes entre otras. Los puntos de descarga pueden ser manantiales de brotes definidos, lagos, arroyos, océanos entre otros (Sophocleous, 2000).

2.2.5. El proceso de modelación

El proceso completo se puede sintetizar en el siguiente diagrama de flujo:

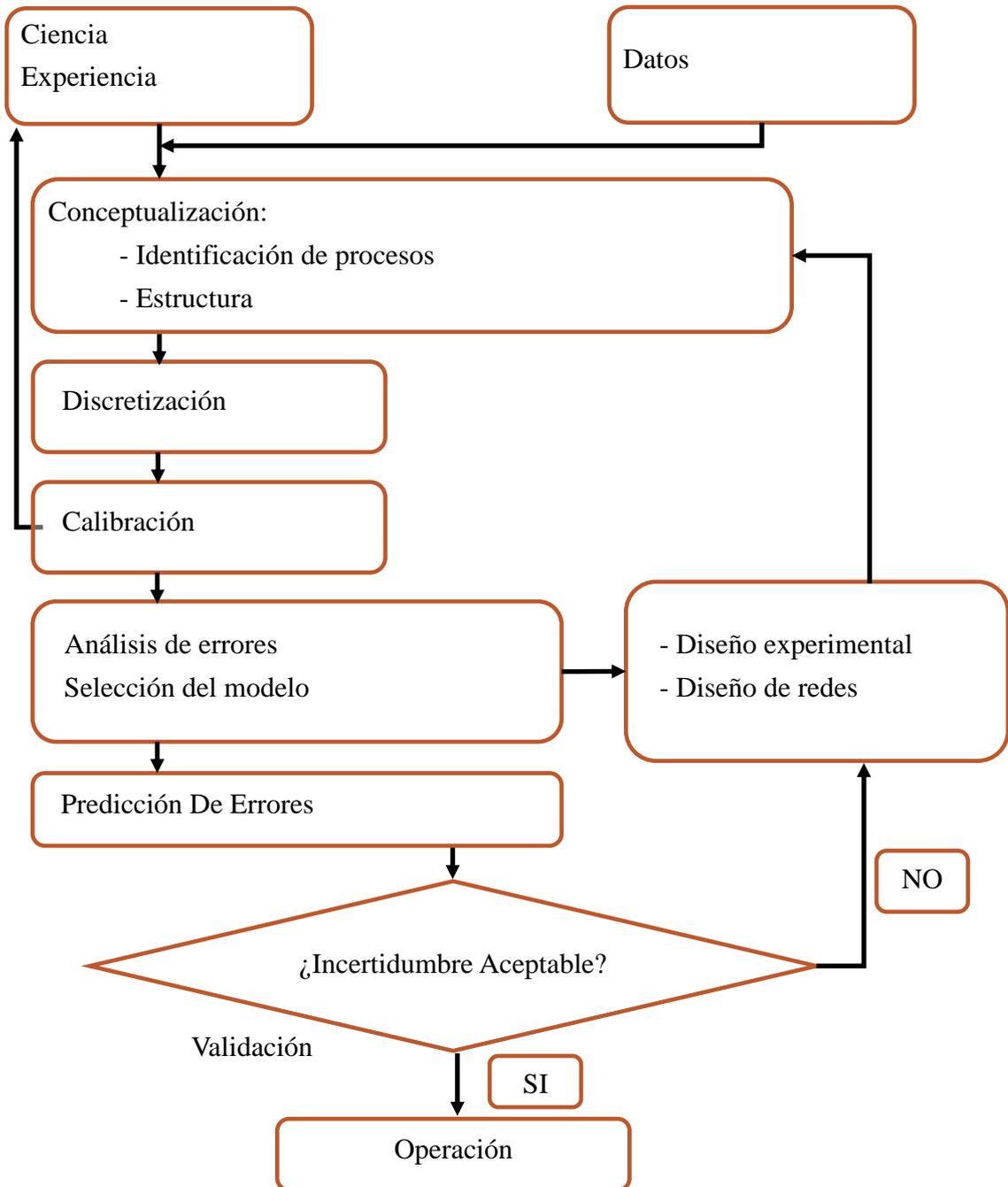


Figura 3. Esquema para generar el modelo conceptual de un modelo hidrogeológico.

Fuente: Anderson y Woessner, (1992)

A continuación, Anderson y Woessner (1992) describen cada uno de los elementos del diagrama:

A. Conceptualización:

Un modelo sólo puede aspirar a ser una buena representación del sistema real si está basado en un modelo conceptual sólido. La información que el modelo conceptual debe aportar al modelo de simulación es toda la referente a la geometría del acuífero, las características físicas del medio, las acciones a las que está sometido el acuífero y los procesos fisicoquímicos relevantes que tienen lugar en él.

A continuación, se citan de manera esquemática todos estos aspectos a especificar en el modelo conceptual:

- a. Marco físico:
- b. Acciones (qué le pasa al acuífero):
- c. Identificación de procesos fisicoquímicos relevantes

B. Datos necesarios para la conceptualización

En términos generales son los típicos de cualquier estudio hidrogeológico.

- Mapas topográficos
- Mapas de usos del suelo
- Geología:
- Meteorología
- Edafología
- Vegetación (x, t)
- Regadíos (x, t)
- Bombeos (x, t)
- Hidrogramas (t)
- Piezometría (x, t)
- Hidroquímica (x, t)
- Isótopos

C. Discretización espacial del acuífero

La primera fase del tratamiento matemático de un acuífero consiste en la sustitución del medio continuo situado dentro del contorno por una serie de elementos rectangulares o poligonales. Discretizar la zona de estudio consiste en dividir el área en regiones y una serie de segmentos en los cuales se destaca sus nodos, que generan el tipo de mallado. Según la malla poligonal sea regular o irregular, el aspecto es como el indicado en la Figura 4.

Las ventajas e inconvenientes de cada tipo de malla se pueden definir atendiendo a varios criterios:

- Ajuste al contorno: La rectangular y poligonal variable, son las más convenientes. Para la misma calidad del ajuste esta última requiere menos elementos que la rectangular.
- Ajuste a las condiciones de la superficie piezométrica: La rectangular y la poligonal variable permiten el uso de elementos más pequeños en zonas con fuertes bombeos. De este modo, se reducen los errores que se producirían al mantener la misma malla con gradientes fuertes. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que estas condiciones pueden variar a lo largo del tiempo, con lo cual, hay que dibujar una nueva malla.
- Automatización de entrada y salida de datos: La malla rectangular variable es la más conveniente desde este punto de vista. La poligonal variable se recomienda en condiciones de gran irregularidad en el contorno del acuífero.
- Eficiencia de los métodos de cálculo: Las mallas poligonales exigen menos elementos para la misma calidad de resultados, pero no permiten la aplicación de métodos muy eficientes para la solución de sistemas de ecuaciones.

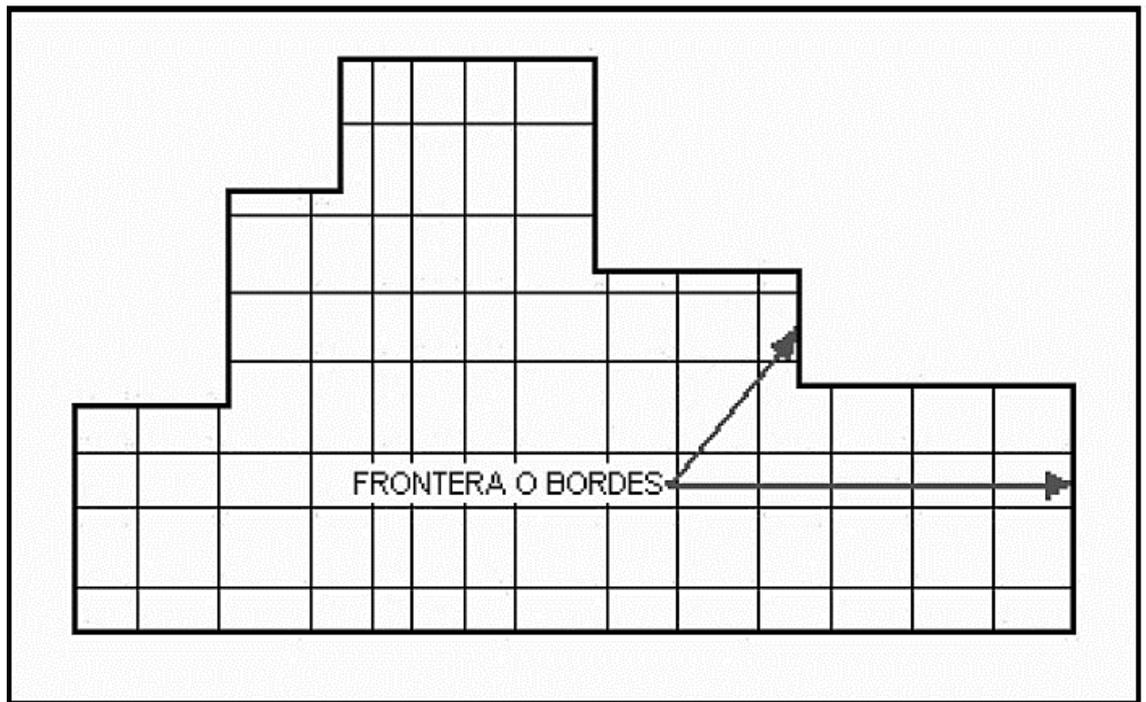


Figura 4. Discretización del acuífero en una malla rectangular

Fuente: Anderson y Woessner, (1992)

D. Calibración:

El objetivo de la calibración es el de obtener los valores de todos los parámetros del modelo (transmisividad, recarga, factores de goteo, permeabilidad de los acuitardos), basándose en información cualitativa (geológica y geoquímica) y en información cuantitativa (niveles y ensayos).

Este proceso se realiza partiendo de los valores obtenidos ensayos, datos geoquímicos, bibliografía, etc. Consiste en ir variando los parámetros de los modelos hasta que se reproducen adecuadamente los niveles o parámetros medidos y conocidos. Esto es la calibración, problema inverso, que puede hacerse por zonas.

La calibración puede efectuarse de manera manual (nada recomendable) o automática.

- Calibración manual:
- La calibración automática tradicionalmente presentaba dificultades

Pero los algoritmos y metodologías han evolucionado de manera que han superado casi todas estas dificultades. Puedes ir variando los valores y comprobando hasta encontrar el resultado óptimo.

E. Análisis de errores de calibración o de sensibilidad

Tras calibrar el modelo se obtienen unos parámetros, la cuestión es saber si se podrían encontrar otros parámetros igualmente plausibles que ajustasen h (medidas de niveles, observaciones de campo) y C (medidas de concentraciones) con precisión similar. Es decir, se debe estudiar si existe sensibilidad a los parámetros, por ejemplo, si aplicas el doble de la transmisividad y no varían los resultados, significa que este parámetro sería insensible. En caso contrario, significaría que la calibración ha funcionado.

Métodos para el análisis de errores de calibración:

- Manual: modificar sucesivamente los valores de los parámetros y ver si el ajuste sigue siendo aceptable.
- Numérico: Matriz de covarianza.
- Estadístico: Matriz de información. Resulta útil para:

F. Análisis de sensibilidad

Consiste en repetir la simulación variando los parámetros dentro de los intervalos definidos durante el análisis de errores.

El objetivo es determinar la incertidumbre de los resultados derivada de la incertidumbre en los valores de los parámetros.

G. Selección de modelos

Con frecuencia diversos modelos conceptuales pueden ajustar los datos apropiadamente. Al elegir el modelo adecuado se llega a un compromiso entre:

- Modelos sencillos, presentan parámetros fiables, pero representación imprecisa.
- Modelos complejos, presentan ajustes buenos, pero parámetros inciertos.

H. Predicciones

Las predicciones o simulaciones se realizan cambiando condiciones de contorno, términos fuente, para simular varias hipótesis sobre el comportamiento del sistema y su evolución futura.

Fuentes de incertidumbre:

- En los parámetros. La incertidumbre puede evaluarse mediante:

- En el modelo. Existe incertidumbre sobre la corrección en los procesos y en la estructura.
- En los escenarios.

I. Validación

La validación intenta asegurar que el modelo es adecuado mediante los siguientes métodos:

- A simple vista
- Duplicación de esfuerzos
- Predicción versus mediciones

Intentan asegurar que el modelo es adecuado. Es un método que se usa para rechazar hipótesis, sin embargo, no permite asegurar que el modelo sea correcto, cualquier medición adicional podría invalidar el modelo. Los modelos deben ser considerados como teorías (es posible demostrar que una teoría es falsa pero no que es correcta). Además, los modelos sólo se validan para condiciones específicas.

J. Limitaciones

Las limitaciones en el modelo conceptual vienen dadas en primer lugar por la imposibilidad de caracterizar la gran variedad espacial que constituye el medio natural del acuífero; esta enorme variedad obliga a que en el momento de establecer las hipótesis de funcionamiento del acuífero se realicen muchas simplificaciones. A veces no consigues calibrar el modelo porque hay algún aspecto que no haces bien o que desconoces, por ejemplo, una capa de arcilla que hace que el acuífero sea semiconfinado en vez de libre, entonces se debe volver a la conceptualización. Otras limitaciones son las dificultades en la sistematización y en la implementación de datos cualitativos.

Las limitaciones en el proceso de discretización se deben a los errores numéricos y a los errores que tienen lugar al suponer que los parámetros son constantes, estos últimos son errores ligados al modelo conceptual y son de difícil cuantificación.

En la calibración se consigue el mejor grupo de parámetros supuesto un modelo conceptual válido. Por otro lado, las predicciones presentan una serie de

incertidumbres ligadas a las incertidumbres en el modelo conceptual, en los parámetros calibrados y en los escenarios.

K. Predicción de errores

Fuentes de incertidumbre:

- Errores numéricos
- Incertidumbres en el modelo

2.2.6. Condiciones de borde o límites espaciales

Una vez sustituido el acuífero continuo por la malla discreta elegida, hay que definir el tipo de condición de borde impuesto a cada segmento de la línea quebrada que sustituye al contorno real del acuífero (Cleary 1991). En el flujo de agua subterránea se establecen hasta tres condiciones de borde.

- 1) Borde de nivel constante o Potencial impuesto (condición tipo Dirichlet): Se utiliza cuando se producen contactos entre el acuífero y masas de agua superficiales o en lugares donde ocurre recarga o descarga subterránea del acuífero (nivel del mar, lagos, ríos)
- 2) Bordos impermeables o caudal impuesto (condición tipo Neumann): Corresponde a las zonas donde el acuífero se encuentra en contacto con formaciones geológicas impermeables; es decir, donde no existan entradas o salidas de agua. También se utilizan cuando el límite del modelo coincide con una línea de corriente, equivalente a un límite impermeable, ya que no circula agua a través de ella.
- 3) Bordos de gradiente constante (condición tipo mixta o de Cauchy): Este tipo de bordes se presente en casos en que por razones de tamaño no es posible modelar el acuífero completo. Entonces se dan casos en que considerar gradiente constante puede ser más correcto que considerar nivel constante. Es el caso de acuíferos aluviales muy largos en que se modelan secciones independientes.

La Fig. 5. muestra un problema típico de campo, en planta y sección transversal, identificándose casos de las tres condiciones de contorno (Cleary 1991), como se explica a continuación:

A lo largo de BC, CD y AD están las de segundo tipo, condiciones de no flujo para ambos acuíferos.

GH, es una condición de no flujo para acuífero confinado.

AB, es una condición de carga constante, del primer tipo para acuífero libre

EF, es un ejemplo de condición de borde de tercer tipo, describiendo el drenaje de un acuífero freático superior para un acuífero confinado inferior.

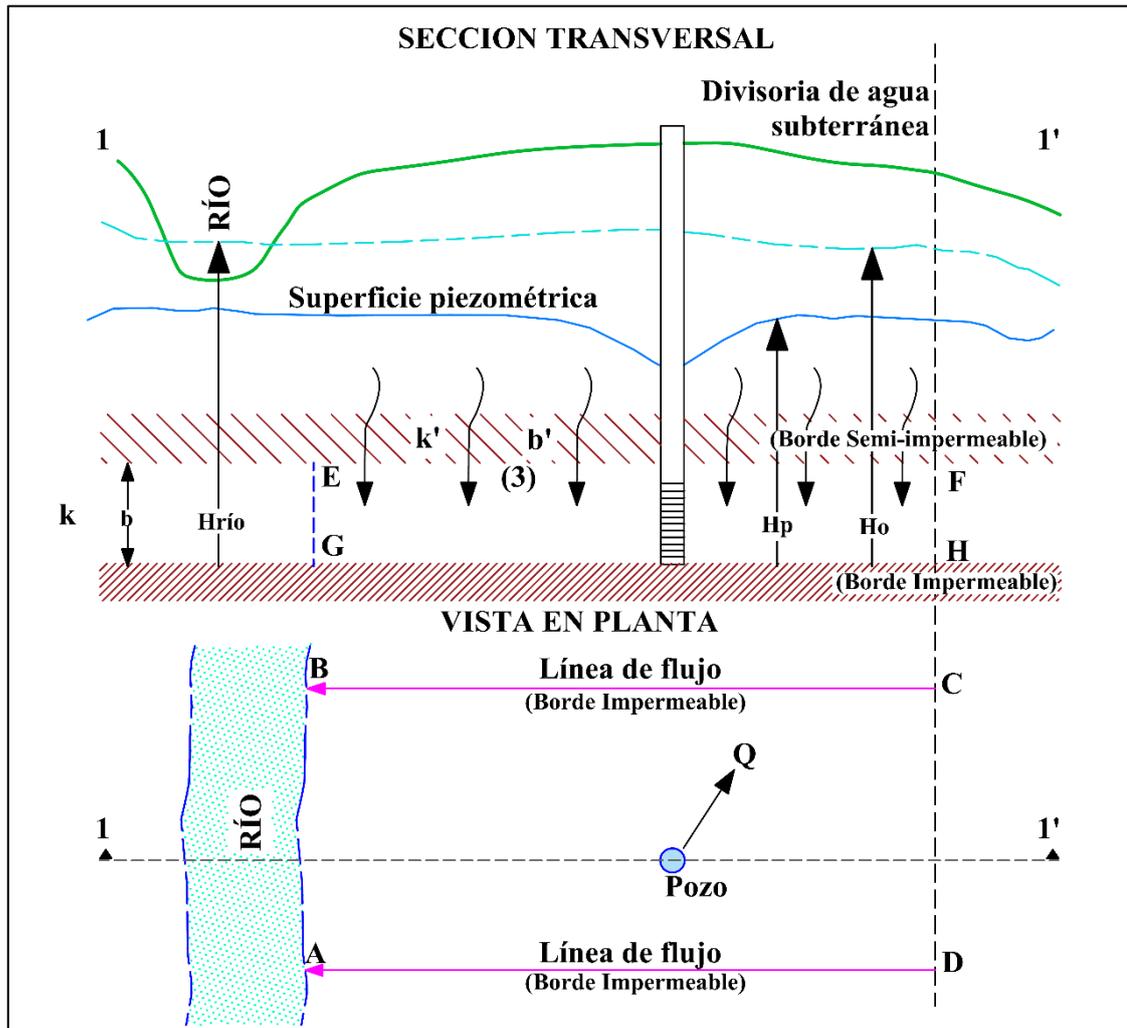


Figura 5. Tipos de condiciones de borde, donde: k (conductividad hidráulica), b (espesor de capa) y H (Carga hidráulica).

Fuente: Cleary, (1991)

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Modelamiento hidrogeológico: es una representación de un sistema real. Estos permiten observar de manera simplificada el comportamiento de un acuífero como herramienta de la investigación hidrogeológica, la cual se fundamenta con información proveniente del campo y el laboratorio (Sánchez, 2011).

Precipitación: caída de agua sólida o líquida por la condensación del vapor sobre la superficie terrestre. Se mide en mm por unidad de tiempo. (Vásquez, 2011)

Evapotranspiración: es la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Se expresa en milímetros por unidad de tiempo (Vásquez, 2011).

Zona de Recarga: es la parte de la cuenca hidrográfica en la cual, por las condiciones climatológicas, geológicas y topográficas, una gran parte de las precipitaciones se infiltran en el suelo, llegando a recargar los acuíferos en las partes más bajas de la cuenca. (Sánchez, 2011)

Zona de Descarga: es la parte de la cuenca hidrográfica en la cual, por las condiciones geológicas y topográficas, el agua contenida en un acuífero aflora en la superficie, generando manantiales, ríos y quebradas (Sánchez, 2011).

Balance hídrico: se deriva del concepto de balance de materia, es decir, que es el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado (Ordoñez et al., 2011).

Infiltración: el proceso por el cual el agua en la superficie de la tierra entra en el suelo, está gobernada por dos fuerzas: la gravedad y la acción capilar. Los poros muy pequeños empujan el agua por la acción capilar además de contra la fuerza de la gravedad (Ordoñez et al., 2011).

Conductividad hidráulica: representa la mayor o menor facilidad con la que el medio deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo (Custodio y Llamas, 2001).

Líneas de flujo: la trayectoria seguida por un elemento de un fluido móvil. En general, a lo largo de la línea de flujo, la velocidad del elemento varía tanto en magnitud como en dirección. Si todo elemento que pasa por un punto dado sigue

la misma trayectoria que los elementos precedentes, se dice que el flujo es estacionario (Custodio y Llamas, 2001).

Nivel freático: corresponde al nivel superior de una capa freática o de un acuífero en general. A menudo, en este nivel la presión de agua del acuífero es igual a la presión atmosférica (Custodio y Llamas, 2001).

Sedimentos no consolidados: son sedimentos que van desde la arcilla, arenas y gravas, y se caracterizan porque el agua subterránea fluye a través de los espacios entre los granos (Pérez y Márquez, 2017).

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN

La zona de estudio se encuentra ubicada a 10 km aproximadamente hacia el sureste de la ciudad de Cajamarca, comprendiendo parte de la hacienda La Colpa, en el distrito de Jesús, provincia de Cajamarca, departamento de Cajamarca.

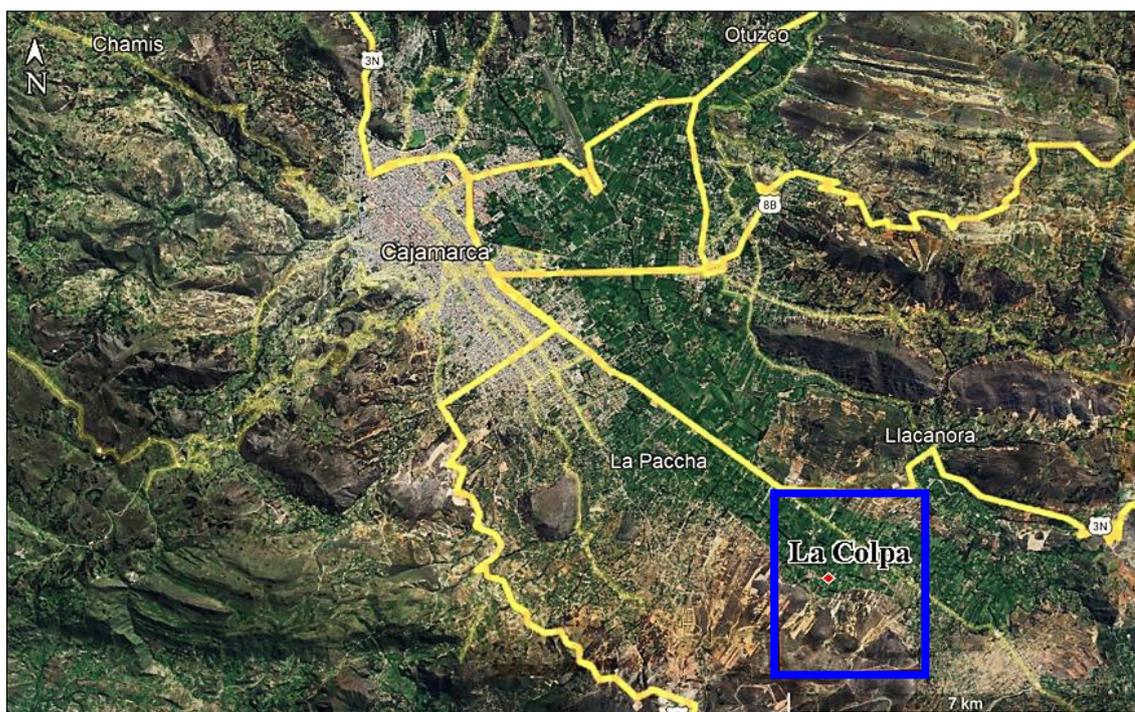


Figura 6. Ubicación del centro poblado La Colpa.

Fuente. SAS Planet, (2023)

3.2. ACCESIBILIDAD

Para el acceso al lugar de investigación se cuenta con dos carreteras, una de ellas asfaltada hasta la hacienda La Colpa y la otra carretera consta de un tramo asfaltado y el resto afirmado, como se describe a continuación:

- Ruta 1. Consta de utilizar la Av. San Martín de Porres que está asfaltada hasta el Penal de Huacariz, y luego continuar por una carretera afirmada

que van hacia la hacienda la Colpa, esta ruta tiene una extensión de 9 km aproximadamente desde la ciudad de Cajamarca.

- Ruta 2. Esta ruta consta de una carretera asfaltada (Carretera hacia distrito de Jesús) hasta el km 8 donde se ubica el ingreso a la Hacienda La Colpa.

Tabla 1. Rutas de acceso hacia la zona de trabajo.

| Tramo | Tipo de carretera | Distancia | Tiempo |
|--------------------------------|----------------------|-------------|---------|
| A) Cajamarca – La Colpa | Asfaltada y afirmada | 9 km aprox. | 20 min. |
| B) Cajamarca – La Colpa | Asfaltada y afirmada | 8 km aprox. | 15 min. |

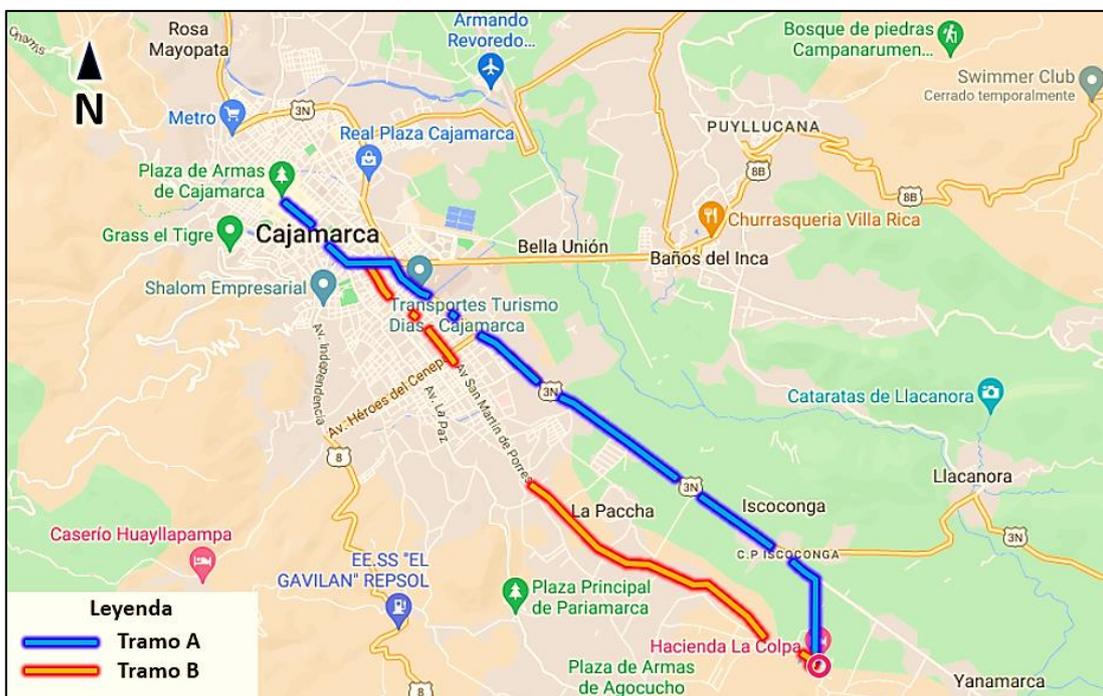


Figura 7. Accesibilidad de la zona de investigación. Línea azul representa el tramo Cajamarca – La Colpa utilizando la carretera al distrito Jesús, línea roja representa el tramo Cajamarca – La Colpa utilizando la Av. San Martín de Porres.

