

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA DE POSGRADO**



**DETERMINACIÓN DE LA RECARGA HÍDRICA Y  
DIRECCIONES DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA DE LA  
SUBCUENCA DEL RÍO AMAYO, MUNICIPIOS DE TEJUTLA  
Y LA REINA, CHALATENANGO**

**PRESENTADO POR:**

**JOSUÉ ISAÍ PORTILLO HERNÁNDEZ**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:**

**MAESTRO EN GESTIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLÓGICOS**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, ENERO DE 2025**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR:**

**MSc. JUAN ROSA QUINTANILLA**

**SECRETARIO GENERAL:**

**LCDO. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO:**

**ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA**

**SECRETARIO:**

**ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**DIRECTOR:**

**MSc. ELMER ARTURO CARBALLO RUÍZ**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**  
**ESCUELA DE POSGRADO**

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**MAESTRO EN GESTIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLOGÍCOS**

Título:

**DETERMINACIÓN DE LA RECARGA HÍDRICA Y  
DIRECCIONES DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA DE  
LA SUBCUENCA DEL RÍO AMAYO, MUNICIPIOS DE  
TEJUTLA Y LA REINA, CHALATENANGO**

Presentado por:

**JOSUÉ ISAÍ PORTILLO HERNÁNDEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

**MSc. JULIO ERNESTO PAYES HERNÁNDEZ**

SAN SALVADOR, ENERO DE 2025

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

**MSc. JULIO ERNESTO PAYES HERNÁNDEZ**

## DEDICATORIA.

A mi padre Otilio Portillo Gutiérrez y a mi madre María Aracely Hernández Rosales, por ser mi sustento emocional y apoyo incondicional en todos los aspectos, que me permitió lograr esta meta.

## **AGRADECIMIENTOS:**

El proyecto Agua Futura y a la cooperación italiana por el financiamiento de mis estudios de maestría que culminaron con la presentación de este trabajo de graduación.

Mi asesor de tesis MSc. Julio Ernesto Payes Hernández por todos los consejos, lineamientos e indicaciones con las cuales fue posible darle forma al presente trabajo.

La escuela de posgrados de la Universidad de El Salvador y en especial a la coordinadora de la maestría PhD. Tania Torres Rivera por todo el apoyo y por haber facilitado que pudiera culminar mis estudios.

Al MSc. Mario Guevara por ayudarme con sus opiniones y conocimiento a concretar la etapa de análisis de resultados.

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos naturales (MARN) por haber facilitado información medida en las estaciones meteorológicas correspondientes.

La unidad ambiental de las alcaldías de los municipios de Tejutla y de La Reina por darme el apoyo y acompañamiento en las campañas de campo para medir y hacer pruebas en la zona de estudio, sin ellos, este trabajo no podría haberse realizado.

Al señor Oscar Francisco Portillo encargado de la unidad ambiental de La Reina por todo el apoyo que dio para poder realizar las visitas de campo.

Al señor Juan Hernández por estar en la disponibilidad de medir el nivel del pozo y el pluviómetro ubicados en la estación de bombeo de la junta de agua del caserío Aguacayo.

Mis compañeros de la maestría que de alguna u otra forma me ayudaron cuando lo necesité mientras estuvimos en este proceso de estudio.

## **RESUMEN**

Las comunidades rurales de El Salvador necesitan toda información de la que se disponga relacionada a sus fuentes de agua. Es primordial que se promuevan investigaciones en zonas como la subcuenca del Río Amayo para que sirvan como precedente en la toma de decisiones y en la elaboración de proyectos destinados a la explotación de los recursos hídricos.

La presente investigación abarca el cálculo de la recarga de los acuíferos ubicados en la subcuenca del Río Amayo por las metodologías de Schosinsky y Variación de Niveles Freáticos haciendo uso de información obtenida en de bibliografía, del Ministerio de Medio Ambiente y recursos Naturales (MARN) e información medida en campo. Hablando en específico de la información medida en campo esta fue: la infiltración medida con permeámetro de guelph, niveles de pozos, precipitación y temperatura con imágenes satelitales. El análisis gira en torno a determinar procedencia del agua desde un punto de vista regional y local, estableciendo las primeras bases para definir si la recarga es mayoritariamente local o regional, para ello se hace uso de las características de los tipos de acuíferos encontrados en la zona partiendo del mapa geológico, hidrogeológico y de tipos de suelo de El Salvador. Además, se definen las direcciones de flujo del agua subterránea de la subcuenca en estudio.

## INDICE DE CONTENIDO

PREGUNTA DE LA INVESTIGACIÓN .....	x
OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	xi
JUSTIFICACIÓN .....	xi
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO. ....	1
1.1. Antecedentes. ....	1
1.2. Descripción del área de estudio.....	2
1.3. Uso de suelo. ....	4
1.4. Datos meteorológicos. ....	6
1.5. Geología. ....	8
1.6. Hidrogeología. ....	11
1.7. Metodología de Schosinsky para la obtención de la recarga hídrica en el área de una cuenca. ....	12
1.8. Obtención de la permeabilidad del suelo utilizando el permeámetro de Guelph.....	16
1.9. Cálculo de la recarga hídrica por el método de variación en los niveles freáticos. ....	19
1.10. Teledetección térmica.....	21
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA. ....	25
2.1. Trabajo de gabinete. ....	25
2.1.1. Obtención de parámetros necesarios en el Balance hídrico según Schosinsky:.....	25
2.1.2. Obtención de mapas de interés para el estudio. ....	26
2.1.3. Obtención de parámetros necesarios para la recarga por el método de Variación de Niveles Freáticos: .....	26
2.2. Trabajo de Campo. ....	26
2.2.1. Inventario de puntos de agua. ....	27
2.2.2. Recolección de información pluviométrica.....	30
2.2.3. Pruebas de infiltración. ....	32
2.3. Procesamiento de datos.....	34
2.3.1. Direcciones de flujo de agua subterránea.....	34
2.3.2. Recarga hídrica por la metodología de Schosinsky.....	35
2.3.3. Recarga hídrica por la metodología de Variación de Niveles Freáticos. ....	48
CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE RESULTADOS. ....	50
3.1. Dirección de flujo de agua subterránea.....	50

3.2. Interpretación de los niveles freáticos con respecto a la precipitación en la Subcuenca del Río Amayo. ....	52
3.3. Recarga hídrica. ....	61
3.3.1. Recarga hídrica utilizando la metodología de Schosinsky y ETP con Temperatura proporcionada por MARN. ....	61
3.3.2. Recarga hídrica utilizando la metodología de Schosinsky y ETP con temperatura a partir de Imágenes satelitales Landsat 8. ....	63
3.3.3. Recarga hídrica utilizando el método de Variación de Niveles Freáticos. ....	65
3.3.4. Comparación de resultados de recarga. ....	67
3.4. Comparación de precipitación obtenida in situ y obtenida por el MARN. ....	69
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES. ....	72
CAPÍTULO V: RECOMENDACIONES. ....	76
CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFÍA ....	78
ANEXOS. ....	80

## **INDICE DE FIGURAS**

Figura 1.1. Mapa de ubicación de la subcuenca del río Amayo, elaboración propia de acuerdo a la base de datos del CNR. ....	2
Figura 1.2. Características generales de la subcuenca del río Amayo. Elaboración propia. ....	3
Figura 1.3. Mapa de pendientes de la subcuenca del Río Amayo, elaboración propia de acuerdo a la base de datos del CNR y el Modelo de Elevación Digital de El Salvador. ....	4
Figura 1.4. Mapa de uso de suelos de la subcuenca del Río Amayo, según (CNR, 1996). ....	5
Figura 1.5. Mapa de zonas Climáticas de El Salvador, elaborado por SNET según Koppen, Sapper, Lauer. ....	7
Figura 1.6. Gráfico de precipitación promedio mensual obtenido a partir de datos registrados en la estación G03-Nueva Concepción en el periodo de 2015-2021. Elaborada a partir de datos proporcionados por el MARN. ....	7
Figura 1.7. Gráfico de temperatura promedio mensual en °C correspondientes a la estación G03-Nueva Concepción en el periodo 2015-2021. Elaborado a partir de los datos proporcionados por el MARN. ....	8
Figura 1.8. Mapa Geológico de la Subcuenca del Río Amayo. Corte hecho a partir del mapa Geológico de la República de El Salvador de escala 1:100,000 ( (Misión Geológica Alemana, 1978).9	9

Figura 1.9. Mapa Hidrogeológico de la subcuenta del río Amayo, obtenido del mapa hidrogeológico de El Salvador de escala 1:100,000 (ANDA, 2011). .....	11
Figura 1.10. Configuración de la instalación del permeámetro de Guelph con sus parámetros de interés (Gabriels, Lobo, & Pulido, 2014). .....	17
Figura 1.11. Escala del factor C en función de $h/\alpha$ . (Gabriels, Lobo, & Pulido, 2014) según (Reynolds & Elrick, 1987). .....	19
Figura 2.1. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas por medio de las cuales se obtuvieron los datos de precipitación, evapotranspiración y temperatura. Elaboración propia de acuerdo a la base de datos del CNR. ....	27
Figura 2.2. Ubicación geográfica de los pozos utilizados para la determinación del nivel freático del agua subterránea de la Subcuenca del Río Amayo. Elaboración propia de acuerdo a la base de datos del CNR. ....	28
Figura 2.3. Mapa señalando la ubicación en la que se instaló el pluviómetro para la medición de la precipitación en la Subcuenca del Río Amayo (notar que es el mismo mapa de la figura 2.2). Elaboración propia de acuerdo a la base de datos del CNR.....	31
Figura 2.4. Instalación de pluviómetro para mediciones de precipitación en sitio. ....	31
Figura 2.5. Ubicación geográfica del sitio en el que se realizaron las pruebas de infiltración. Se aprecia además el tipo de suelo en el que se realizó cada prueba de acuerdo a (MAG, 1966). .....	32
Figura 2.6. Toma de datos de infiltración y la configuración del permeámetro de Guelph en campo. ....	34
Figura 2.7. Representación gráfica de la precipitación y evapotranspiración de los datos medidos en la estación meteorológica de Nueva Concepción. Fuente: MARN. ....	40
Figura 2.8. Cálculo de permeabilidad del punto PO-2 por medio de la hoja de cálculo de SOILMOISTURE. Para este punto se utilizaron las cargas de 5cm y 10cm y reservorios combinados. ....	41
Figura 2.9. Criterios utilizados para la división de polígonos a los cuales se le aplicará la metodología de Schosinsky. ....	45
Figura 2.10. Cálculo del balance hídrico de suelos para el polígono POL-1. Visualización general de la hoja de cálculo utilizada para determinar la recarga hídrica de acuerdo a la metodología de Schosinsky. ....	47
Figura 3.1. Direcciones de flujo del agua subterránea evidenciado por los pozos estudiados, mostrado sobre las unidades acuíferas encontradas en la zona de estudio, obtenido del mapa hidrogeológico de El Salvador de escala 1:100,000 (ANDA, 2011). ....	50
Figura 3.2. Direcciones de flujo del agua subterránea evidenciado por los pozos estudiados, mostrado sobre el mapa en 3D de elevación de la zona de estudio, elaboración propia a partir de la base de datos del CNR. ....	51
Figura 3.3. Respuesta del nivel freático de los pozos estudiados con respecto a la precipitación registrada en la zona de estudio (de Abril a Noviembre). ....	55

Figura 3.4. Nomenclatura de colores usados para identificar los gráficos de los pozos mostrados en la figura 3.3 y 3.4. ....	56
Figura 3.5. Respuesta del nivel freático de los pozos estudiados con respecto a la precipitación registrada en la zona de estudio (de Abril a Noviembre) para los pozos PO-1.....	56
Figura 3.5. Continuación. Respuesta del nivel freático de los pozos estudiados con respecto a la precipitación registrada en la zona de estudio (de Abril a Noviembre) para los pozos PO-2 y PO-3. ....	57
Figura 3.5. Continuación. Respuesta del nivel freático de los pozos estudiados con respecto a la precipitación registrada en la zona de estudio (de Abril a Noviembre) para los pozos PO-4 y PO-5. ....	58
Figura 3.5. Continuación. Respuesta del nivel freático de los pozos estudiados con respecto a la precipitación registrada en la zona de estudio (de Abril a Noviembre) para los pozos PO-6 y PO-7. ....	59
Figura 3.5. Continuación. Respuesta del nivel freático de los pozos estudiados con respecto a la precipitación registrada en la zona de estudio (de Abril a Noviembre) para los pozos PO-8 y PO-9. ....	60
Figura 3.6. Direcciones de flujo del agua subterránea evidenciado por los pozos estudiados, mostrado sobre el mapa geológico de la Subcuenca del Río Amayo. Corte hecho a partir del mapa Geológico de la República de El Salvador de escala 1:100,000 (Misión Geológica Alemana, 1978). ....	61
Figura 3.7. Recarga potencial determinada por zona utilizando la metodología de Schosinsky y ETP proporcionada por MARN. ....	63
Figura 3.8. Recarga potencial determinada por zona utilizando la metodología de Schosinsky y ETP usando Temperatura calculada a partir de Teledetección Térmica. ....	65
Figura 3.9. Distribución de pozos con respecto a las zonas de análisis en las que se aplicó la metodología de Schosinsky. ....	68
Figura 3.10. Precipitación registrada en la estación Nueva Concepción (datos del año 2020) comparada con la precipitación registrada en Aguacayo (año 2021). Se incluye además, la línea de tendencia con su respectiva relación. ....	71

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Componentes del coeficiente de infiltración (Schosinsky & Losilla, 2000). ....	14
Tabla 1.2. Punto de marchitez permanente y capacidad de campo en porcentaje por peso de suelo seco de diferentes texturas de suelos (Grassi, 1976). ....	14
Tabla 1.3. Profundidad de raíces de diferentes cultivos (Grassi, 1976). ....	15

Tabla 1.4. Categorías de medios porosos usados para la estimación de $\alpha$ *según (Elrick, Reynolds, & Tan, 1989).....	18
Tabla 1.5. Resumen de las estadísticas sobre rendimiento específico de 17 estudios recopilados por (Johnson, 1967). .....	21
Tabla 1.6. Constantes de calibración de la banda térmica del satélite Landsat (Chander, Markham, & Helder, 2009).....	22
Tabla 2.1. Inventario de puntos de agua a partir de pozos localizados en la subcuenca de estudio. ....	29
Tabla 2.2. Tipos de suelo que constituyen la subcuenca del río Amayo según (MAG, 1966).....	35
Tabla 2.3. Punto de Marchitez Permanente y Capacidad de Campo para suelos de varias Texturas de acuerdo a USDA (SNET, 2005). .....	36
Tabla 2.4. Valores de Evapotranspiración en mm, Obtenidos usando Hargreaves y las imágenes Landsat 8. ....	39
Tabla 2.5. Valores de precipitación en mm, presentados de forma mensual correspondientes a la zona de estudio. Fuente: MARN. ....	39
Tabla 2.6. Valores de Evapotranspiración en mm, presentados de forma mensual correspondientes a la zona de estudio. Fuente: MARN.....	40
Tabla 2.7. Categoría del medio poroso utilizado en el cálculo de permeabilidad de acuerdo a SOILMOISTURE. ....	42
Tabla 2.8. Parámetros utilizados en el cálculo de permeabilidad correspondientes al permeámetro de Guelph de acuerdo a SOILMOISTURE.....	42
Tabla 2.9. Parámetros a utilizar en la metodología de Schosinsky por cada polígono de la subcuenca del río Amayo. ....	46
Tabla 2.10. Parámetros utilizados para determinar la recarga hídrica de acuerdo al método de variación de niveles freáticos.....	49
Tabla 3.1. Resume por zona de la recarga obtenida con la metodología de Schosinsky y ETP proporcionada por MARN. ....	62
Tabla 3.2. Resume por zona de la recarga obtenida con la metodología de Schosinsky y ETP usando Temperatura calculada a partir de Teledetección Térmica. ....	64
Tabla 3.3. Resumen de resultados de la Recarga Potencial obtenida a partir del método de Variaciones de Niveles Freáticos.....	66
Tabla 3.4. Resumen de resultados de la Recarga Potencial obtenida a partir del método de Variaciones de Niveles Freáticos y Schosinsky para el acuífero libre de roca fracturada. ....	68
Tabla 3.5. Resumen de resultados de la Recarga Potencial obtenida a partir del método de Variaciones de Niveles Freáticos y Schosinsky para el acuífero poroso de gran extensión. ....	68
Tabla 3.6. Comparación entre la precipitación registrada por la estación Nueva Concepción (G03) y la que se registró en el Caserío Aguacayo.....	70

## INTRODUCCIÓN

En la presente investigación se pretende dar un primer paso en el largo camino que representa la descripción de las características y el funcionamiento de un sistema acuífero, en este caso, se toma como zona de estudio la Subcuenca del río Amayo y se centra en la determinación de la dirección de flujo de agua subterránea y la recarga acuífera de la zona a partir de dos metodologías generales: La estimación de la Recarga acuífera a partir de la metodología de Schosinsky y la metodología de Variación de Niveles Freáticos. El interés de la tesis radica en la generación de conocimiento que puede ser usado por las comunidades que habitan la subcuenca como referencia para la correcta gestión del recurso ya que por diversas razones el entendimiento de los sistemas de agua subterránea es ajeno al conocimiento colectivo y se necesita de esfuerzos conjuntos para generar la información necesaria para estos fines.

La investigación está dividida en seis capítulos generales: el Capítulo I, en el cual se encuentra el marco teórico donde se discuten los fundamentos en los que se basan los modelos y métodos utilizados para la determinación de la recarga hídrica explorando variantes como el uso de información medida en la zona y de imágenes satelitales landsat 8 para la obtención de la temperatura y a su vez la evapotranspiración; el Capítulo II, donde se describe la metodología para obtener la información de campo y bibliográfica, así como las consideraciones que llevaron a la selección de los valores utilizados en las metodologías de obtención de recarga; el Capítulo III, donde se recopilan los resultados obtenidos de recarga y direcciones de flujo y se analizan las interpretaciones que se pueden dar del sistema acuífero de la zona; por último, se presentan los Capítulos IV Conclusiones y V Recomendaciones, donde se analizan los resultados obtenidos con respecto a los objetivos e hipótesis planteados para el estudio; finalizando con el Capítulo VI, donde se presenta la bibliografía utilizada para sustentar toda la investigación.

## **PREGUNTA DE LA INVESTIGACIÓN**

La pregunta base de la que se parte es la siguiente:

- ¿Cuál es la influencia que tiene la recarga local en los niveles freáticos del acuífero de la subcuenca del río Amayo, durante la estación húmeda del año hidrológico 2021-2022?

Dicha interrogante nace de las circunstancias observadas en campo al visitar la subcuenca del río Amayo. Aspectos como, una época seca muy marcada con un caudal del río muy pequeño, descensos en pozos someros que los dejan sin aparente nivel freático y un aspecto árido que se observa en la vegetación de la subcuenca.

## **OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

### **OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar la influencia de la recarga local por precipitación en el aumento de los niveles freáticos del acuífero de la subcuenca del río Amayo.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar la hidrogeología del sistema acuífero de la subcuenca del río Amayo.
- Definir el comportamiento de las direcciones de flujo de agua subterránea de la subcuenca del río Amayo por medio del monitoreo de niveles freáticos en los pozos.
- Establecer la relación entre la respuesta de los niveles freáticos y la recarga local por precipitación determinada con los métodos de balance de humedad de suelos y las variaciones de niveles freáticos.

## **JUSTIFICACIÓN**

La presente investigación se enfoca en evaluar y determinar la influencia de la recarga local por precipitación en el aumento de los niveles freáticos en pozos en la subcuenca del río Amayo, así como también determinar las direcciones de flujo de agua subterránea en la región de estudio, con el propósito de conocer de mejor manera el sistema del recurso hídrico en las zonas de extracción del mismo para uso de la comunidad; considerando el aumento de zonas urbanas generado por un alto crecimiento poblacional para que las comunidades posean herramientas para realizar una gestión correcta del agua subterránea.

Hablando específicamente de la subcuenca del río Amayo y considerando que el agua utilizada para usos domésticos proviene únicamente de pozos y manantiales. Las comunidades que hacen uso de esa agua, necesitan conocer la cantidad de agua que se recarga, así como también las zonas de mayor recarga potencial. Con dicha información podrán elaborar planes de regadíos, planes de extracción de agua en los pozos y gestionar de mejor manera las zonas agrícolas con base en la disponibilidad de agua.

Además, considerando que los estudios previos realizados en la zona se limitan a consideraciones generales y zonas extensas (sin delimitar territorios específicos), con la realización de este proyecto de enfocado en una subcuenca pequeña, el mapeo y delimitación de las zonas de recarga de agua subterránea será más detallado, además de que dicho estudio podrá ser usado para futuras investigaciones.

## **CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.**

### **1.1. Antecedentes.**

Zonas rurales como las que conforman la subcuenca del río Amayo son abundantes en el país, dicha zona pertenece a los municipios de Tejutla y La Reina del departamento de Chalatenango. La actividad económica principal es de carácter agropecuario, de modo que las aguas subterráneas de dicha zona son utilizadas en su mayoría para riego y uso doméstico en los cantones que lo constituyen y en el casco urbano. De acuerdo al mapa Hidrogeológico del país realizado por ANDA en la zona existe un acuífero de formaciones volcánicas de reducida permeabilidad, su descripción hasta el momento es de forma generalizada y conviene ampliar los hallazgos obtenidos hasta el momento de la mejor manera posible.

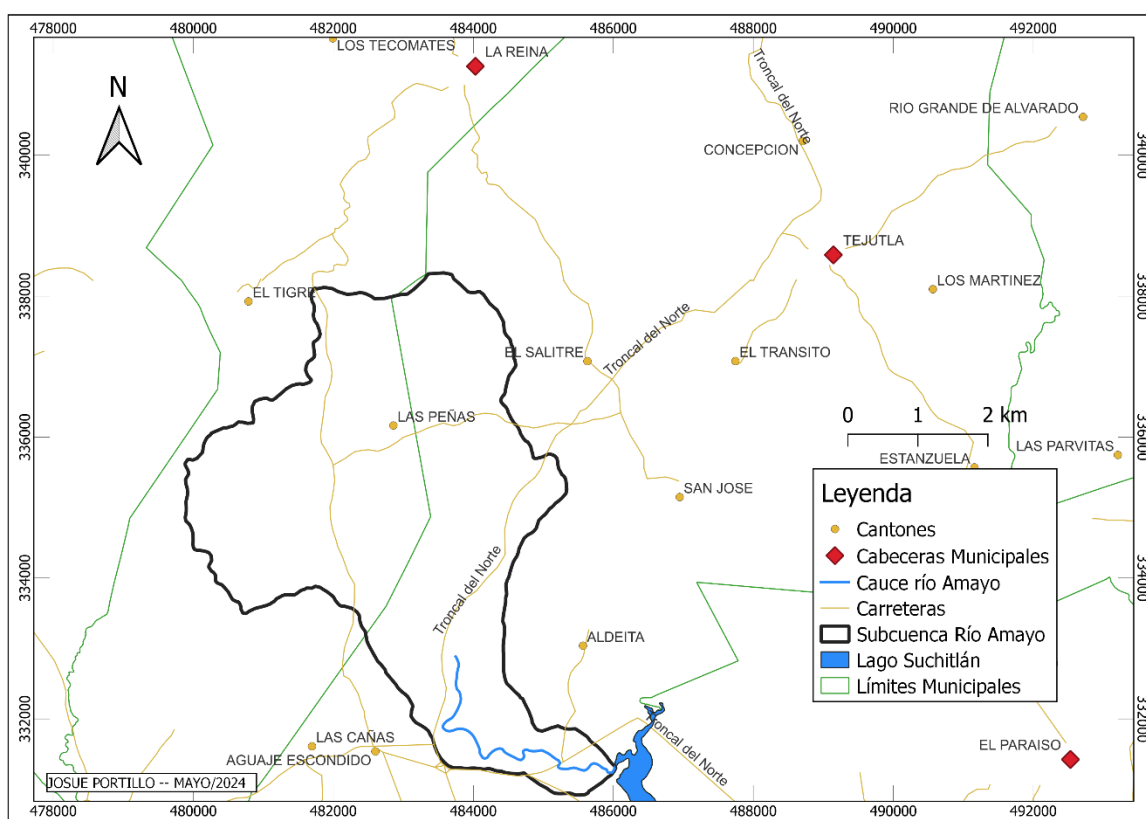
De los documentos consultados, resaltan principalmente los registros del Sistema de Información Hídrica del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales en el cual se muestra una distribución de recarga potencial acuífera, la dirección de flujo de agua subterránea en la cuenca baja del río Amayo, así como también la columna litológica de un pozo ubicado en la zona.

Los siguientes documentos sirven como punto de partida a la presente investigación, en los cuales se describen aspectos de agua subterránea, pero a nivel de país:

- Mapa Geológico de la República de El Salvador, (1978), Misión Geológica Alemana.
- Mapa Hidrogeológico de El Salvador, (2008), ANDA, COSUDE.
- Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico de El Salvador, con énfasis en Zonas Prioritarias, (2017), MARN.
- Plan Nacional de Agua Potable y Saneamiento de El Salvador, (2017), ANDA.

## 1.2. Descripción del área de estudio.

Se ha considerado la subcuenca del río Amayo como límite geográfico para la realización del presente estudio. Esta subcuenca forma parte de la cuenca del río Lempa y se encuentra ubicada compartiendo territorio con los municipios de La Reina en la parte noroeste y de Tejutla en la parte sureste como se puede apreciar en la figura 1.1. El cauce del río Amayo es uno solo y desemboca directamente en el lago Suchitlán el cual es parte del cauce del río Lempa. El cauce del río Amayo depende principalmente de la época lluviosa puesto que este es el momento en que existe un caudal de agua, en la época seca no hay flujo de agua.

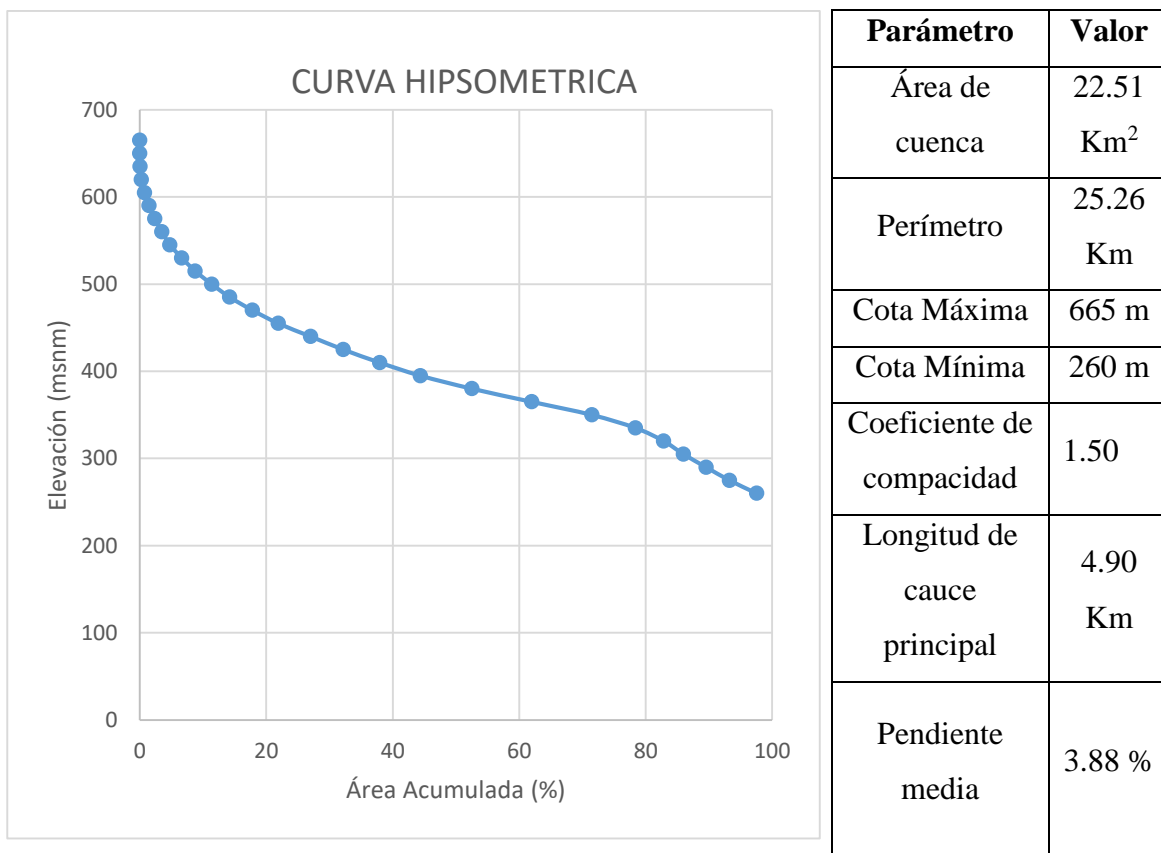


*Figura 1.1. Mapa de ubicación de la subcuenca del río Amayo, elaboración propia de acuerdo a la base de datos del CNR.*

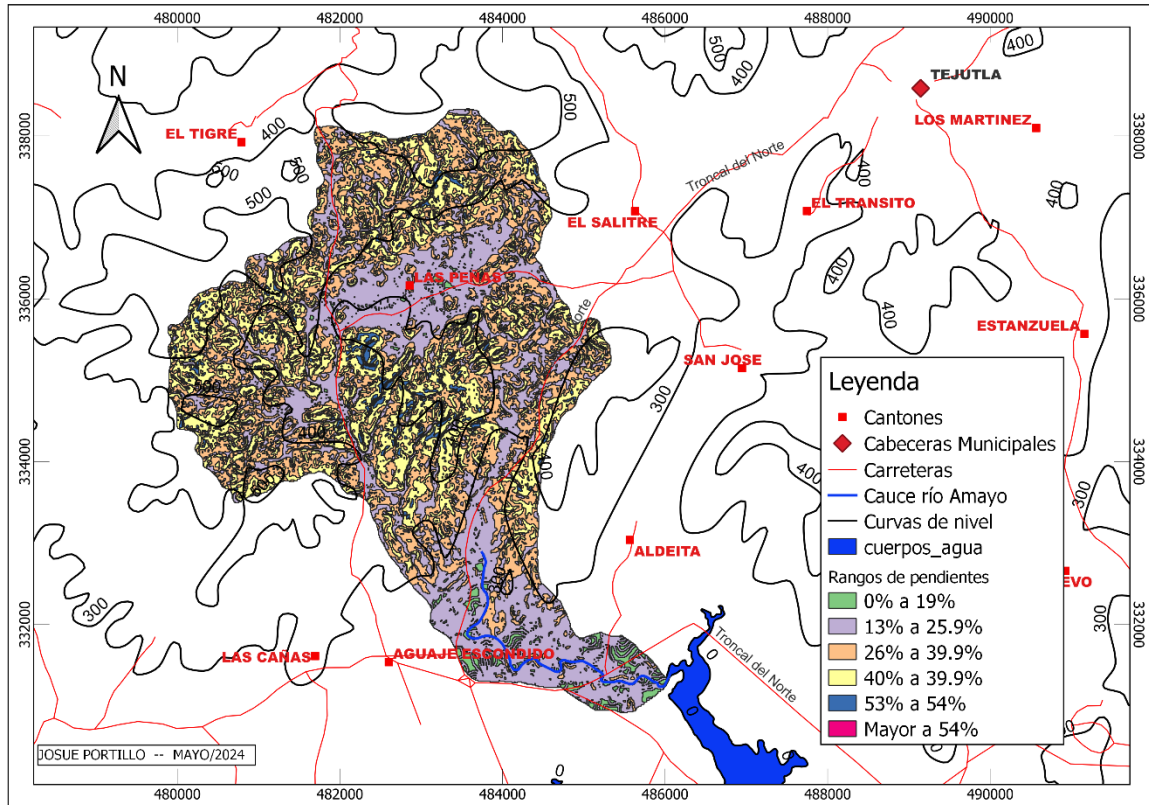
La subcuenca del río Amayo se encuentra en los cantones de El Tigre y Las Peñas pertenecientes a La Reina y los cantones El Salitre, Agujescondido y Aldeita pertenecientes a Tejutla. A la subcuenca se puede acceder por medio de la carretera Troncal del Norte, y a

partir de esta por el cantón Aguajescondido, El Salitre o directamente desde el casco urbano de La Reina.

El recurso hídrico en la zona es administrado por tres juntas de agua localizadas en el Cantón El Tigre, en el Cantón Aguajescondido y la última en la colonia Guadalupe del Cantón Aldeita. Cada una de las juntas de agua posee un pozo perforado para su explotación. La topografía de la zona varía entre 260 msnm y 655 msnm, encontrando su menor altitud en el cantón Aldeita y su mayor altitud en el Cantón el Tigre. La curva hipsométrica y las características de la subcuenca se muestran en la figura 1.2. El mapa de pendientes se puede apreciar en la figura 1.3, este fue elaborado utilizando el Modelo de Elevación Digital de El Salvador.



**Figura 1.2.** Características generales de la subcuenca del río Amayo. Elaboración propia.



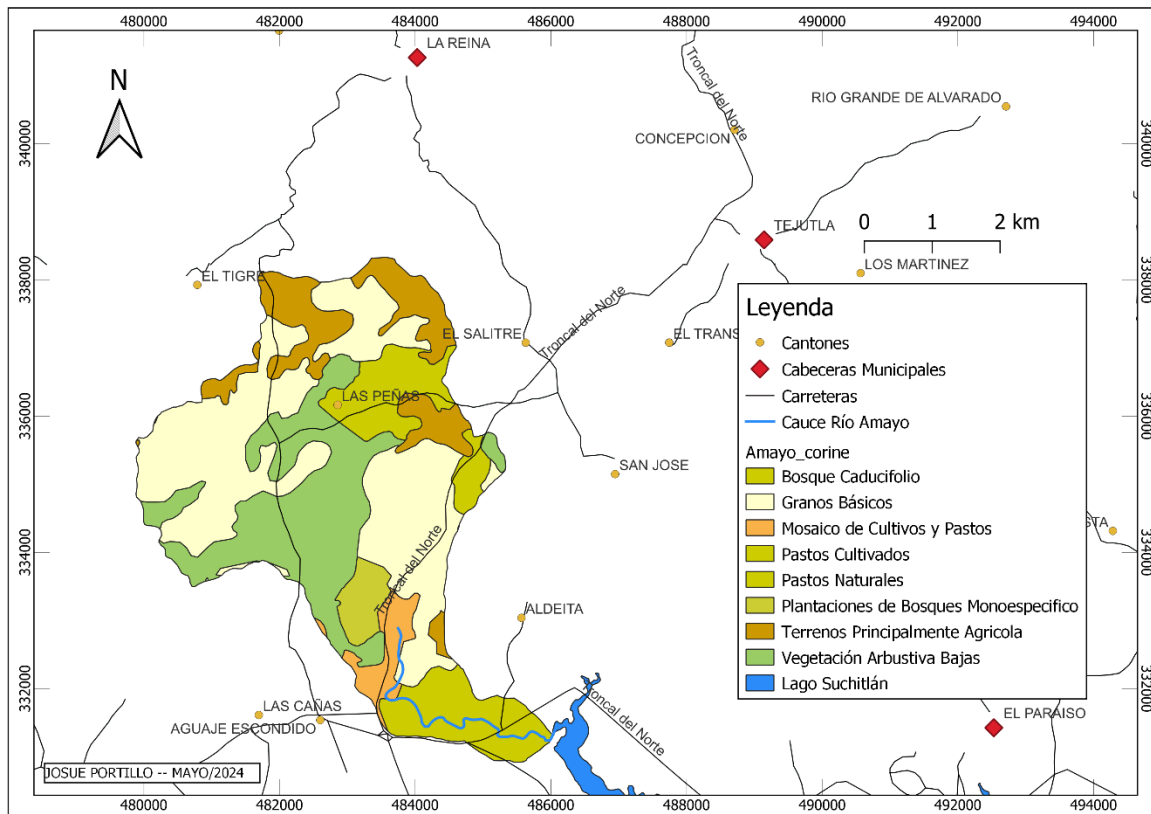
**Figura 1.3.** Mapa de pendientes de la subcuenca del Río Amayo, elaboración propia de acuerdo a la base de datos del CNR y el Modelo de Elevación Digital de El Salvador.

### 1.3. Uso de suelo.

Para la clasificación del uso de suelos se ha utilizado el mapa de uso de suelos proporcionado por el CNR (Centro Nacional de Registro) del año 1996 con escala 1:100,000. La distribución de los tipos de suelo se puede apreciar en la figura 1.4.

La clasificación es la siguiente:

1. Plantaciones de bosques Monoespecífico (2.98 % del área total): Bosques compuestos esencialmente de individuos de la misma especie o de especies diferentes numerosas (2 o 3).
2. Pastos cultivados (8.86 % del área total): Superficies con hierba densa de composición florística constituida principalmente de gramíneas, no incluidas en



**Figura 1.4.** Mapa de uso de suelos de la subcuenca del Río Amayo, según (CNR, 1996).

3. una rotación de cultivos, generalmente bajo prácticas agronómicas y de mejoramiento.
4. Plantaciones de bosques Monoespecífico (2.98 % del área total): Bosques compuestos esencialmente de individuos de la misma especie o de especies diferentes numerosas (2 o 3).
5. Pastos cultivados (8.86 % del área total): Superficies con hierba densa de composición florística constituida principalmente de gramináceas, no incluidas en una rotación de cultivos, generalmente bajo prácticas agronómicas y de mejoramiento.
6. Mosaico de cultivos y pastos (3.54 % del área total): Yuxtaposición de pequeñas parcelas de cultivos anuales diversificadas, de pastos y/o de cultivos permanentes.