Fuente. Google Earth 2023

3.3. CLIMA

Cajamarca tiene un clima templado moderadamente lluvioso y con amplitud térmica moderada, con temperaturas templadas. Las temperaturas promedio mínimas y máximas no varían mucho durante el año. La diferencia de temperatura diurna es alrededor de 10°C. Las temperaturas absolutas mínimas varían más durante el año. El enfriamiento es fuerte durante las noches claras,

lo que ocurre sobre todo en los meses secos, en los cuales aumenta la incidencia de heladas.

Tabla 2. El clima en Cajamarca 2022 (Estación Weber Bauer, 7°10'2.98" S, 78°29'35.14" W, 2673 msnm).

| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
|--------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|------|------|------|
| Precipitación [mm] | 61 | 79 | 89 | 60 | 60 | 11 | 8 | 13 | 31 | 25 | 5 | 47 |
| Días con lluvia | 12 | 18 | 19 | 19 | 19 | 9 | 4 | 6 | 12 | 13 | 2 | 15 |
| Temp. max. [°C] | 20 | 21 | 22 | 19 | 19 | 19 | 20 | 21 | 22 | 20 | 22 | 21 |
| Temp. min. [°C] | -0.4 | 0.8 | 0 | 1.2 | 1.2 | -3 | -3.6 | -4.1 | -3 | -1.2 | -4.9 | -3.2 |
| Temp. med. [°C] | 12 | 11 | 11 | 11 | 11 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 10 | 11 | 11 | 11 |

Fuente: SENAMHI, (2023).

3.4. METODOLOGÍA

3.4.1. TIPO, NIVEL, DISEÑO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es descriptiva de nivel IV, porque se basa en la recopilación de datos de la población de estudio (unidades hidrogeológicas) necesarios para explicar la ocurrencia del acuífero libre en La Colpa, con un diseño no experimental, de sección transversal, inductivo – deductivo, porque parte de un modelo hidrogeológico conceptual donde se identifican variables necesarias para entender el comportamiento de la microcuenca La Colpa.

3.4.2. POBLACIÓN DE ESTUDIO

Unidades hidrogeológicas de la microcuenca La Colpa, en una extensión de 4,576.11 Has.

3.4.3. MUESTRA

Ríos, quebradas y manantiales que intervienen en la recarga y descarga del acuífero libre.

3.4.4. UNIDAD DE ANÁLISIS

Sedimentos no consolidados (arenas, gravas, limos y arcillas) presentes en la Colpa.

3.4.5. METODOLOGÍA DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

La metodología utilizada en el presente proyecto de investigación será del tipo cuantitativo; desarrollando tres (3) etapas:

3.4.5.1. PRIMERA ETAPA DE GABINETE.

Consiste en la revisión de información sobre métodos para realizar el modelo hidrogeológico, también de revisión de los trabajos existentes y la información de pozos realizados sobre el área de estudio. Asimismo, se compiló toda la información climatológica de la estación meteorológica Weberbauer de la Universidad Nacional de Cajamarca, del histórico de los últimos 5 años. También se realizó una revisión y análisis minucioso sobre los métodos usados para obtener conductibilidad hidráulica del terreno e infiltración de suelos. Se realizó también la recopilación de los planos topográficos y geológicos a escala 1/50000 del cuadrángulo de San Marcos (15 G) publicados por el INGEMMET.

Luego de la búsqueda selectiva de la data de trabajo, se optó para este trabajo de investigación seguir el siguiente procedimiento:

- Realizar una fotointerpretación de la zona mediante imágenes satelitales, descargadas del SAS planet, centrándose en la ubicación de la muestra de estudio como son: ríos, quebradas, manantiales y sedimentos no consolidados del cuaternario.
- Realizar salida de campo para la corroboración de la fotointerpretación y reconocimiento geológico local de la zona de investigación, para determinar el modelo conceptual hidrogeológico.
- Realización de pruebas de infiltración, en los diferentes tipos de suelo que encontramos en nuestra zona de investigación, para determinar la conductividad hidráulica.
- Ubicación de las zonas de recarga y descarga de la zona de investigación, mediante el análisis de las muestras de estudio (ríos, quebradas, manantiales).
- Realizar el modelo conceptual para iniciar el proceso de modelación mediante Software ModFlow.

3.4.5.2. ETAPA DE CAMPO (IN SITU).

En esta etapa se procedió a realizar el procedimiento planteado en gabinete, para lo cual se tuvo:

- Primera salida de campo, que consistió en la comprobación de la fotointerpretación el reconocimiento general del área de estudio. También se identificó los sectores para realizar los ensayos.
- Realización de los ensayos de infiltración con el Infiltrómetro, para calcular la permeabilidad de suelos, según el método de las Carrazón (2007), que consiste en introducir el tubo en el suelo unos 20cm y llenar con agua hasta saturar el suelo. Seguidamente se llena el tubo y se mide los descensos por intervalos de tiempo.
- Ubicación de las zonas de recarga y descarga en la zona de investigación, identificando cuales son las unidades litoestratigráficas que favorecen la recarga del acuífero.

3.4.5.3. SEGUNDA ETAPA DE GABINETE.

En esta etapa se procede a organizar la data obtenida en campo, así como la obtenida de la estación meteorológica y los inventarios de pozos existentes en la zona de investigación para un posterior tratamiento. El procesamiento de la información consiste en:

- Elaborar las tablas en Excel para la precipitación y evapotranspiración, y generar el balance hídrico que presenta la zona de investigación. También elaborar llenar las plantillas en Excel de los ensayos de infiltración para calcular la permeabilidad.
- Ejecutar el modelo conceptual, con la información obtenida alimentamos el modelo conceptual, mediante la interpretación de datos, identificando cuales son los ríos y quebradas que favorecen la recarga del acuífero, dependiendo de sus características hidrogeológicas, además de caracterizar el depósito de material no consolidado, y calcular el balance hídrico del modelo.
- Generar el modelo hidrogeológico mediante el software ModFlow para poder simular el comportamiento del agua al recargar el acuífero, y determinar cómo es el flujo del agua subterránea en el acuífero libre.

3.4.6. DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS

Los instrumentos utilizados para el procesamiento de la información son:

- ModFlow: Software de diferencias finitas desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, el cual consiste en un código fuente que resuelve mediante interacciones la ecuación de flujo del agua subterránea. Se usa en hidrogeología para simular el flujo subterráneo de cualquier acuífero.
- Arc Gis: Software GIS para visualizar, crear, manipular y gestionar información geográfica, estos corresponden a lugares, direcciones, posiciones en terreno, áreas urbanas y rurales; regiones y cualquier tipo de ubicaciones en terrenos determinados. Esta información es trabajada de manera sistémica, lo que representa una diferencia sustancial a lo relacionado al trabajo con información planos y mapas, permitiéndonos explorar, ver y analizar los datos según parámetros, relaciones y tendencias que presenta nuestra información, teniendo como resultado nuevas capas de información, mapas y nuevas bases de datos.
- Microsoft Excel: es un software que permite crear tablas que calculan de forma automática los totales de los valores numéricos que ingresan, también realiza gráficos estadísticos simples.
- SAS planet: es un software de cartografía que permite descargar información satelital, elaborado por Rusia.
- Infiltrómetro: Consiste en un tubo de 90 mm de diámetro, que sirve para medir el descenso de agua, sirven para hacer pruebas que determinan la permeabilidad en suelos, simulando el proceso de infiltración del agua en el suelo desde áreas de inundación amplias.
- Brújula: sirve para medir la orientación de los estratos, fallas, diaclasas.
- G.P.S.: sirve para determinar la ubicación de un punto determinado, mediante sistemas de referenciación. Para nuestro caso es UTM.
- Cinta métrica: para medir longitudes.

3.4.7. FICHAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS:

Ensayo de Infiltración en suelos: este tipo de ensayos se realizan para determinar la conductividad hidráulica (K). Se realiza de la siguiente manera:

- Se ubica en campo el lugar para realizar el ensayo, seguido de la nivelación del suelo y limpieza de vegetación.
- Penetración del tubo Infiltrómetro en el terreno, y aforo con agua varias veces hasta saturar el suelo para realizar las mediciones.
- Se afora nuevamente para tomar los datos cada intervalo de tiempo, hasta que el descenso se mantenga constante.

Tabla 3. Ficha técnica para ensayos de infiltración.

| LOCALIZACIÓN DEL SONDEO: | | Microcuenca La Colpa | | OBSERVACIONES: | |
|--|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| N° SONDEO: | | 1 | | | |
| COORDENADAS (X,Y,Z): | | N: | 9202788 | | |
| | | E: | 779590 | | |
| | | C: | 2665 | | |
| FECHA: HORA DE INICIO: | | C/02/05/15 9:15 a.m. | | | |
| FECHA Y HORA DE FIN: | | C/02/05/15 10:15 a.m. | | | |
| CONDICIONES METEOROLÓGICAS: | | Soleado, con cielo despejado | | | |
| DATOS DEL ENSAYO | | | | | |
| Tiempo (min.): t | | 60 | | Tiempo (s): 3600 | |
| Profundidad inicial (m.): Hi | | | | 0 | |
| Profundidad final (m.): Hf | | | | 54 | |
| Diámetro interior de la entubación o del sondeo (m): | | | | 0.072 | |
| Tiempo (min.) | Intervalo de tiempo (min.) | Descenso del nivel (cm) | Descenso acumulado del nivel (cm) | Velocidad de Infiltración (cm/s) | Altura del nivel (m): |
| 1 | 1 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 51.5 |
| 2 | 1 | 1 | 3.5 | 1 | 50.5 |
| 4 | 2 | 1.5 | 5 | 0.8 | 49 |
| 10 | 2 | 1.5 | 8.5 | 0.8 | 45.5 |
| 15 | 5 | 2.3 | 10.8 | 0.5 | 43.2 |
| 20 | 5 | 1.8 | 12.6 | 0.4 | 41.4 |
| 30 | 10 | 3 | 15.6 | 0.3 | 38.4 |
| 45 | 15 | 3.9 | 19.5 | 0.3 | 34.5 |
| 60 | 15 | 3.2 | 22.7 | 0.2 | 31.3 |
| K | | | | 4.46E - 6 | |

Fuente. Carrazón, (2007)

3.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN

3.5.1. DEFINICIÓN DE VARIABLES

Las variables de investigación son 5 en total, como variable principal tenemos al modelamiento hidrogeológico, y como secundarias: la precipitación, evapotranspiración, recarga y descarga, que nos van a ayudar para resolver el problema de investigación.

3.5.2. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

| <i>VARIABLES</i> | <i>DEFINICIÓN</i> | <i>DIMENSIONES</i> | <i>INDICADORES</i> |
|------------------------------------|---|---|---|
| MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO | Son representaciones físicas o numéricas de un sistema hidrogeológico real | Se determina mediante software de modelación finita. | Flujo subterráneo Conductividad Hidráulica Almacenamiento |
| PRECIPITACIÓN | condensación del vapor de agua atmosférico que se deposita en la superficie de la Tierra | Se determina mediante pluviómetros, y su medida es en mm de lluvia | Intensidad Duración Área (mm) |
| EVAPOTRANSPIRACIÓN | Proceso por el cual el agua es transferida desde la superficie terrestre hacia la atmósfera | La unidad más usual para expresar la evapotranspiración es, el mm de altura de agua | Evaporación Transpiración |
| RECARGA | lugar donde se infiltra el agua para aumentar el volumen del acuífero | La unidad de medida para la recarga es: l/s o m ³ /s | Área Infiltración |
| DESCARGA | Lugar por donde el acuífero libera agua | La unidad de medida para la descarga es: l/s o m ³ /s | Nivel freático Manantial |

3.6. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

3.6.1. DELIMITACIÓN HIDROGRÁFICA DE LA MICROCUENCA

La microcuenca de estudio La Colpa se encuentra formando parte de la cuenca hidrográfica del Crisnejas, la cual es una cuenca de orden 5 según clasificación de Pfafstetter además se compone de 9 unidades hidrográficas de nivel 6, y vertiente Atlántica (ANA 2015). La microcuenca La Colpa tiene un área de 45.7611km², y perímetro de 36.4495km, que se encuentran dentro de la unidad hidrográfica del río Crisnejas (Código 498981).

Tabla 4. Características hidrográficas de la cuenca Crisnejas.

| CUENCA CRISNEJAS | | | | | | |
|---|----------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------|--|----------------------|
| ZONA DE VIDA | Símbolo | cotas m.s.n.m. | Precipitación (mm/año) | Temp. (°C) | Vegetación | Clima |
| BOSQUE PLUVIAL MONTANO BAJO TROPICAL | bp-MBT | 500-1000 | 700-1000 | 27 | Herbácea y arbustiva | Húmedo cálido |
| BOSQUE PLUVIAL MONTANO TROPICAL | bp-MT | 1000-1500 | 1000-1200 | 22 | Herbácea y arbustiva | Húmedo templado |
| BOSQUE SECO MONTANO BAJO TROPICAL | bs-MBT | 1500-2000 | 700-1000 | 20 | arbustiva y cactáceas | Seco templado |
| BOSQUE SECO TROPICAL | bs-T | 2000-2500 | 800-1000 | 22 | cactáceas y matorrales espinosos | Sub húmedo cálido |
| BOSQUE HÚMEDO PRE MONTANO TROPICAL | bs-PMT | 2500-2750 | 1000-1100 | 18 | helechos, musgos, líquenes, café, maíz, cacao | Húmedo y semi cálido |
| PÁRAMO HÚMEDO SUB ALPINO TROPICAL | ph-SAT | >3000 | 1000-1200 | 10 | pastos naturales, arbustos | Semi húmedo frío |

Fuente: Vásquez, (2011).



Figura 8. Ubicación de la microcuenca de estudio dentro de la cuenca Crisnejas.

Fuente: Vásquez, (2011).

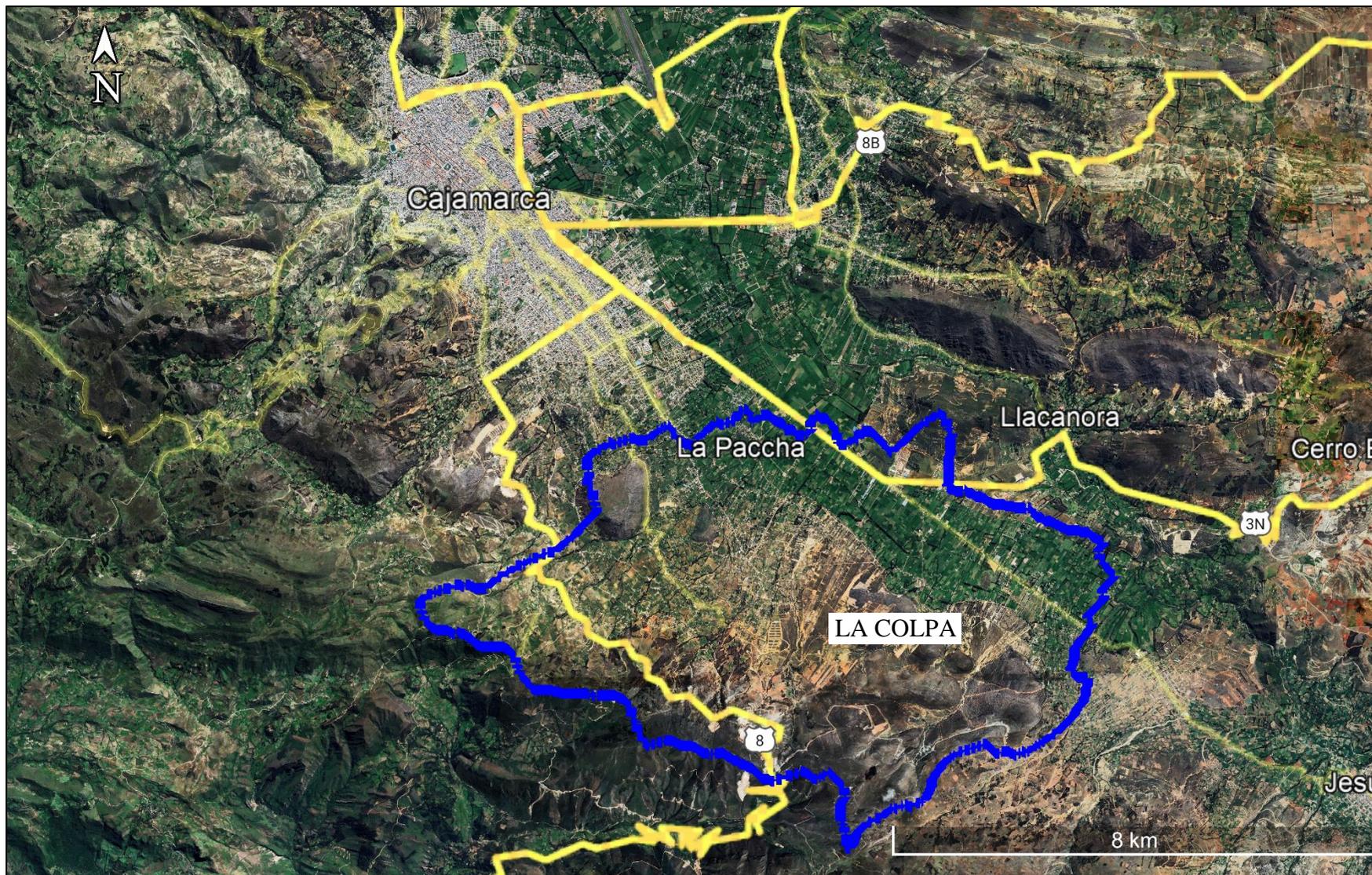


Figura 9. Ubicación de la microcuenca la Colpa; la línea azul es el borde de la microcuenca la Colpa, en donde se realizó la toma de datos.

Tabla 5. Parámetros geomorfológicos de la microcuenca La Colpa.

| Nº | CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS | RESULTADOS |
|---|---|---|
| 1 | Área (A) | = 45.22 km ² |
| 2 | Perímetro (P) | = 36.47 km |
| 3 | Longitud de la cuenca (Lc) | = 11.16 km |
| 4 | Ancho promedio de la cuenca (B) | = 4.05 km |
| 5 | Coefficiente de compacidad (Kc) | = 1.52 Oblonga alargada |
| 6 | Factor de forma (Ff) | = 4.27 |
| 7 | Pendiente media de la cuenca (S) | = 21% Fuerte |
| 8 | Curva Hipsométrica (CH) | Grafico A |
| 9 | Diagrama de frecuencias altimétricas | Grafico B |
| 10 | Altitud media de la cuenca (Hm) | = 2878.58 m.s.n.m. |
| 11 | Altitud más frecuente (HF) | = 2575.00 m.s.n.m. |
| 12 | Coefficiente de masividad (Cm) | = 63.65 |
| 13 | Coefficiente orográfico (Co) | = 5812.22 % Erosión hídrica alta |
| CARACTERÍSTICAS DE LA RED DE DRENAJE | | |
| 1 | Longitud del cauce principal (Lr) | = 14.03 km |
| 2 | Pendiente media del cauce (J) | = 7% |
| 3 | Densidad de drenaje (Dd) | = 1.15 km/km ² |
| 4 | Orden de Corrientes | = 3.00 |
| 5 | Relación de confluencias (Rc) | = 2.25 Ramificación muy alta |
| 6 | Longitud promedio de flujo superficial (L0) | = 3.224 km ² /km |
| Curva hipsométrica (Gráfico A) | | Frecuencia Altimétrica (Gráfico B) |
| | | |

Fuente: Adaptado de Ortiz, (2016).

3.6.2. GEOLOGÍA LOCAL

La geología comprende un sustrato (roca), sobre la cual evolucionó el paisaje, y un conjunto de unidades litoestratigráficas (vinculadas con el tipo de sedimentos). El sustrato está constituido por la Formación Chimú, que está conformada por rocas detríticas, como areniscas que es la roca predominante en la zona de estudio, estas rocas presentan tonalidades rojizas por la presencia de patinas de óxidos de hierro. También tenemos presencia de sedimentos acumulados en la parte norte de la zona de estudio, formando depósitos cuaternarios.

| EDAD Ma | ERATEMA | SISTEMA | SERIE | PISO | FORMACIÓN | ESPESOR (m) | LITOLOGÍA | DESCRIPCIÓN |
|--|-----------|-------------|--|---|--|---|---|---|
| 0.01 | CENOZOICO | CUATERNARIO | HOLOCENO | | Dep.fluviales y Aluviales | 30 | | Conglomerados, areniscas y arcillas rojas. |
| 11.62 13.82 15.97 20.44 | | | | | Dep. lagunares | 150 | | Limos, arcillas. |
| | | NEÓGENO | MIO-CENO | Serranvaliano Langiniano Burdigaliano | Volcánico Huambos | 200 | | Tobas dacíticas y traquiandesíticas blanquecinas. |
| 52.5 | | PALEÓGENO | EO-CENO | Priaboniano Bartoniano Lutetiano | Gpo. Calipuy Volcánico San Pablo | 300 | | Tobas riolíticas a traquíticas, en bancos gruesos y delgados aglomerados volcánicos, en menor proporción andesitas. |
| 83.6 ±0.2 89.8 ±0.3 | MESOZOICO | CRETÁCEO | SUPERIOR | Santoniano Coniaciano | Formación Celendín | 200 | Estratos delgados de Calizas, margas y lutitas amarillentas. Ambiente Marino poco profundo | |
| 93.9 | | | | Turoniano | Formación Cajamarca | 600-700 | Calizas gris azuladas, puras, con delgadas intercalaciones de margas. Calizas macizas en estratos gruesos coloración gris oscura. Ambiente marino profundo | |
| | | | | | Grupo Quilquiñán y Fm. Mujarrún | 120-500 | Calizas nodulares macizas, margas y lutitas pardo-amarillentas fosilíferas. Ambiente marino somero. | |
| 100.5 | | | | Cenomaniano | Gpo. Pullucana Formación Yumagual | 400-700 | Calizas arcillosas, arcillitas calcareas en estratos gruesos. Ambiente marino poco profundo. | |
| | | | | | Albiano | Formación Pariatambo | 150-200 | Calizas gris parduzcas fétidos, fosilíferas. Margas y escasos niveles de lutita. Marino profundo. |
| | | | | | | Formación Chúlec | 200-300 | Calizas arenosas, lutitas calcáreas y margas. Marino poco profundo. |
| ~113.0 | | | INFERIOR | | Formación Inca | 80-150 | Areniscas calcáreas, limolitas y arcillitas ferruginosas, estratos gruesos. | |
| ~125.0 | | | | Aptiano | Gpo. GOYLLARISQUIZGA Formación Farrat | 300-500 | Transición a la Fm. Inca, intercalación de areniscas y limos. Areniscas grano medio en estratos de un metro, con oxidación. Continental | |
| ~129.4 | | | | Barremiano | Formación Carhuáz | 350-500 | Areniscas grano fino gris verdosas, estratos delgados con bioturbación, intercalado con limolitas y arcillitas. Limoarcillitas gris rojizas con nódulos de óxido de hierro. Transicional. | |
| ~132.9 | | | | Hauteriviano | Formación Santa | 100-150 | Lutitas grises y calizas margosas gris azulinas. Marino poco profundo. | |
| ~139.8 | | | | Valaginiano | Formación Chimú | 80-600 | Areniscas grano fino, gris blanquecinas, pasa en forma transicional a la Fm. Santa. Areniscas gris blanquecinas, estratificación cruzada. Netamente continental. | |
| ~145.0 | | | | Berrisiano | | | | |
| 152.1 ±0.9 157.3 ±1.0 163.5 ±1.0 | JURÁSICO | SUPERIOR | Titoniano Kimmeridgiano Oxfordiano | Formación Chicama | 500 | Lutitas negras, laminares y deleznales con intercalaciones de areniscas grises y horizontes arcillosos. Tonalita/granodiorita. | | |

Figura 10. Columna estratigráfica de Cajamarca

Fuente: INGEMMET, Modificado por Herrera, (2012)

3.6.2.1. Grupo Goyllarisquizga - Formación Chimú.

Esta formación aflora en la parte sur de la zona de investigación, y abarca la extensión de los cerros: Ventanilla, Huayllaconga, La colpa y Huacariz; la secuencia es apreciable en la extensión de las quebradas Corgasmayo y De La Encañada, los estratos consisten en arenisca de grano medio a grueso, con mayor porcentaje de cuarzo.

Los estratos tienen una coloración rojiza por presencia de patinas de óxidos de hierro, también se observa que los estratos se encuentran muy fracturados, generando discontinuidades que cortan de manera perpendicular a la estratificación, la estratificación tiene una orientación predominante de N 310° (Azimut), y buzamiento de 60° NE.



Foto 1. Afloramiento de estratos de arenisca de la Formación Chimú.

3.6.2.2. Depósitos cuaternarios:

Son depósitos de sedimentos no consolidados que se encuentran en la mayor parte de la zona central y norte del área de investigación, donde se ubican los cantros poblados de La Colpa, Agopampa, Yanamarca, Yanamango, Aparinaco y Pariamarca. En su mayor parte son depósitos Coluvio-aluviales y fluviales del holoceno que fueron originados por el transporte de sedimentos como consecuencia de la erosión en las colinas y afloramientos rocosos de partes elevadas (montañas) zona sur del área de estudio, estas se encuentran representadas en las quebradas Pariamarca, Agocucho y De La Encañada; sobre este tipo de depósitos encontramos el acuífero libre de la Colpa.

A) Depósito Coluvio-Aluvial: Se encuentran en las faldas del cerro La Collpa y formando la ladera del valle que se encuentra en la margen central y norte del área de investigación, se definen como sedimentos heteroclasticos conformados por arcilla, gravas y cantos.



Foto 2. Depósito coluvio-aluvial en la falda del cerro Collpa margen este, donde se aprecia sedimentos de arcilla, limos, gravas y cantos, mostrando clastos sub angulosos a sub redondeados.



Foto 3. Se observa la presencia de clastos heterogéneos de tamaño entre 5cm a 40cm, mal clasificados y con clastos angulosos a subangulosos.

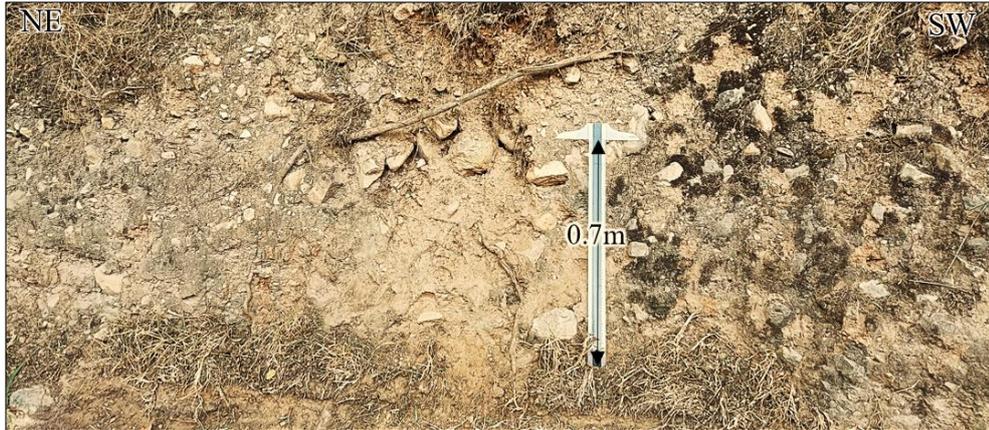


Foto 4. Depósito coluvio-aluvial en la falda del cerro Collpa margen oeste, donde se aprecia sedimentos de arcilla, gravas y cantos, siendo el predominante la matriz arcillosa.

B) Depósito Fluvial: Se encuentran en los cursos de las quebradas que existe en el área de estudio, quebrada Pariamarca, Agocucho y De la encañada, están formados por la acumulación de sedimentos que son transportados por el flujo de agua, y depositados en las riberas de las quebradas Pariamarca, De La Encañada, Agocucho y Corgasmayo. Consisten en sedimentos heteroclásticos como son gravas gruesas y finas, arenas sueltas y limoarcillosos.



Foto 5. Depósito aluvio-fluvial ubicado en la quebrada Agocucho, conformado por sedimentos de limos, gravas y cantos heterogéneo subangulosos a subredondeados.

3.6.3. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS.

La microcuenca La Colpa presenta tres unidades hidrogeológicas, un acuífero fisurado correspondiente a la Formación Chimú, que aflora al sur de la microcuenca, un acuífero poroso que corresponde a los sedimentos no consolidados, depósito coluvio-aluvial y fluvial, que se encuentran al norte de la microcuenca, y un acuítardo que corresponde a la formación Chicama, la cual infrayace a la Formación Chimú y es inferida como borde confinante en el modelo hidrogeológico.