7. Pastos Naturales (7.01 % del área total): Zonas de pastoreo en altitudes lejos de las viviendas y de los cultivos.
8. Bosque caducifolio (1.81 % del área total): Comprende el conjunto de las formaciones constituidas por árboles, pero también por los arbustos. Estos bosques comprenden todos los grupos vegetativos donde los árboles tienen una cubierta aparente (proyección vertical al suelo de la corona) superior a 75%.
9. Vegetación arbustiva baja (23.76 % del área total): Representa los cinturones de vegetación a orillas de los ríos.
10. Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural (12.83 % del área total): Superficies principalmente agrícolas, interrumpidas por espacios naturales importantes.
11. Granos básicos (39.21 % del área total): Superficies de cultivos anuales herbáceos los cuales presentan superficies de terreno de forma homogénea.

#### **1.4. Datos meteorológicos.**

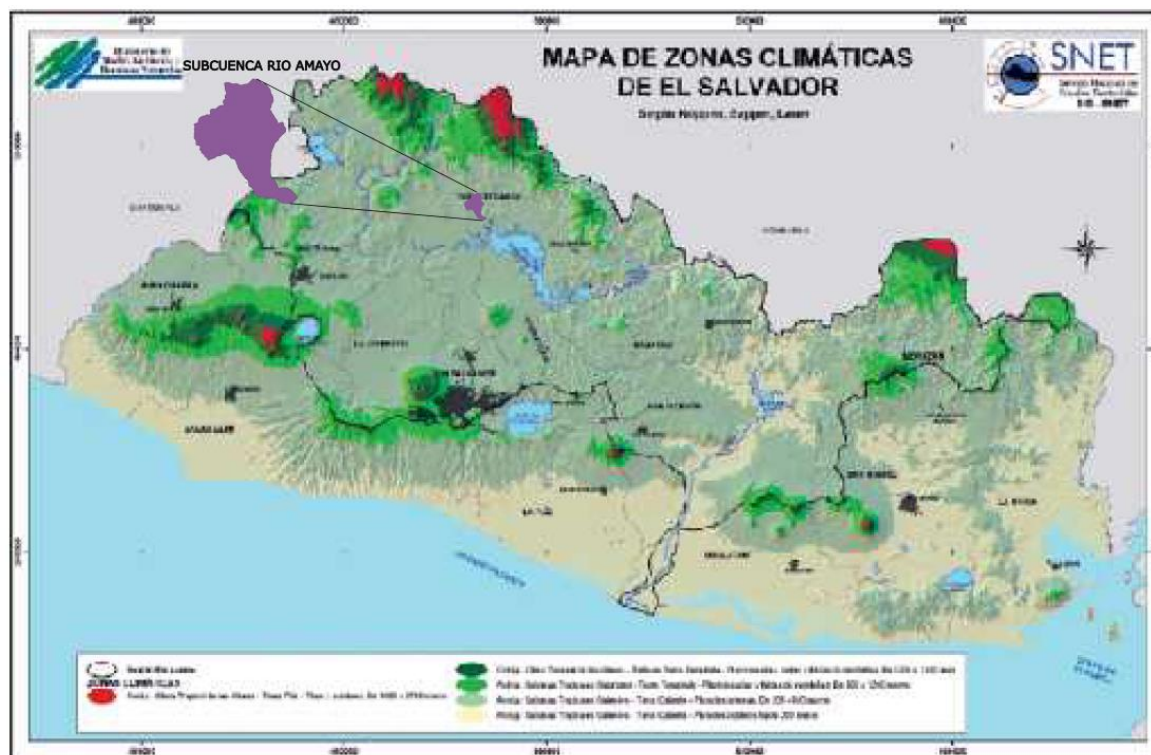
El clima de la subcuenca del río Amayo esta descrita por la información contenida en la figura 1.5. Según el SNET, basándose en la clasificación de Köppen, Sapper, Lauren, la zona de estudio se clasifica como “Sabanas Tropicales Calientes – Tierra Caliente – Planicies internas, de 200 a 800 msnm. Además, en la zona se distinguen dos estaciones, una lluviosa que permanece desde mayo a septiembre y una seca que se presenta desde noviembre a marzo.

Como parte de la información meteorológica se cuenta con datos obtenidos del MARN correspondiente a precipitación, temperatura y evapotranspiración. Se presenta esta información en el periodo de 2015 a 2021.

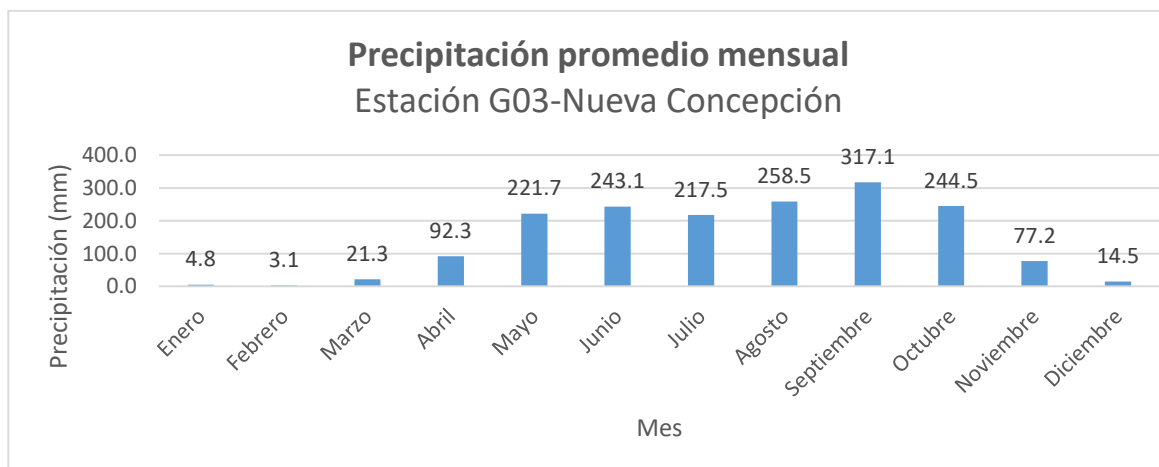
- Precipitación:

La precipitación promedio anual en el periodo de la serie de datos (2015-2021) es de 1715.5 mm, esto es de acuerdo a los datos proporcionados por el MARN de la estación G03-Nueva

concepción. El promedio de estos datos de forma mensual se puede apreciar en la figura 1.6. El mes más lluvioso es el de septiembre y en segundo lugar se tiene el mes de agosto. Los meses en el que se reporta menos precipitación son febrero y enero.



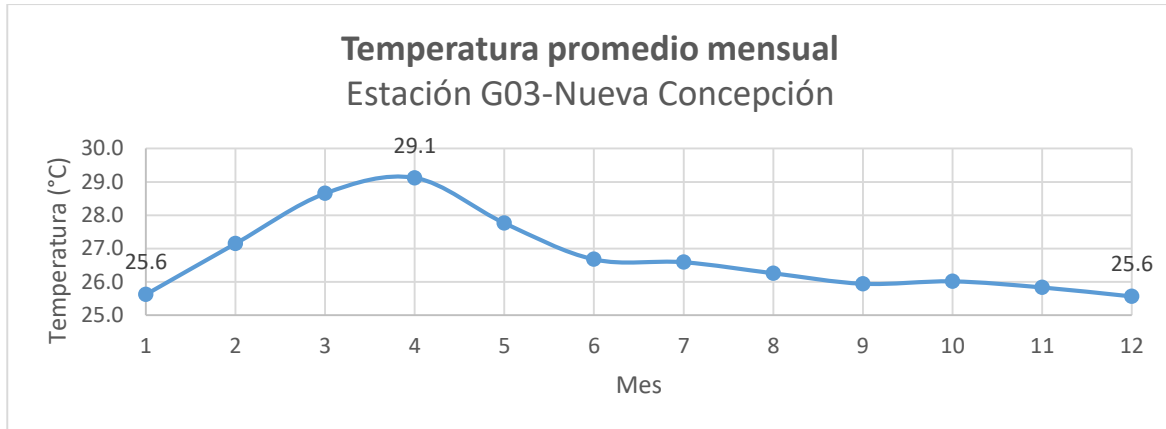
**Figura 1.5.** Mapa de zonas Climáticas de El Salvador, elaborado por SNET según Koppen, Sapper, Lauer.



**Figura 1.6.** Gráfico de precipitación promedio mensual obtenido a partir de datos registrados en la estación G03-Nueva Concepción en el periodo de 2015-2021. Elaborada a partir de datos proporcionados por el MARN.

- Temperatura:

La temperatura también se tomó en el mismo periodo de la precipitación (2015-2021) y fue a partir de la misma estación (G03-Nueva concepción) procedente de los registros del MARN. Los datos de temperatura se pueden apreciar en la figura 1.7. La temperatura varía entre 25.6 °C y 29.1 °C, los meses con menor temperatura son diciembre y enero y el mes con mayor temperatura es abril. Cabe resaltar que estas son temperaturas ambientales.

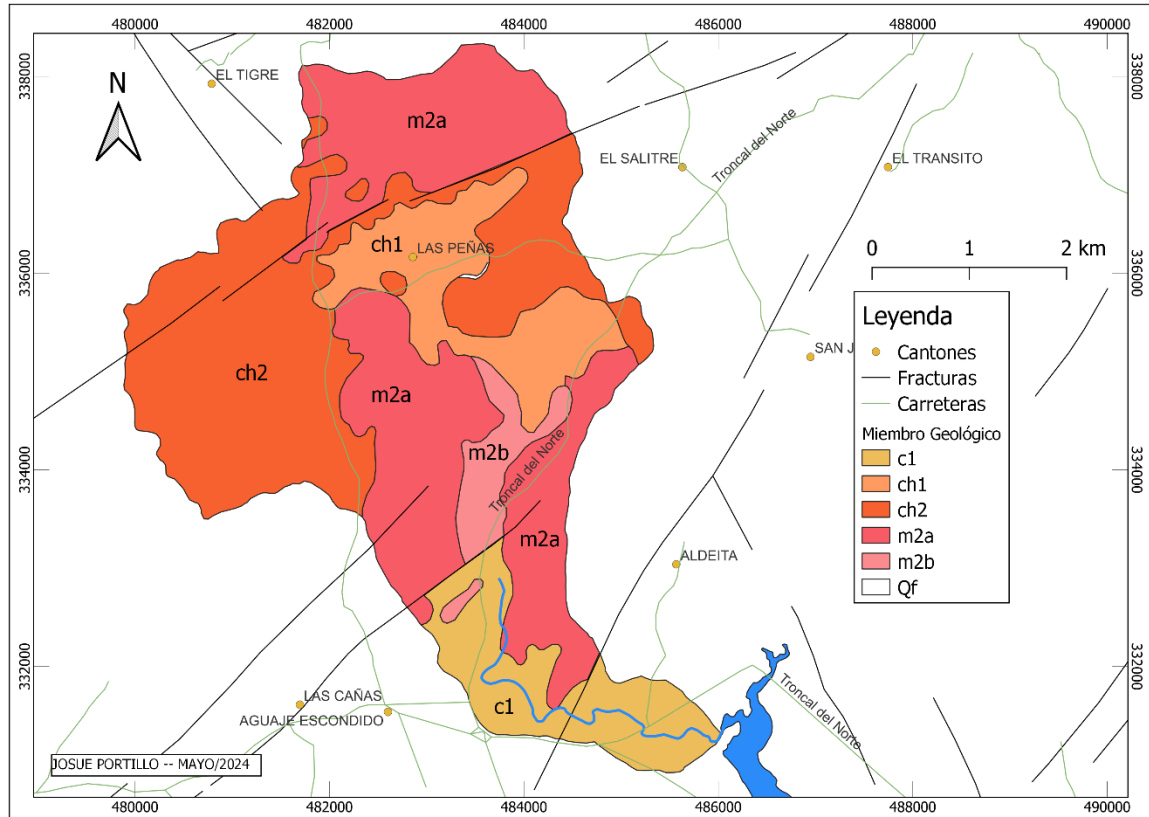


*Figura 1.7. Gráfico de temperatura promedio mensual en °C correspondientes a la estación G03-Nueva Concepción en el periodo 2015-2021. Elaborado a partir de los datos proporcionados por el MARN.*

### 1.5. Geología.

De acuerdo a la figura 1.8 en la cual se observa el Mapa Geológico de la República de El Salvador (Misión Geológica Alemana, 1978), y en este caso, haciendo referencia al corte hecho a partir de la subcuenca en estudio, se pueden observar fracturas con dirección SO-NE tanto en la subcuenca alta, media y baja.

En dicho mapa se pueden observar los miembros respectivos encontrados en la extensión de la subcuenca, así como también, cada uno de los miembros geológicos. A partir del Léxico Estratigráfico (Baxter, 1984), se puede dar una descripción de cada uno de ellos, como sigue a continuación:



**Figura 1.8.** Mapa Geológico de la Subcuenca del Río Amayo. Corte hecho a partir del mapa Geológico de la República de El Salvador de escala 1:100,000 ( *Misión Geológica Alemana, 1978*).

a) Formación Cuscatlán: se describe como una secuencia volcano-sedimentaria del Plio-Pleistoceno. La sección volcánica está constituida por tobas ácidas en la base, seguido por lavas ácidas intermedias y andesitas-basaltos en la parte superior. De acuerdo a la Figura 1.7 en la subcuenca podemos encontrar el miembro c1 correspondiente a esta formación.

- c1: Es el miembro inferior de la Formación Cuscatlán, está constituida por unidades tanto sedimentarias como volcánicas. Las primeras son fluvio-lacustres. Para esta sub cuenca las unidades volcánicas que nos interesan son las “Capas del Lempa Superior”. Éstas se caracterizan por las facies macroclásticas producto de la aparición de un país de erosión (montañas marginales), resultado de los eventos Plio-Pleistocénicos. En la Cuenca de Lempa han sido reconocidas otras localidades con diatomitas, estas se ubican en el Río Amayo, entre otros.

b) Formación Chalatenango: Esta formación es una secuencia de rocas volcánicas ácidas piroclásticas, ignimbritas y epiclastitas, eventualmente en transición a la formación cuscatlán. Como se puede apreciar en la figura 1.7 en la extensión de la subcuenca en estudio podemos encontrar los miembros ch1 y ch2 pertenecientes a esta formación.

- ch1: Está definido como rocas piroclásticas ácidas, epiclastitas volcánicas, ignimbritas y rocas efusivas intercaladas, localmente silicificadas.
- ch2: Es el miembro superior de la Formación Chalatenango. La unidad está constituida por efusivas ácidas de tipo riolítico, eventualmente en transición al miembro c2 de la Formación Cuscatlán, y por piroclastitas subordinadas.

c) Formación Morazán: Esta unidad equivale en parte a Series del Río Lempa, Serie Pliocénica y a Tobas Blancas. En la figura 1.7 podemos notar que en la subcuenca en estudio encontramos dos de los miembros de esta formación: m2a y m2b.

- m2a: Está constituido por rocas efusivas intermedias hasta intermedias-ácidas y piroclásticas subordinadas, en parte silicificadas, con metamorfismo de contacto o con alteración hidrotermal.
- m2b: Consiste en una secuencia de piroclastitas intermedias, hasta intermedias-ácidas, epiclastitas volcánicas y efusivas subordinadas, con evidencias de metamorfismo de contacto y alteración hidrotermal. Subyace al miembro ch1 de la formación Ch-alatenango y los afloramientos están limitados a la franja noroccidental a nororiental de El salvador.

Las formaciones anteriormente mencionadas se encuentran dentro de las Unidades del Terciario y Cuaternario las cuales son netamente continentales, principalmente de origen volcánico con intercalaciones de materiales fluviales y algunas secciones lacustres.

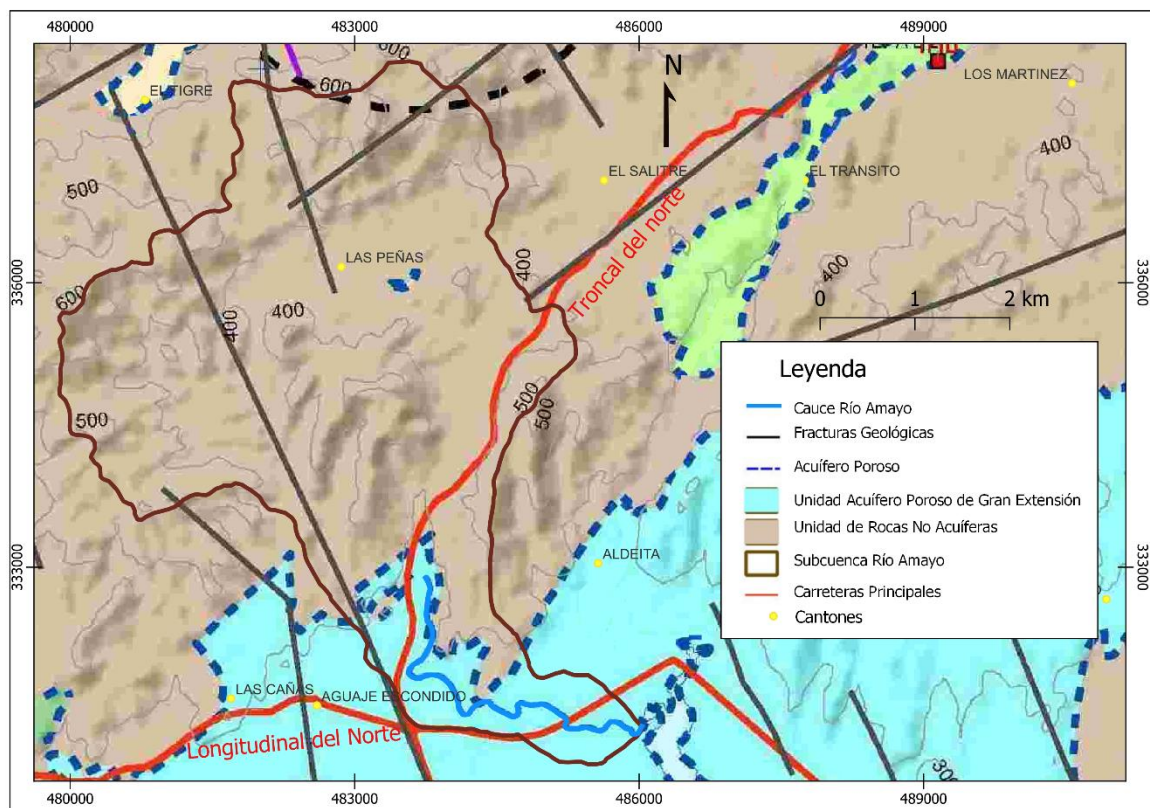
Además, existe también en la subcuenca del Río Amayo el miembro Qf como se puede apreciar en la figura 1.7:

d) Qf: Son depósitos sedimentarios del cuaternario constituidos principalmente por secciones con intercalaciones de rocas piroclásticas, depósitos de estuario, barras costeras, depósitos

coluviales, conos de deyección y suelos de armor. Debido a esto es bastante discordante encontrarla tan al norte de la costa.

## 1.6. Hidrogeología.

El mapa Hidrogeológico de la subcuenca del río Amayo que se puede apreciar en la figura 1.8 corresponde a un extracto del mapa Hidrogeológico elaborado por (ANDA, 2011). Las formaciones acuíferas contenidas en él son las siguientes:



*Figura 1.9. Mapa Hidrogeológico de la subcuenta del río Amayo, obtenido del mapa hidrogeológico de El Salvador de escala 1:100,000 (ANDA, 2011).*

**Unidad Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media:** Los materiales de esta unidad consisten principalmente en materiales piroclásticos aglomerados y retrabajados (pómez, lapillo, tobas), teniendo una distribución granulométrica que varía de fina a gruesa. Las conductividades hidráulicas pueden variar de medianas a bajas, como consecuencia al

grado de cementación o compactación que pueden tener los granos de los materiales que la constituye. Esta unidad puede tener más de 50 m de espesor.

**Unidad Rocas no Acuíferas:** Los materiales de esta unidad están compuestos por flujos macizos de lavas, intercalados con tobas aglomeradas y brechosas, además de lahares cementados, presentando conductividades hidráulicas muy bajas o casi nulas, debido a su baja porosidad o a su alto grado de compactación y cementación. Se considera que constituyen el basamento de los acuíferos identificados en la zona de estudio. La profundidad a la que se encuentra esta unidad puede superar los 100 m.

### **1.7. Metodología de Schosinsky para la obtención de la recarga hídrica en el área de una cuenca.**

Existen diferentes metodologías para la obtención de la recarga hídrica, una de ellas es la descrita por Gunter Schosinsky la cual se pasará a describir de forma generalizada para tener una base teórica, puesto que en este caso es la que se utilizará para una parte del análisis de la presente investigación.

De acuerdo a (Schosinsky N, 2006) la recarga al acuífero se puede obtener realizando un balance de suelos siguiendo tres pasos generales los cuales son: *“En primer lugar se determina la fracción de lluvia que se intercepta por el follaje; en segundo lugar, se requiere conocer la infiltración del agua de lluvia hacia el suelo, generada por la precipitación que llega a su superficie; en tercer lugar, se debe realizar un balance de suelos, que nos permita estimar el agua que drena del suelo hacia el acuífero, que se encuentra ubicado debajo del suelo”*

Se pasa a describir lo anterior.

#### a) Fracción de lluvia interceptada por el follaje:

En este caso (Schosinsky N, 2006) define el coeficiente de follaje (Cfo) como el porcentaje de lluvia retenida por el follaje. Además, establece la siguiente definición para el cálculo de la retención mensual por el follaje (Ret) de lluvia (P) por follaje:

Si P es menor o igual a 5 mm/mes,  $Ret = P$ .

Si el producto  $(P)(C_{fo})$  es mayor o igual de 5 mm/mes,  $Ret = (P)(C_{fo})$ .

Si  $P$  es mayor de 5mm/mes y el producto  $(P)(C_{fo})$  menor de 5,  $Ret = 5$ .

Para bosques muy densos  $C_{fo}=0.20$ , otros  $C_{fo}=0.12$ .

b) Infiltración pluvial mensual:

Se hace necesario el cálculo de la precipitación que infiltra mensualmente, para ello se consideran los siguientes factores: la precipitación mensual, la retención pluvial mensual en el follaje y el coeficiente de infiltración (Schosinsky N, 2006).

Así, la precipitación que infiltra se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

$$P_i = (C_i)(P - Ret)$$

Para la obtención de los parámetros incluidos en la ecuación anterior se necesita conocer el coeficiente de infiltración  $C_i$ , La precipitación mensual en mm/mes y la Retención de lluvia mensual por el follaje, ambos planteados en el literal anterior.

El Coeficiente de infiltración viene dado por la siguiente ecuación:

$$C_i = K_p + K_v + K_{fc}$$

Donde  $K_p$  es la fracción que infiltra por efecto de pendiente (ver Tabla 1.1),  $K_v$  es la fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal (ver tabla 1.1) y  $K_{fc}$  es la fracción que infiltra por textura de suelo.

De acuerdo a (Schosinsky & Losilla, 2000) la obtención del coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo ( $K_{fc}$ ) está definida tentativamente por la siguiente ecuación:

$$K_{fc} = 0,267\ln(fc) - 0,000154fc - 0,723$$

El valor de  $fc$  en mm/día corresponde a la permeabilidad del suelo saturado, en los primeros 30 centímetros de profundidad, este valor se puede obtener a partir de la prueba de anillos

aplicada en la superficie del terreno, también se puede obtener con el permeámetro de guelpho o con la prueba de porchet siempre aplicadas a una profundidad no mayor de 30 cm (Schosinsky N, 2006).

**Tabla 1.1. Componentes del coeficiente de infiltración (Schosinsky & Losilla, 2000).**

<b>Por pendiente:</b>	<b>Pendiente</b>	<b>Kp</b>
Muy plana	0.02%-0.06%	0.30
Plana	0.3%-0.4%	0.20
Algo plana	1%-2%	0.15
Promedio	2%-7%	0.10
Fuerte	Mayor de 7%	0.06
<b>Por cobertura vegetal:</b>		<b>Kv</b>
Cobertura con zacate menos del 50%		0.09
Terrenos cultivados		0.10
Cobertura con pastizal		0.18
Bosques		0.20
Cobertura con zacate más del 75%		0.21

c) Balance de suelo:

El balance de suelos se realiza en un prisma rectangular, que tiene en la cara superior un cuadrado de 1 metro de lado y de profundidad igual a la profundidad de las raíces con capacidad de absorción del agua en el suelo (Schosinsky N, 2006). Para llevarlo a cabo se necesita de la infiltración mensual al suelo descrita en el literal b), conocer la capacidad de campo y el punto de marchitez de acuerdo a la Tabla 1.2 y como se mencionó, conocer la profundidad aproximada de las raíces extractoras de agua según la Tabla 1.3.

**Tabla 1.2. Punto de marchitez permanente y capacidad de campo en porcentaje por peso de suelo seco de diferentes texturas de suelos (Grassi, 1976).**

<b>TEXTURA DEL SUELO</b>	<b>Porcentaje por peso de suelo seco</b>		
	<b>PMP%</b>	<b>CC%</b>	<b>Densidad aparente (g/cm<sup>2</sup>)</b>
Arenoso	2-6	6-12	1.55-1.80
Franco-arenoso	4-8	10-18	1.40-1.60
Franco	8-12	18-26	1.35-1.50
Franco-arcilloso	11-15	23-31	1.30-1.40
Arcillo-arenoso	13-17	27-31	1.25-1.35
Arcilloso	15-19	31-39	1.20-1.30

**Tabla 1.3. Profundidad de raíces de diferentes cultivos (Grassi, 1976).**

<b>PROFUNDIDAD DE RAÍCES</b>	
Cultivo	Metros
Alfalfa (pastos)	1-2
Algodón	1-1.7
Banano	0.5-0.8
Caña de azúcar	1.20-2
Frijol	0.5-0.7
Cebolla	0.3-0.5
Cítricos	1.20-2.0
Zacate	0.3-0.5
Bosques	2.0-3.0

La forma natural de extracción de agua del suelo es mediante la transpiración de las plantas (Schosinsky N, 2006).

Para la realización del balance de suelos es necesario además el parámetro de evapotranspiración el cual se define como la combinación de la evaporación de la superficie del suelo y la transpiración de las planta (Chow, Maldment, & Mays, 1988).

Por lo tanto, para que se dé la recarga de agua a un acuífero es necesario que la cantidad de agua que infiltra en el suelo sea suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. A lo anterior se le llama recarga acuífera y se calcula de la siguiente manera (Schosinsky N, 2006):

$$R_p = P_i + H_{si} - H_{sf} - ETP$$

Donde  $R_p$  es la recarga potencial mensual en mm/mes,  $P_i$  es la Precipitación que infiltra en mm/mes,  $H_{si}$  es la humedad del suelo al inicio del mes en mm,  $H_{sf}$  es la humedad del mes al final del mes en mm y  $ETP$  es la evapotranspiración real en mm/mes.

Para la completa aplicación de esta metodología de recarga hídrica es necesaria la determinación del parámetro Evapotranspiración, del cual no se ha hablado hasta el momento. Existen muchas maneras de obtenerlo, pero en el presente estudio se utilizará el método de Hargreaves (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998). Para la aplicación de este método se utiliza la siguiente ecuación conocida como la fórmula de Hargreaves:

$$ETP = 0.0075(RSM)(TMF)$$

Dónde:  $ETP$  es la evapotranspiración potencial diaria en mm/día,  $TMF$  es la temperatura media en °F y  $RSM$  es la radiación solar incidente, convertida en mm/día.

El valor de  $RSM$  se obtiene usando la ecuación siguiente:

$$RSM = 0.075(RMM)(S^{\frac{1}{2}})$$

Dónde:  $RMM$  es la radiación extraterrestre en milímetros de agua evaporada (se obtiene de tablas, en función de la latitud de la estación meteorológica) y  $S$  es el porcentaje del posible brillo del sol.

El valor de  $S$  se calcula usando la ecuación siguiente:

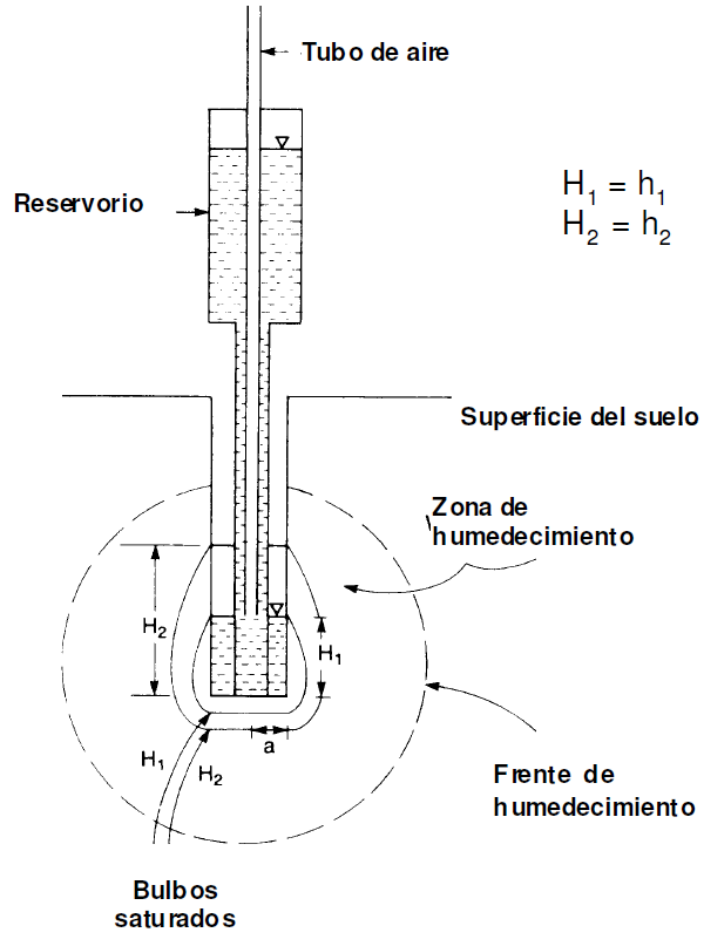
$$S = 12.5(100 - HM)^{\frac{1}{2}}$$

Dónde:  $HM$  es la humedad relativa.

A partir de lo anterior, la radiación solar se determina utilizando datos tabulados con respecto a la latitud del lugar de estudio y del mes tal y como lo especifica el método de Hargreaves, para la temperatura media se utilizará la temperatura superficial de la zona de estudio obtenida por medio de teledetección térmica y para la humedad relativa se usarán datos medidos en estaciones meteorológicas del país.

### **1.8. Obtención de la permeabilidad del suelo utilizando el permeámetro de Guelph.**

El permeámetro de Guelph se utiliza para la obtención de la conductividad hidráulica ( $Kfs$ ) en zona insaturada, aunque también se puede utilizar para medir la infiltración acumulada y la tasa de infiltración (Gabriels, Lobo, & Pulido, 2014). Con éste equipo se mide la penetración a velocidad constante de agua en el suelo no saturado desde un pozo cilíndrico en el cual se mantiene una carga constante de agua (Gabriels, Lobo, & Pulido, 2014) según (Reynolds & Elrick, 1987). En la figura 1.10 se puede apreciar la configuración del uso del permeámetro de Guelph.



**Figura 1.10.** Configuración de la instalación del permeámetro de Guelph con sus parámetros de interés (Gabriels, Lobo, & Pulido, 2014).

La conductividad hidráulica saturada ( $K_{fs}$ ) puede calcularse resolviendo la ecuación de Richards:

$$K_{fs} = \frac{CAq}{2\pi h^2 + C\pi\alpha^2 + \left(2\pi \frac{h}{\alpha^*}\right)}$$

Donde  $C$  es el factor de forma adimensional obtenido de  $h/a$ ,  $A$  es el área de la sección transversal del reservorio del permeámetro ( $m^2$ ),  $q$  es el estado estable de la caída del nivel de agua en el reservorio del permeámetro ( $m \cdot s^{-1}$ ),  $h$  es la profundidad de agua en el pozo (controlada por la altura del tubo de aire ( $m$ ),  $\alpha$  es el radio del pozo ( $m$ ) y  $\alpha^*$  es el parámetro de textura/estructura ( $m^{-1}$ ).

El valor de  $\alpha$  se puede obtener utilizando la tabla 1.4 tomada de (Gabriels, Lobo, & Pulido, 2014) según (Elrick, Reynolds, & Tan, 1989). Y el valor de C se puede determinar utilizando la gráfica de la figura 1.11 donde se encuentra la escala del factor C, esta se obtiene de (Gabriels, Lobo, & Pulido, 2014) según Reynolds y (Reynolds & Elrick, 1987).

**Tabla 1.4.** Categorías de medios porosos usados para la estimación de  $\alpha^*$  según (Elrick, Reynolds, & Tan, 1989).

Categorías del medio poroso	Valor de $\alpha^*$ (m <sup>-1</sup> )
Materiales compactados, materiales arcillosos o limosos poco estructurados, tales como sedimentos marinos o lacustrinos, materiales de relleno, etc.	1
Suelos que tienen textura fina y sin estructura.	14
La mayor parte de los suelos estructurados desde arcillas, pasando por francos; además incluyendo arenas finas y gruesas desestructurados. Categoría más frecuentemente aplicada a suelos agrícolas.	12
Suelos pedregosos y arenas gruesas, pueden además incluir algunos suelos con buena estructura con grandes grietas y macroporos.	36

Cuando se mide el flujo estable para dos potenciales de agua diferentes (cargas) aplicadas secuencialmente a la superficie de infiltración, la conductividad hidráulica saturada de campo puede estimarse mediante la siguiente expresión (Gabriels, Lobo, & Pulido, 2014):

$$K_{fs} = G_2 \cdot Q_2 - G_1 \cdot Q_1$$

Donde:

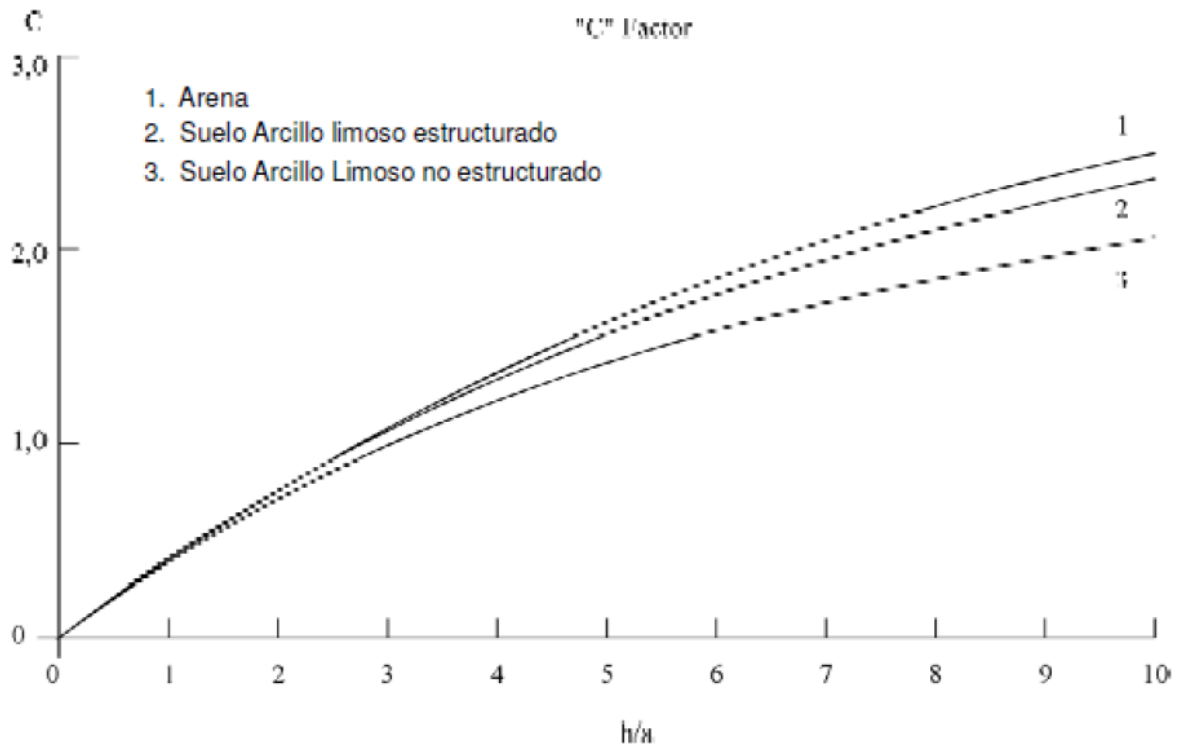
$$G_2 = \frac{h_1 C_2}{\pi [2h_1 h_2 (h_2 - h_1) + \alpha^2 (h_1 C_2 - h_2 C_1)]}$$

$$G_1 = G_2 \frac{h_2 C_1}{h_1 C_2}$$

Siendo Q la descarga (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>) cuando el flujo es estable:

$$Q_1 = Aq_1$$

$$Q_2 = Aq_2$$



**Figura 1.11.** Escala del factor  $C$  en función de  $h/\alpha$ . (Gabriels, Lobo, & Pulido, 2014) según (Reynolds & Elrick, 1987).