➤ **Acuífero fisurado:**

Este tipo de acuífero lo encontramos en la parte sur de la microcuenca La Colpa, comprende afloramientos de roca presentes en los cerros Ventanilla, Huayllaconga, Huacariz y Collpa, conformado por estratos de roca arenisca, que están fuertemente fracturadas logrando porosidad secundaria, y altos valores de conductibilidad Hidráulica, este acuífero corresponde a los estratos de la Formación Chimú, que se encuentra aflorando en la margen sur de la microcuenca, y los estratos presentan buzamiento de 60° con dirección NE o 310° de azimut.



Foto 6. Estratos de areniscas fracturadas, que presentan alta conductividad hidráulica.

➤ **Acuífero poroso (Sedimentos no consolidados):**

Este tipo de acuífero ocurre en los depósitos de sedimentos no consolidados que se encuentran en la microcuenca, mayormente en la parte central hacia el norte de la microcuenca La Colpa, iniciando por el sur desde las faldas de los cerros Yutupampa, Ventanilla y Collpa extendiéndose por norte hasta el cerro Iscoconga. Los sedimentos no consolidados tienen mayor presencia de gravas, arenas y limos, que conforman al acuífero libre, con una profundidad de napa freática entre 0.5 a 0.6 m en la zona central de la microcuenca.



Foto 7. Acuífero poroso en sedimentos no consolidados, donde se observa la profundidad de la napa freática a 0.6m de profundidad.

3.6.3.1. Conductividad hidráulica:

Para el acuífero de la Formación Chimú, el rango de conductividad hidráulica promedio es de $9.66E-4$ m/s y para el acuífero libre de sedimentos no consolidados es de $4.53E-5$ m/s, y. El valor de las conductividades se determinó mediante los ensayos de infiltración, como se muestra en la Tabla 5, que fueron tomadas en diferentes sectores del acuífero.

- **En Acuífero Libre:** Se realizaron pruebas de infiltración con carga constante en diferentes sectores del acuífero libre, para determinar la conductividad hidráulica.



Foto 8. Ensayo de infiltración, para determinar la conductividad hidráulica en depósitos no consolidados.

- **En Acuífero Fisurado:** las pruebas se realizaron sobre la Formación Chimú, la cual aflora en la microcuenca de estudio (Sector sur).



Foto 9. Ensayo de infiltración sobre la Formación Chimú, que presenta estratos fuertemente fracturados.

- **En Quebradas:** también se realizó ensayos sobre las quebradas, para determinar la conductividad hidráulica que tiene el material fluvial, y

determinar el aporte que recibe el acuífero cuando las quebradas presentan flujo en temporada de precipitación.



Foto 10. Ensayo de infiltración, sobre sedimentos de origen fluvial en la quebrada Agocucho.

Tabla 6. Valor de la conductividad hidráulica de los ensayos de infiltración realizados en campo.

| N° ENSAYO | Conductividad Hidráulica (K) (m/s) |
|-----------|------------------------------------|
| E - 1 | 4.25E-05 |
| E - 2 | 9.51E-04 |
| E - 3 | 5.01E-05 |
| E - 4 | 8.78E-05 |
| E - 5 | 5.27E-05 |
| E - 6 | 9.83E-05 |
| E - 7 | 8.25E-04 |
| E - 8 | 9.43E-04 |

3.6.4. BALANCE HÍDRICO DEL ACUÍFERO

El balance hídrico se determinó mediante procesamiento de los valores correspondiente a la precipitación, temperatura y evapotranspiración recopilados de la estación meteorológica Weber Bauer de la Universidad Nacional de Cajamarca. Se consideró una información histórica desde enero

del año 2018 hasta diciembre del año 2022 para determinar el valor del balance hidrológico.

▪ **Precipitación:**

Se consideró valores diarios en mm de altura, desde el año 2018 hasta 2022, donde se identifica dos temporadas: época húmeda (Octubre – Abril) y época seca (Mayo – Setiembre). La altitud de la estación meteorológica Weber Bauer de la Universidad Nacional de Cajamarca es de 2673 m.s.n.m. y presenta una precipitación media anual de 694.8 mm de altura, como se muestra en la tabla 6.

▪ **Evapotranspiración:**

Los valores fueron tomados a igual que la precipitación desde el año 2018, estos datos se trabajaron para obtener el balance hídrico de la cuenca.

En general, el valle de Cajamarca presenta una evapotranspiración potencial promedio anual de 71.1 mm de altura, estos valores variaron en los diferentes años, obteniendo un valor mínimo en el 69.1 mm de altura en el año 2022 y un valor máximo de 72.5 en el año 2019.

Tabla 7. Cuadro de datos meteorológicos anuales de la cuenca Cajamarca.

| AÑO | Temperatura del Aire (°C) | Humedad Relativa (%) | Evapotranspiración Potencial (mm) | Precipitación (mm) |
|--------------|----------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------|
| 2018 | 26.7 | 61.9 | 69.8 | 730.2 |
| 2019 | 26.6 | 63.8 | 72.5 | 802.2 |
| 2020 | 25.7 | 63.2 | 72.2 | 459.1 |
| 2021 | 28.4 | 66.0 | 71.8 | 752.5 |
| 2022 | 26.9 | 61.8 | 69.1 | 730.1 |
| Media | 27.3 | 63.3 | 71.1 | 694.8 |

Fuente: SENAMHI, (2023).

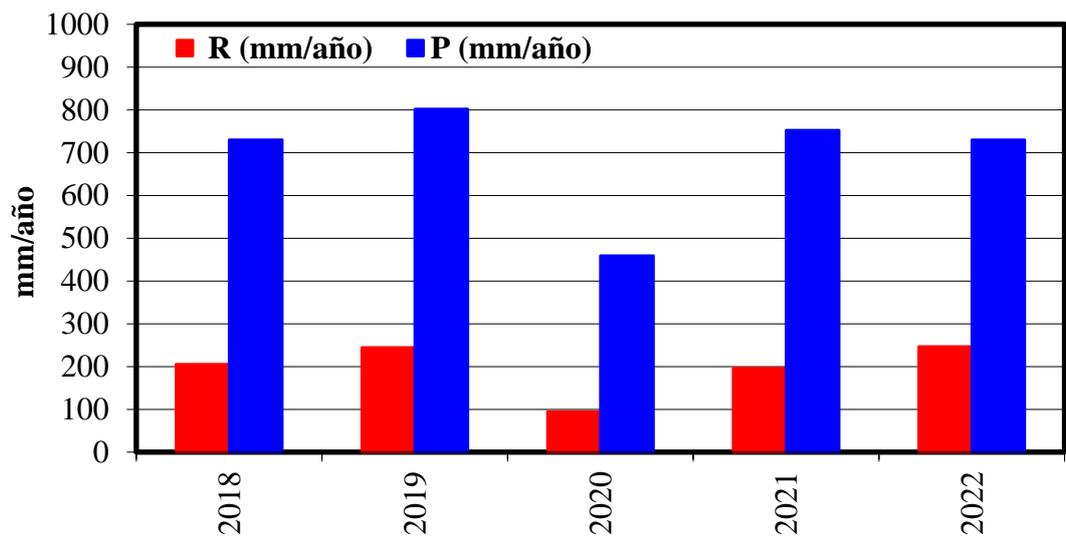
Los datos obtenidos son trabajados en una matriz de Excel, realizada por Vázquez (1998), donde hallamos la recarga anual.

Tabla 8. Cuadro de recarga anual desde los últimos 5 años.

| <i>Año</i> | <i>R (mm/año)</i> |
|--------------|-------------------|
| 2018 | 205.5 |
| 2019 | 244.6 |
| 2020 | 94.6 |
| 2021 | 196.0 |
| 2022 | 247.0 |
| MEDIA | 197.5 |

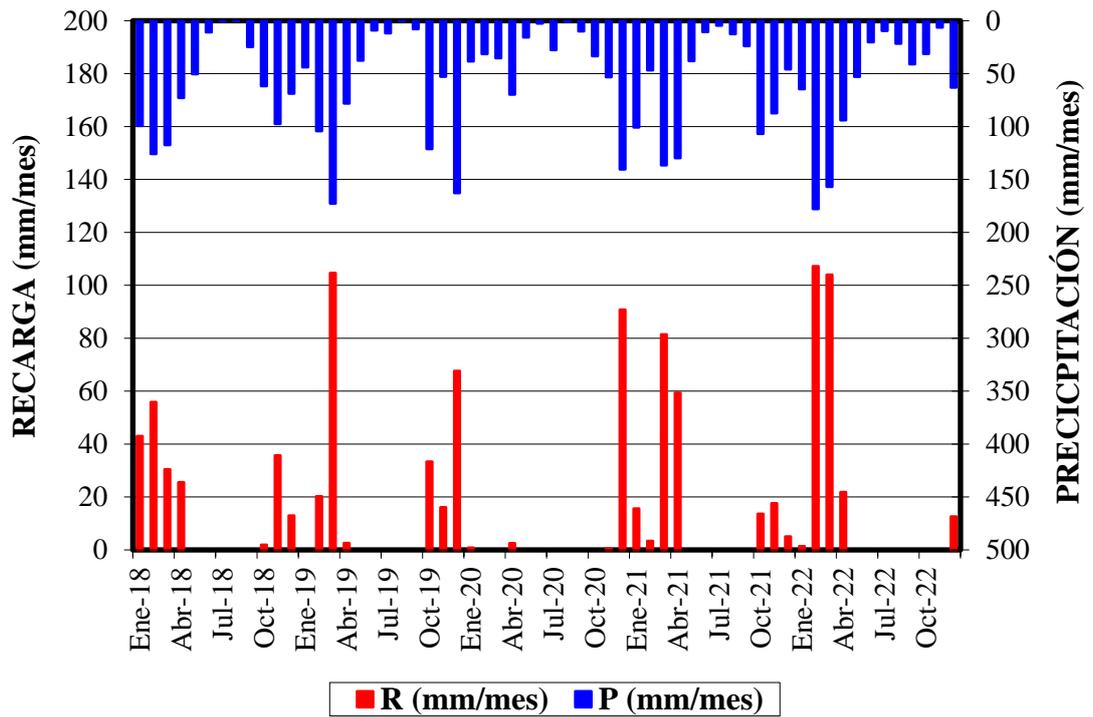
Fuente: SENAMHI, (2023).

Tabla 9. Cuadro de balance hídrico anual de la microcuenca.



Fuente: SENAMHI, (2023).

Tabla 10. Cuadro de balance hídrico mensual de la microcuenca.



Fuente: SENAMHI, (2023).

3.6.5. PROFUNDIDAD DE LA NAPA FREÁTICA.

Para determinar la profundidad de la Napa freática se analizó el reporte de inventario de pozos del valle de Cajamarca, de la información obtenida se identifica que la profundidad del nivel freático esta sectorizado, siendo en la zona noreste el sector con menor profundidad de nivel freático (entre 0.5 a 4.0m de profundidad).

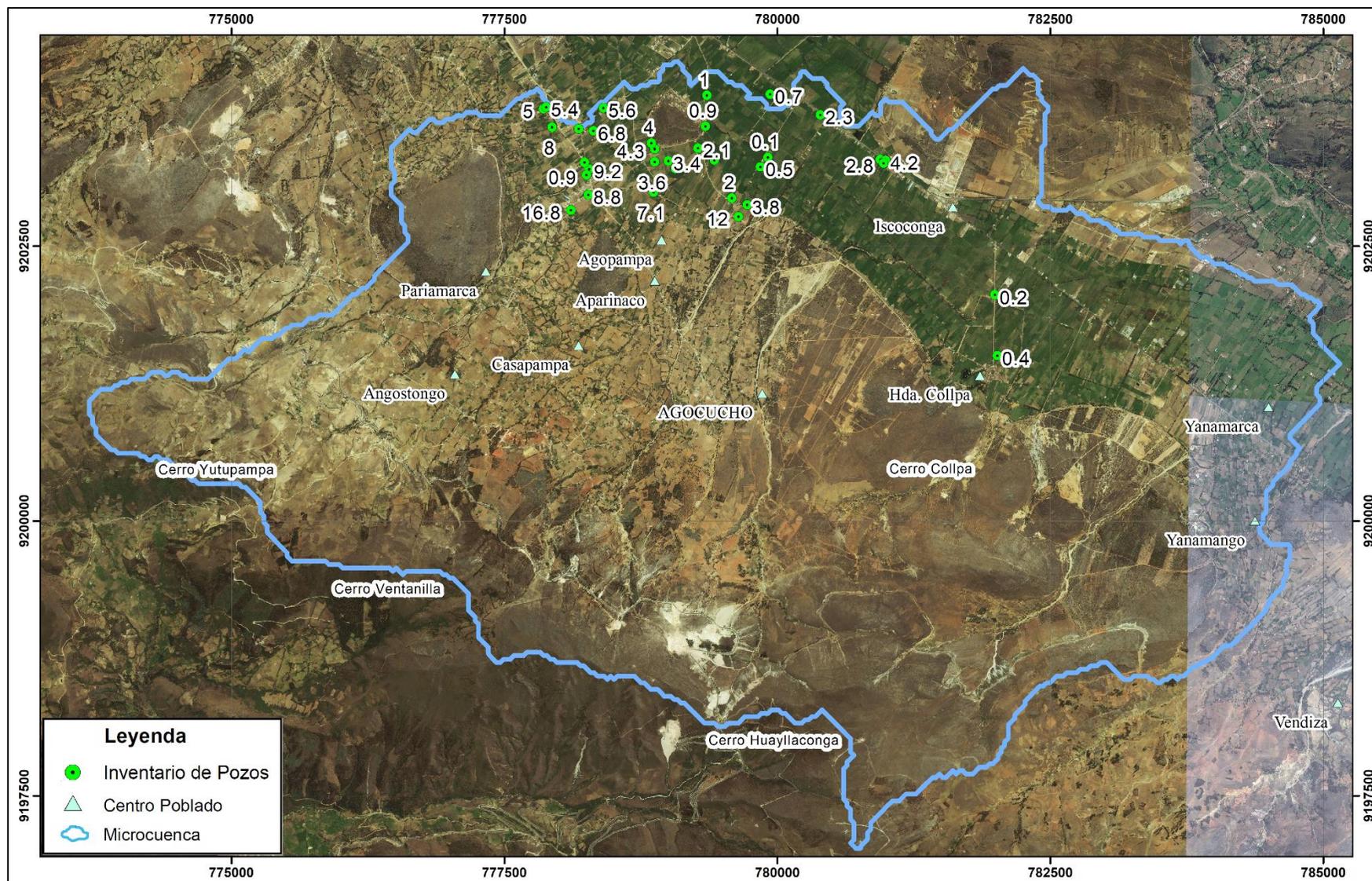


Figura 11. Ubicación de pozos donde se muestra la profundidad del nivel freático en la micro cuenca de La Colpa.

3.6.6. CONDICIONES DE BORDE.

3.6.2.3. Condiciones de flujo.

Para el acuífero, el flujo de agua sobre las quebradas tiene comportamiento estacionario, es decir cada quebrada presenta flujo en la época de precipitación o húmeda, y en la época secas no presentan flujo alguno de agua.

Para el modelo conceptual, las quebradas en la época húmeda actúan como flujos influyentes, aportando agua por infiltración. También hay presencia de flujos canalizados con concreto, que son irrelevantes para el modelamiento y no se van a considerar porque no hay interacción con el acuífero libre.

3.6.2.4. Condiciones de Elevación.

El acuífero presenta una topografía variable, es decir presenta zonas altas (montañas) y zonas bajas (valle). Morfológicamente tenemos zonas de montaña y zonas de planicie, que determinan la configuración para nuestro modelo, haciendo que tomemos valores de carga distintos según la topografía.

3.6.2.5. Bordes impermeables.

En la microcuenca, se considera a la Formación Chimú como borde impermeable estratos impermeables debido a la presencia de capas de lutitas en la secuencia estratigráfica de dichas formaciones, considerando estas capas como límite inferior del acuífero libre; para efectos de la presente tesis se tuvo que inferir la profundidad del basamento a partir de la secuencia estratigráfica y geología estructural existente en el valle de Cajamarca.

3.6.2.6. Pozos de bombeo.

Otra condición, es la presencia de pozos de extracción de agua subterránea, estos pozos dan un comportamiento dinámico al modelo. La extracción por bombeo se determina sobre la formación del inventario de pozos, realizado por el ALA en 2006. Los pozos que se encuentran en la zona son 32 de los 126 pozos inventariados en Cajamarca; la mayoría de pozos se encuentran ubicados en la zona Norte de la microcuenca, sobre el acuífero libre. (Figura 19). La mayoría de los pozos son usados para riego.

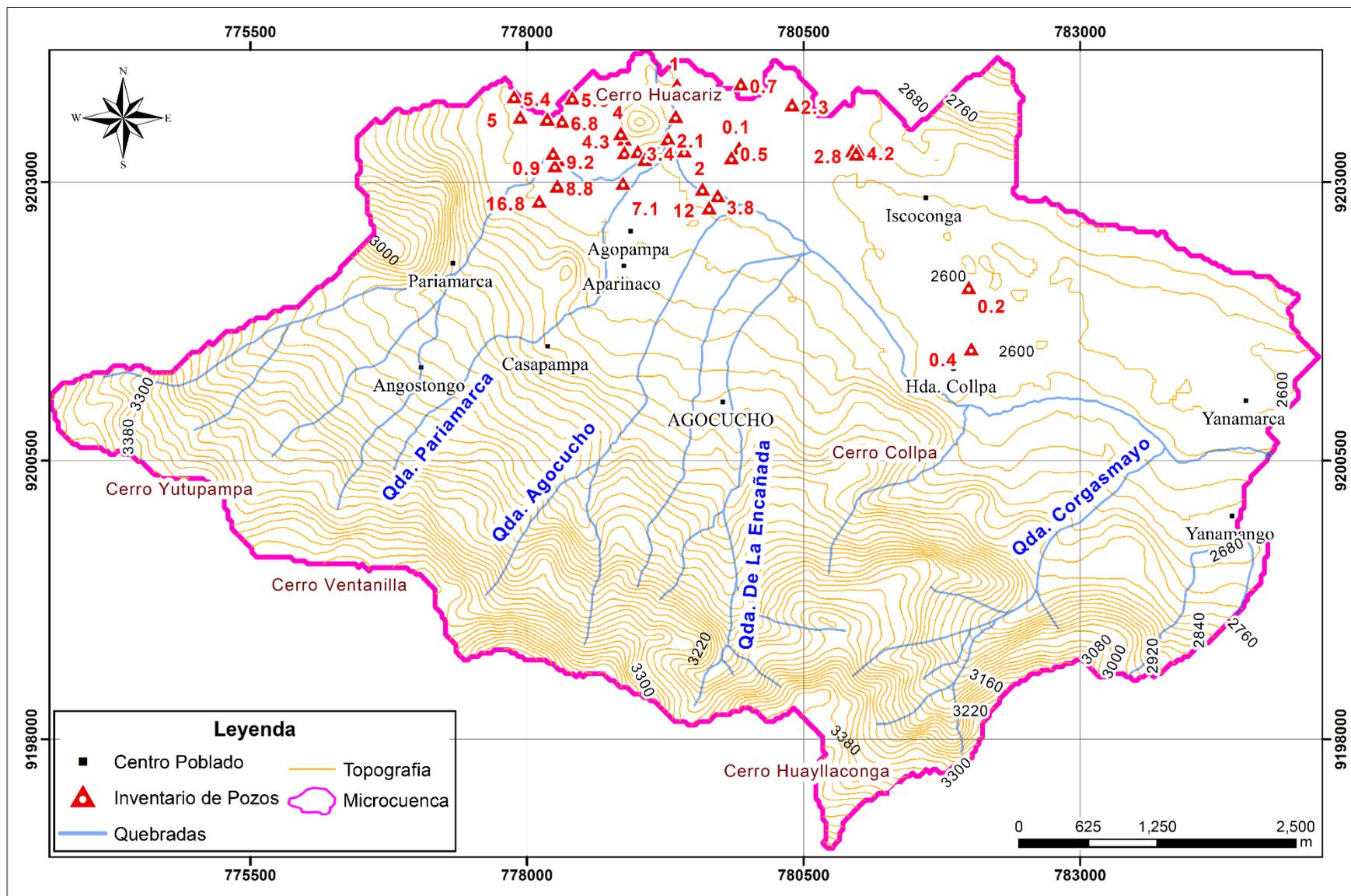


Figura 12. Pozos de agua subterránea en la microcuenca La Colpa.

3.7. SIMULACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO

El modelo numérico del acuífero La Colpa se elaboró usando el programa modular tridimensional de diferencias finitas MODFLOW para la solución de problemas de flujo de Aguas Subterráneas desarrollado por el USGS (United State Geological Service) en 1983.

El software ModFlow usa la aproximación por diferencias finitas para simular el flujo transitorio o variable con el tiempo en tres dimensiones en un medio poroso heterogéneo y anisótropo, simula, también, las condiciones en estado permanente (McDonald y Harbaugh, 1988). Los ejes principales de conductividad hidráulica se alinean con las coordenadas direccionales, asumiendo que el agua tiene densidad constante. Se evalúa la derivada temporal utilizando la aproximación diferencial. Pozos, ríos, drenes, evapotranspiración y recarga son simulados y representados dependientes de la carga y de los términos por los que el usuario ha especificado la carga exterior al modelo. Los acuíferos se representan por aproximación tridimensional espacial. Los nodos de esta aproximación pueden cambiar de confinados a no confinados y recíprocamente, en el desarrollo del proceso informático.

Este software especializado, básicamente se divide en tres módulos: INPUT, RUN y OUTPUT (Figura 13). En el primero se construye el modelo asignando los límites físicos, es decir las condiciones de frontera y el ingreso de datos al modelo (Figura 14). El segundo módulo, es el encargado de ejecutar la interpolación para encontrar las cargas hidráulicas en cada celda, ya sea en estado permanente o transitorio. En este módulo se asignan las condiciones iniciales. El último módulo se encarga de mostrar los resultados del proceso, gráficamente. Se pueden destacar las líneas de flujo, velocidades y líneas equipotenciales.

3.7.1. ELABORACIÓN Y DISCRETIZACIÓN DE LA MALLA.

El Software ModFlow calcula las cargas hidráulicas en cada una de las celdas mediante interpolaciones y toma como paso las dimensiones de las celdas. Entre menor sea esta distancia se tendrá mayor precisión en los resultados. También, debe tenerse en cuenta que en cada celda solo se debe ubicar un pozo; por esta razón e infiriendo que la napa freática se deprime con mayor rapidez en las zonas de mayor explotación de pozos, para la microcuenca La Colpa; se refinó la malla en estas áreas, obteniendo celdas de hasta 2 m de ancho por 2 m de largo.

En áreas de poca o nula información, como en los sectores de la parte sur de la microcuenca, las dimensiones de las celdas fueron de 50 x 50 m.

Al considerarse el modelo conceptual de la microcuenca La Colpa, como acuífero libre y de una sola capa, la discretización vertical del modelo no es necesaria (Anderson y Woessner, A 1992). La división final de la malla, luego del refinamiento que toma en cuenta la densidad y ubicación de los pozos, presenta 37368 celdas activas de las 43551 celdas creadas en la extensión de la microcuenca, estas celdas se distribuyen en 3 capas verticales las cuales simulan el comportamiento de dos acuíferos no confinados y una capa confinante en la base.

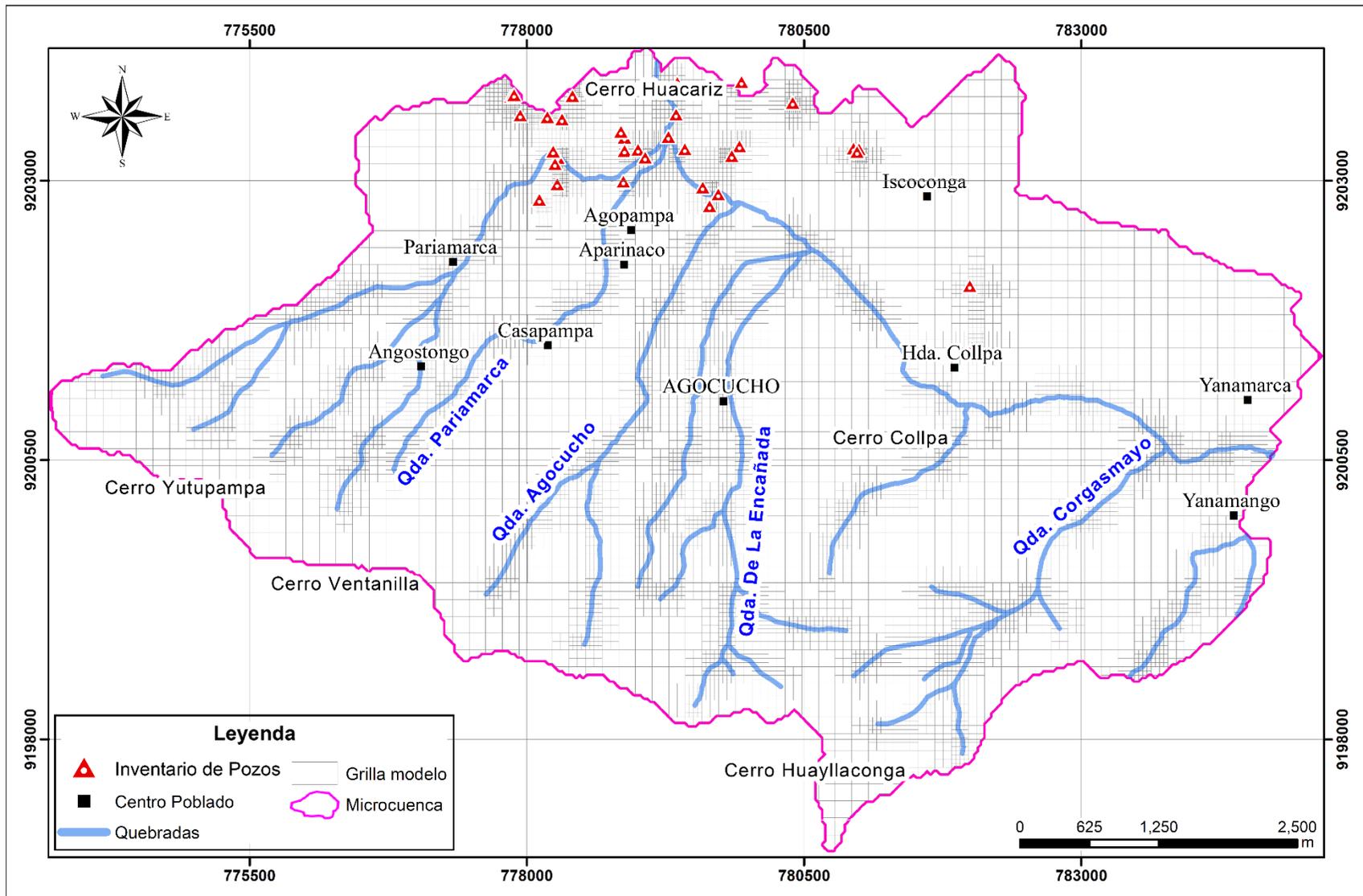


Figura 13. Discretización de la Malla para la microcuenca La Colpa, donde se considera un tamaño de celda menor en los nodos de la quebrada y para los pozos de agua subterránea.