### 1.9. Cálculo de la recarga hídrica por el método de variación en los niveles freáticos.

La metodología para realizar el cálculo de la recarga del acuífero a partir de la variación de los niveles freáticos en pozos de acuerdo a (Healy & Cook, 2002) involucra de forma general la estimación de los cambios en el almacenamiento de agua subterránea, el flujo de agua subterránea hacia la cuenca, el flujo base (descarga de agua subterránea a arroyos o manantiales), la evapotranspiración del agua subterránea fuera de la cuenca. A lo anterior se le llama presupuesto de aguas y se puede expresar por medio de la siguiente relación:

$$R = \Delta S^{gw} + Q^{bf} + ET^{gw} + Q_{off}^{gw} + Q_{on}^{gw}$$

Donde  $R$  es la recarga,  $\Delta S^{gw}$  es el cambio en el almacenamiento de agua subterránea,  $Q^{bf}$  es el flujo base,  $ET^{gw}$  es la evapotranspiración del agua subterránea  $Q_{off}^{gw} + Q_{on}^{gw}$  es el flujo subterráneo del área de estudio e incluye el bombeo. Todos los términos están expresados en tazas (mm/año) (Healy & Cook, 2002).

El método de variaciones en los niveles freáticos está considerado para ser aplicado a acuíferos no confinados y se basa en la premisa de que los aumentos en los niveles de las aguas subterráneas se deben a la recarga del agua que llega a la capa freática. De una forma más simplificada, la ecuación anterior puede ser escrita de la siguiente manera (Healy & Cook, 2002):

$$R = \frac{S_y dh}{dt} = \frac{S_y \Delta h}{\Delta t}$$

Donde  $S_y$  es el rendimiento específico,  $h$  es la altura del nivel freático y  $t$  es el tiempo.

La definición de la ecuación anterior asume que el agua que llega al nivel freático se almacena inmediatamente y que todos los demás componentes de la primera ecuación son igual que cero durante el periodo de recarga. La suposición anterior es más válida si se aplica la ecuación en periodos cortos de tiempo (horas o unos pocos días), es en este marco de tiempo para el cual la aplicabilidad del método es más apropiada. Aun cuando lo anterior es cierto, (Healy & Cook, 2002) establece que la ecuación anterior también puede ser utilizada para intervalos de tiempo más largos (estacionales o anuales) para producir una estimación del cambio en el almacenamiento subterráneo ( $\Delta S^{gw}$ ). Este valor a veces se denomina recarga “neta”.

Considerando lo anteriormente expresado, cabe la necesidad de dar una definición para el rendimiento específico ( $S_y$ ). El concepto de rendimiento específico tomado de (Healy & Cook, 2002) según (Meinzer, 1923) es el siguiente: “*El rendimiento específico de una roca o suelo, con respecto al agua es la relación entre el volumen de agua que, después de saturarse cederá por gravedad su propio volumen*”. La siguiente formula es usada generalmente para obtenerlo:

$$S_y = \emptyset - S_r$$

Donde  $\emptyset$  es la porosidad y  $S_r$  es la retención específica (el volumen de agua retenido por la roca por unidad de volumen de roca). De acuerdo al análisis estadístico realizado por (Healy & Cook, 2002) a partir de los resultados estadísticos de 17 estudios compilados por (Johnson, 1967) el rendimiento específico se puede obtener de los datos que se encuentran tabulados en la tabla 1.5.

**Tabla 1.5.** Resumen de las estadísticas sobre rendimiento específico de 17 estudios recopilados por (Johnson, 1967).

Textura	S <sub>y</sub> promedio	Coefficiente de variación %	S <sub>y</sub> mínimo	S <sub>y</sub> máximo	Número de mediciones
Arcillas	0.02	59	0.0	0.05	15
Limos	0.08	60	0.03	0.19	16
Arcillas y arenas	0.07	44	0.03	0.12	12
Arenas finas	0.21	32	0.10	0.28	17
Arenas medianas	0.26	18	0.15	0.32	17
Arenas gruesas	0.27	18	0.20	0.35	17
Arena gravosa	0.25	21	0.20	0.35	15
Gravas finas	0.25	18	0.21	0.35	17
Gravas medias	0.23	14	0.13	0.26	14
Gravas gruesas	0.22	20	0.12	0.26	13

### 1.10. Teledetección térmica.

De acuerdo a (Martínez Barbáchano, 2020) la Teledetección térmica es un término que hace referencia a las medidas obtenidas por un sensor ubicado a bordo de una plataforma (un avión o satélite) que capta la radiación electromagnética emitida por la superficie terrestre en la región del infrarrojo térmico, típicamente se encuentra entre los 8 y 14 μm según (Sobrino, y otros, 2000)

(Martínez Barbáchano, 2020) plantea las variables involucradas y las consideraciones necesarias para la determinación de la temperatura usando imágenes satelitales, mencionando que la estimación de ésta se encuentra condicionada, principalmente, por el contenido de vapor de agua de la atmósfera (especialmente sensible en la zona intertropical) y la emisividad de la superficie. Por lo tanto, para lograr lo anterior plantea que se necesita la consideración y corrección de los factores mencionados.

A continuación, se pasa a describir la base teórica planteada por (Martínez Barbáchano, 2020) para la obtención de la temperatura. Inicialmente se debe determinar la emisividad emitida por la superficie en cuestión, de forma general ésta se puede obtener de acuerdo a (Valor & Caselles, 1996) a partir de la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_i = \frac{R_{i(Ts)} - L_i^\alpha}{B_{i(Ts)} - L_i^\alpha}$$

Donde  $\varepsilon_i$  es la emisividad de una superficie (considerando la transmisividad e irradiancia de la atmósfera),  $R_{i(T_S)}$  es la radiancia espectral emitida por un cuerpo a una determinada longitud de onda y temperatura,  $B_{i(T_S)}$  es la radiancia emitida por un cuerpo negro a una temperatura dada, medida en campo, y por último  $L_{i\infty}$  es la irradiancia atmosférica.

La técnica usada por (Martínez Barbáchano, 2020) para la obtención de la emisividad es “El método basado en índice de vegetación (NDVI) propuesto por Valor y Caselles, (1996)”.

De este modo el canal térmico (6 para Landsat TM-ETM+) convertido a radiancia se puede transformar a temperatura de brillo afectiva por medio de la ecuación de cálculo de la temperatura superficial a partir de los valores de brillo de la imagen térmica, que requiere de dos constantes de calibración como muestra la tabla 1.6.

**Tabla 1.6.** Constantes de calibración de la banda térmica del satélite Landsat (Chander, Markham, & Helder, 2009).

Satélites	Bandas	K <sub>1</sub> (W/m <sup>2</sup> /sr <sup>-1</sup> /μm <sup>-1</sup> )	K <sub>2</sub> (Kelvin)
Landsat 4	6	671.62	1284.30
Landsat 5	6	60576	1260.56
Landsat 7	6	666.09	1282.71
Landsat 8	10	774.89	1321.08
		480.89	1201.14

El proceso usado por (Martínez Barbáchano, 2020) se realiza usando la “calculadora de mapas” del software de código libre GvSIG 2.4 y recursos libres online; dicho proceso contiene la siguiente secuencia:

1. Se realiza una corrección DOS1 a las bandas roja e infrarroja de Landsat5, para remover el efecto de la dispersión atmosférica.
2. Se calcula el índice de vegetación diferencial normalizado, o NDVI a partir de las bandas 3 y 4, ya corregidas atmosféricamente. La fórmula es la siguiente:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

3. Se calcula la emisividad de los píxeles de la imagen generando un PV (Proporción de Vegetación). Esto se hace utilizando la ecuación siguiente propuesta por (Carlson & Ripley, 1997):

$$P_v = \left[ \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]^2$$

4. Se procede a mapear la emisividad de los pixeles a partir de la vegetación. Esto se hace usando la expresión para calcular la emisividad en el monocanal de la imagen a partir de la proporción de vegetación o  $P_v$  siguiente (Sobrino, Jiménez-Muñoz, & Paolini, 2004):

$$\varepsilon_{TM6} = 0.004P_v + 0.986$$

5. Se calcula la radiancia de acuerdo a los metadatos del archivo MTL de la banda 6, a través de la siguiente ecuación:

$$L_\lambda = \left( \frac{LMAX - LMIN}{QCALMAX - QCALMIN} \right) * (DN - QCALMIN) + LMIN$$

Donde  $L_\lambda$  es la radiancia espectral de la banda térmica que va a ser calculada,  $LMAX$  y  $LMIN$  son los valores de radiancia máxima y mínima para la banda 6,  $QCALMAX$  y  $QCALMIN$  son los valores máximo y mínimo de la radiancia calibrada, es decir, modificados a escala en unidades de números digitales (en función de la resolución radiométrica del sensor) y  $DN$  son los niveles digitales (la banda 6 en este caso).

6. Se determina la transferencia radiactiva de acuerdo a la ecuación siguiente planteada por (Coll, Galve, Sánchez-Tomás, & Caselles, 2010):

$$B(T) = \frac{L_{sen} - L \uparrow}{\varepsilon \tau} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} L \downarrow$$

Donde  $L_{sen}$  es la radiancia medida por el sensor ( $W/m^2/sr^1/\mu m^{-1}$ ),  $\varepsilon$  es la emisividad de la superficie,  $B$  es el parámetro derivado de la Ley de Planck calculado a partir de la ecuación de cálculo de temperatura de la superficie terrestre ( $^{\circ}K$ ),  $L \downarrow$  es la radiancia atmosférica descendente ( $W/m^2/sr^1/\mu m^{-1}$ ),  $\tau$  es la transmisividad atmosférica y  $L \uparrow$  es la radiancia atmosférica ascendente ( $W/m^2/sr^1/\mu m^{-1}$ ).

7. Por último, se determina la temperatura superficial haciendo uso de la ecuación propuesta por (Chander, Markham, & Helder, 2009) para el cálculo de la temperatura

a partir de los valores de brillo de la imagen satelital, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$T_b = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{k_1}{L_{sen}} + 1\right)}$$

Donde  $k_2$  y  $k_1$  son los coeficientes de calibración, con valores de 1260.56 y 607.76 (W/m-2/sr<sup>-1</sup>/μm-1), respectivamente y  $L_{sen}$  es el ráster de radiancia corregida obtenido en el paso anterior.

## **CAPÍTULO II: METODOLOGÍA.**

Para poder desarrollar completamente la presente investigación se desarrollaron 3 actividades generales las cuales van desde una investigación de gabinete en un primer acercamiento al tema, cubriendo toda la documentación concerniente a la subcuenca del Río Amayo, en segundo lugar, se pasa a una recopilación de datos en campo y por último se procede al procesamiento de toda la información recabada en los anteriores pasos.

### **2.1. Trabajo de gabinete.**

Lo que se recabó en el trabajo de gabinete fue utilizado para armar el marco teórico y como fuente de datos para la obtención del balance hídrico por medio del cual se obtuvo la recarga.

#### **2.1.1. Obtención de parámetros necesarios en el Balance hídrico según Schosinsky:**

Todos estos parámetros fueron obtenidos de la bibliografía y fuentes de información como el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. A continuación, se presenta un listado de los parámetros de entrada necesarios para realizar la metodología de Schosinsky estableciendo cual fue la fuente para su obtención:

- Parámetros obtenidos de fuentes bibliográficas:

Fracción que infiltra por efecto de pendiente ( $K_p$ ), Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal ( $K_v$ ), Densidad del suelo ( $DS$ ), Profundidad de Raíz ( $PR$ ), Lluvia retenida por el Follaje, Capacidad de Campo (%  $CC$ ), Punto de Marchitez (%  $PM$ ).

- Parámetros obtenidos a partir de la información estaciones meteorológicas del MARN:

Precipitación ( $P$ ), Evapotranspiración ( $ETP$ ) y Temperatura ( $T$ ). Estos parámetros se obtuvieron de las siguientes estaciones: Tamarindo (12), Dulce Nombre de María (138) y Nueva Concepción (B10). En la figura 2.1 se puede apreciar la ubicación de las estaciones en el mapa de Chalatenango y San Salvador con sus respectivos polígonos de THIESSEN expresando su área de influencia, Ver figura 2.1.

- Parámetros obtenidos a partir de Imágenes Satelitales:

Evapotranspiración (ETP) y Temperatura (T). El procedimiento para su obtención es el descrito por la metodología planteada en el apartado 1.10 del Marco Teórico de este documento.

### **2.1.2. Obtención de mapas de interés para el estudio.**

Se utilizó el software libre QGIS para poder procesar los mapas temáticos de Geología, Uso de suelos, Clasificación de suelos, Hidrogeología, Ubicación geográfica de la cuenca y Precipitación. También se obtuvo la delimitación de la cuenca de estudio, su área, longitud del cauce del río, curva hipsométrica y el factor de forma. La información para los mapas proviene del CNR.

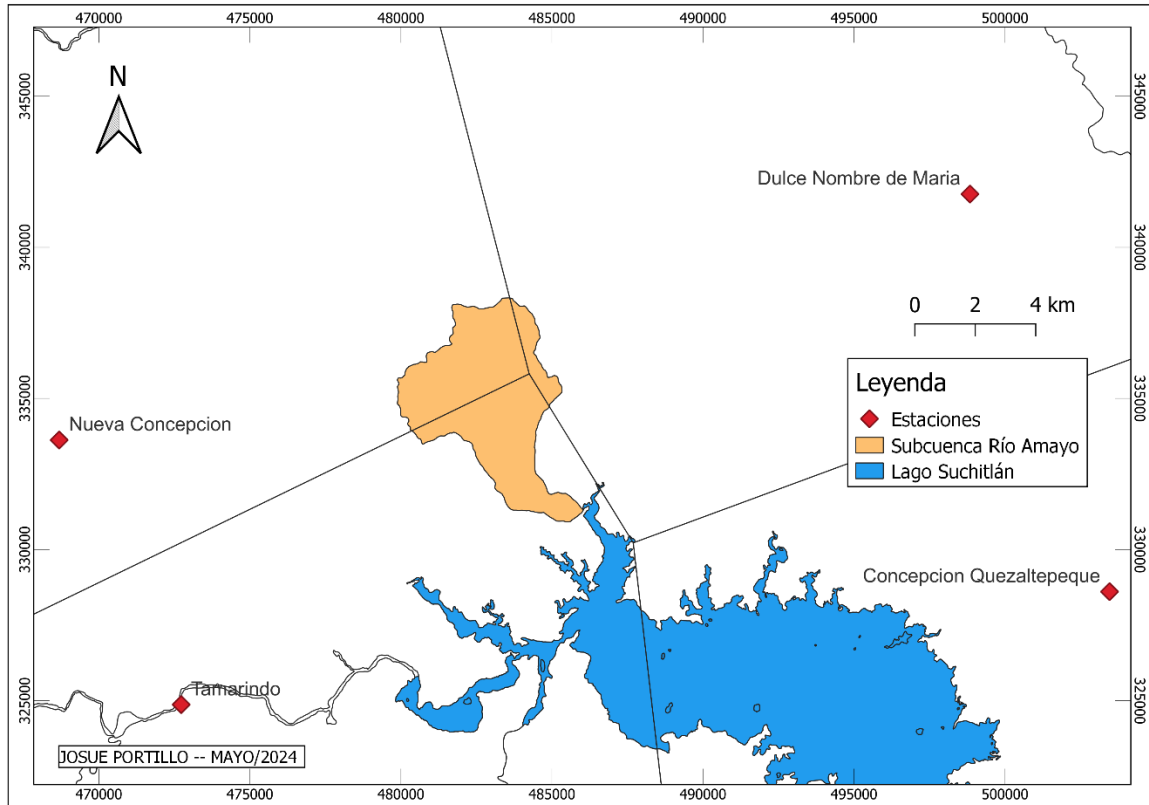
### **2.1.3. Obtención de parámetros necesarios para la recarga por el método de Variación de Niveles Freáticos:**

El parámetro principal que se obtuvo de la bibliografía para esta metodología es el rendimiento específico ( $S_y$ ). La metodología fue descrita en el apartado 1.9 del Marco Teórico.

## **2.2. Trabajo de Campo.**

Los demás parámetros que no se obtuvieron a partir de la información bibliográfica y proporcionada por el MARN y el CNR se obtuvieron a partir de mediciones en campo. A continuación, se describe la manera en la que se obtuvo en campo cada uno de los parámetros necesarios para el cálculo de la recarga por Schosinsky y por diferencia de niveles freáticos. Para lograr lo anterior se realizaron visitas de campo en específico como lo fueron:

1. Obtención de un inventario de puntos de agua, de los cuales en su mayoría fueron pozos, distribuidos a lo largo de toda la extensión de la subcuenca.
2. Campañas de campo para la medición de la infiltración del suelo.
3. Medición de los niveles freáticos en el inventario de puntos de agua.
4. Colocación de pluviómetros para la obtención de datos de lluvia durante el periodo de medición.



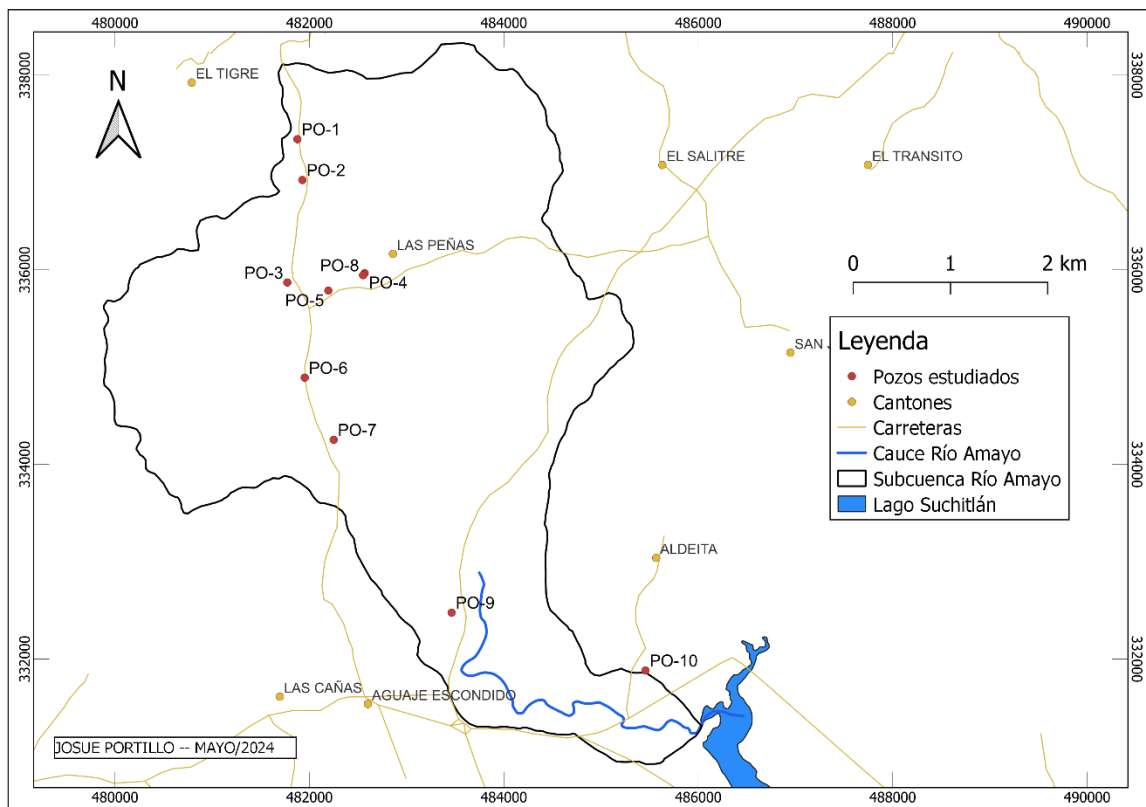
**Figura 2.1.** Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas por medio de las cuales se obtuvieron los datos de precipitación, evapotranspiración y temperatura. Elaboración propia de acuerdo a la base de datos del CNR.

La realización del trabajo de campo fue entre los meses de enero a diciembre del año 2021. Para la realización del mismo fue necesario de la ayuda de la Unidad Ambiental de la Alcaldía del Municipio de la Reina y del Municipio de Tejutla, quienes ayudaron contactando las juntas de agua del cantón las Peñas y Aguajescondido respectivamente. Además, se recibió apoyo de la escuela de Posgrados de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador con el préstamo del equipo utilizado para la medición como lo fueron el Permeámetro de Gueph y el Freatímetro.

### 2.2.1. Inventario de puntos de agua.

Para la determinación del nivel piezométrico fue necesario realizar una selección de puntos en los cuales se pudiera medir altura de la salida de agua subterránea, para ello se hizo un recorrido en las comunidades localizadas en la subcuenca en estudio ubicando de este modo

9 pozos excavados, 8 de los cuales son privados y le pertenecen a una familia en específico y un pozo destinado a uso público, además de 1 pozo perforado del cual se abastece todo un caserío, la localización de los mismos se obtuvo usando un GPS y se puede apreciar en la figura 2.2, en total son 10 pozos estudiados. Para cada pozo se midió la profundidad del nivel piezométrico con respecto a la superficie y el brocal utilizando una sonda de nivel o freatómetro. Para obtener el nivel freático del agua subterránea se restó la altura del brocal a la profundidad del nivel piezométrico y esta última se le restó a la altura del pozo con respecto al nivel del mar medido a partir del Modelo de Elevación Digital (DEM) de 10 metros para el país. Esta información se encuentra tabulada en la tabla 2.1.



**Figura 2.2.** Ubicación geográfica de los pozos utilizados para la determinación del nivel freático del agua subterránea de la Subcuenca del Río Amayo. Elaboración propia de acuerdo a la base de datos del CNR.

**Tabla 2.1.** *Inventario de puntos de agua a partir de pozos localizados en la subcuenca de estudio.*

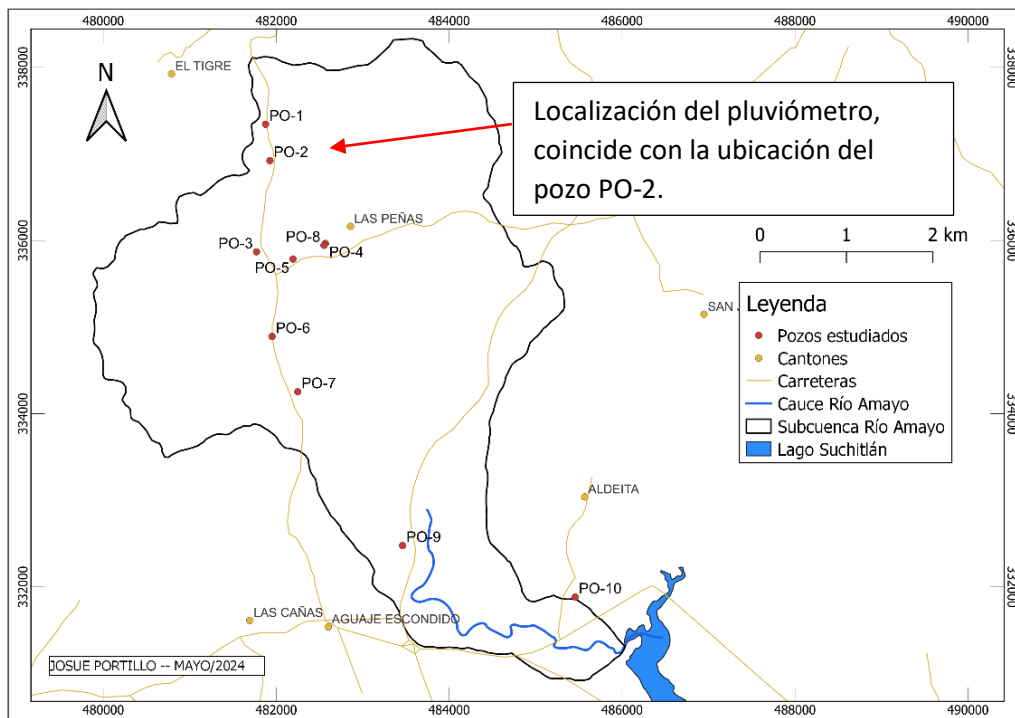
<b>N°</b>	<b>Código</b>	<b>Nombre</b>	<b>Tipo</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>M.S.N.M</b>	<b>Nivel Piezométrico Min (m)</b>	<b>Profundidad desde superficie inicial (m)</b>	<b>Nivel Piezométrico Max (m)</b>	<b>Profundidad desde superficie final (m)</b>	<b>Δnivel (m)</b>
1	PO-1	El Tigre 1	Excavado	481876.28	337343.83	439	431.3	7.75	437.87	1.13	6.62
2	PO-2	El Tigre 2	Perforado	481927.27	336923.7	452	442.7	9.3	448.46	3.54	5.76
3	PO-3	Las Peñas 1	Excavado	481772.39	335870.64	379	366.3	12.75	369.97	9.03	3.72
4	PO-4	Las Peñas 2	Excavado	482568.4	335966.59	357	338.4	18.65	341.11	15.89	2.76
5	PO-5	Las Peñas 3	Excavado	482194.3	335787.07	369	360.5	8.52	362.91	6.09	2.43
6	PO-6	Las Peñas 4	Excavado	481951.65	334892.64	345	334.7	10.3	343.12	1.88	8.42
7	PO-7	Las Peñas 5	Excavado	482249.63	334253.84	357	347.2	9.8	354.45	2.55	7.25
8	PO-8	Las Peñas 6	Excavado	482552.49	335945.4	358	346.7	11.29	351.09	6.91	4.38
9	PO-9	Aguajescondido 1	Excavado	483462.59	332477.7	299	288.9	10.08	290.35	8.65	1.43
10	PO-10	Guadalupe 1	Excavado	485457.49	331882.47	267	251.2	15.82			

### **2.2.2. Recolección de información pluviométrica.**

Se realizó una recopilación de datos pluviométricos en la zona de estudio, se colocó un pluviómetro en la ubicación que se puede apreciar en el mapa de la figura 2.3. Se solicitó la colaboración de los miembros de la junta de agua del caserío Aguacayo para que midieran la lluvia recopilada por cada día. Adicionalmente se instalaron 2 pluviómetros más dentro del área de la Subcuenca del Río Amayo, pero dado a que la medición de estos equipos dependía de la participación comunitaria de los poblados, las mediciones no pudieron ser realizadas de forma periódica y los datos no son continuos, por ello solo se consideraron los datos obtenidos del pluviómetro instalado en la ubicación mostrada en la figura 2.3. El procedimiento de medición de la precipitación fue el siguiente:

- Tomar la medida a las 8:00 am de la lluvia recopilada durante la noche y el día anterior.
- Vaciar el agua recopilada por el pluviómetro.
- Colocarlo en el pedestal para que pueda recopilar la lluvia durante el resto del día y la noche.

Notar que el mapa mostrado en la figura 2.3 es la mismo que se muestra en la figura 2.2, en dichas figuras se puede apreciar que la ubicación del pluviómetro es la misma que la del pozo PO-2 es decir, que este se ubicó en la misma localidad del pozo de la junta de agua de Aguacayo donde se proporcionó apoyo para la realización de las medias del nivel freático y por lo tanto también colaboraron con la medición de la precipitación in situ. Los datos de precipitación recolectados a lo largo del periodo de estudio se encuentran tabulados en el ANEXO N° 1.



**Figura 2.3.** Mapa señalando la ubicación en la que se instaló el pluviómetro para la medición de la precipitación en la Subcuenca del Río Amayo (notar que es el mismo mapa de la figura 2.2). Elaboración propia de acuerdo a la base de datos del CNR.

En la figura 2.4 se aprecia la instalación del pluviómetro.

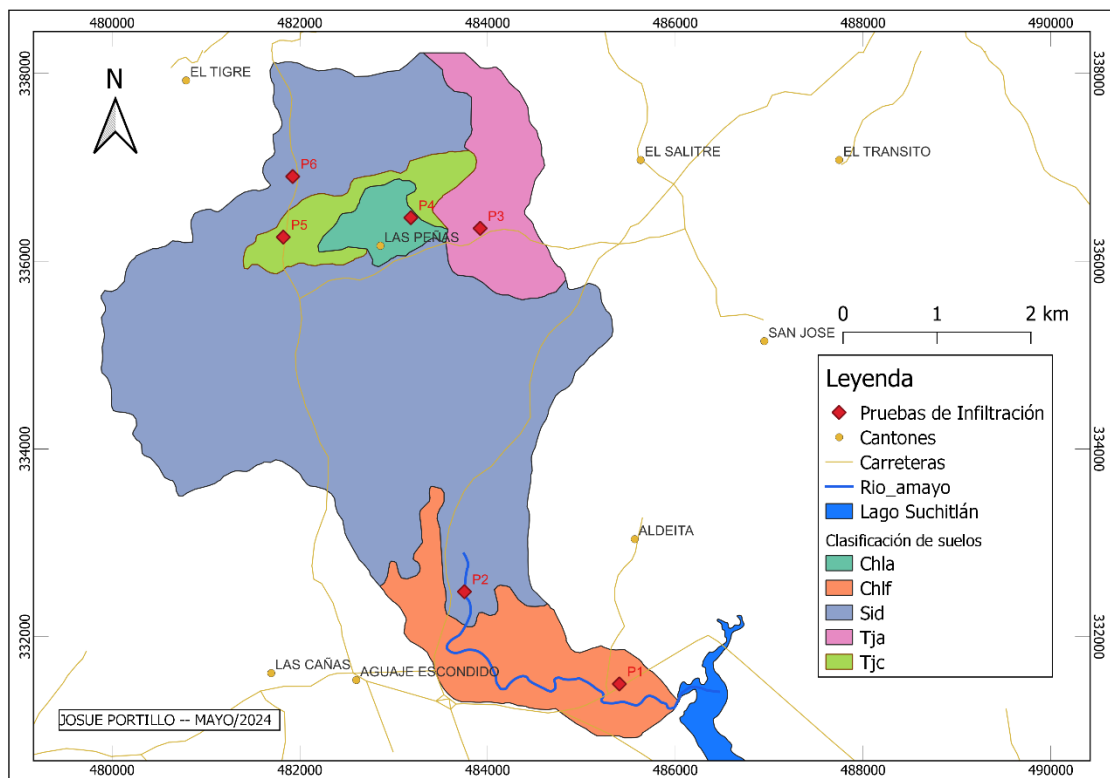


**Figura 2.4.** Instalación de pluviómetro para mediciones de precipitación en sitio.

### 2.2.3. Pruebas de infiltración.

Para la realización de las pruebas de infiltración se seleccionaron 6 puntos tomando en cuenta el mapa de tipo de suelos del país de acuerdo a (MAG, 1966), una por cada tipo de suelo, ver figura 2.5. La clasificación es la siguiente (el número de la clasificación corresponde al cuadrante topográfico en escala 1:50,000 y el código de letras es el nombre del tipo de suelo):

- 2358 II-Chla
- 2358 II-Chlf
- 2358 II-Sid
- 2358 II-Tja
- 2358 II-Tjc



**Figura 2.5.** Ubicación geográfica del sitio en el que se realizaron las pruebas de infiltración. Se aprecia además el tipo de suelo en el que se realizó cada prueba de acuerdo a (MAG, 1966).

Únicamente para la clasificación “Sid” se realizaron dos pruebas, la ubicación de las cuales se puede apreciar en la figura 2.5. En total fueron 6 pruebas de infiltración para las que se utilizó el permeámetro de Guelph proporcionado por la facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador. El procedimiento de toma de datos en campo que se siguió fue el siguiente:

1. Perforación de un agujero de 30 cm de profundidad haciendo uso del Barreno que trae el kit del permeámetro.
2. Instalación del permeámetro de Guelph de acuerdo a las instrucciones del manual de usuario de (Rickly Hydrological Co., 2006) cuidando de dejarlo de forma horizontal.
3. Realizar mediciones primero con una carga de 5 cm y luego con una de 10 cm.
4. Utilizar el reservorio interior o ambos reservorios dependiendo del tipo de suelo donde se realiza la prueba. El reservorio interno es para suelos de baja permeabilidad y ambos para suelos con moderada o alta permeabilidad.
5. Registrar los cambios en la altura de agua del tubo interno en intervalos de tiempo constantes.
6. Finalizar la prueba una vez que el cambio de altura de agua ( $\Delta$  de altura /  $\Delta$  de tiempo) en el tubo interior no cambie significativamente en tres intervalos de tiempo consecutivos.

La ubicación de los puntos de pruebas de infiltración se determinó con visitas técnicas con el apoyo de las Unidades Ambientales de Las Alcaldías de la Reina y Tejutla dependiendo del terreno que le corresponde a cada una. Se tomó en consideración la accesibilidad a la zona, así como la seguridad y que se encontraran en la zona específica de la clasificación de suelo. En la figura 2.6 siguiente se puede apreciar una fotografía de la toma de datos de infiltración:



*Figura 2.6. Toma de datos de infiltración y la configuración del permeámetro de Guelph en campo.*

Las pruebas de infiltración fueron realizadas en los meses de julio y agosto del año de estudio lo cual corresponde a la mitad del periodo de estación lluviosa en el país.

### **2.3. Procesamiento de datos.**

En este apartado se describirá el proceso de cálculo utilizado para obtener el mapa de direcciones de flujo y la aplicación de los métodos de obtención de recarga hídrica.

#### **2.3.1. Direcciones de flujo de agua subterránea.**

Utilizando la información obtenida en las campañas de campo de medición de niveles de pozos que se encuentra en la tabla 2.1 y utilizando el software SURFER (versión 15.2.305) se realizó el mapa de isolíneas de nivel freático.

Debido a que todos los valores de niveles medidos se encuentran relativamente cercanos a la superficie se considera que todos hacen referencia a un solo acuífero superficial, esto considerando que el pozo perforado con código PO-2 se encuentra en el mismo rango de niveles que los demás, esto es, a no más de 20 m bajo el suelo. Los pozos PO-9 y PO-10,

son los únicos que se encuentran en la Unidad Acuifero poroso de gran extensión y productividad media.

La asignación de altura sobre el nivel del mar se realizó a partir del Modelo de Elevación Digital (DEM) de El Salvador, con una resolución de 1 metro.

### 2.3.2. Recarga hídrica por la metodología de Schosinsky.

El procesamiento de los datos para la obtención de la recarga hídrica se divide en dos grandes apartados, uno dedicado a la determinación de la recarga de acuerdo a la metodología de Schosinsky y el siguiente tratará de la determinación de la recarga por medio del método de variaciones de niveles freáticos. A continuación, se pasa a describir el primero haciendo un recuento de los parámetros asignados y el criterio utilizado para su establecimiento:

- Tipo de suelo y profundidad de raíz (PR en mm).

Para determinar el tipo de suelo con el que se constituye la subcuenca del río Amayo se utilizará la clasificación de suelos descrita en la figura 2.5 según (MAG, 1966). Ésta clasificación de suelo se utilizará para la obtención de muchos de los parámetros necesarios para determinar la recarga hídrica, entre ellos la profundidad de raíz, la cual se tomará igual al espesor de la capa de suelo especificada en la tabla 2.2, esta información fue tomada de (MAG, 1966) y tabulada tal y como se presenta en este apartado.

**Tabla 2.2.** Tipos de suelo que constituyen la subcuenca del río Amayo según (MAG, 1966)

Punto	Clasificación	Textura	Espesor/PR (m)
P1	2358 II-Chlf	Franco	0.4
P2	2358 II-Sid	Franco y Franco Arcilloso	0.1
P3	2358 II-Tja	Franco a Franco Arenoso	0.1
P4	2358 II-Chla	Franco	0.3
P5	2358 II-Tjc	Franco a Franco Arenoso	0.2
P6	2358 II-Sid	Franco y Franco Arcilloso	2

Para los puntos P2 y P6 la referencia (MAG, 1966) no muestra datos para el espesor, éstos se establecen a partir de la vegetación encontrada en la zona. Así para los puntos P2 y P6 la vegetación corresponde a cobertura de zacate (clasificación establecida por (Schosinsky N, 2006) en tabla 1.3 del presente documento).

Para una explicación más amplia de los tipos de suelo encontrados en la subcuenca del río Amayo consultar el ANEXO N° 2.

- Densidad del suelo (DS en g/cm<sup>3</sup>)

La densidad del suelo (DS) se obtiene a partir de la tabla 1.2 y utilizando la clasificación de uso de suelos descrita en la tabla 2.2, tomando de este modo un valor intermedio.

- Capacidad de Campo (CC en %) y Punto de Marchitez (PM en %).

Para la determinación de los valores a utilizar de estos parámetros se utilizó la información contenida en la tabla 2.2 y la tabla 2.3 según el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA). La tabla 2.3 fue tomada de (SNET, 2005). Dado que los valores en la tabla 2.3 son a la profundidad de 1 pie se hizo una interpolación lineal para tener los valores a la profundidad correspondiente al espesor de la tabla 2.2.