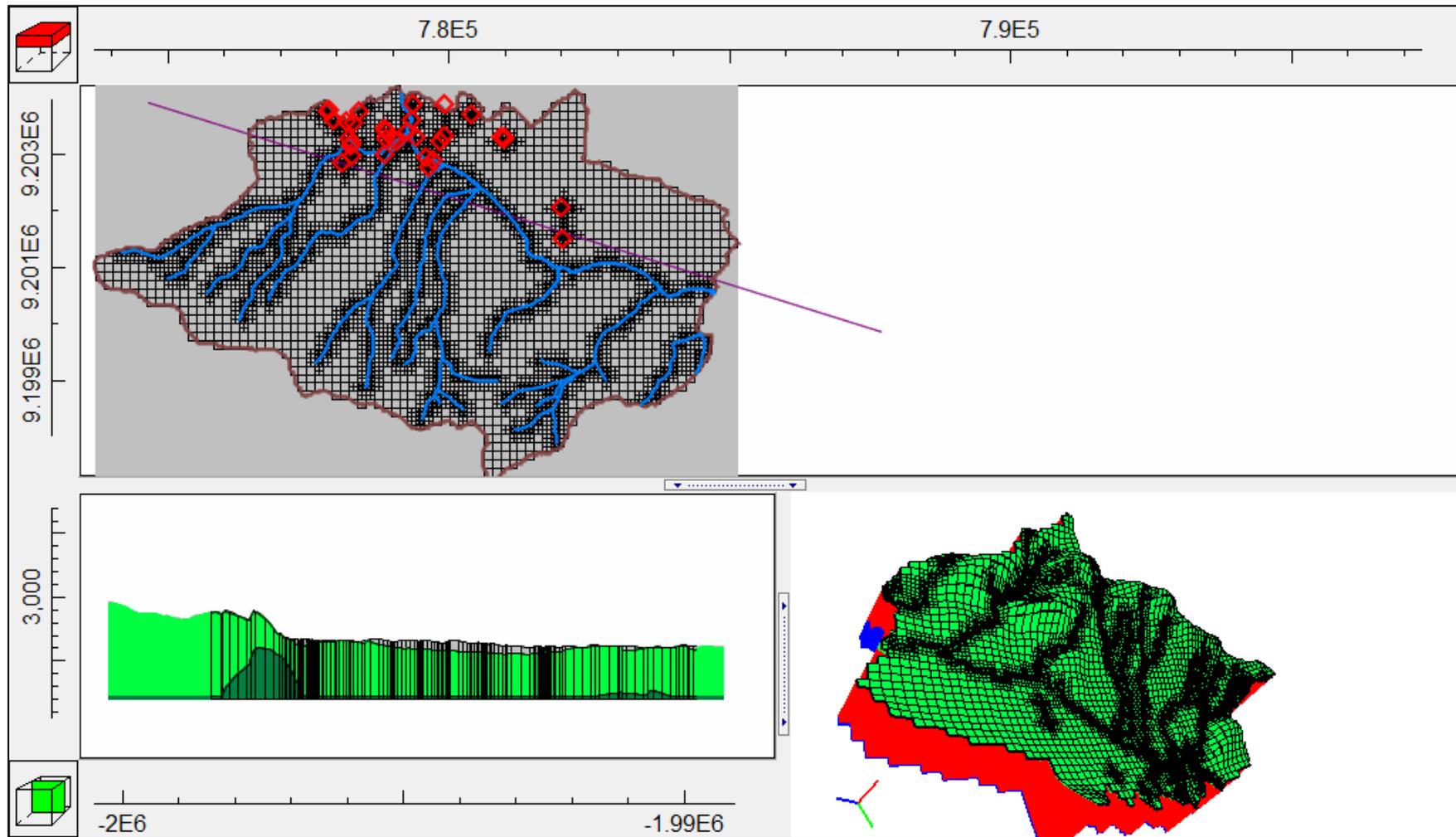


Figura 14. Interfaz gráfica del software ModFlow, donde se procesa el modelo hidrogeológico, mostrando las condiciones de borde y malla discretizada.

3.7.2. IMPUT DE DATOS.

Una vez elaborada la malla, se introduce los datos del modelo conceptual, para después escoger el método numérico de simulación. Se introduce el archivo shapfile que contiene la huella de la microcuenca La Colpa, para discretizar la malla de trabajo, también se importa la superficie topográfica de la cuenca, los drenajes, los pozos, las conductividades hidráulicas, la evapotranspiración, y la recarga. Luego en el software ModFlow se selecciona toda la información dentro del acuífero como activo, para que la simulación se realice solo para la microcuenca.

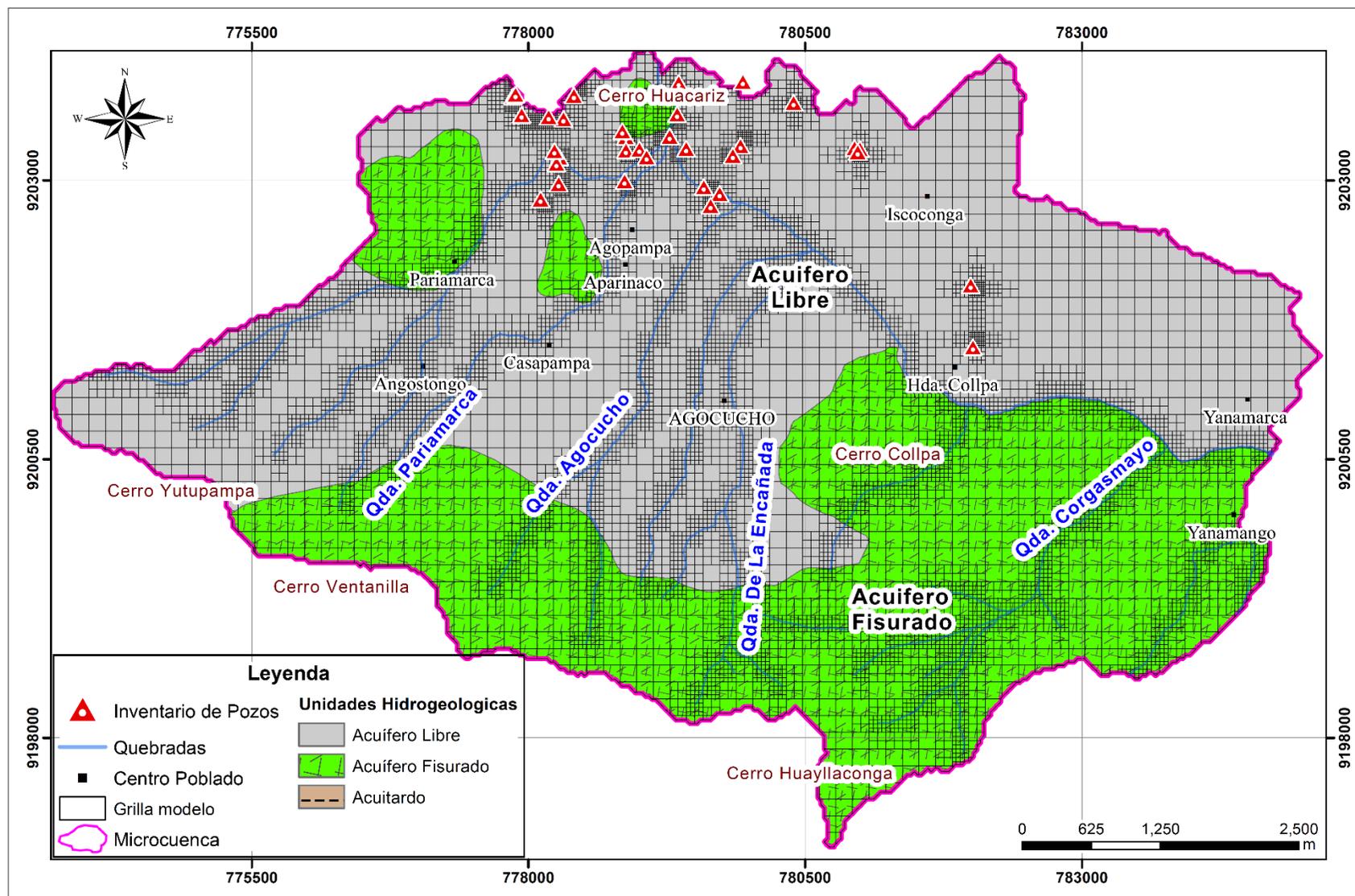


Figura 15. Procesamiento de datos en software ModFlow, que ejecutará la simulación del modelo conceptual.

3.7.3. RUN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO.

3.7.3.1. Calibración del modelo y elección del método numérico.

Para simular el modelo, es necesario elegir el método de interpolación para la solución de la ecuación matricial. El Software MODFLOW permite elegir de cuatro métodos: Conjugada del Gradiente Precondicionado (PCG2, Preconditioned Conjugate Gradient Package), Procedimiento Fuertemente Implícito (SIP, Strongly Implicit Procedure Package), Secciones Sucesivas (SOR, Slice Successive Overrelaxation Package) y Newton Solvers (NWT); siendo el último (NWT), el que fue ejecutado, por ser más rápido y tener una convergencia mucho más suave que los otros métodos, además que ajusta la precisión del modelo, de acuerdo a la extensión de la microcuenca a simular (Ahlfeld et al., 1992).

MODFLOW-NWT es una formulación de Newton para MODFLOW-2005, y es un programa independiente que se destina para la solución de problemas que implica el secado y linealidades rehumectantes de la ecuación de flujo de agua subterránea no confinado. MODFLOW-NWT se debe utilizar con el Upstream-Ponderación (agua ultrapura), el paquete de cálculo de conductancias se activa en el Flujo de bloque centrado (BCF), Propiedad de Capa de flujo (LPF), o paquete de flujo de unidad hidrogeológico (HUF). El paquete Upstream-Ponderación calcula a secuencias no lineales de secado y rehumectación entre bloques mediante el uso continuo de la función de carga en aguas subterráneas, en lugar del enfoque discreto de secado y rehumectación que es utilizado por los paquetes BCF, LPF y HUF. Esto permite aplicar la formulación de NWT para los problemas de flujo de agua subterránea no confinados, porque los derivados de conductancia requeridas por el método de NWT son lisas sobre la gama completa de la carga de un bloque del modelo. El enfoque de linealización NWT genera una matriz asimétrica, que es diferente de la formulación estándar de MODFLOW que genera una matriz simétrica.

Tabla 11. Parámetros de simulación para el solucionador NWT.

| PARÁMETRO | VALOR |
|---------------------------------------|--------------|
| Head tolerance | 0.0001 |
| Flux tolerance | 0.06 |
| Máximo número de iteraciones externas | 100 |
| Matrix solver | CHI MD (2) |
| Model complexity | simple |
| Thickfact | 1.00E-05 |
| Iprnwt | activo |

En cuanto a la calibración del modelo, al simular el modelo, este presenta un porcentaje de discrepancia menor a 1, en términos de modelación es aceptable; lo cual nos indica que el modelo está calibrado con una discrepancia de 0.01%, siendo un error mínimo y aceptable para microfrecuencias de esta dimensión.

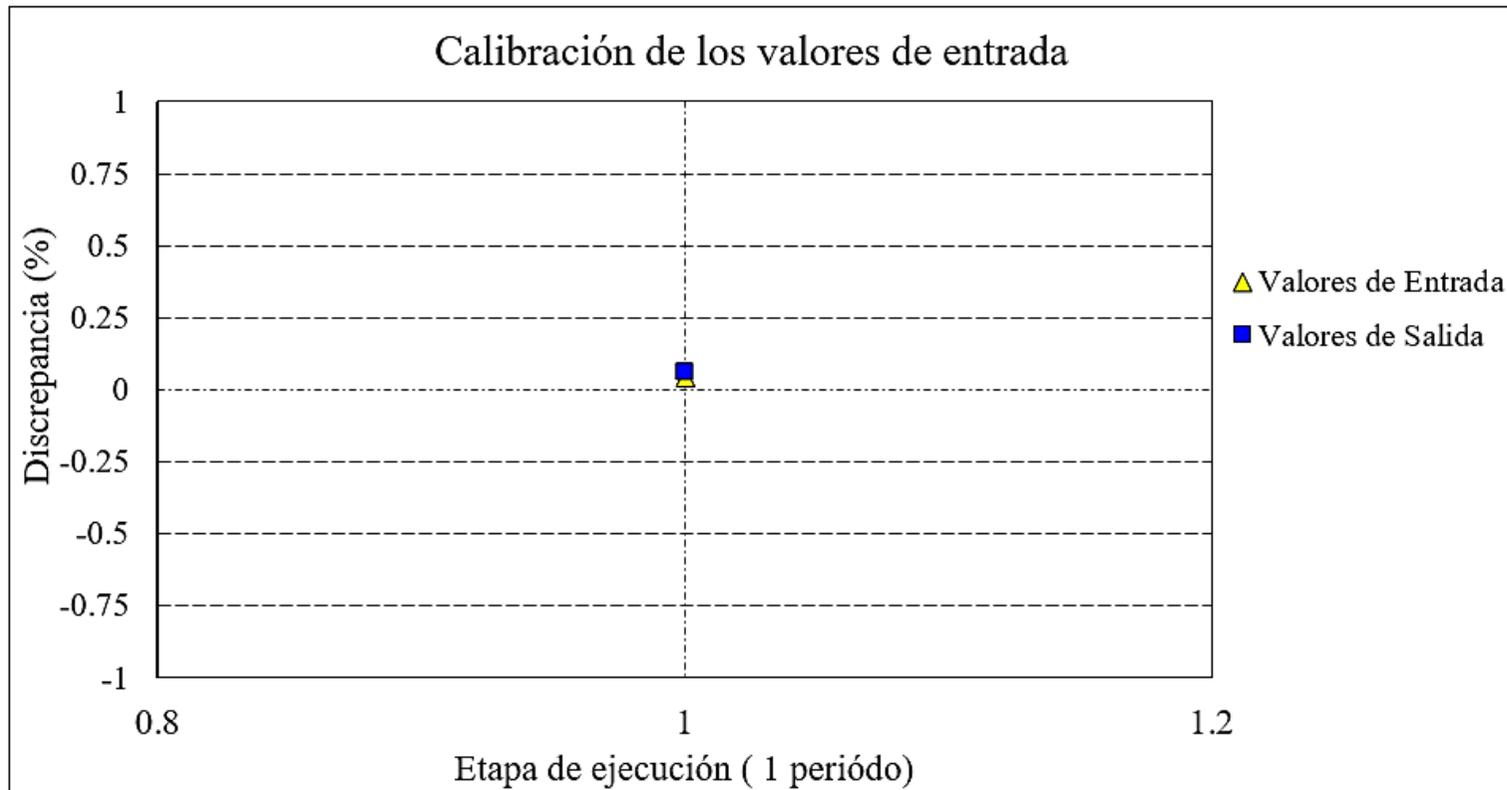


Figura 16. Porcentaje de discrepancia (0.01%) entre los datos reales y los calculados del modelo, para la calibración del modelo.

3.7.3.2. Simulación del modelo.

Los criterios para la simulación del acuífero se dan para condiciones de flujo estacionario de aguas subterráneas, el acuífero recibe una alimentación constante proveniente de la infiltración que se genera después de la precipitación, también tienen influencia por infiltración en el riego de los cultivos.

Los valores de la simulación del modelo hidrogeológico de la microcuenca La Colpa determinan que el acuífero libre tiene mayor aporte que salidas, en el periodo de tiempo establecido.

Tabla 12. Balance Hídrico del acuífero libre, en L/m³

| IN: | | OUT: | |
|-------------------|--------|----------------------------------|---------|
| CONSTANT HEAD | Capa 1 | CONSTANT HEAD | Capa 1 |
| DRAINS | 0 | DRAINS | 1.1E-02 |
| EVT | 0 | EVT | 2.2420 |
| WEL | 0 | WEL | 2.1E-02 |
| RECHARGE | 2.2863 | RECHARGE | 0 |
| IN TOTAL | 2.2863 | OUT TOTAL | 2.2740 |
| IN - OUT = | | 12.32E-03 L/m³ | |

CAPÍTULO IV:

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Del modelo se obtiene el balance hídrico del acuífero, siendo un valor de $12.32 \text{ E-}03 \text{ L/m}^3$. Este balance muestra valores de entrada de flujo de agua al acuífero y salidas, el ingreso de agua se debe a la infiltración por la precipitación que ocurren en la microcuenca, generando recarga de la microcuenca en 2.2863 L/m^3 , la evapotranspiración potencial del acuífero hace perder ingreso de agua por la absorción de la vegetación, siendo este gasto 2.242 L/m^3 , adicional a ello tenemos en la microcuenca La Colpa, pozos de agua subterránea que generan una salida de $2.1\text{E-}02 \text{ L/m}^3$, que reduce la cantidad de agua existente en la microcuenca.

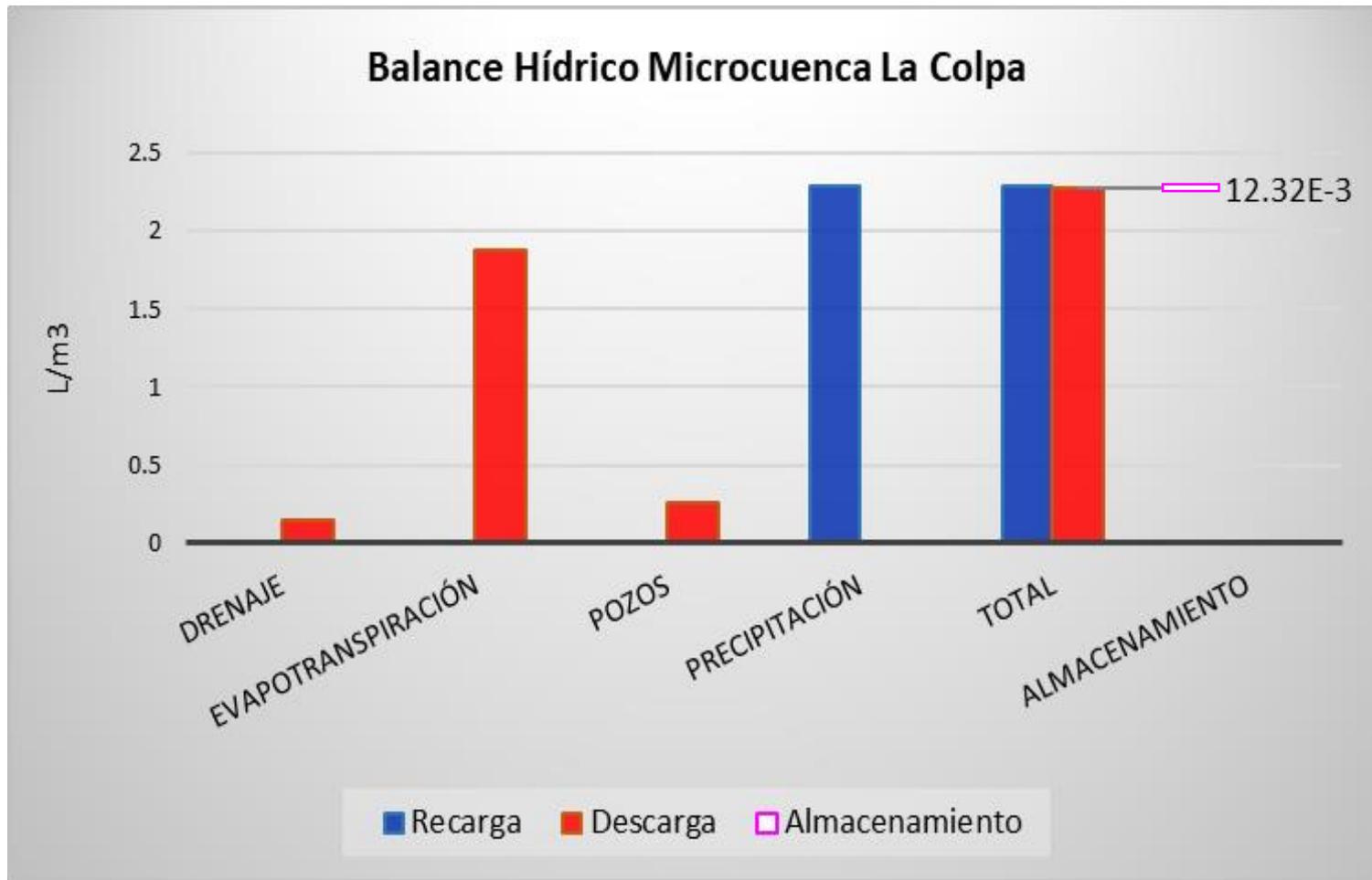
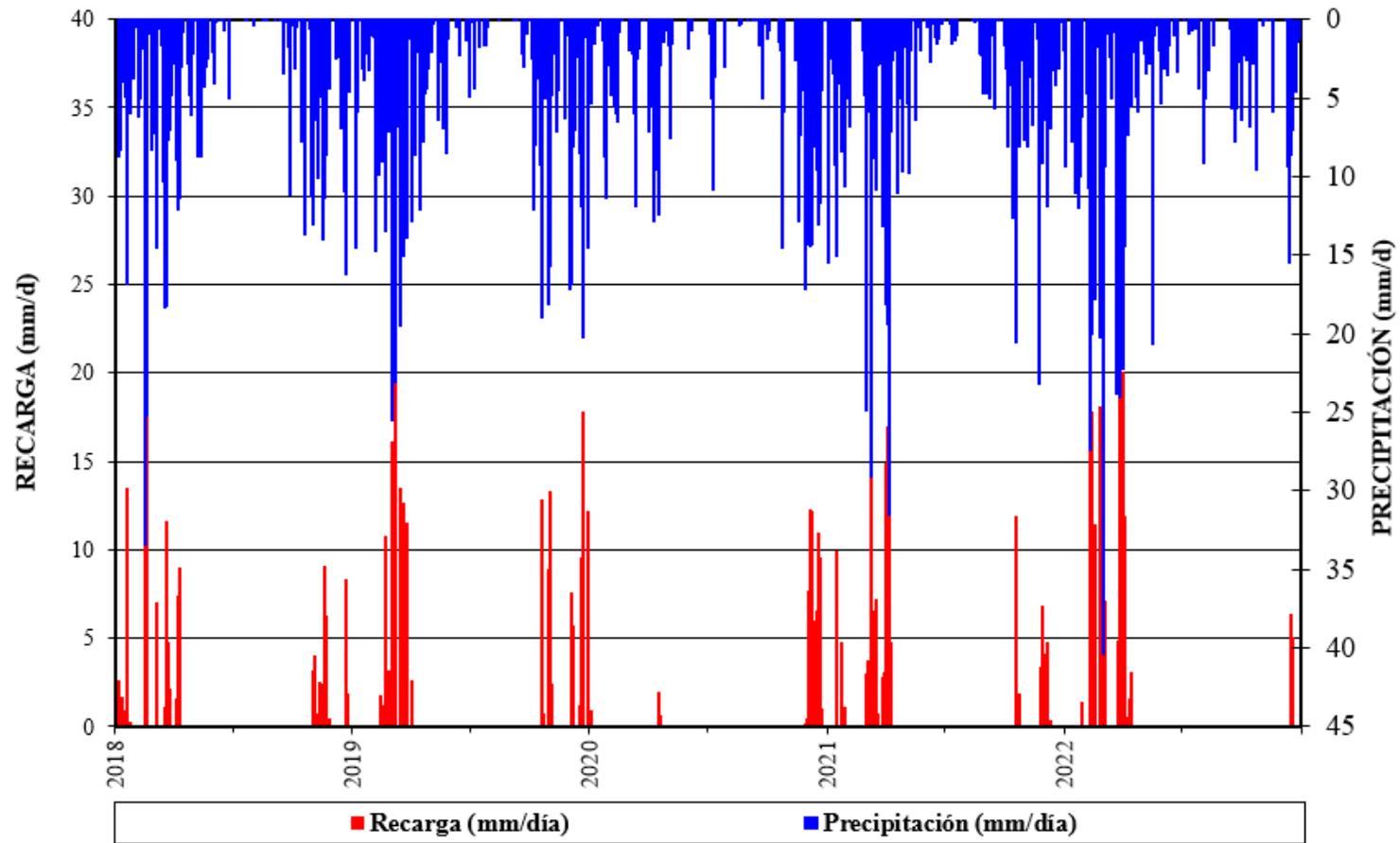


Figura 17. Balance hídrico del acuífero La Colpa.

4.1.1. ANÁLISIS DEL BALANCE HÍDRICO

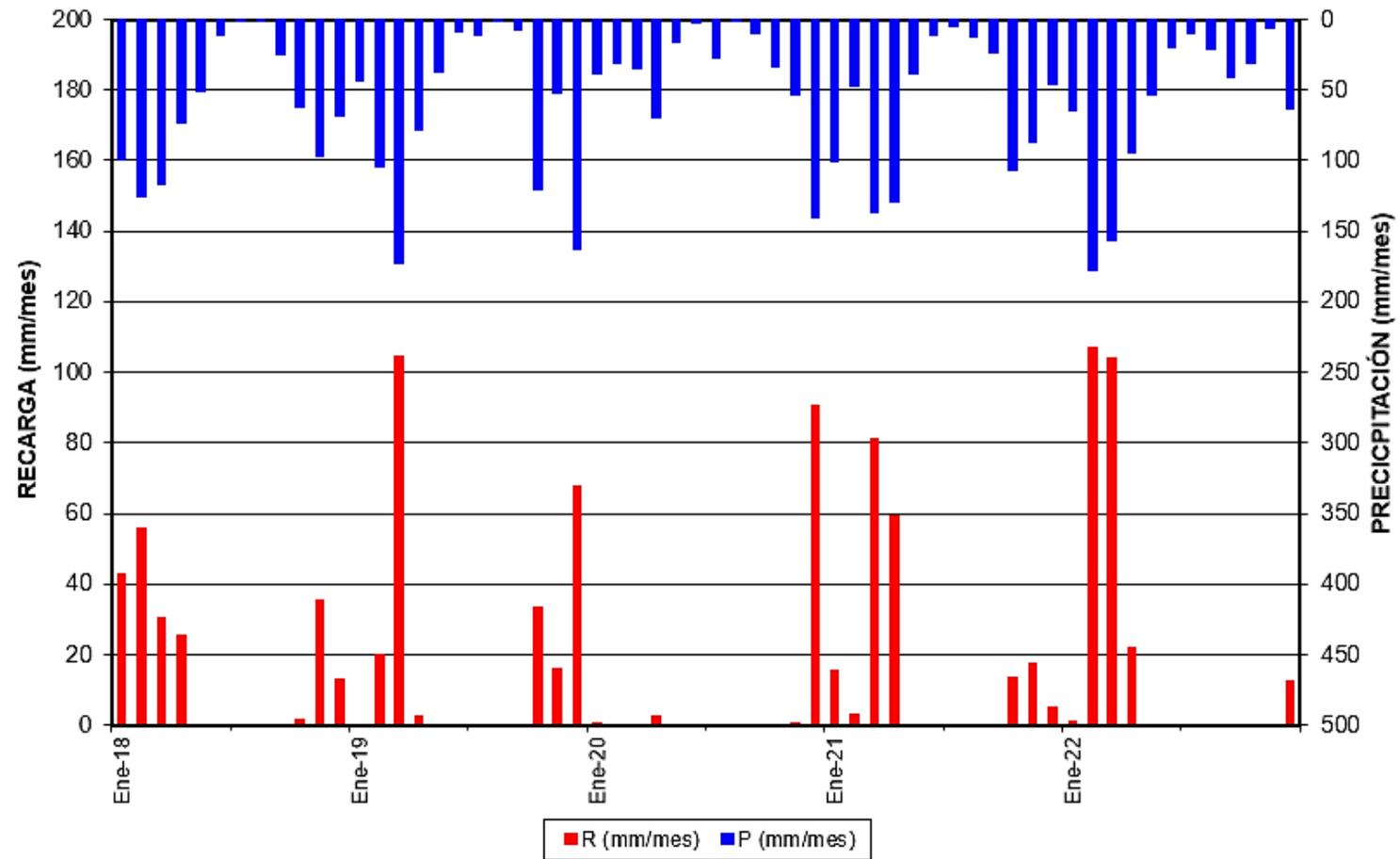
El balance hídrico calculado de la microcuenca, fue hecho de valores provenientes de un espacio temporal de 5 años, desde inicios del 2018 hasta fines del 2022, estos datos meteorológicos fueron recopilados del SENAMHI, que consistió de datos diarios de precipitación, temperatura y evapotranspiración. Estos datos se llevaron a una hoja de cálculo en el cual se ejecutó el balance hídrico, obteniendo valores de la recarga diaria, mensual y anual.

Tabla 13. Balance Hídrico, Precipitación vs recarga para valores diarios en mm/día.