**Tabla 2.3. Punto de Marchitez Permanente y Capacidad de Campo para suelos de varias Texturas de acuerdo a USDA (SNET, 2005).**

Textura	Punto de Marchitez (agua por pie de profundidad)		Capacidad de Campo (Agua por pie de profundidad)	
	(%)	(mm)	(%)	(mm)
Arena Media	1.7	7.62	6.8	30.48
Arena Fina	2.3	10.16	8.5	38.1
Franco Arenoso	3.4	15.24	11.3	50.8
Franco Arenoso Fino	4.5	20.32	14.7	66.04
Franco	6.8	30.48	18.1	81.28
Franco Limoso	7.9	35.56	19.8	88.9
Franco Arcilloso	10.2	45.72	21.5	96.52
Arcilloso	14.7	66.04	22.6	101.6

- Fracción de lluvia interceptada por el follaje Cf<sub>0</sub>.

Éste parámetro se tomará de acuerdo a los descrito en el apartado 1.7 del marco teórico. Su valor se toma como 0.20 para bosques muy densos y 0.12 para otros.

- Precipitación (P).

Para la precipitación se utilizará la información proporcionada por el MARN correspondiente a las estaciones de Nueva Concepción, Tamarindo y Dulce Nombre de

María, las cuales de acuerdo a los polígonos de Thiessen presentados en la figura 2.1 son las que ejercen influencia sobre la subcuenca en estudio. Los valores de precipitación correspondientes a las estaciones mencionadas se encuentran presentados en la tabla 2.5. Una representación gráfica del promedio de P se encuentra en la figura 2.7.

- Evapotranspiración (ETP).

Como un intento de obtener resultados que reflejen el sitio de estudio de la mejor manera posible, utilizando el modelo propuesto por Hargreaves (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998), el parámetro de Evapotranspiración se calculó siguiendo lo descrito en los últimos 3 párrafos del apartado 1.7 del marco teórico. Se hace necesario recalcar que este modelo se aplicó a cada mes del año 2021 y que para cada uno de los meses se obtuvo un raster de temperatura utilizando imágenes Landsat 8 con un nivel de producto L2C2 (esto corresponde a datos crudos, sin correcciones) descargadas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS) y la metodología propuesta por (Martínez Barbáchano, 2020) descrita en el apartado 1.10 del Marco Teórico del presente documento. Los rasters con las temperaturas de la zona de estudio se pueden apreciar de mejor manera en el ANEXO N° 3.

Para lograr obtener la evapotranspiración usando la metodología de Hargreaves y la temperatura de la imagen satelital fue necesario obtener un promedio de los valores de cada raster por cada área que divide la subcuenca. Lo anterior se realiza de ese modo ya que cada raster está conformado por muchos pixeles que representan un valor puntual de temperatura en la extensión de área de la cuenca. El último parámetro restante es la Humedad Relativa (HM), éste se obtuvo de la estación meteorológica Nueva Concepción mostrada en la figura 2.1 y los datos fueron proporcionados por el MARN al igual que la precipitación. Se utilizaron los valores de humedad relativa de la estación Nueva Concepción para toda la subcuenca ya que no se cuenta con datos de este parámetro en las otras dos estaciones mostradas en la figura 2.1.

En la tabla 2.4 se muestran la Humedad Relativa y los valores de ETP obtenidos con el modelo de Hargreaves y las imágenes Landsat 8, así como la respectiva humedad relativa.

Además, a modo de comparación, se utilizará la información de ETP proporcionada por el MARN para calcular paralelamente la recarga según Schosinsky. Lo anterior servirá

para saber qué tan distantes están los valores de recarga obtenidos a partir de temperaturas medidas en la estación meteorológica del país más cercana con respecto a las obtenidas con imágenes satelitales del sitio de estudio. Los valores de ETP se obtuvieron de la estación Nueva Concepción, misma que se utilizó en la Precipitación y humedad relativa, para el mismo periodo de medición, estos valores se encuentran presentados en la tabla 2.6. Una representación gráfica se puede apreciar en la figura 2.7, la cual además contiene una comparación con la Precipitación.

**Tabla 2.4.** Valores de Evapotranspiración en mm, Obtenidos usando Hargreaves y las imágenes Landsat 8.

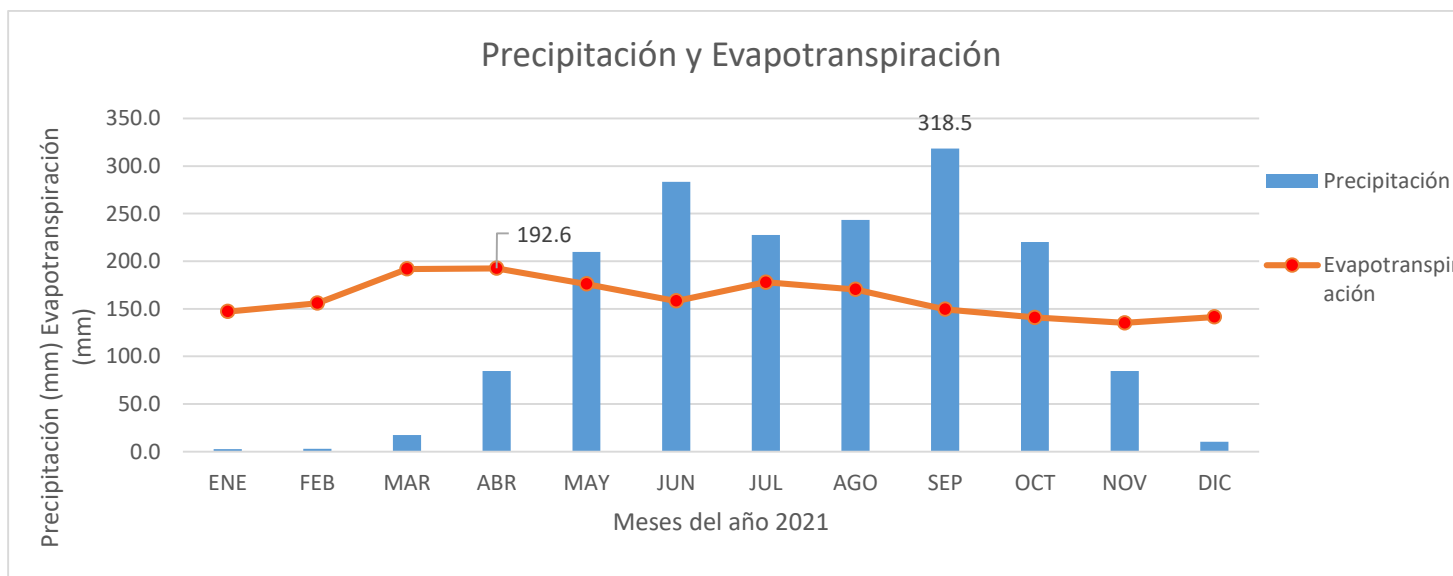
MESES - 2021	ETP (sumatoria de mm/mes)									Humedad relativa (%HM)
	POL-1	POL-2-1	POL-2-2	POL-3-1	POL-3-2	POL-3-3	POL-4	POL-5	POL-6	
Enero	177.8	166.2	163.3	165.0	164.4	172.3	171.6	171.4	166.0	60.5
Febrero	198.0	185.4	180.1	183.4	181.9	189.3	189.9	189.0	184.4	57.7
Marzo	248.0	232.2	230.7	230.8	229.7	238.1	236.3	235.1	231.1	55.8
Abril	247.4	235.2	227.8	226.4	223.9	230.4	229.1	229.7	229.3	61.9
Mayo	197.3	188.0	186.8	183.6	186.5	193.8	191.9	191.4	190.2	74.7
Junio	139.9	141.4	146.8	143.4	141.3	142.0	150.2	147.4	142.3	80.3
Julio	165.4	162.9	153.6	161.3	156.3	160.5	159.8	160.5	160.4	78.0
Agosto	123.9	114.5	118.3	127.8	119.6	125.3	127.6	128.2	124.6	80.3
Septiembre	148.1	137.7	129.2	141.0	132.6	137.1	142.1	137.2	133.9	83.2
Octubre	155.3	146.8	144.7	145.6	144.1	146.6	146.9	147.3	144.7	81.8
Noviembre	153.6	137.6	140.3	129.5	138.8	139.6	143.1	144.2	141.2	72.5
Diciembre	160.0	149.4	142.1	145.7	138.0	146.4	152.0	151.2	146.7	66.4

**Tabla 2.5.** Valores de precipitación en mm, presentados de forma mensual correspondientes a la zona de estudio. Fuente: MARN.

Datos de estaciones					Precipitación de 2015-2020 (mm)												
Código	Estaciones	Area (Km <sup>2</sup> )	LAT	LON	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
12	Tamarindo	10.28	14.0469	-89.2525	0.1	1.6	13.5	80.8	181.4	301.3	222.4	212.1	304.5	188.8	92.1	6.2	1604.7
138	Dulce Nombre de María	1.87	14.1997	-89.0107	2.8	10.7	18.4	65.3	300.7	408.6	311.4	333.4	403.9	257.4	83.1	11.0	2206.7
G03	Nueva Concepción	10.36	14.1259772	-89.29	4.8	3.1	21.3	92.3	221.7	243.1	217.5	258.5	317.1	244.5	77.2	14.5	1715.6
<b>Aplicación de polígonos de Thiessen</b>					2.5	3.1	17.5	84.8	209.8	283.4	227.5	243.5	318.5	220.1	84.5	10.4	1705.8

**Tabla 2.6.** Valores de Evapotranspiración en mm, presentados de forma mensual correspondientes a la zona de estudio. Fuente: MARN.

Datos de estación				Evapotranspiración de 2015-2020 (mm/mes)												
Código	Estaciones	LAT	LON	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
G03	Nueva Concepción	14.1259772	-89.29	147.1	155.8	191.9	192.6	176.0	158.2	177.9	170.4	149.4	140.9	135.2	141.5	147.1



**Figura 2.7.** Representación gráfica de la precipitación y evapotranspiración de los datos medidos en la estación meteorológica de Nueva Concepción. Fuente: MARN.

- Permeabilidad (fc en mm/día).

La velocidad de infiltración se calcula a partir de la información de campo obtenida de acuerdo al apartado 2.2.3, utilizando la información de tipo de textura de suelo de la tabla 2.2 y la hoja de cálculo proporcionada por el fabricante del permeámetro de Guelph que se utilizó (SOILMOISTURE) la cual se puede apreciar en la figura 2.8 y se basa en el procedimiento descrito en el apartado 1.8 del presente documento.

**Método de dos cargas**

Tipo de Reservorio (entre "1" para combinados y "2" para reservorio interior): **2**

**Entradas** Entre la primera altura de Carga de Agua ("H1" en cm): **5**  
Entre la segunda altura de Carga de agua ("H2" en cm): **10**

**Resultados** Entre el radio del pozo ("a" en cm): **4**

Entre la categoría textura-estructura del suelo (uno de los siguientes numeros): **3**

Categoría del Medio Poroso	
1	Materiales arcillosos, compactos, poco estructurados
2	Suelos que tienen estructura fina y desestructurada
3	Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas
4	Arenas gruesas y gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos

$\alpha^* = 0.12 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$

Tasa de cambio de estado estable del nivel de agua ("R1" en cm / min): **0.100**

Tasa de cambio de estado estable del nivel de agua ("R2" en cm / min): **0.700**

$Q_1 = 0.216 \text{ (cm}^3\text{/min)}$

$Q_2 = 1.512 \text{ (cm}^3\text{/min)}$

$C_1 = 0.65515$

$C_2 = 1.06262$

$G_1 = 0.00397$

$G_2 = 0.00322$

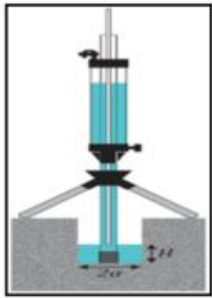
$G_3 = 0.04712$

$G_4 = 0.0213$

$K_{fs} = 4.01E-03 \text{ cm/min}$   
 $6.69E-05 \text{ cm/sec}$   
 $1.58E-03 \text{ inch/min}$   
 $2.63E-05 \text{ inch/sec}$

$\Phi_m = -2.20E-02 \text{ (cm}^2\text{/min)}$

Res Type: 2.16  
H1/a: 1.25  
H2/a: 2.5  
C1-0.01: 0.67728  
C2-0.01: 1.03259  
C1-0.04: 0.70033  
C2-0.04: 1.08468  
C1-0.12: 0.65515  
C2-0.12: 1.06262  
C1-0.36: 0.65515  
C2-0.36: 1.06262



**Figura 2.8.** Cálculo de permeabilidad del punto PO-2 por medio de la hoja de cálculo de SOILMOISTURE. Para este punto se utilizaron las cargas de 5cm y 10cm y reservorios combinados.

Además, se deben usar los parámetros encontrados en la tabla 2.7.

**Tabla 2.7.** Categoría del medio poroso utilizado en el cálculo de permeabilidad de acuerdo a SOILMOISTURE.

CATEGORÍA DE TEXTURA	DESCRIPCIÓN DE CATEGORÍA DEL MEDIO POROSO
1	Materiales arcillosos, compactados, poco estructurados
2	Suelos que tienen estructura fina y desestructurada
3	Suelos estructurados, desde arcillas pasando por francos. Incluye arenas desestructuradas
4	Arenas gruesas gravas. Se incluyen algunos suelos con gran estructura como grandes fisuras y macroporos.

Por lo tanto, de acuerdo a los puntos de muestreo establecidos en la figura 2.5 y bajo los criterios descritos en este apartado los valores a ser utilizados en la metodología de cálculo de permeabilidad y su resultado son los que se pueden apreciar en la tabla 2.8.

**Tabla 2.8.** Parámetros utilizados en el cálculo de permeabilidad correspondientes al permeámetro de Guelph de acuerdo a SOILMOISTURE.

Punto	Tipo	H1 (cm)	H2 (cm)	a (cm)	Cat	R1 (cm/min)	R2 (cm/min)	fc (mm/día)
P1	2	5	10	4	3	0.1	0.7	57.79
P2	2	5	10	4	3	0.25	0.5	19.21
P3	2	5	10	4	3	1.6	1.4	57.41
P4	2	5	10	4	3	1.2	1.0	48.07
P5	2	5	10	4	3	13	18	197.41
P6	2	5	10	4	3	1.0	1.28	4.70

Notas:

- Punto: punto de muestreo.
- Tipo: tipo de reservorio (entre 1 y 2).
- H1: Primera altura de Carga de Agua.
- H2: Segunda altura de Carga de Agua.
- a: Radio del pozo.
- Cat.: Categoría textura-estructura del suelo.
- R1: Tasa de cambio de estado estable del nivel de agua para la carga H1.
- R2: Tasa de cambio de estado estable del nivel de agua para la carga H2.
- fc: es la permeabilidad de cada punto de medición.

En el ANEXO N°4 se presentan las curvas de los datos de tiempo y alturas que se midieron en campo por cada una de las pruebas de infiltración que se realizaron en los puntos especificados en la figura 2.5 en la Subcuenca del Río Amayo.

- Fracción que infiltra por efecto de pendiente ( $K_p$ ) y fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal ( $K_v$ ).

El valor para este parámetro se obtiene de la tabla 1.1.

- Mes inicial para el análisis de la metodología Schosinsky y Humedad del Suelo Inicial HSi).

De acuerdo a (Schosinsky N, 2006), el mes inicial para el cálculo se selecciona considerando meses consecutivos en que la precipitación que infiltra mensualmente supere la evapotranspiración potencial mensual, de este modo se asigna al mes siguiente, de los meses consecutivos seleccionados, una humedad inicial igual a la capacidad de campo. Así, de acuerdo a los valores de la tabla 2.6 que contiene la evapotranspiración potencial y al haber analizado los valores de la precipitación que infiltra se selecciona el mes de noviembre como el mes inicial y su HSi será igual a la Capacidad de Campo (CM) para cada punto. En otras palabras, los meses de septiembre y octubre son los meses consecutivos en los que la precipitación que infiltra es mayor que la evapotranspiración.

- División de zonas en la subcuenca de estudio para el cálculo de recarga potencial anual.

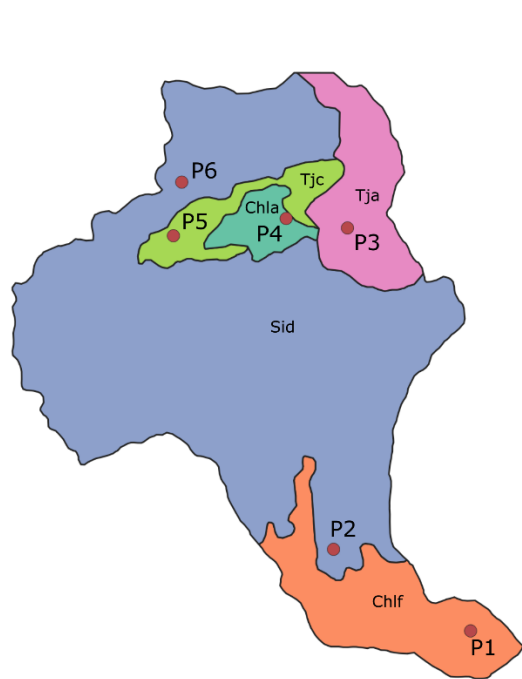
Para realizar el cálculo de la recarga hídrica en la subcuenca es necesario dividirla en zonas y asignar valores a los parámetros de la metodología de Schosinsky por cada polígono que representa una zona en específico (Schosinsky N, 2006). Los criterios de zonificación son los siguientes: Tipos de suelo encontrados en la subcuenca, polígonos de Thiessen por cada estación que proporcionó los datos de precipitación y localización del punto donde se ejecutó la prueba de infiltración. En la figura 2.9 se aprecia la zonificación de la subcuenca para realizar el cálculo de recarga hídrica.

Es necesario aclarar que, tal como se aprecia en la figura 2.9 c), las zonas POL-3-3 y POL-2-2 representan dos áreas por cada una de ellas. Esto se eligió de esta manera ya que las dos áreas que conforman la zona POL-3-3 poseen los mismos valores para los parámetros que se utilizan en el cálculo de la recarga. Así que, para evitar tener un área más en la que se tiene que hacer el mismo proceso de cálculo se decidió que las dos áreas conformaran una sola zona. El mismo caso es para la zona POL-2-2 la cual está

conformada por dos áreas. Por lo tanto, en lugar de analizar 11 zonas para aplicar esta metodología, se analizan 9, lo cual simplifica el proceso de cálculo.

Una vez que se tiene la división de polígonos en los cuales se aplicará la metodología se puede proceder a procesar los datos que se han venido describiendo en este apartado para cada uno de los polígonos que se aprecian en el literal c) de la figura 2.9. En la tabla 2.9 se presenta un resumen de cada uno de los parámetros a utilizar en la metodología para cada uno de los polígonos en los cuales se ha dividido la subcuenca.