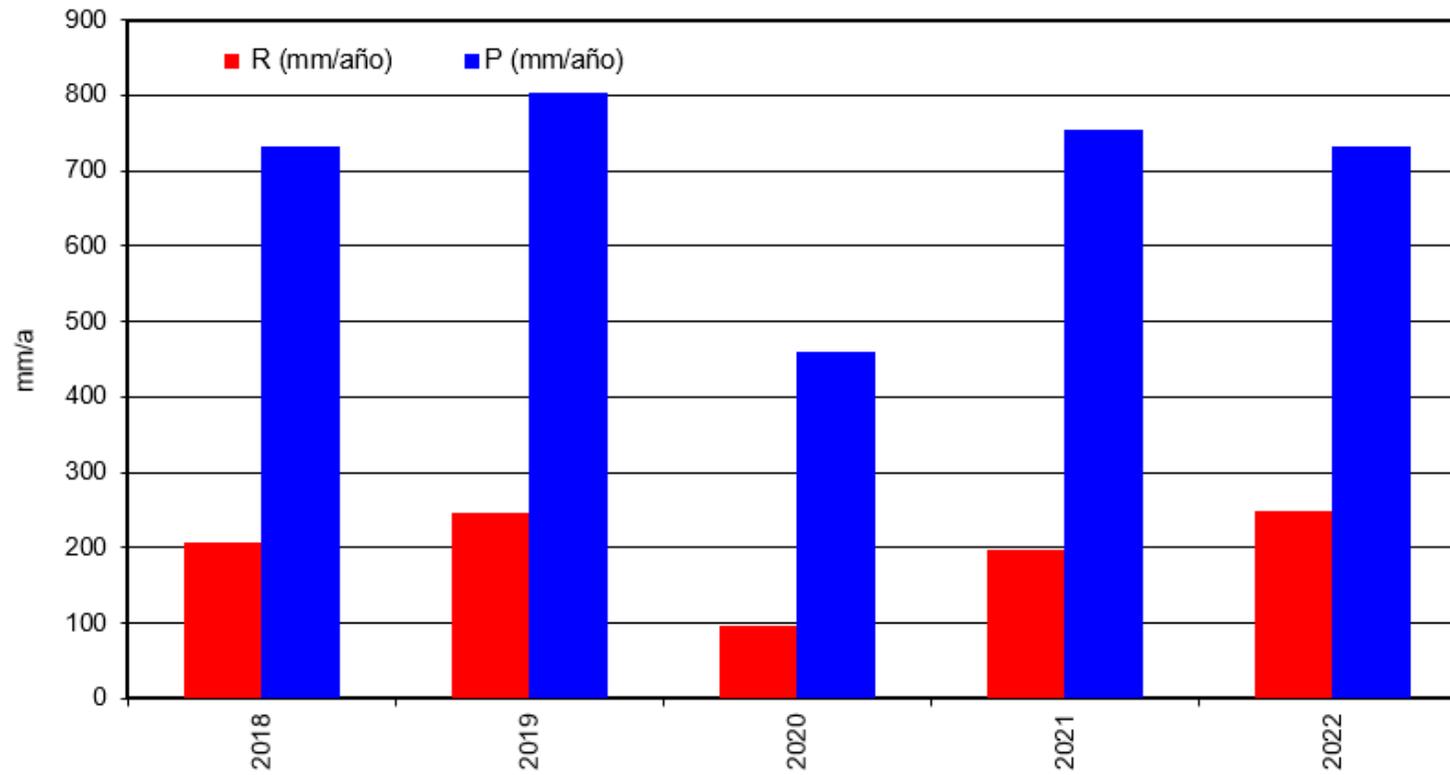
Fuente: SENAMHI, (2023).

Tabla 14. Balance Hídrico, Precipitación vs recarga para valores mensuales en mm/mes



Fuente: SENAMHI, (2023).

Tabla 15. Balance Hídrico, Precipitación vs recarga para valores anuales en mm/año



Fuente: SENAMHI, (2023)

Estos valores, fueron tomados en un espacio temporal de 5 años, para introducir la recarga promedio anual al modelo, necesaria para la simulación del modelo hidrogeológico de la microcuenca La Colpa. Este valor de recarga promedio anual para el modelo es la fuente principal de ingreso de agua hacia el acuífero, debido a que en la microcuenca no hay otras fuentes de recarga como ríos o quebradas con régimen permanente.

4.1.2. ANÁLISIS DE LAS ZONAS DE RECARGA Y DESCARGA.

Las zonas de recarga y descarga son las zonas en donde hay introducción de flujo de agua hacia el acuífero y hacia la superficie respectivamente. Dentro de las principales zonas de recarga tenemos, las zonas de montaña y los afloramientos de roca, que presentan mayor conductibilidad hidráulica, y zonas donde hay recarga estacionaria, como son las quebradas, en la que hay ingreso de agua en las épocas húmedas; las principales zonas de descarga son los manantiales que se mantienen permanentes en el espacio temporal de análisis, además de los pozos de explotación de agua para riego. Estas zonas han sido corroboradas después de la simulación del modelo de la microcuenca La Colpa, donde mediante las líneas equipotenciales del agua subterránea se encuentran estas zonas de recarga y descarga, además de la altura del nivel piezométrico del acuífero libre simulado.

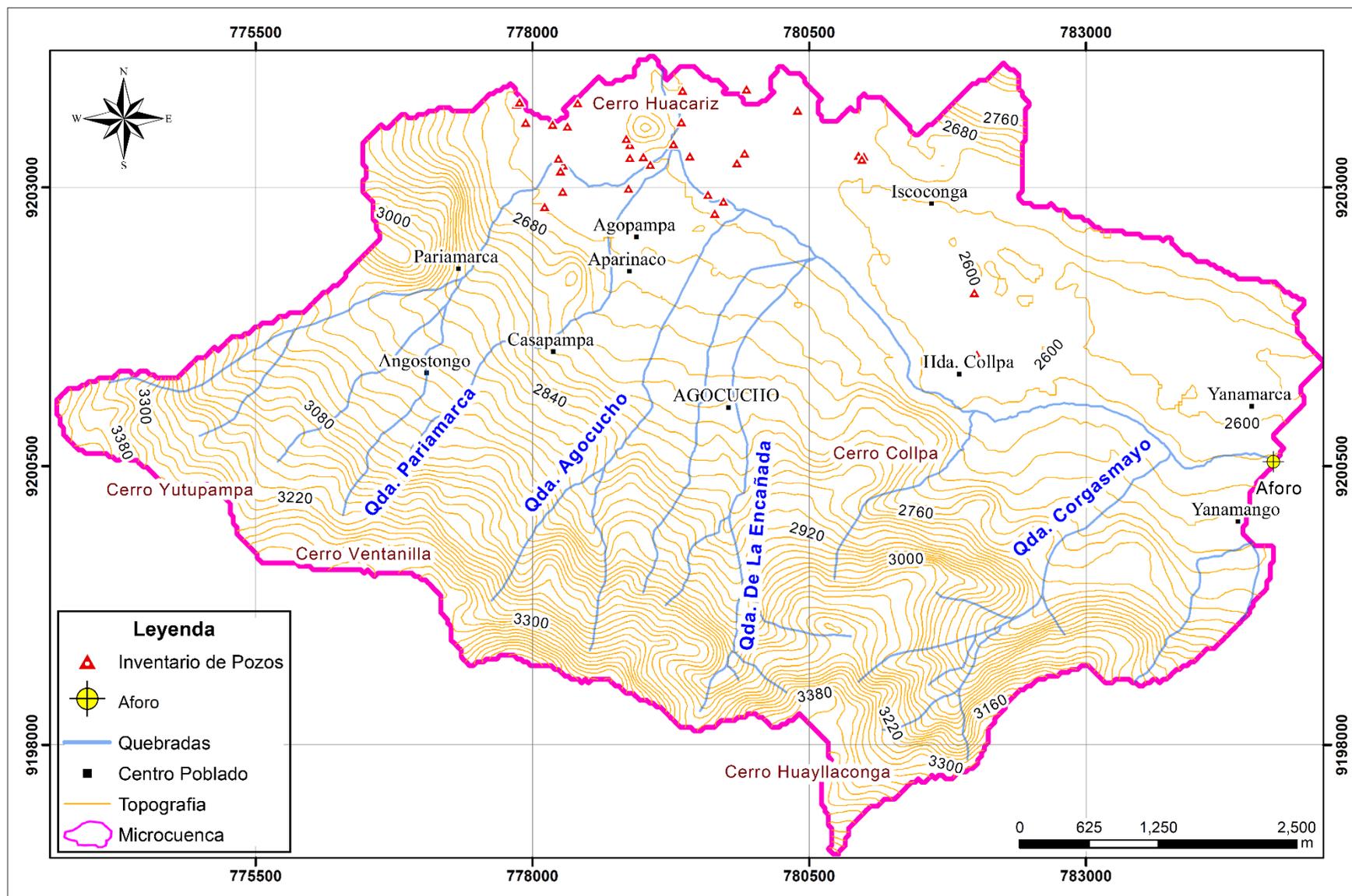


Figura 18. Topografía de la microcuenca, donde se muestra las zonas altas de color amarillo y naranja, que actúan como zonas de recarga.

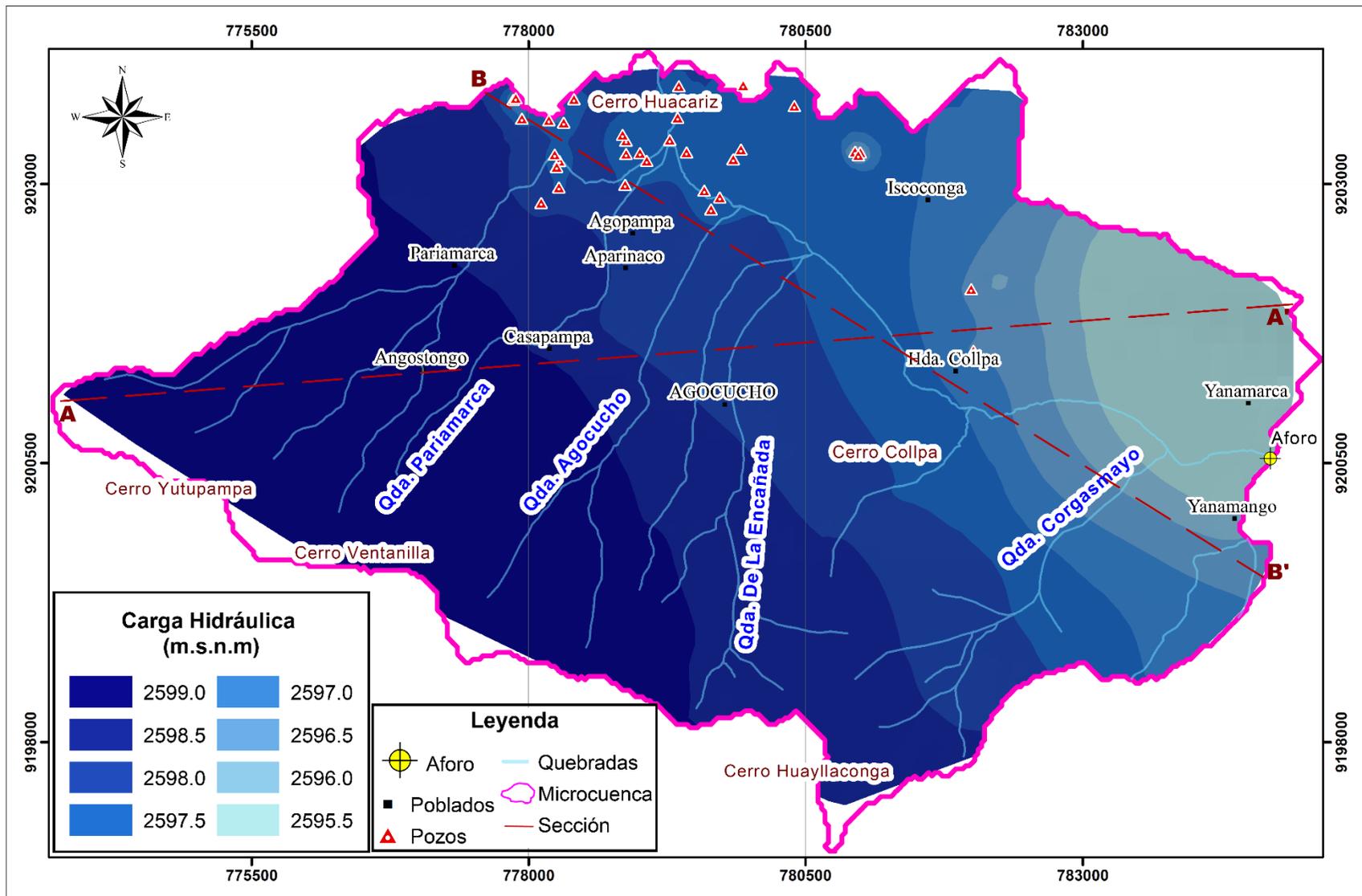


Figura 19. Se muestra el acuífero libre con sus líneas equipotenciales.

Como se muestra en la figura 18 la zona de recarga ocurre en el borde suroeste de la microcuena La Colpa, lugar donde existe afloramiento de rocas fracturadas (Fm. Chimú) y pendientes poco pronunciadas favoreciendo la infiltración por escorrentía superficial. La microcuena La Colpa, también recibe aporte de las quebradas y ríos por conductancia en la época húmeda siendo el material fluvial un material que presenta conductividad hidráulica alta.

En cuanto a las zonas de descarga como se nota en los perfiles transversales y longitudinales tomadas del modelo hidrogeológico simulado en MODFLOW, las líneas de flujo tienden a descargar en el sector noreste de la microcuena, cercano a la hacienda La Colpa, para efectos de ubicación; donde se observa ocurrencia de manantiales, de régimen permanente, además de pozos de extracción de agua subterránea. En la zona alta del acuífero, como se observa en la figura, el nivel piezométrico del acuífero libre se encuentra debajo de la superficie topográfica, se mantiene entre la cota 2885 hasta 2630 con un gradiente hidráulico de 8.5° . Como se observa en los perfiles la tendencia del flujo subterráneo del acuífero, se centra en la margen central noreste, razón por la que encontramos el nivel freático cercano a la superficie, profundidades del nivel freático hasta 0.5m.

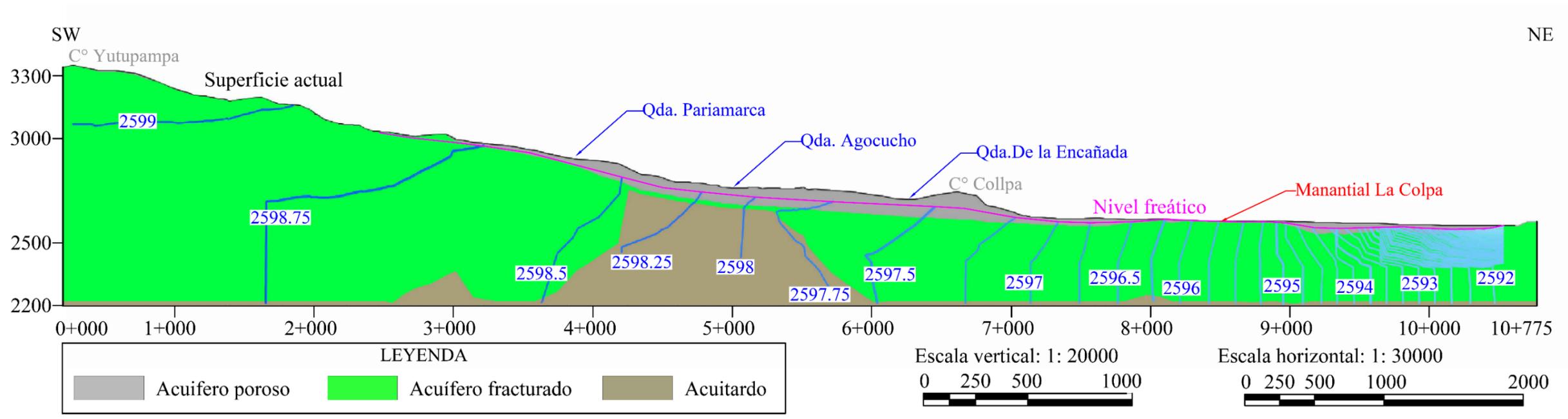


Figura 20. Perfil Longitudinal A-A', corte longitudinal del modelo hidrogeológico de la microcuenca la Colpa.

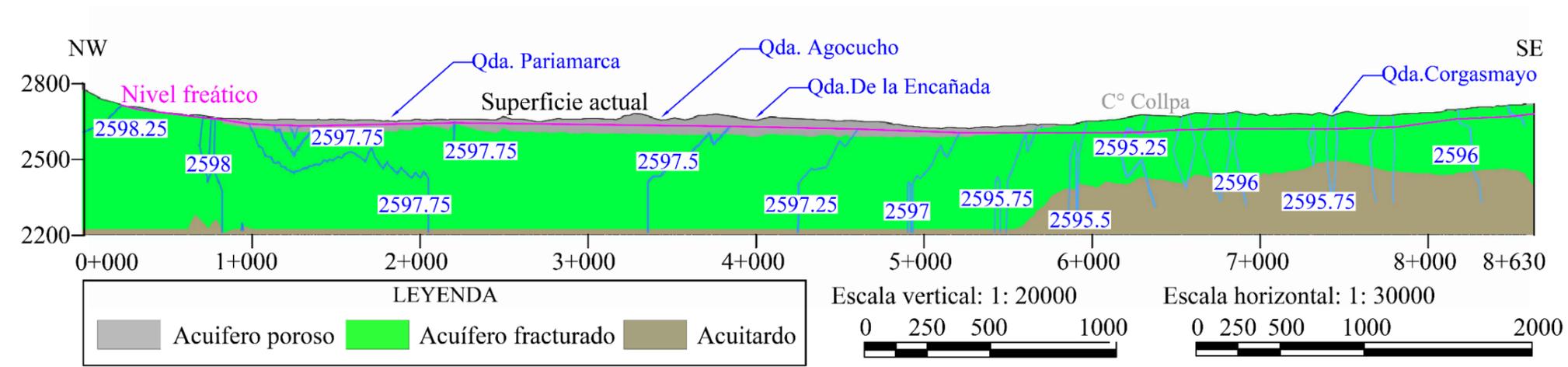


Figura 21. Perfil Longitudinal B-B', corte longitudinal del modelo hidrogeológico de la microcuenca la Colpa.

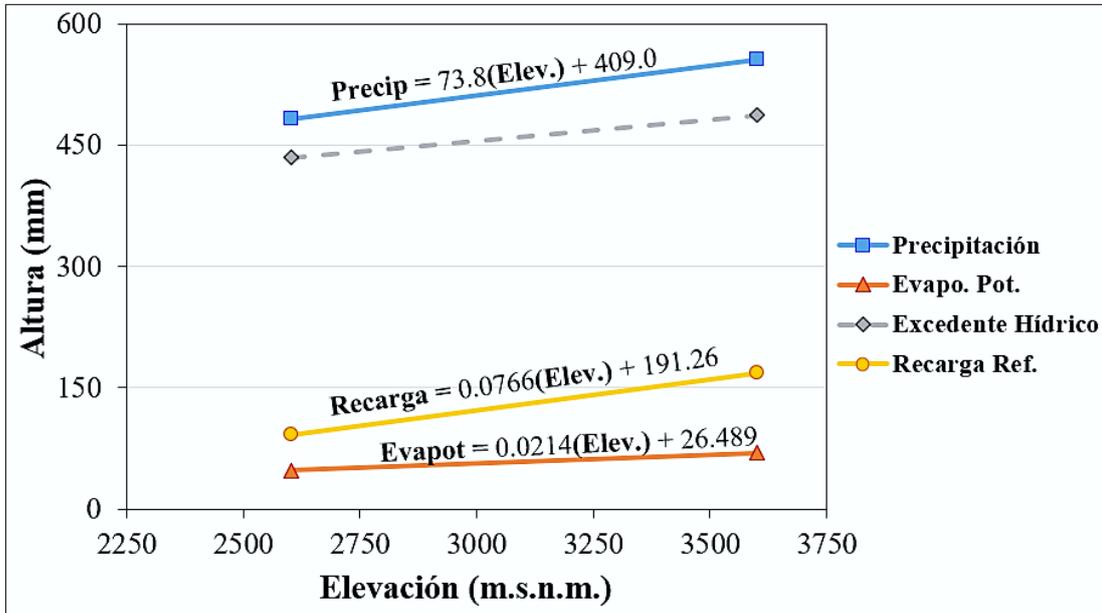


Foto 11. Manantial de régimen permanente, siendo una zona de descarga del acuífero, indicando que el nivel freático se encuentra cerca la superficie, ubicado dentro de la Hacienda La Colpa.

4.1.3. RELACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN SOBRE EL ACUÍFERO

Los valores de precipitación y evapotranspiración de la microcuenca facilitaron obtener el valor de la recarga anual que experimenta el acuífero, y simular el modelo hidrogeológico en el software ModFlow. Se empleó una distribución lineal (la ecuación de la recta) para aplicar la recarga sobre la topografía de la microcuenca, donde interviene: recarga, los afloramientos de roca fracturada y sedimentos no consolidados (depósitos aluviales y fluviales).

Tabla 16. Relación entre Precipitación, evapotranspiración y recarga con la elevación topográfica del acuífero.



El gráfico anterior, trabajamos con la relación lineal entre recarga y la altura, esta relación viene dada por la ecuación de cada parámetro meteorológico con la topografía del acuífero, por lo que cabe mencionar que mientras más alto se encuentre la zona de precipitación, habrá mayor recarga de la que se obtiene de la parte baja (Coras,2006).

De los resultados presentados en la tabla 15 se genera la distribución de la recarga anual de la microcuenca, como se muestra a continuación.

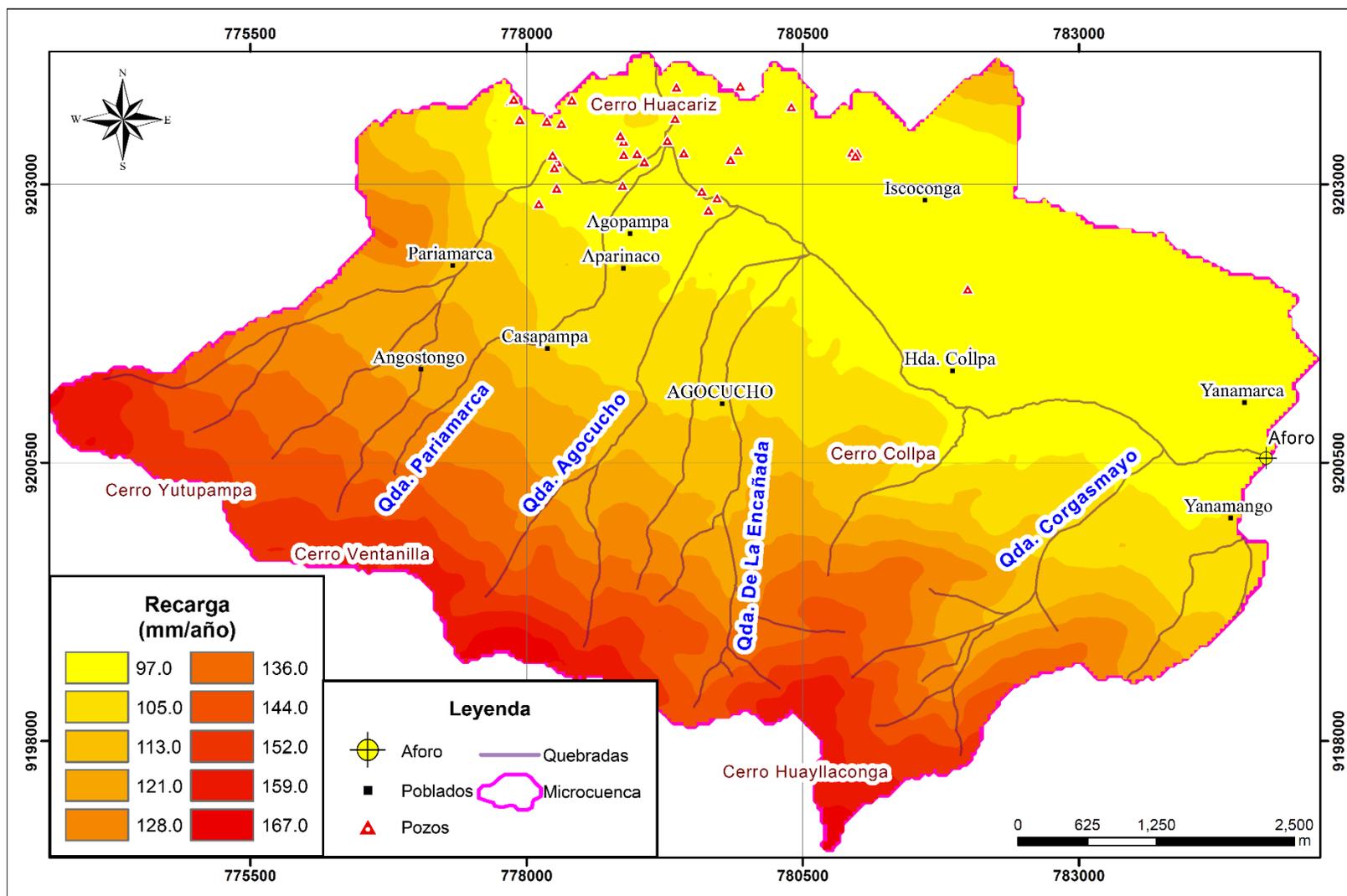


Figura 22. Balance hídrico donde se observa la distribución de la recarga según la topografía de la microcuenca La Colpa.

4.2. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La hipótesis con la que se trabajó es la siguiente:

- El modelo hidrogeológico del acuífero libre en el Centro Poblado de la Colpa, está relacionado con la precipitación, evapotranspiración, y las zonas de recarga y descarga.

Como se demostró anteriormente en los análisis de resultados para cada objetivo, se logró determinar que los factores que condicionan el modelo hidrogeológico del acuífero libre La Colpas son: la recarga, la descarga, la precipitación y evapotranspiración, debido a que la ausencia de cualquiera de estos factores resultaría en una variación brusca del modelo durante la simulación.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

El modelamiento hidrogeológico del acuífero libre en la Colpa presenta una geometría irregular, con dirección sur-oeste a nor-este definiendo una gradiente hidráulica de 0.66° y un almacenamiento de $12.32E-3 \text{ L/m}^3$

Las zonas de recarga en la microcuenca ocurren en el margen Suroeste de la microcuenca (Afloramiento de roca fracturada), y la descarga en la parte central de la microcuenca, con una napa freática cercana a la superficie entre 0.5 y 4.0m en la margen central sureste.

La precipitación anual en la microcuenca La Colpa es mayor a la evapotranspiración, generando un valor de excedente hídrico de 497.7 mm de altura, y la evapotranspiración potencial es de 71.1mm. de altura, se da por la vegetación en la microcuenca, donde hay plantas con raíces no mayores a 45cm. de profundidad en su mayoría.

5.2. RECOMENDACIONES

La Autoridad Nacional del Agua (ANA) deberá llevar el control del caudal empleado en los pozos de extracción existentes en el acuífero libre de la microcuenca La Colpa porque puede originar una sobreexplotación de agua subterránea.

La Autoridad Nacional del Agua (ANA) deberá recomendar a la población utilizar un caudal máximo de 35 L/s en los pozos existentes y evitar la sobreexplotación del acuífero.

La Autoridad Local del Agua, deberá inventariar los pozos informales que existe en la microcuenca La Colpa, para mantener el control del caudal de extracción existente en el acuífero libre de la microcuenca La Colpa y evitar la sobreexplotación del mismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahlfeld, D; Barlow, P; Mulligan, A. 2005. GWM—A Ground–Water Management Process for the U.S. Geological Survey Modular Ground– Water Model (MODFLOW–2000). U.S. Geological Survey Open–File Report 2005–1072, 2005, 124 p.
- ANA (Autoridad Nacional del Agua, Perú), 2015. Evaluación de recursos hídricos en la cuenca de Crisnejas. Lima, Perú, ANA.
- Anderson, M; Woessner, W. 1992. Applied Groundwater Modeling, Academic Press, Inc., San Diego, CA. 381 p.
- Baechler, J. 2012. Estudio hidrogeológico cuenca del río Mataquito. Aquaterra Ingenieros Limitada, Tomo 1, S.I.T. N° 296. Santiago, Chile.
- Barrionuevo, N; Feler, M; Querner, E; Rébori, G. 2010. Simulación Del Flujo De Aguas Subterráneas Utilizando SIMGRO En El Noroeste De Buenos Aires. Revista GESIG, Buenos Aires, Argentina, Sección Artículos: I PP. 98-110.
- Castany, G. 1978. Tratado práctico de las aguas subterráneas. Ediciones Omega S.A. Barcelona, España.
- Cleary R. 1991. *Modelagem matematica em agua subterranea*. Colección ABRH. De Recursos Hídricos. Asociación Brasileira de Recursos Hídricos. Editora USP. Sao Paulo, Brasil.
- Carrazón, J. 2007. Manual práctico para el diseño de sistemas de minirriego. FAO 2007, Honduras, 218 pp.
- Coras, P. 2006. Elementos climáticos y su relación con la fluctuación del nivel freático.
- Custodio, E; Llamas, M. 1979. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega. Barcelona, España, 2359 pp.

- Datos Hidrometeorológicos a nivel nacional PERÚ. 2022. Consultado 16 de ene. 2023. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>
- Harbaugh, A; McDonald, M. 1996. *Programmer's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model*: U.S. Geological Survey Open-File Report 96-485.
- Herrera, E. 2012. Estudio estratigráfico del cretáceo superior en los alrededores de la ciudad de Cajamarca. s.l., Universidad Nacional de Cajamarca. 120pp.
- McDonald, M; Harbaugh, A. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, *Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 6, Chapter A1, U.S. Geological Survey, Denver, Colorado
- Mijailov, L., 1990, *HIDROGEOLOGÍA*. Editorial MIR, Moscú, URSS.
- Mendoza, W. 2015. Modelamiento hidrogeológico en la zona de cimentación de relaves del proyecto conga mediante el software GMS (groundwater Modeling System). Cajamarca, Perú.
- Molina, D; Cabrera, E; Ramos, L. 2014. Modflow y AQÜIMPE: dos aproximaciones a la realidad. CIH, Vol. 35, Habana, Cuba.
- Ordoñez, J; Chamorro, G; Obando, O. 2008. Evaluación y caracterización hidrológica en la región Cajamarca. SENAMI, Lima, Perú.
- Ortiz, S. 2016. Similitud hidráulica de sistemas hidrológicos altoandinos y transferencia de información hidrometeorológica. Tesis Doctoris Philosophiae. Lima: Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Peña, F. 2005. Hidrogeología de las fuentes termales de Cajamarca y Churín para el desarrollo de las aguas termales y minerales. INGEMMET. Lima, Perú.
- Pérez, A; Márquez, A. 2017. Sedimentología. México, Universidad Autónoma Metropolitana.

- Rojas, H. 2008. Modelamiento para el análisis de la variación hidrogeológica espacial del acuífero la Yarada – Tacna. Tesis, Lima, Perú.
- Sánchez, J. 2011. Hidrogeología Subterránea. España, Universidad de Salamanca.
- Sophocleous, M; Perkins, S. 2000. “Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas”. Journal of Hydrology 236, 185-201.
- Vásquez, C. 2011. Estudio hidrológico de La región Cajamarca. Gobierno Regional Cajamarca. Cajamarca, Perú.
- Vásquez, E. 1998. Easy Bal - analizador de datos meteorológicos. Consejo Nacional de Investigación de España (CSIC), Valencia, España.

ANEXOS

1. PLANOS.

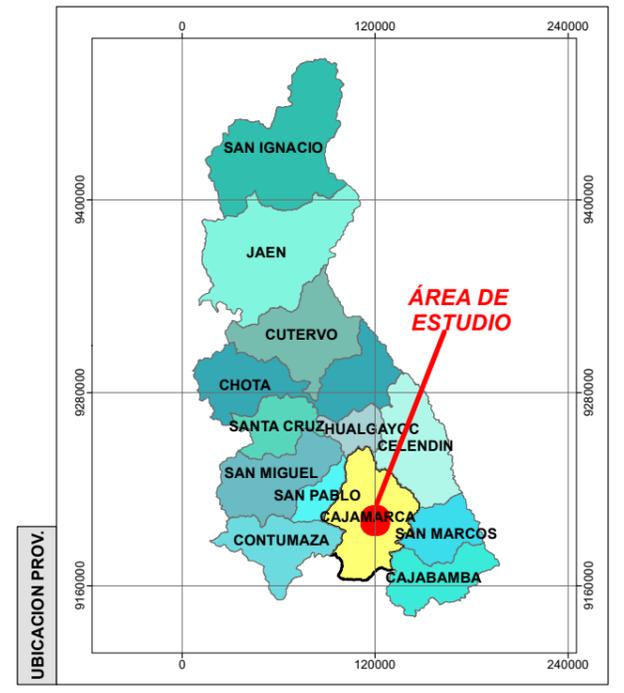
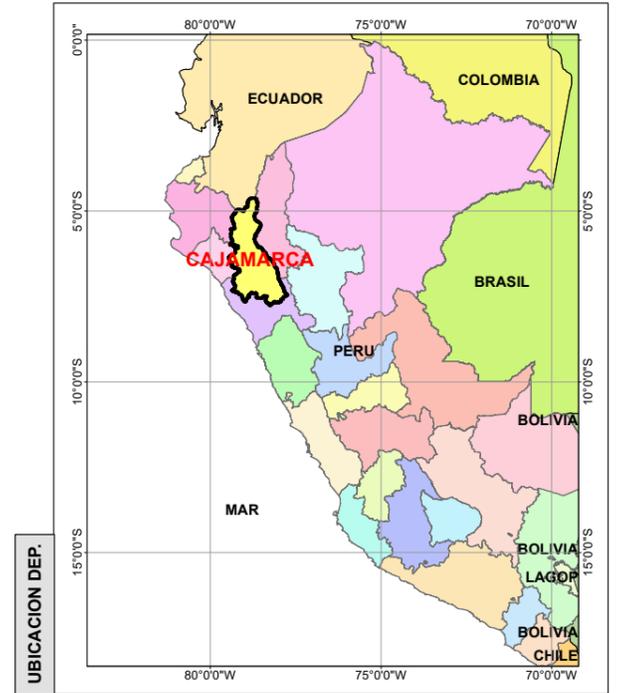
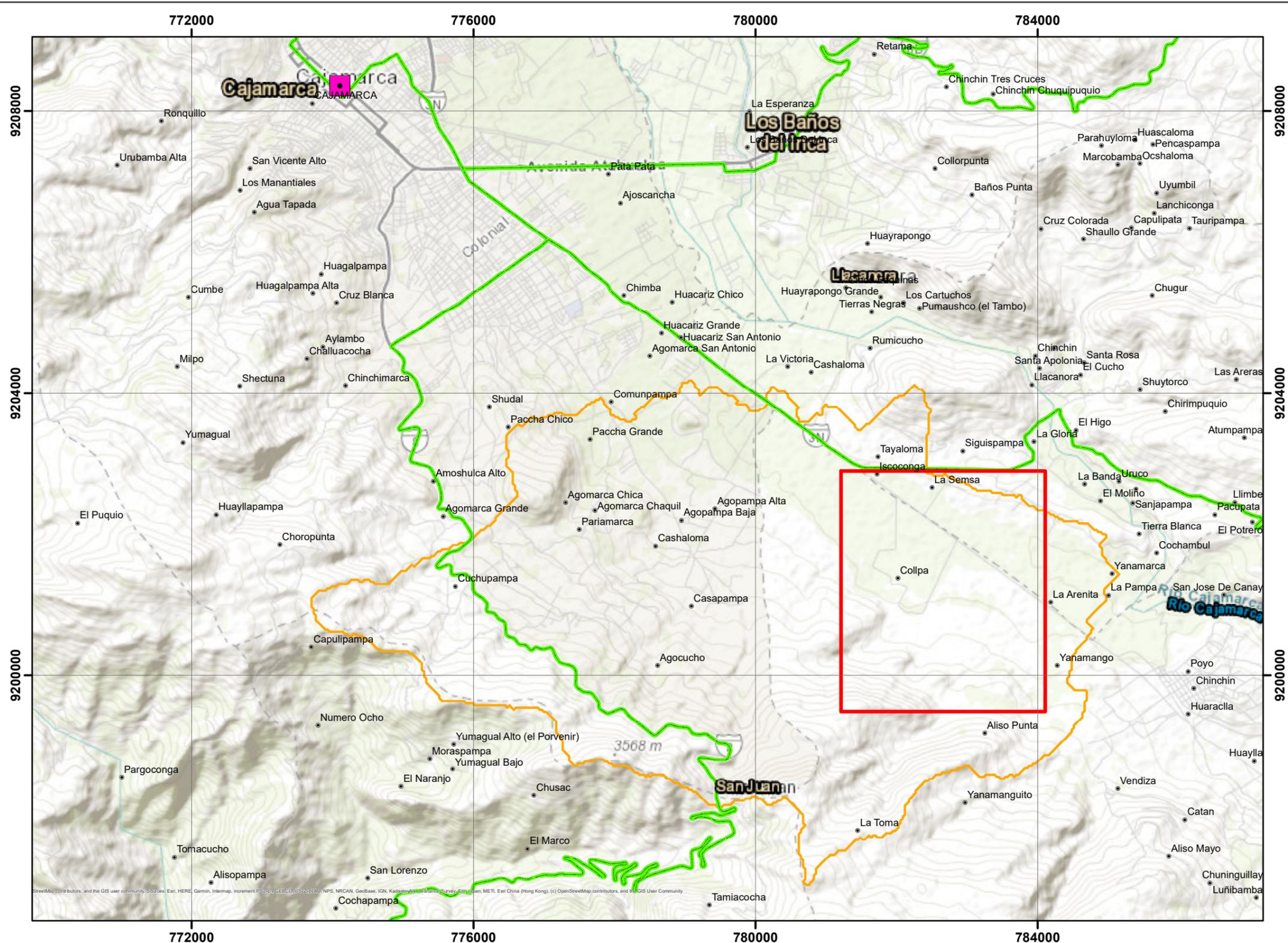
- 1.1. Plano de ubicación (P-01)
- 1.2. Plano de imagen satelital (P-02)
- 1.3. Plano topográfico (P-03)
- 1.4. Plano geológico (P-04)
- 1.5. Plano hidrogeológico. (P-05)
- 1.6. Plano de balance hídrico. (P-06)
- 1.7. Plano de recarga anual. (P-07)
- 1.8. Plano de inventario de pozos subterráneos. (P-08)
- 1.9. Plano de superficie potenciométrica. (P-09)
- 1.10. Plano de carga hidráulica del acuífero La Colpa. (P-10)
- 1.11. Secciones longitudinales del acuífero La Colpa. (P-11)

2. FICHAS DE COLECCIÓN DE DATOS

- 2.1. Ensayos De Infiltración (T-01)

3. INVENTARIO DE DATOS EN CAMPO

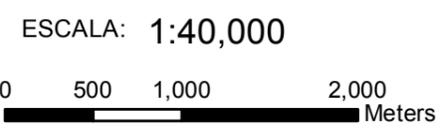
- 3.1. Inventario de pozos de agua subterránea en valle de Cajamarca (L-1)



Simbología

- ▭ Area de Estudio
- Centros Poblados
- Vías Nacionales
- Microcuenca La Colpa

CARTA CAJAMARCA , escala 1/40 000
(Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 17 Sur)



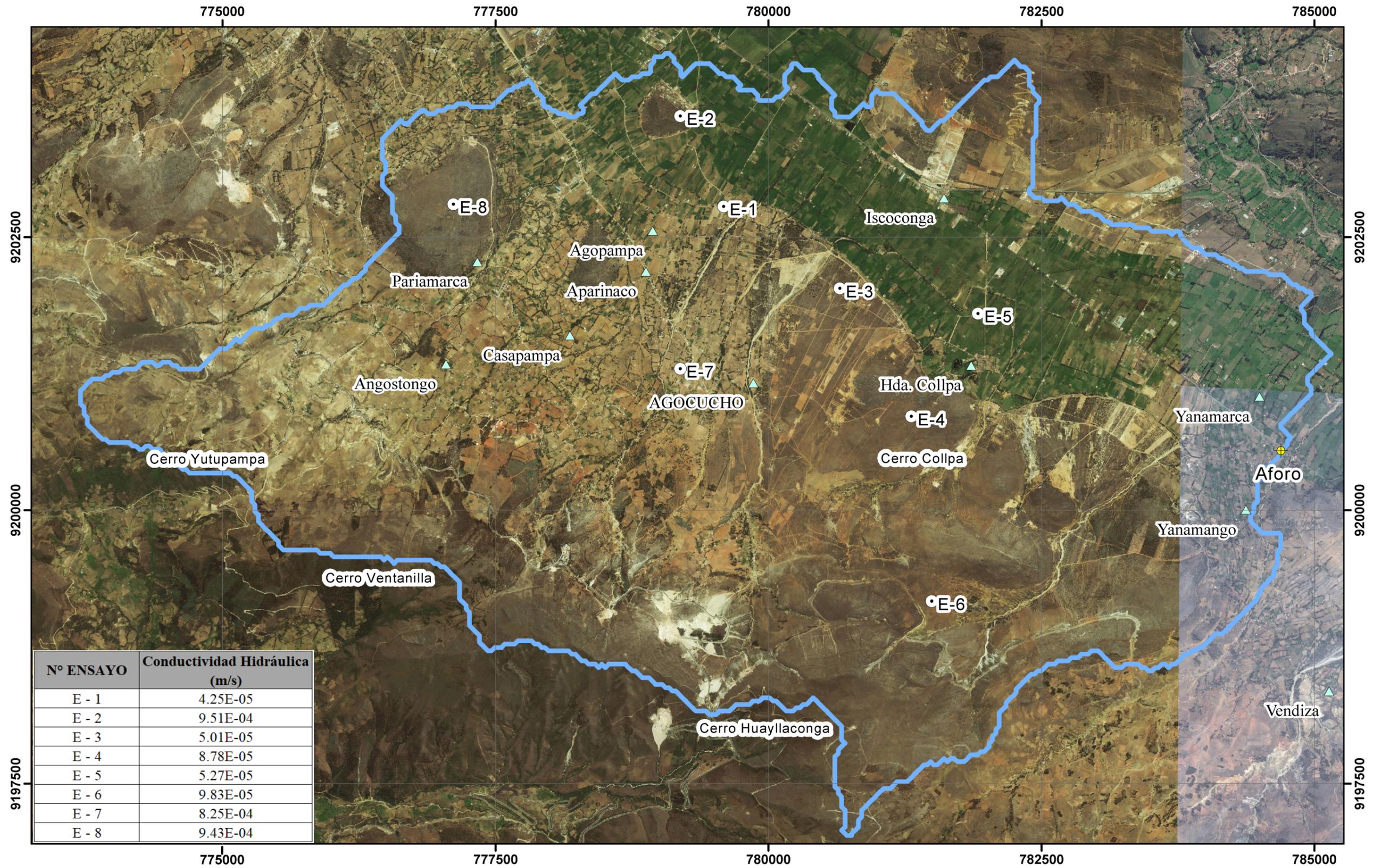
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica

TESIS: MODELAMIENTO HIDROGEOLOGICO DEL ACUIFERO LIBRE EN EL CENTRO POBLADO LA COLPA

PLANO DE UBICACIÓN

| | | |
|-----------------------------------|--|-------------|
| Tesista: Bach. BOÑÓN A. C. | Asesor: MCs Ing. GONZALES YANA R. | P-01 |
| Escala: INDICADAS | Fecha: FEBRERO 2024 | |

PLANO SATELITAL DE LA MICROCUENCA LA COLPA



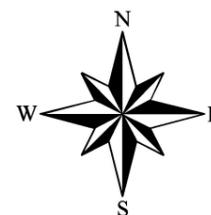
| N° ENSAYO | Conductividad Hidráulica (m/s) |
|-----------|--------------------------------|
| E - 1 | 4.25E-05 |
| E - 2 | 9.51E-04 |
| E - 3 | 5.01E-05 |
| E - 4 | 8.78E-05 |
| E - 5 | 5.27E-05 |
| E - 6 | 9.83E-05 |
| E - 7 | 8.25E-04 |
| E - 8 | 9.43E-04 |

Simbología

- Ensayos de Infiltración
- △ Centros Poblados
- Límite de Cuenca

CARTA CAJAMARCA , escala 1/35 000
(Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 17 Sur)

ESCALA: 1:35,000



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica

TESIS: MODELAMIENTO HIDROGEOLOGICO DEL ACUÍFERO LIBRE MEDIANTE SOFTWARE MODFLOW EN LA COLPA

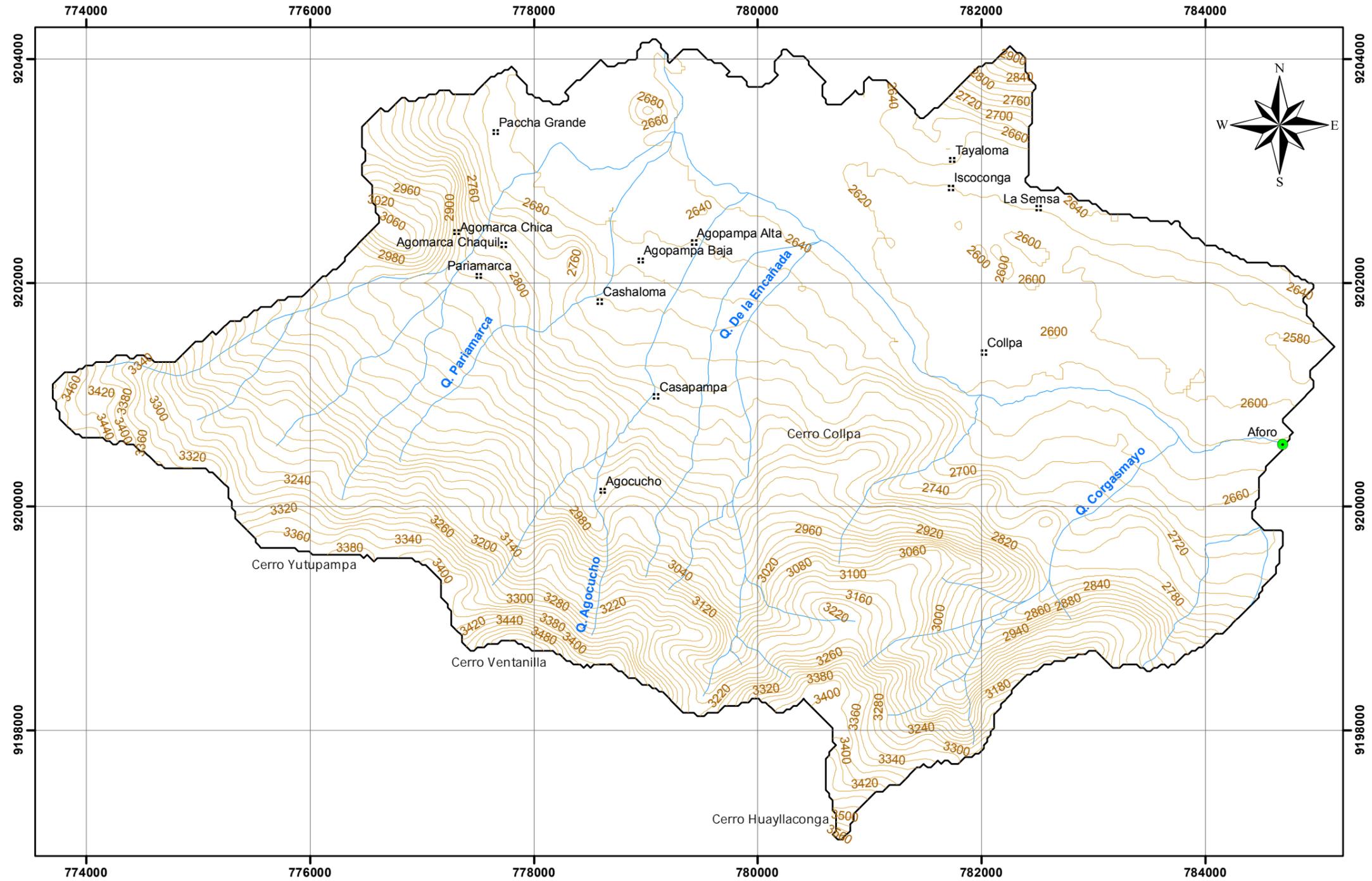
MAPA: PLANO SATELITAL

Tesisista: Bach. BOÑÓN A. C. Asesor: MCs Ing. GONZALES YANA R.

Escala: INDICADA Fecha: FEBRERO 2024

P-02

PLANO TOPOGRÁFICO DE LA MICROCUENCA LA COLPA



Simbología

- Aforo
- ⋈ Centros Poblados
- Curvas de Nivel
- Drenajes
- ⬭ Límite de Cuenca



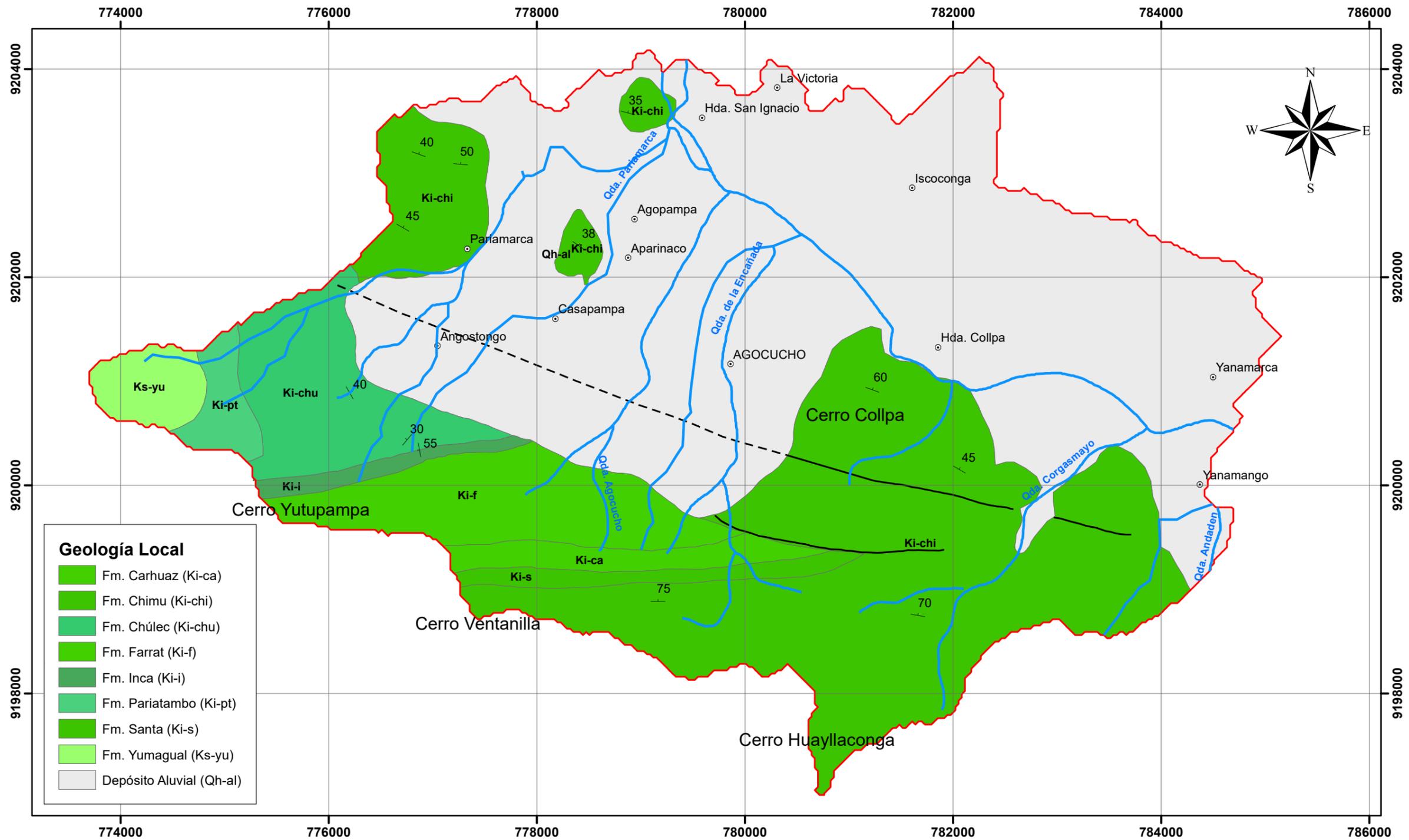
CARTA CAJAMARCA, escala 1/40 000
(Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 17 Sur)

ESCALA: 1:40,000



| | |
|---|----------------------------|
|  UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica | |
| TESIS: MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO LIBRE MEDIANTE SOFTWARE MODFLOW EN LA COLPA | |
| PLANO TOPOGRÁFICO | |
| Tesisista: Bach. BOÑÓN A. C. Asesor: MCs Ing. GONZALES YANA R. | |
| Escala: INDICADAS | Fecha: FEBRERO 2024 |
| P-03 | |

PLANO GEOLÓGICO DE LA MICROCUENCA LA COLPA



Geología Local

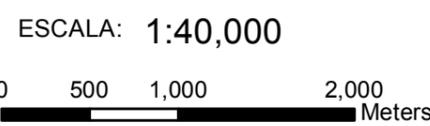
| | |
|--|--------------------------|
| | Fm. Carhuaz (Ki-ca) |
| | Fm. Chimu (Ki-chi) |
| | Fm. Chúlec (Ki-chu) |
| | Fm. Farrat (Ki-f) |
| | Fm. Inca (Ki-i) |
| | Fm. Pariatambo (Ki-pt) |
| | Fm. Santa (Ki-s) |
| | Fm. Yumagual (Ks-yu) |
| | Depósito Aluvial (Qh-al) |

Simbología

| | |
|--|------------------|
| | Centros Poblados |
| | Buzamiento |
| | Drenaje |
| | Límite de Cuenca |
| | Falla inferida |
| | Falla normal |

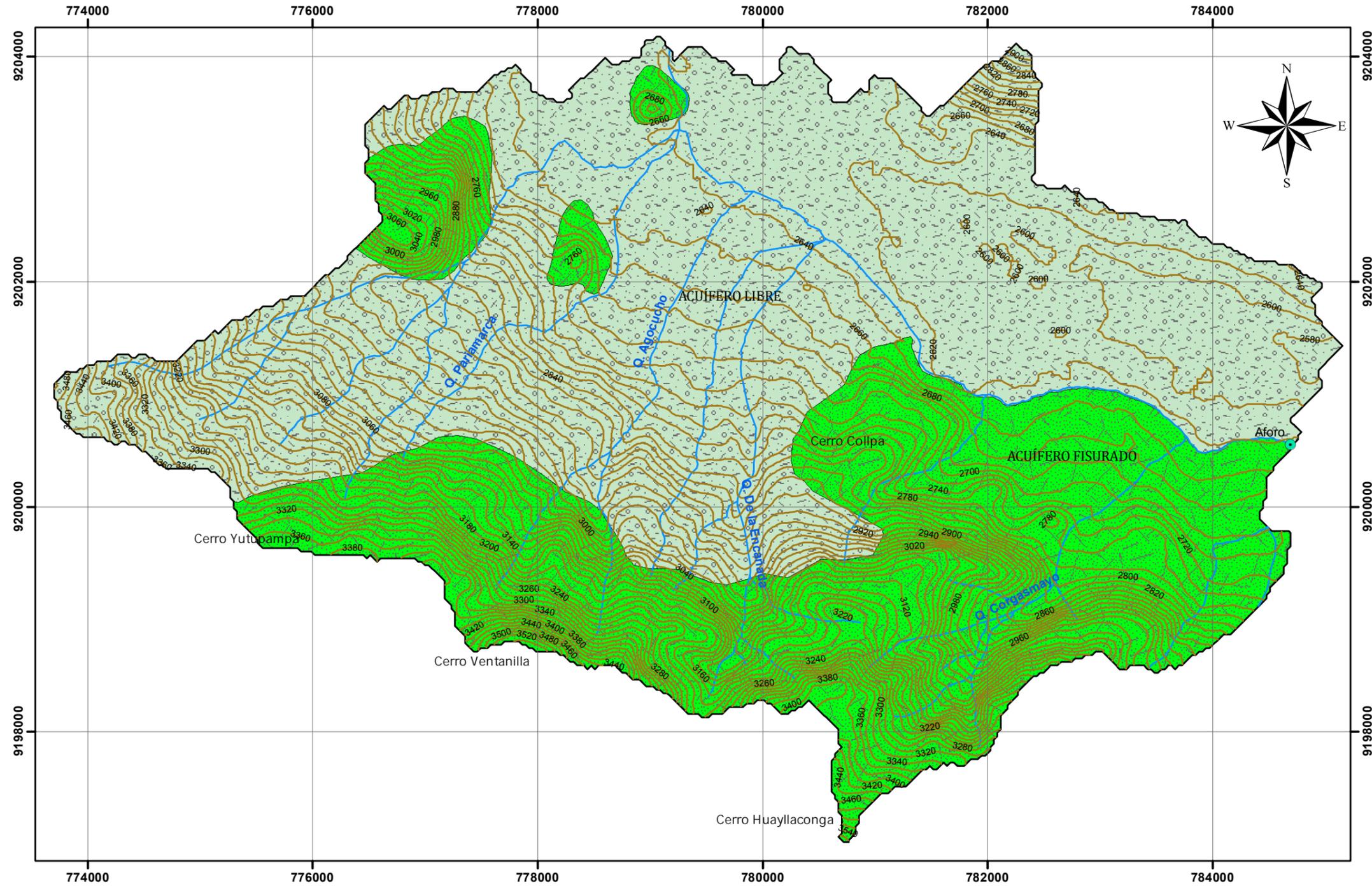


CARTA CAJAMARCA, escala 1/40 000
(Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 17 Sur)



| | | | |
|------------------------------|--|--|-------------|
| | | UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA | |
| | | Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica | |
| TESIS: | | MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO LIBRE MEDIANTE SOFTWARE MODFLOW EN LA COLPA | |
| | | PLANO GEOLÓGICO | |
| Tesisista: Bach. BOÑÓN A. C. | | Asesor: MCs Ing. GONZALES YANA R. | |
| Escala: INDICADAS | | Fecha: FEBRERO 2024 | |
| | | | P-04 |

PLANO HIDROGEOLÓGICO DE LA MICROCUENCA LA COLPA



Simbología

- Aforo
- Curvas de Nivel
- Drenajes
- Límite de Cuenca

Unidades Hidrogeológicas

- Acuífero Fisurado
- Acuífero Poroso no Consolidado

CARTA CAJAMARCA , escala 1/40 000
(Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 17 Sur)

ESCALA: 1:40,000



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica

TESIS: MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO LIBRE
MEDIANTE SOFTWARE MODFLOW EN LA COLPA

PLANO HIDROGEOLÓGICO

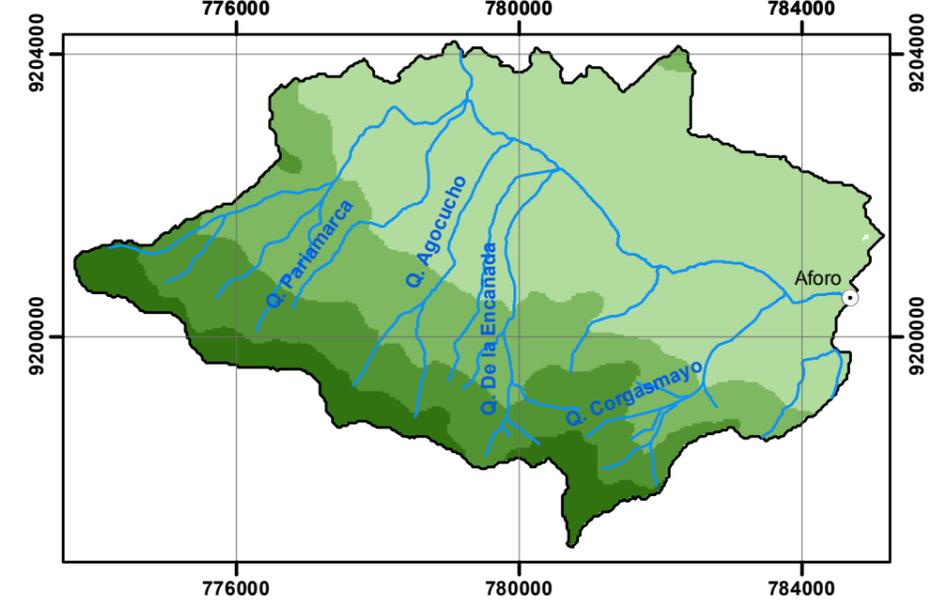
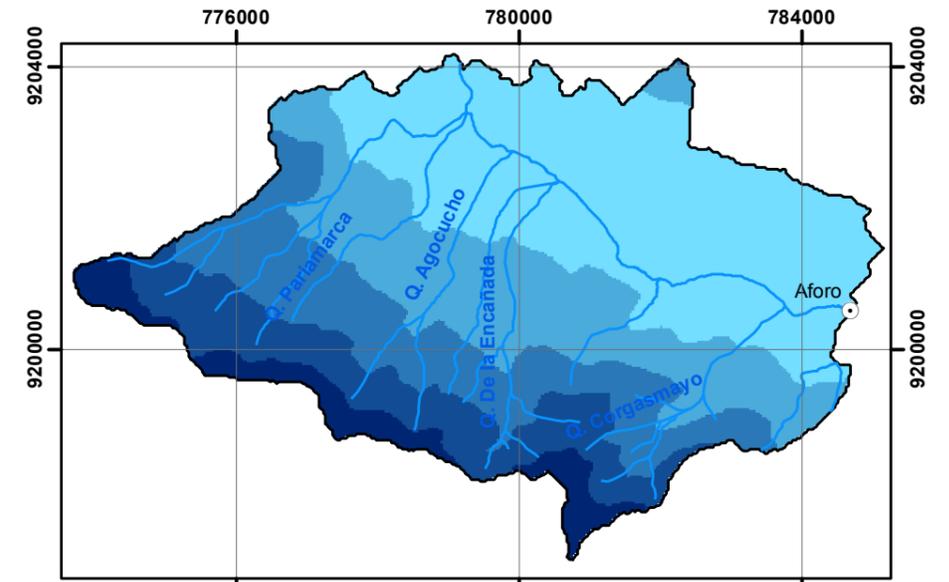
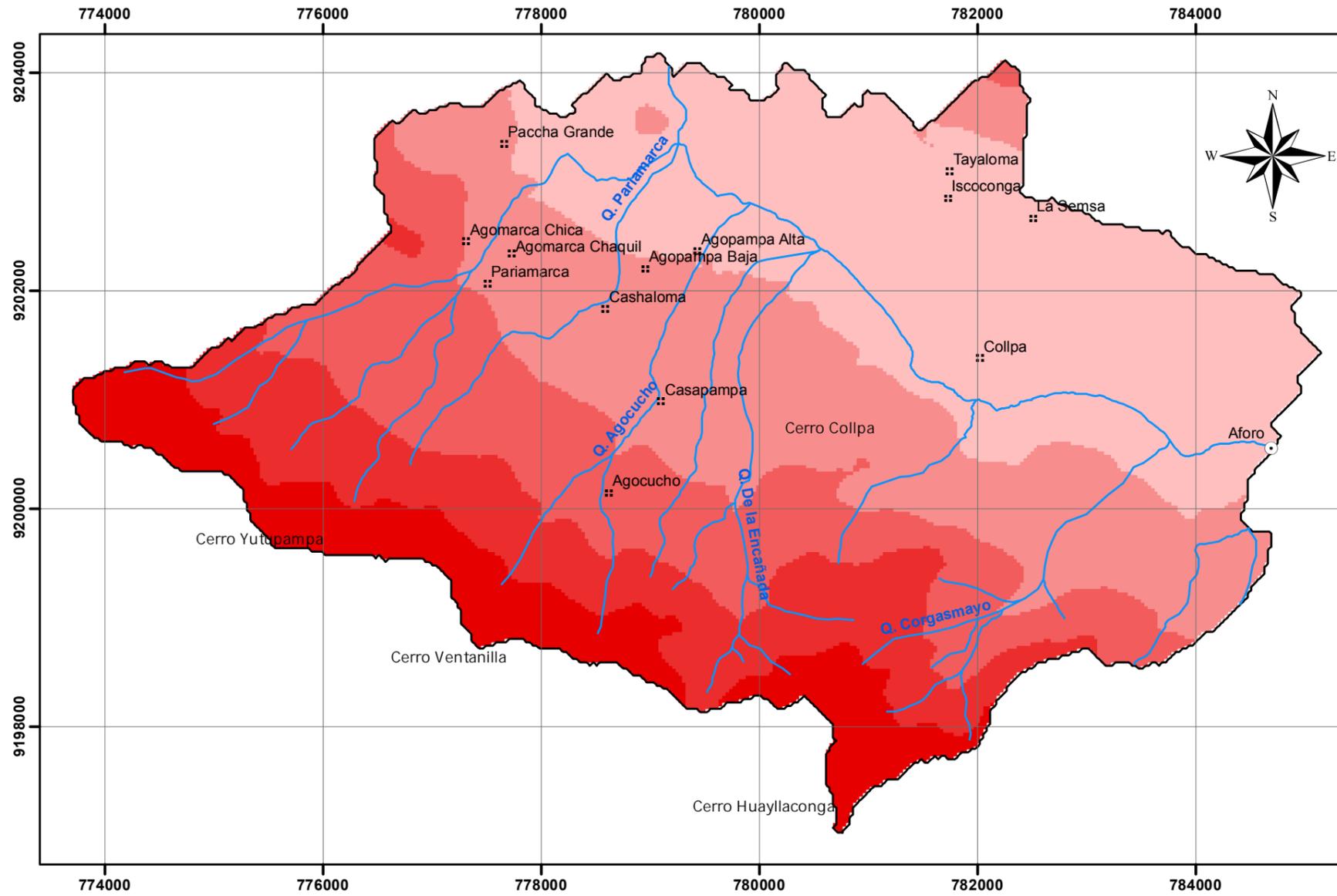
MAPA:

Tesista: Bach. BONÓN A. C. Asesor: MCs Ing. GONZALES YANA R.

Escala: INDICADAS Fecha: FEBRERO 2024

P-05

PLANO BALANCE HÍDRICO DE LA MICROCUENCA LA COLPA

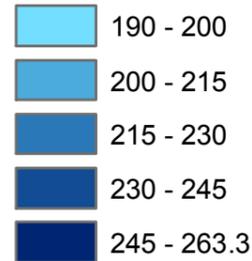


Simbología

- Aforo
- ⋮ Centros Poblados
- Drenajes
- ⬭ Límite de Cuenca

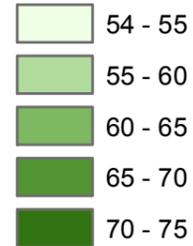
Precipitación

<mm/año>



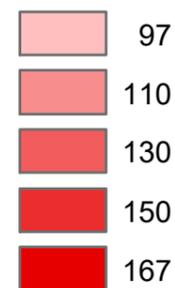
Evapotranspiración

<mm/año>



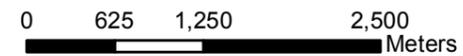
Recarga Promedio

<mm/año>



CARTA CAJAMARCA, escala 1/40 000
(Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 17 Sur)

ESCALA: 1:50,000



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica

TESIS: MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO LIBRE
MEDIANTE SOFTWARE MODFLOW EN LA COLPA

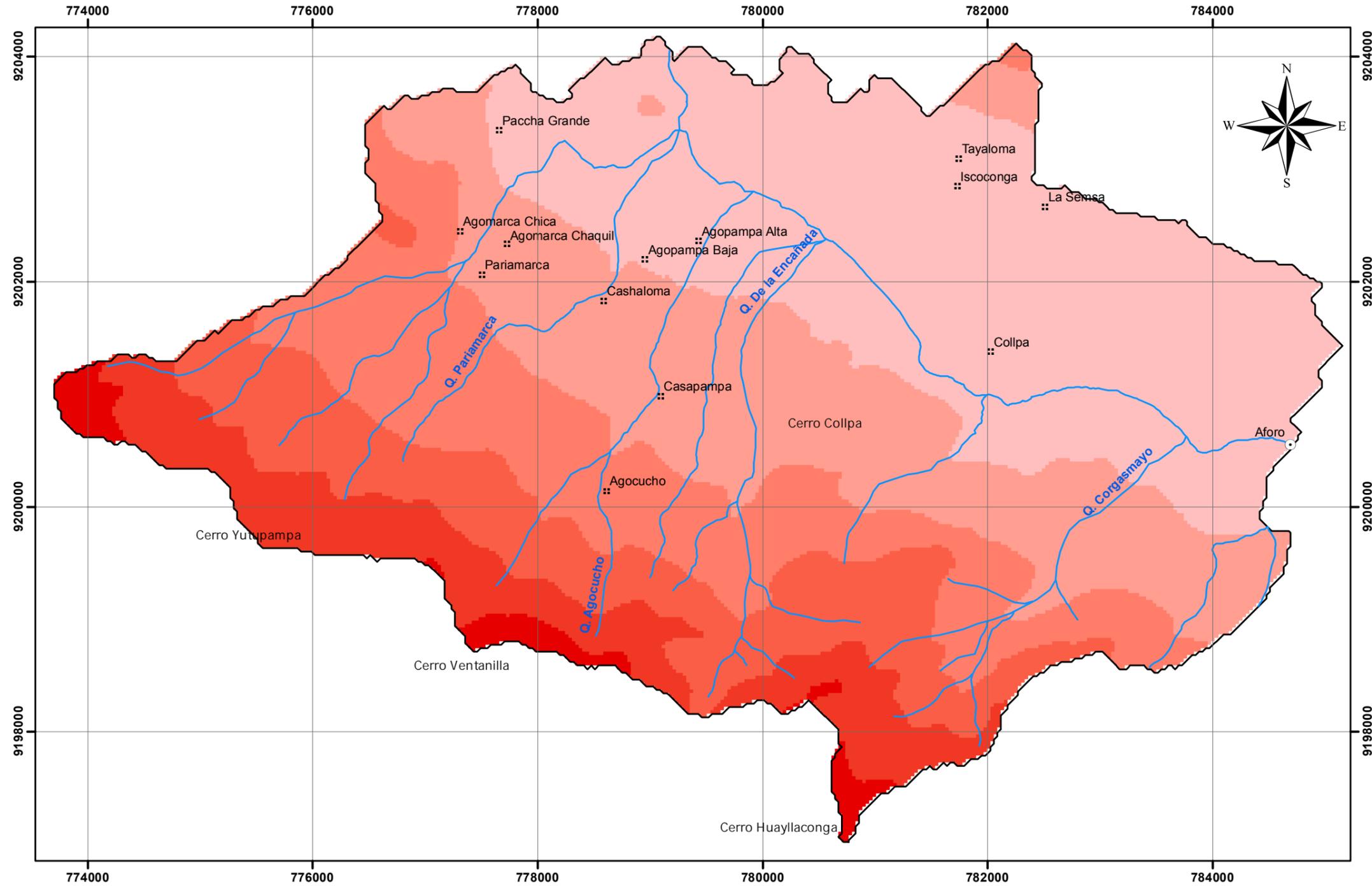
BALANCE HÍDRICO

Tesista: Bach. BOÑÓN A. C. Asesor: MCs Ing. GONZALES YANA R.

Escala: INDICADAS Fecha: FEBRERO 2024

MAPA: P-06

PLANO BALANCE HÍDRICO DE LA MICROCUENCA LA COLPA



Simbología

- Aforo
- :: Centros Poblados
- Drenajes
- ⬭ Límite de Cuenca

RECARGA ANUAL PROMEDIO (mm/año)

- 97
- 115
- 130
- 145
- 150
- 167

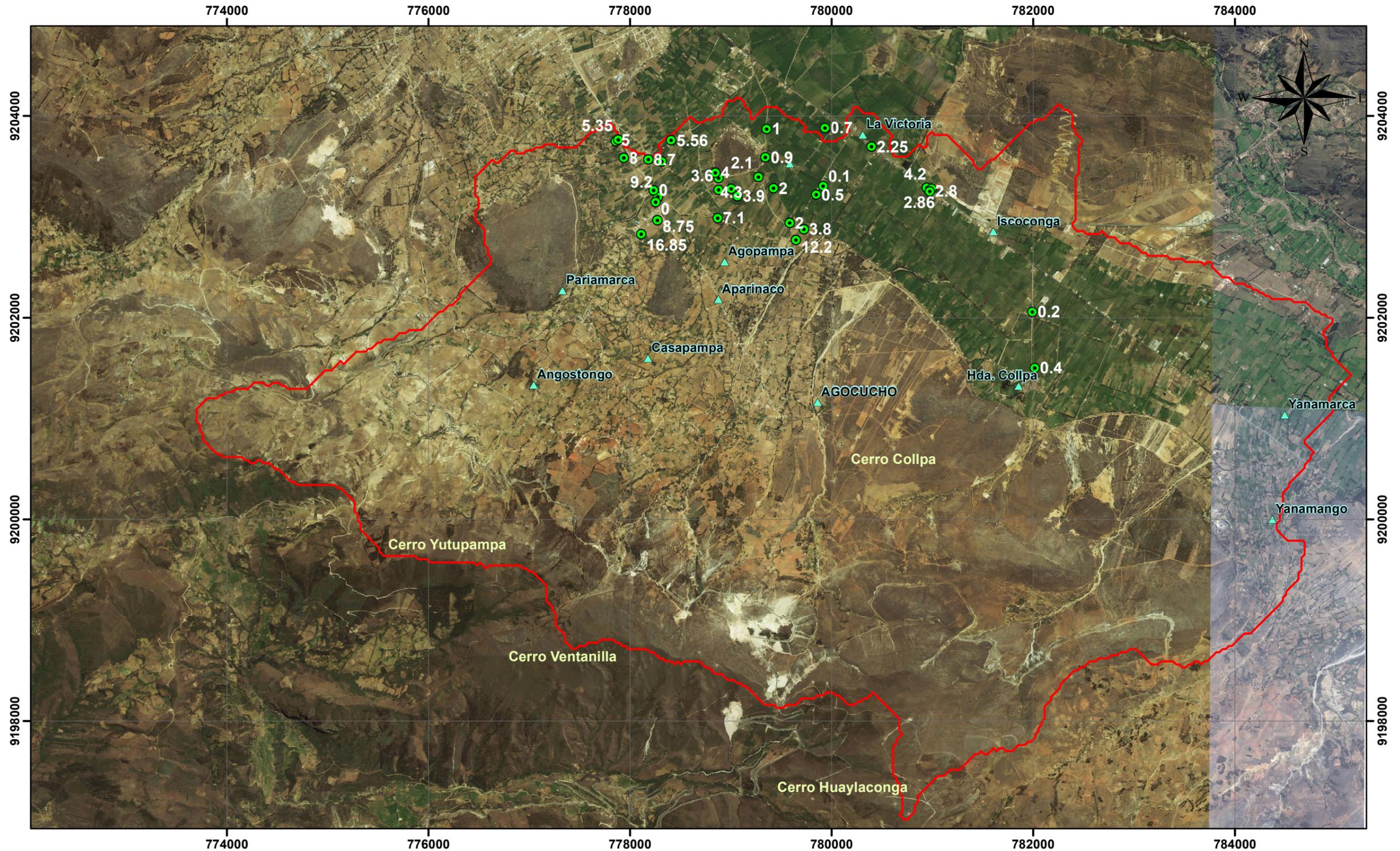
CARTA CAJAMARCA , escala 1/40 000
(Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 17 Sur)

ESCALA: 1:40,000

0 500 1,000 2,000 Meters

| | |
|---|--|
|  UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica | |
| TESIS: MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO LIBRE MEDIANTE SOFTWARE MODFLOW EN LA COLPA | |
| RECARGA DE MICROCUENCA LA COLPA | |
| Tesisista: Bach. BOÑÓN A. C. | Asesor: MCs Ing. GONZALES YANA R. |
| Escala: INDICADAS | Fecha: FEBRERO 2024 |
| P-07 | |

PLANO DE UBICACION DE AGUA SUBTERRÁNEA



Simbología

- Inventario de pozos
- ▲ Centros Poblados
- ⬮ Límite de cuenca

CARTA CAJAMARCA , escala 1/40 000
(Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 17 Sur)

ESCALA: 1:40,000



 **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**
Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica

TESIS: MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO LIBRE
MEDIANTE SOFTWARE MODFLOW EN LA COLPA

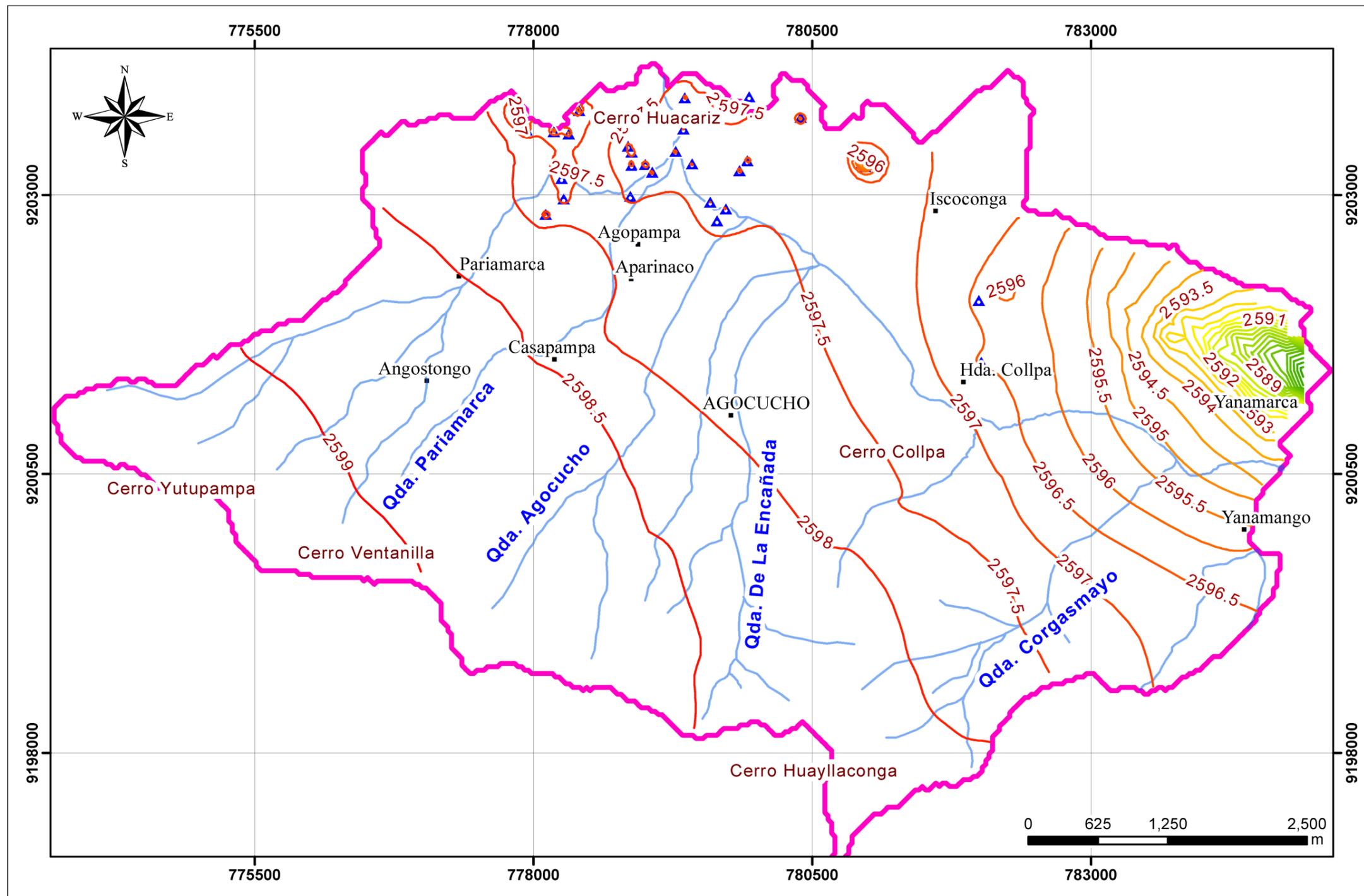
PLANO DE UBICACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA MAPA:

Tesista: **Bach. BOÑÓN A. C.** Asesor: **MCs Ing. GONZALES YANA R.**

Escala: **INDICADAS** Fecha: **FEBRERO 2024**

P-08

PLANO DE SUPERFICIE POTENCIOMÉTRICA DEL ACUIFERO LA COLPA



Simbología

- Poblados
- ▲ Pozos
- Quebradas
- Línea Potenciométrica
- Microcuenca

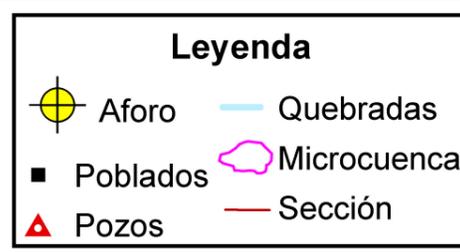
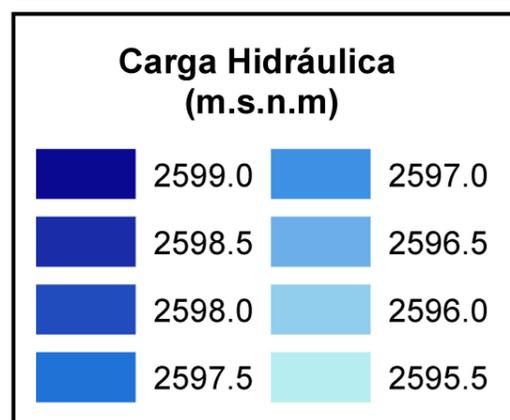
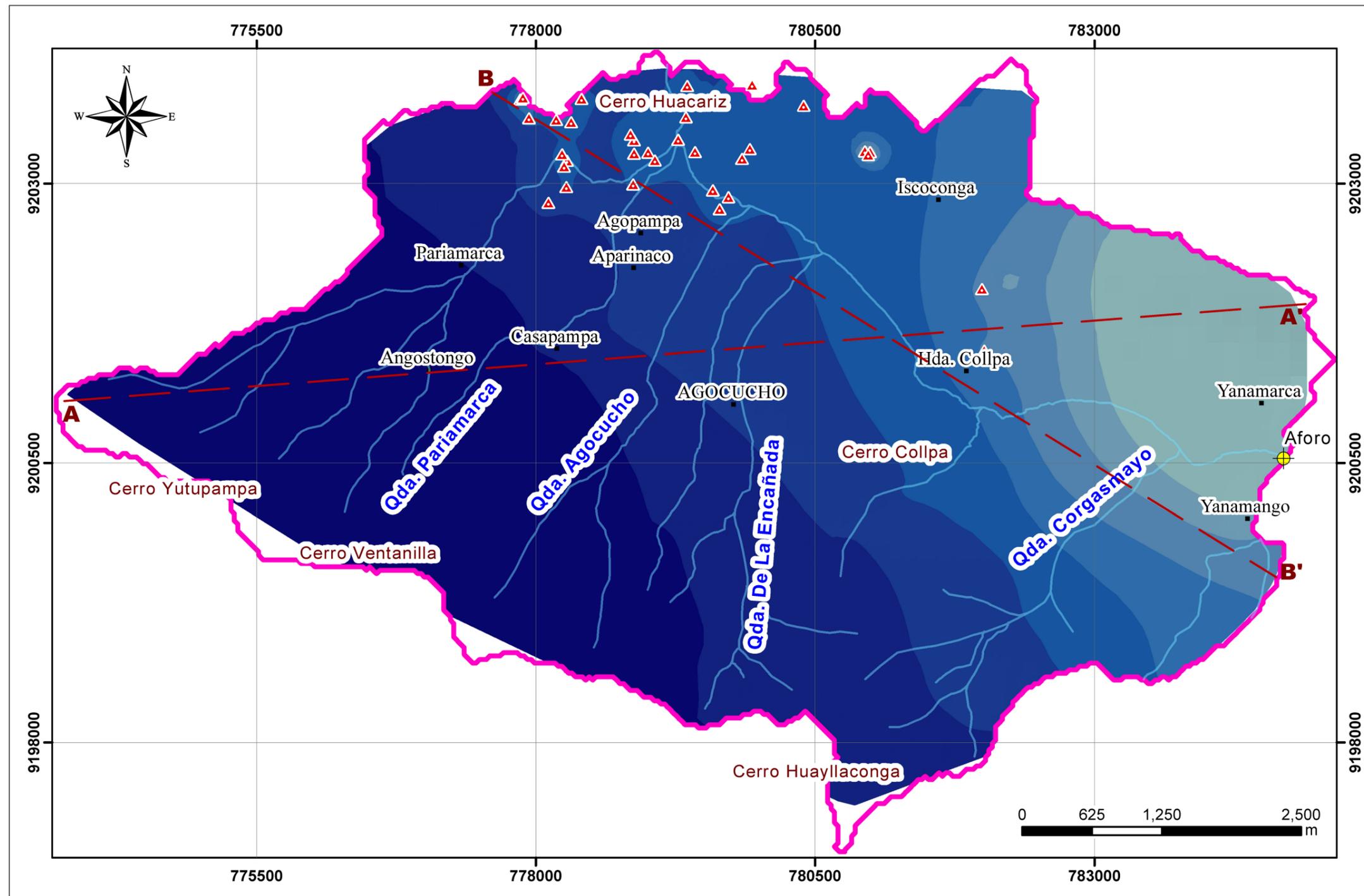
CARTA CAJAMARCA, escala 1/40 000
(Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 17 Sur)

ESCALA: 1:40,000

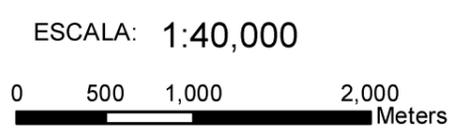


| | | | |
|---|--|-----------------------------------|--|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica | | MAPA: | |
| | | P-09 | |
| TESIS: MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUIFERO LIBRE MEDIANTE SOFTWARE MODFLOW EN LA COLPA | | | |
| SUPERFICIE POTENCIOMÉTRICA | | MAPA: | |
| Tesisista: Bach. BOÑÓN A. C. | | Asesor: MCs Ing. GONZALES YANA R. | |
| Escala: INDICADAS | | Fecha: FEBRERO 2024 | |

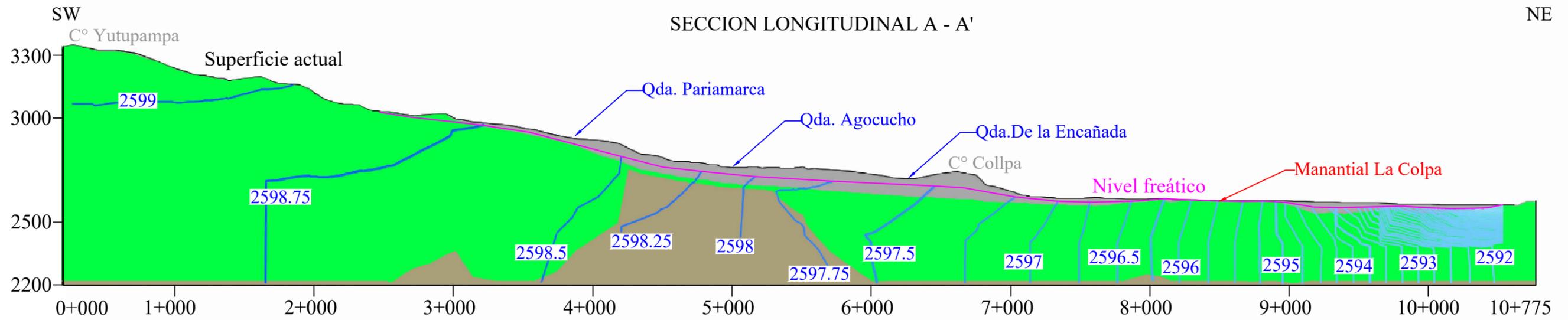
PLANO BALANCE HÍDRICO DE LA MICROCUENCA LA COLPA



CARTA CAJAMARCA, escala 1/40 000
(Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 17 Sur)



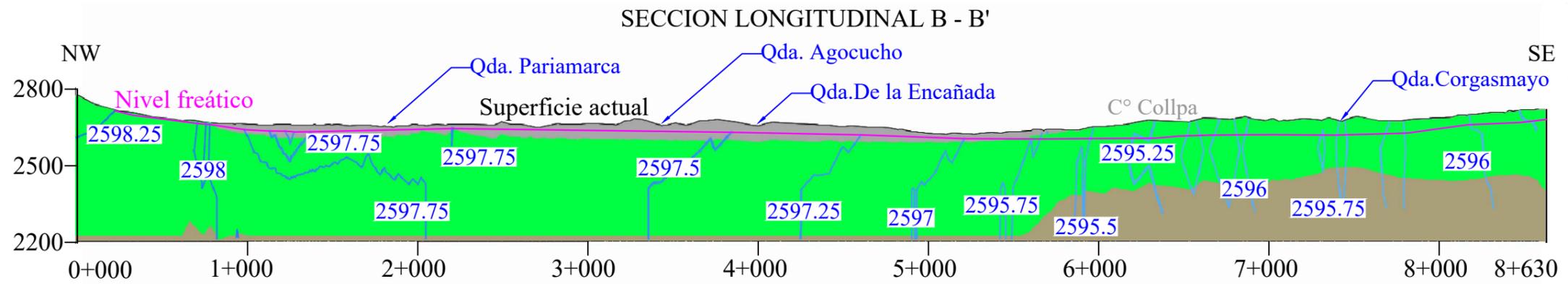
| | |
|---|------------------------------------|
| UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica | |
| TESIS: MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO LIBRE MEDIANTE SOFTWARE MODFLOW EN LA COLPA | |
| CARGA HIDRAULICA ACUIFERO LA COLPA | |
| Tesisista: Bach. BOÑÓN A. C. | Asesor: M.Cs Ing. GONZALES YANA R. |
| Escala: INDICADAS | Fecha: FEBRERO 2024 |
| P-10 | |



Escala vertical: 1: 20000



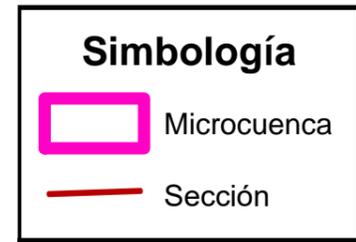
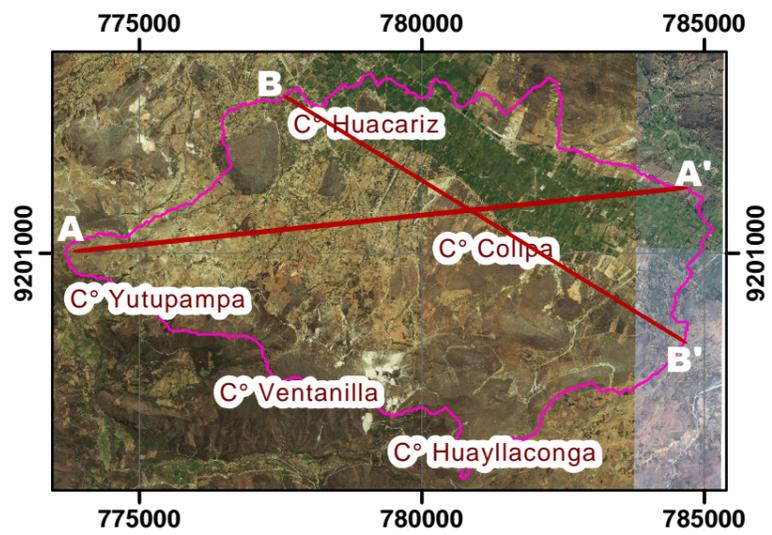
Escala horizontal: 1: 30000



Escala vertical: 1: 20000



Escala horizontal: 1: 30000



CARTA CAJAMARCA, 15-G
(Proyección UTM, Datum WGS 84, Zona 17 Sur)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica

TESIS: MODELAMIENTO HIDROGEOLOGICO DEL ACUIFERO LIBRE MEDIANTE SOFTWARE MODFLOW EN LA COLPA

SECCIONES LONGITUDINAL DEL ACUIFERO LA COLPA

Tesista: Bach. BOÑÓN A. C. Asesor: MCs Ing. GONZALES YANA R.

Escala: INDICADAS Fecha: FEBRERO 2024

MAPA: P-11

"MODELAMIENTO HIDROGEOLOGICO DEL ACUIFERO LIBRE MEDIANTE SOFTWARE MODFLOW EN LA COLPA"
2.1. FICHA TÉCNICA PARA ENSAYOS DE INFILTRACIÓN

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|--|------------------------------------|-----------------------------|--|------------------------------------|-----------------------------|--|------------------------------------|-----------------------------|--|------------------------------------|
| LOCALIZACIÓN DEL SONDEO: | | C.P. Agopampa | LOCALIZACIÓN DEL SONDEO: | | C.P. Huacariz grande | LOCALIZACIÓN DEL SONDEO: | | C.P. La Colpa | LOCALIZACIÓN DEL SONDEO: | | C.P. La Colpa |
| N° SONDEO: | | 1 | N° SONDEO: | | 2 | N° SONDEO: | | 3 | N° SONDEO: | | 4 |
| COORDENADAS (X,Y,Z): | | N: 9202788 E: 779590 C: 2665 | COORDENADAS (X,Y,Z): | | N: 9203643 E: 779087 C: 2706 | COORDENADAS (X,Y,Z): | | N: 9201760 E: 780587 C: 2678 | COORDENADAS (X,Y,Z): | | N: 9200869 E: 781308 C: 2768 |
| FECHA Y HORA DE INICIO: | | C/02/05/22 9:15 a.m. | FECHA Y HORA DE INICIO: | | C/02/05/22 10:43 a.m. | FECHA Y HORA DE INICIO: | | C/09/05/22 8:12 a.m. | FECHA Y HORA DE INICIO: | | C/09/05/22 9:40 a.m. |
| FECHA Y HORA DE FIN: | | C/02/05/22 10:15 a.m. | FECHA Y HORA DE FIN: | | C/02/05/22 11:43 a.m. | FECHA Y HORA DE FIN: | | C/09/05/22 9:12 a.m. | FECHA Y HORA DE FIN: | | C/09/05/22 10:40 a.m. |
| CONDICIONES METEOROLÓGICAS: | | Soleado, con cielo despejado | CONDICIONES METEOROLÓGICAS: | | Soleado, con cielo despejado | CONDICIONES METEOROLÓGICAS: | | Nublado. | CONDICIONES METEOROLÓGICAS: | | Nublado. |



| DATOS DEL ENSAYO | | | | | | DATOS DEL ENSAYO | | | | | | DATOS DEL ENSAYO | | | | | | DATOS DEL ENSAYO | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------|------------------|----------------------------|--|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|--|----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------|------------------|----------------------------|--|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Tiempo (min.): t | | 60 | | Tiempo (s): | | 3600 | | Tiempo (min.): t | | 60 | | Tiempo (s): | | 3600 | | Tiempo (min.): t | | 60 | | Tiempo (s): | | 3600 | |
| Profundidad inicial (m.): Hi | | 0 | | Profundidad inicial (m.): Hi | | 0 | | Profundidad inicial (m.): Hi | | 0 | | Profundidad inicial (m.): Hi | | 0 | | Profundidad inicial (m.): Hi | | 0 | | Profundidad inicial (m.): Hi | | 0 | |
| Profundidad final (m.): Hf | | 0.54 | | Profundidad final (m.): Hf | | 0.62 | | Profundidad final (m.): Hf | | 0.58 | | Profundidad final (m.): Hf | | 0.68 | | Profundidad final (m.): Hf | | 0.68 | | Profundidad final (m.): Hf | | 0.68 | |
| Diámetro interior de la entubación o del sondeo (m): | | 0.072 | | Diámetro interior de la entubación o del sondeo (m): | | 0.072 | | Diámetro interior de la entubación o del sondeo (m): | | 0.072 | | Diámetro interior de la entubación o del sondeo (m): | | 0.072 | | Diámetro interior de la entubación o del sondeo (m): | | 0.072 | | Diámetro interior de la entubación o del sondeo (m): | | 0.072 | |
| Tiempo (min.) | Intervalo de tiempo (min.) | Descenso del nivel (cm) | Descenso acumulado del nivel (cm) | Velocidad de Infiltración (cm/s) | Altura del nivel (m): | Tiempo (min.) | Intervalo de tiempo (min.) | Descenso del nivel (cm) | Descenso acumulado del nivel (cm) | Velocidad de Infiltración (cm/s) | Altura del nivel (m): | Tiempo (min.) | Intervalo de tiempo (min.) | Descenso del nivel (cm) | Descenso acumulado del nivel (cm) | Velocidad de Infiltración (cm/s) | Altura del nivel (m): | Tiempo (min.) | Intervalo de tiempo (min.) | Descenso del nivel (cm) | Descenso acumulado del nivel (cm) | Velocidad de Infiltración (cm/s) | Altura del nivel (m): |
| 0 | 0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.54 | 0 | 0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.62 | 0 | 0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.58 | 0 | 0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.68 |
| 1 | 1 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.53 | 1 | 1 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 0.59 | 1 | 1 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 0.56 | 1 | 1 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 0.66 |
| 2 | 1 | 0.7 | 2.2 | 0.7 | 0.52 | 2 | 1 | 1.4 | 4.1 | 1.4 | 0.58 | 2 | 1 | 1.0 | 3.5 | 1.0 | 0.55 | 2 | 1 | 0.1 | 2.1 | 0.1 | 0.66 |
| 4 | 2 | 2.1 | 4.3 | 1.1 | 0.50 | 4 | 2 | 1.4 | 5.5 | 0.7 | 0.57 | 4 | 2 | 1.5 | 5.0 | 0.8 | 0.53 | 4 | 2 | 0.8 | 2.9 | 0.4 | 0.65 |
| 8 | 4 | 1.2 | 5.5 | 0.3 | 0.49 | 8 | 4 | 3.1 | 8.6 | 0.8 | 0.53 | 8 | 4 | 2.0 | 7.0 | 0.5 | 0.51 | 8 | 4 | 0.6 | 3.5 | 0.2 | 0.65 |
| 10 | 2 | 3.0 | 8.5 | 1.5 | 0.46 | 10 | 2 | 0.9 | 9.5 | 0.5 | 0.53 | 10 | 2 | 1.5 | 8.5 | 0.8 | 0.50 | 10 | 2 | 0.3 | 3.8 | 0.2 | 0.64 |
| 15 | 5 | 4.5 | 13.0 | 0.9 | 0.41 | 15 | 5 | 0.8 | 10.3 | 0.2 | 0.52 | 15 | 5 | 2.3 | 10.8 | 0.5 | 0.47 | 15 | 5 | 0.8 | 4.6 | 0.2 | 0.63 |
| 20 | 5 | 7.4 | 20.4 | 1.5 | 0.34 | 20 | 5 | 0.2 | 10.5 | 0.0 | 0.52 | 20 | 5 | 1.8 | 12.6 | 0.4 | 0.45 | 20 | 5 | 0.6 | 5.2 | 0.1 | 0.63 |
| 30 | 10 | 8.0 | 28.4 | 0.8 | 0.26 | 30 | 10 | 14.5 | 25.0 | 1.5 | 0.37 | 30 | 10 | 8.1 | 20.7 | 0.8 | 0.37 | 30 | 10 | 9.6 | 14.8 | 1.0 | 0.53 |
| 45 | 15 | 8.0 | 36.4 | 0.5 | 0.18 | 45 | 15 | 18.4 | 43.4 | 1.2 | 0.19 | 45 | 15 | 8.0 | 28.7 | 0.5 | 0.29 | 45 | 15 | 9.4 | 24.2 | 0.6 | 0.44 |
| 60 | 15 | 9.4 | 45.8 | 0.6 | 0.08 | 60 | 15 | 17.6 | 61.0 | 1.2 | 0.01 | 60 | 15 | 8.5 | 37.2 | 0.6 | 0.21 | 60 | 15 | 9.6 | 33.8 | 0.6 | 0.34 |

K 4.250E-05

K 9.511E-04

K 5.010E-05

K 8.78E-05

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|--|------------------------------------|-----------------------------|--|------------------------------------|-----------------------------|--|------------------------------------|-----------------------------|--|------------------------------------|
| LOCALIZACIÓN DEL SONDEO: | | C.P. La Colpa | LOCALIZACIÓN DEL SONDEO: | | Abra el Gavilán | LOCALIZACIÓN DEL SONDEO: | | C.P. Agocucho | LOCALIZACIÓN DEL SONDEO: | | C.P. Paríamarca |
| N° SONDEO: | | 5 | N° SONDEO: | | 6 | N° SONDEO: | | 7 | N° SONDEO: | | 8 |
| COORDENADAS (X,Y,Z): | | N: 9201894 E: 781891 C: 2620 | COORDENADAS (X,Y,Z): | | N: 9199225 E: 781131 C: 3185 | COORDENADAS (X,Y,Z): | | N: 9201114 E: 779075 C: 2766 | COORDENADAS (X,Y,Z): | | N: 9202462 E: 777325 C: 2985 |
| FECHA Y HORA DE INICIO: | | C/09/05/22 11:08 a.m. | FECHA Y HORA DE INICIO: | | C/23/05/22 9:36 a.m. | FECHA Y HORA DE INICIO: | | C/13/06/22 9:36 a.m. | FECHA Y HORA DE INICIO: | | C/27/06/22 9:15 a.m. |
| FECHA Y HORA DE FIN: | | C/09/05/22 12:08 a.m. | FECHA Y HORA DE FIN: | | C/23/05/22 10:36 a.m. | FECHA Y HORA DE FIN: | | C/13/06/22 10:36 a.m. | FECHA Y HORA DE FIN: | | C/27/06/22 10:15 a.m. |
| CONDICIONES METEOROLÓGICAS: | | Nublado. | CONDICIONES METEOROLÓGICAS: | | Soleado | CONDICIONES METEOROLÓGICAS: | | Soleado | CONDICIONES METEOROLÓGICAS: | | Soleado, con cielo despejado |



| DATOS DEL ENSAYO | | | | | | DATOS DEL ENSAYO | | | | | | DATOS DEL ENSAYO | | | | | | DATOS DEL ENSAYO | | | | | |
|--|----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------|------------------|----------------------------|--|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|--|----------------------------|-------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------|------------------|----------------------------|--|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Tiempo (min.): t | | 60 | | Tiempo (s): | | 3600 | | Tiempo (min.): t | | 60 | | Tiempo (s): | | 3600 | | Tiempo (min.): t | | 60 | | Tiempo (s): | | 3600 | |
| Profundidad inicial (m.): Hi | | 0 | | Profundidad inicial (m.): Hi | | 0 | | Profundidad inicial (m.): Hi | | 0 | | Profundidad inicial (m.): Hi | | 0 | | Profundidad inicial (m.): Hi | | 0 | | Profundidad inicial (m.): Hi | | 0 | |
| Profundidad final (m.): Hf | | 0.43 | | Profundidad final (m.): Hf | | 0.65 | | Profundidad final (m.): Hf | | 0.50 | | Profundidad final (m.): Hf | | 0.60 | | Profundidad final (m.): Hf | | 0.60 | | Profundidad final (m.): Hf | | 0.60 | |
| Diámetro interior de la entubación o del sondeo (m): | | 0.072 | | Diámetro interior de la entubación o del sondeo (m): | | 0.072 | | Diámetro interior de la entubación o del sondeo (m): | | 0.072 | | Diámetro interior de la entubación o del sondeo (m): | | 0.072 | | Diámetro interior de la entubación o del sondeo (m): | | 0.072 | | Diámetro interior de la entubación o del sondeo (m): | | 0.072 | |
| Tiempo (min.) | Intervalo de tiempo (min.) | Descenso del nivel (cm) | Descenso acumulado del nivel (cm) | Velocidad de Infiltración (cm/s) | Altura del nivel (m): | Tiempo (min.) | Intervalo de tiempo (min.) | Descenso del nivel (cm) | Descenso acumulado del nivel (cm) | Velocidad de Infiltración (cm/s) | Altura del nivel (m): | Tiempo (min.) | Intervalo de tiempo (min.) | Descenso del nivel (cm) | Descenso acumulado del nivel (cm) | Velocidad de Infiltración (cm/s) | Altura del nivel (m): | Tiempo (min.) | Intervalo de tiempo (min.) | Descenso del nivel (cm) | Descenso acumulado del nivel (cm) | Velocidad de Infiltración (cm/s) | Altura del nivel (m): |
| 0 | 0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.43 | 0 | 0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.65 | 0 | 0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.50 | 0 | 0 | 0 | 0.0 | 0 | 0.60 |
| 1 | 1 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.42 | 1 | 1 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 0.64 | 1 | 1 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.49 | 1 | 1 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 0.58 |
| 2 | 1 | 0.6 | 1.4 | 0.6 | 0.42 | 2 | 1 | 1.1 | 2.4 | 1.1 | 0.63 | 2 | 1 | 0.6 | 1.4 | 0.6 | 0.49 | 2 | 1 | 1.2 | 2.9 | 1.2 | 0.57 |
| 4 | 2 | 0.7 | 2.1 | 0.4 | 0.41 | 4 | 2 | 2.6 | 5.0 | 1.3 | 0.60 | 4 | 2 | 0.7 | 2.1 | 0.4 | 0.48 | 4 | 2 | 1.3 | 4.2 | 0.7 | 0.56 |
| 8 | 4 | 1.6 | 3.7 | 0.4 | 0.39 | 8 | 4 | 2.3 | 7.3 | 0.6 | 0.58 | 8 | 4 | 1.1 | 3.2 | 0.3 | 0.47 | 8 | 4 | 1.9 | 6.1 | 0.5 | 0.54 |
| 10 | 2 | 0.6 | 4.3 | 0.3 | 0.39 | 10 | 2 | 1.2 | 8.5 | 0.6 | 0.57 | 10 | 2 | 0.5 | 3.7 | 0.3 | 0.46 | 10 | 2 | 1.2 | 7.3 | 0.6 | 0.53 |
| 15 | 5 | 1.3 | 5.6 | 0.3 | 0.37 | 15 | 5 | 4.9 | 13.4 | 1.0 | 0.52 | 15 | 5 | 0.6 | 4.3 | 0.1 | 0.46 | 15 | 5 | 2.3 | 9.6 | 0.5 | 0.50 |
| 20 | 5 | 2.2 | 7.8 | 0.4 | 0.35 | 20 | 5 | 2.2 | 15.6 | 0.4 | 0.49 | 20 | 5 | 1.1 | 5.4 | 0.2 | 0.45 | 20 | 5 | 1.2 | 10.8 | 0.2 | 0.49 |
| 30 | 10 | 7.6 | 15.4 | 0.8 | 0.28 | 30 | 10 | 10.8 | 26.4 | 1.1 | 0.39 | 30 | 10 | 13.0 | 18.4 | 1.3 | 0.32 | 30 | 10 | 11.6 | 22.4 | 1.2 | 0.38 |
| 45 | 15 | 7.4 | 22.8 | 0.5 | 0.20 | 45 | 15 | 11.5 | 37.9 | 0.8 | 0.27 | 45 | 15 | 12.1 | 30.5 | 0.8 | 0.20 | 45 | 15 | 13.6 | 36.0 | 0.9 | 0.24 |
| 60 | 15 | 8.8 | 31.6 | 0.6 | 0.11 | 60 | 15 | 12.7 | 50.6 | 0.8 | 0.14 | 60 | 15 | 15.8 | 46.3 | 1.1 | 0.04 | 60 | 15 | 16.0 | 52.0 | 1.1 | 0.08 |

K 5.27E-05

K 9.83E-05

K 8.25E-04

K 9.43E-04

"MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO LIBRE MEDIANTE SOFTWARE MODFLOW EN LA COLPA"
3.1. INVENTARIO DE POZOS DE AGUA SUBTERRANEA EN VALLE DE CAJAMARCA

| N° | DISTRITO | PROPIETARIO | ESTE | NORTE | Cota m.s.n.m. | Tipo | Prof.Act | Diam. Ø | Prof. (m) | N.A. m.s.n.m. |
|----|----------------|---------------------------------|-----------|-----------|------------------|-----------|----------|------------|--------------|------------------|
| 1 | Baños del Inca | Alberto Cabanillas | 779503.6 | 9206686.9 | 2671.4 | Anillado | 14 | 1.2 | 1.1 | 2670 |
| 2 | Baños del Inca | Fundo Zootécnia Huayrapongo | 779476.9 | 9206052.2 | 2663.6 | Anillado | 5 | 1.2 | 0.6 | 2663 |
| 3 | Baños del Inca | Diana Tocto Herazo | 779434.8 | 9206130.8 | 2665.8 | Anillado | 12 | 1.2 | 1.2 | 2665 |
| 4 | Baños del Inca | Rogelio Celis Ventura | 780144.8 | 9207208.2 | 2677.1 | Anillado | 20 | 1.2 | 2.6 | 2675 |
| 5 | Cajamarca | Turismo Dias | 776225.5 | 9206733.2 | 2710.9 | Anillado | 25 | 1.2 | 21.9 | 2689 |
| 6 | Cajamarca | Raul Cerna Rosales | 777045.4 | 9206224.8 | 2700.1 | Anillado | 18 | 1.2 | 13.9 | 2686 |
| 7 | Cajamarca | Juan Carlos Alcalde | 776778.5 | 9206151.4 | 2707.5 | Anillado | 27 | 1.2 | 20.1 | 2687 |
| 8 | Baños del Inca | Iglesia Jesús de Nazaret Tartar | 780226.8 | 9209698.2 | 2739.0 | Anillado | 20 | 1.2 | 16.7 | 2722 |
| 9 | Baños del Inca | Grifo Otuzco | 778808.2 | 9210372.3 | 2711.6 | Anillado | 9 | 1.2 | 3.5 | 2708 |
| 10 | Baños del Inca | El Zarco | 777164.2 | 9208672.1 | 2693.8 | Anillado | 14 | 1.2 | 1.8 | 2692 |
| 11 | Baños del Inca | Francisco Banda Culqui | 775374.2 | 9210973.9 | 2726.3 | Anillado | 14 | 1.2 | 3.7 | 2723 |
| 12 | Baños del Inca | Carlos Marín | 775323.8 | 9210841.6 | 2724.4 | Anillado | 14 | 1.2 | 5.3 | 2719 |
| 13 | Cajamarca | UNC Pozo N° 02 | 776637.6 | 9206820.6 | 2700.9 | Tubular | 70 | 0.3 | 13.4 | 2688 |
| 14 | Cajamarca | UNC Pozo N° 01 | 776385.8 | 9206983.9 | 2701.0 | Tubular | 85 | 0.3 | 9.3 | 2692 |
| 15 | Cajamarca | UNC Pozo N° 03 | 777090.3 | 9207120.0 | 2689.6 | Tubular | 110 | 0.3 | 8.4 | 2681 |
| 16 | Cajamarca | Isidro Cerquin Alcantara | 777263.5 | 9206937.4 | 2687.5 | Anillado | 9 | 1.2 | 3.5 | 2684 |
| 17 | Cajamarca | Lucy Altamirano | 777850.1 | 9205681.0 | 2684.8 | Anillado | 10 | 1.2 | 6.1 | 2679 |
| 18 | Cajamarca | Oscar Chavez | 777629.9 | 9205714.1 | 2690.0 | Anillado | 11.3 | 1.2 | 9.4 | 2681 |
| 19 | Cajamarca | Clinica Limatambo 1 | 773556.2 | 9208763.6 | 2753.2 | Anillado | 19 | 1.2 | 10.5 | 2743 |
| 20 | Cajamarca | Clinica Limatambo 2 | 773556.2 | 9208763.6 | 2753.2 | Anillado | 21.2 | 1.2 | 12.2 | 2741 |
| 21 | Cajamarca | Restaurante el Mundialito | 773558.0 | 9208764.2 | 2748.7 | Anillado | 10.5 | 1.2 | 5.7 | 2743 |
| 22 | Baños del Inca | Wilder Ramirez Requelme | 781101.5 | 9205368.8 | 2646.8 | Anillado | 8 | 1.2 | 1.1 | 2646 |
| 23 | Baños del Inca | Abraham Huaman Ocas | 780944.4 | 9205622.0 | 2655.6 | Anillado | 10 | 1.2 | 0.8 | 2655 |
| 24 | Baños del Inca | Abraham Casas Linares | 781268.8 | 9205338.0 | 2646.3 | Anillado | 8 | 1.2 | 1.5 | 2645 |
| 25 | Llacanora | Llanos | 784027.4 | 9202989.2 | 2647.9 | Anillado | 27 | 1.2 | 12.2 | 2636 |
| 26 | Llacanora | Familia Huaccha Gonzales | 783531.4 | 9202826.1 | 2649.1 | Anillado | 22 | 1.2 | 6.5 | 2643 |
| 27 | Jesús | Laura Lulichac Julcamoro | 781987.1 | 9202037.9 | 2631.7 | Anillado | 5 | 1.2 | 0.5 | 2631 |
| 28 | Jesús | Luis Malca | 781978.5 | 9202024.8 | 2630.1 | Anillado | 8 | 1.2 | 1.1 | 2629 |
| 29 | Jesús | Pedro Celada Cachi | 781975.3 | 9202007.4 | 2631.9 | Anillado | 8 | 1.2 | 0.5 | 2631 |
| 30 | Llacanora | Carlos Pajares | 780858.8 | 9203729.0 | 2653.5 | Anillado | 10 | 1.2 | 4.1 | 2649 |
| 31 | Llacanora | Pedro Pajares | 780895.2 | 9203805.9 | 2653.9 | Anillado | 11 | 1.2 | 7.9 | 2646 |
| 32 | Llacanora | Santiago Pajares | 780829.0 | 9203570.1 | 2653.2 | Anillado | 14 | 1.2 | 4.3 | 2649 |
| 33 | Llacanora | Alan Abanto Pajares | 780343.1 | 9204577.7 | 2652.6 | Anillado | 6 | 1.2 | 0.6 | 2652 |
| 34 | Llacanora | UNC Fundo La Victoria | 780604.1 | 9204477.2 | 2649.9 | Tubular | 80 | 0.3 | 0.8 | 2649 |
| 35 | Cajamarca | Albina Duran | 779255.1 | 9203376.9 | 2663.7 | Anillado | 15 | 1.2 | 1.9 | 2662 |
| 36 | Baños del Inca | Petronila Mantilla Caruanambo | 780749.9 | 9208095.9 | 2696.7 | Anillado | 18 | 1.2 | 13.2 | 2683 |
| 37 | Cajamarca | Felipe Cortez Guevara | 777576.6 | 9205148.9 | 2697.2 | Anillado | 25 | 1.2 | 16.0 | 2681 |
| 38 | Cajamarca | Frente a Penal | 777586.7 | 9204279.5 | 2692.6 | Anillado | 20 | 1.2 | 12.5 | 2680 |
| 39 | Cajamarca | Jose Duran Aquino | 778884.0 | 9202121.7 | 2705.0 | Anillado | 45 | 1.2 | 37.6 | 2667 |
| 40 | Cajamarca | Segundo Aquino Sapo | 778823.6 | 9202309.7 | 2695.5 | Anillado | 33 | 1.2 | 27.7 | 2668 |
| 41 | Baños del Inca | Centro Poblado Cerrillo Bajo | 2146231.0 | 9211187.0 | 2721.0 | Perforado | 35 | 0.3 | 12.6 | 2708 |

Fuente: Hernandez, (2019)