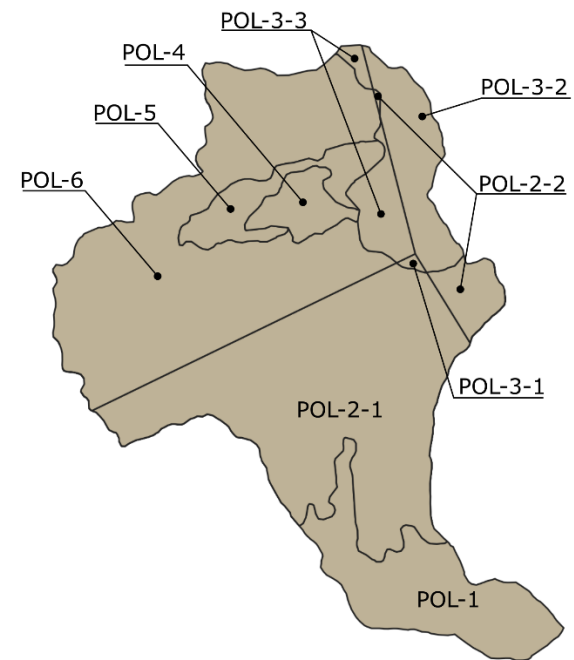
En la figura 2.10 se puede apreciar la hoja de cálculo en Excel utilizada para la aplicación de las ecuaciones y en general de la metodología.



a) División de la subcuenca a partir de los tipos de suelo y las pruebas de infiltración realizadas. Tomado de figura 2.5.



b) División de la subcuenca a partir de los polígonos de Thiessen correspondientes a las estaciones meteorológicas de las cuales se tomo la Precipitación.



c) Combinación de divisiones proporcionando la zonificación final que se utiliza en la metodología de Schosinsky.

**Figura 2.9.** Criterios utilizados para la división de polígonos a los cuales se le aplicará la metodología de Schosinsky.

**Tabla 2.9. Parámetros a utilizar en la metodología de Schosinsky por cada polígono de la subcuenca del río Amayo.**

<b>Parámetro</b>	<b>POL-1</b>	<b>POL-2-1</b>	<b>POL-2-2</b>	<b>POL-3-1</b>	<b>POL-3-2</b>	<b>POL-3-3</b>	<b>POL-4</b>	<b>POL-5</b>	<b>POL-6</b>
fc (mm/día)	57.8	19.2	19.2	57.4	57.4	57.4	48.1	197.4	4.7
Kp	0.2	0.2	0.2	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Kv	0.21	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.2	0.2	0.2
DS (g/cm <sup>3</sup> )	1.425	1.35	1.35	1.5	1.5	1.5	1.425	1.5	1.35
PR (mm)	400	100	100	100	100	100	300	200	100
HSi (mm)	23.8	21.5	21.5	11.3	11.3	11.3	18.1	14.7	21.5
Mes inicial	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Cf0	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.2	0.2	0.2
CC (%)	23.8	21.5	21.5	11.3	11.3	11.3	18.1	14.7	21.5
PM (%)	8.9	10.2	10.2	3.4	3.4	3.4	6.8	4.5	10.2
Precipitación*	Tamarindo	Tamarindo	Dulce N. de Mar	Tamarindo	Dulce N. de Mar	Nueva Conc.	Nueva Conc.	Nueva Conc.	Nueva Conc.
ETP*	Nueva Conc. // ETP con Landsat	Nueva Conc. // ETP con Landsat	Nueva Conc. // ETP con Landsat	Nueva Conc. // ETP con Landsat	Nueva Conc. // ETP con Landsat	Nueva Conc. // ETP con Landsat	Nueva Conc. // ETP con Landsat	Nueva Conc. // ETP con Landsat	Nueva Conc. // ETP con Landsat
Área (m <sup>2</sup> )	2817262.4	7423516.3	546214.4	37580.2	1325320.9	752 920.1	641232.1	1021384.5	7945292.2

Nota:

\* Para la Precipitación se muestra la estación de la que se obtuvieron los datos para cada área de acuerdo a la división realizada en la Figura 2.9 y para la Evapotranspiración se muestra la estación y se especifica además que también se usaron las Imágenes Landsat para obtener los valores de ETP.

## BALANCE HIDRICO DE SUELOS Gunther Schosinsky

**Zona de Estudio:** Zona 1  
**Fecha:** Jun-21  
**Textura de Suelo:** Franco

### Simbología

<p>fc: Capacidad de Infiltración.          I: Infiltración.          CC: Capacidad de Campo.          PM: Punto de Marchitez.          PR: Profundidad de Raíces.          (CC-PM): Rango de Agua Disponible.          DS: Densidad de Suelo.          C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR.          C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR.          Kp: Factor por pendiente ( ver léame)          Kv: Factor por vegetación ( ver léame)          Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración</p>	<p>P: Precipitación Media Mensual.          Pi: Precipitación que infiltra.          ESC: Escorrentía Superficial          ETP: Evapotranspiración Potencial.          ETR: Evapotranspiración Real.          HSi: Humedad de Suelo Inicial.          HD: Humedad Disponible          HSf: Humedad de Suelo Final.          DCC: Déficit de Capacidad de Campo.          Rp: Recarga Potencial          NR: Necesidad de Riego.          Ret: Retención de lluvia</p>
---	---

fc [mm/d]	57.80	
Kp [0.01%]	0.20	
Kv [0.01%]	0.21	
Kfc [0.01%]	0.3513	
I [0.01%]	0.7613	
DS (g/cm <sup>3</sup> ):	1.43	
PR (mm)	400.00	
HSi (mm)	135.66	
Nº de mes con que inicia HSi; 1,2,3...12?	11	
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.	0.12	

	por peso	
	(%)	(mm)
CC	23.80	135.66
PM	8.90	50.73
(CC-PM)	14.90	84.93

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	0.10	1.60	13.50	80.80	181.40	301.30	222.40	212.10	304.50	188.80	92.10	6.20	1604.80
Ret [mm]	0.10	1.60	5.00	9.70	21.77	36.16	26.69	25.45	36.54	22.66	11.05	5.00	201.71
Pi (mm)	0.00	0.00	6.47	54.13	121.53	201.86	149.00	142.10	204.00	126.49	61.70	0.91	1068.19
ESC (mm)	0.00	0.00	2.03	16.97	38.10	63.29	46.71	44.55	63.96	39.66	19.34	0.29	334.90
ETP (mm)	158.10	170.10	209.10	205.80	179.00	162.10	182.10	176.20	156.20	145.00	136.20	144.40	2024.30
HSi (mm)	61.38	51.47	50.73	50.73	50.73	82.76	135.06	135.66	135.66	135.66	135.66	120.90	
C1	0.13	0.01	0.08	0.64	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.84	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.60	0.60	1.00	0.78	0.12	0.00	
HD (mm)	10.65	0.74	6.47	54.13	121.53	233.89	233.33	227.03	288.93	211.42	146.63	71.08	
ETR (mm)	9.92	0.74	6.47	54.13	89.50	149.56	145.97	140.83	156.20	129.20	76.47	60.43	1019.40
HSf (mm)	51.47	50.73	50.73	50.73	82.76	135.06	135.66	135.66	135.66	132.95	120.90	61.38	
DCC (mm)	84.19	84.93	84.93	84.93	52.90	0.60	0.00	0.00	0.00	2.71	14.76	74.28	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.43	1.27	47.80	0.00	0.00	0.00	51.50
NR (mm)	232.38	254.29	287.56	236.60	142.40	13.14	36.13	35.37	0.00	18.51	74.50	158.25	1489.13

*Figura 2.10. Cálculo del balance hídrico de suelos para el polígono POL-1. Visualización general de la hoja de cálculo utilizada para determinar la recarga hídrica de acuerdo a la metodología de Schosinsky.*

### 2.3.3. Recarga hídrica por la metodología de Variación de Niveles Freáticos.

La recarga hídrica siguiendo el método de variaciones de los niveles freáticos se obtendrá de acuerdo al apartado 1.9 utilizando la ecuación siguiente:

$$R = \frac{S_y dh}{dt} = \frac{S_y \Delta h}{\Delta t}$$

Donde  $S_y$  se obtendrá de la tabla 1.5 para cada uno de los tipos de suelo donde se encuentra ubicado el pozo (los tipos de suelos aparecen en la tabla 2.2),  $\Delta h$  es tomado de la tabla 2.1 y  $\Delta t$  corresponde al periodo de 1 año de muestreo.

En este apartado se debe hacer la aclaración de que, debido a la propia definición de la metodología de obtención de la recarga a partir de la Variación de Niveles Freáticos, esta puede aplicarse únicamente en el pozo PO-9. Esto se debe a que el presente método solo aplica para acuíferos libres con matriz porosa que no sea roca fracturada. Por lo tanto, de acuerdo a la figura 1.9 del apartado 1.6 en la zona de estudio únicamente el pozo PO-9 se encuentra ubicado en la unidad acuífero poroso de gran extensión, y solo en este pozo es aplicable la metodología. El pozo PO-10 solo se toma como referencia de nivel freático, solo se cuenta con nivel freático de la época seca, así que no entra en este análisis.

Además, esta metodología depende del uso del rendimiento específico el cual no es fácilmente medible en roca fracturada, más conocida como roca dura. El resto de pozos se encuentran ubicados en las unidades de rocas no acuíferas. Este tipo de rocas son las llamadas rocas duras, lo cual significa que su porosidad es debida únicamente a fisuramiento o fracturas y la literatura no proporciona valores de rendimiento específico (también llamado porosidad eficaz) para roca fisurada. El mismo autor (Healy & Cook, 2002), quien describe la metodología de cálculo de recarga por medio de la Variación de Niveles Freáticos, proporciona en su artículo un ejemplo de uso de esta metodología para obtener la recarga en roca fisurada y específica que el problema de usar el método radica en la dificultad de estimar el rendimiento específico ( $S_y$ ) por las metodologías existentes, ya que no se tiene la certeza de que los valores de  $S_y$  obtenidos sean precisos como para permitir su uso en la estimación de la recarga o si, debido a las complejidades de los sistemas acuíferos de rocas fracturadas, la aplicación del método de niveles freáticos es

en absoluto válida. Los acuíferos de rocas fracturadas son muy particulares de cada zona en específico.

Adicional a lo anterior, como se observa en la tabla 2.8, los valores de permeabilidad correspondientes a los puntos ubicados en las unidades de rocas no acuíferas son muy diferentes entre sí, no poseen valores que correspondan a un tipo de suelo o formación geológica homogénea, esto puede atribuirse a las diferencias que existen en la porosidad debido a la fisuración no uniforme característico de la roca fracturada. Por último, las pendientes que se aprecian en la zona (ver figura 1.3) pueden provocar flujos subterráneos preferenciales haciendo que además aplicar esta metodología puede producir datos no tan cercanos a la realidad.

Sin embargo, pese a lo descrito en el párrafo anterior, en el presente trabajo se aplicará la metodología de variación de niveles freáticos a todos los pozos estudiados con ánimo de ampliar el panorama de análisis y con la intención de poder obtener conclusiones de valor respecto a los resultados de este método. Los valores a usar en esta metodología son los que se muestran en la tabla 2.10.

**Tabla 2.10.** *Parámetros utilizados para determinar la recarga hídrica de acuerdo al método de variación de niveles freáticos.*

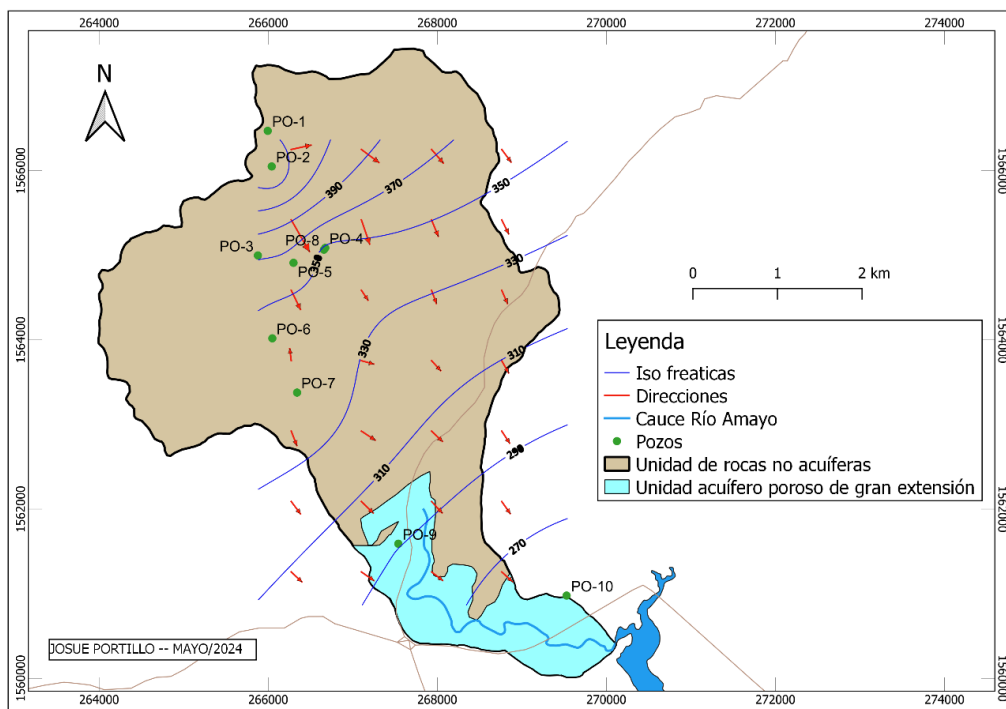
<b>Pozo</b>	<b>Textura</b>	<b><math>S_y</math></b>	<b><math>\Delta h</math> (m)</b>
PO-1	Arcillas y arenas	0.07	6.62
PO-2	Arcillas y arenas	0.07	5.76
PO-3	Arcillas y arenas	0.07	3.72
PO-4	Arcillas y arenas	0.07	2.76
PO-5	Arcillas y arenas	0.07	2.43
PO-6	Arcillas y arenas	0.07	8.42
PO-7	Arcillas y arenas	0.07	7.25
PO-8	Arcillas y arenas	0.07	4.38
PO-9	Arenas medias	0.26	1.43

### CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

A continuación, se presenta una recopilación de los resultados obtenidos a lo largo de la investigación realizada en la subcuenca del Río Amayo. Se iniciará con la descripción de las direcciones de flujo del agua subterránea, pasando por la descripción de los resultados obtenidos de recarga hídrica para finalizar con algunas consideraciones de los datos obtenidos en sitio y de bibliografía.

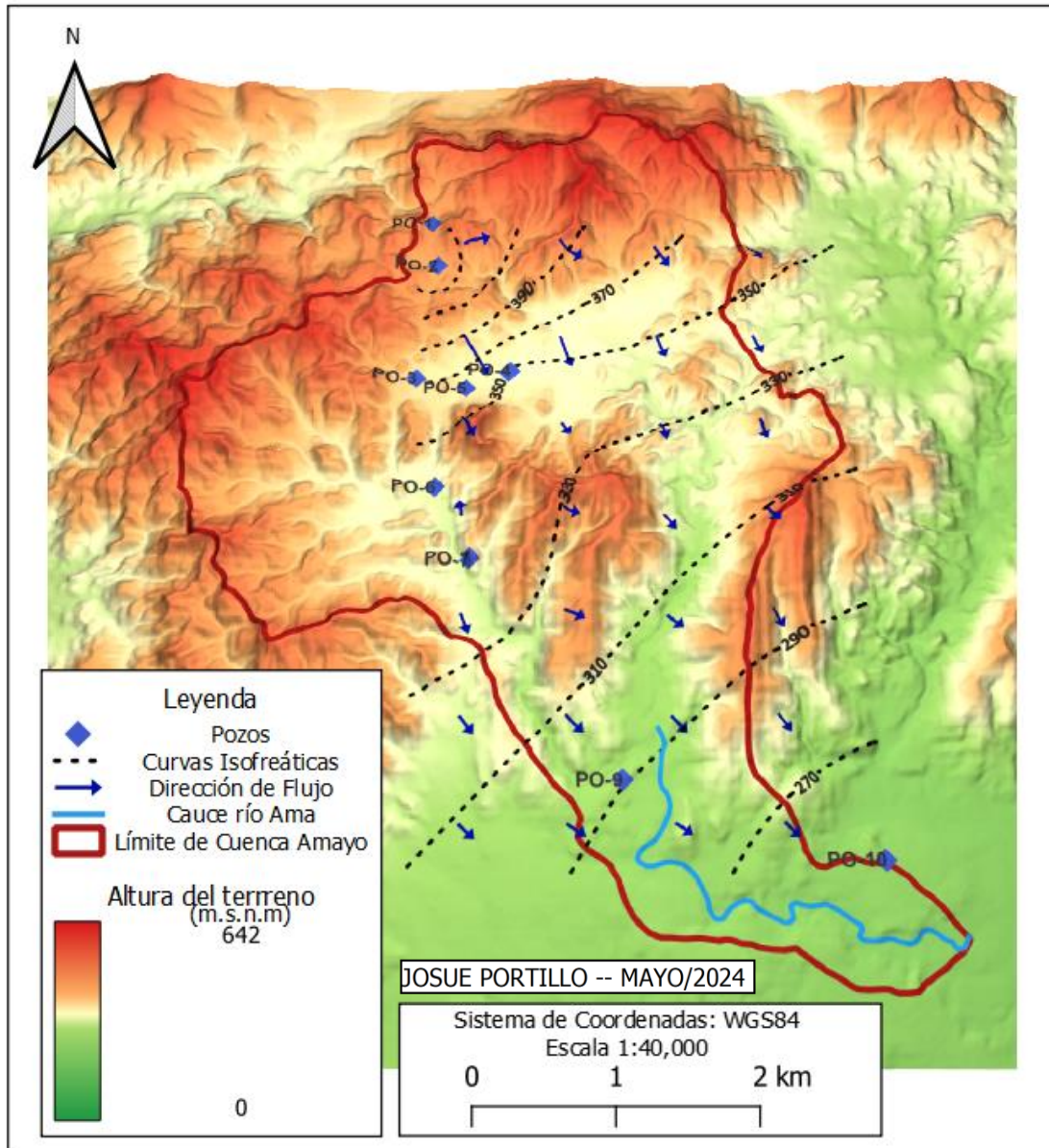
#### 3.1. Dirección de flujo de agua subterránea.

La dirección del flujo subterráneo se encuentra determinada en este caso a partir de los niveles de los pozos que se estudiaron, estos pueden apreciarse en la tabla 2.1. Se realizó una interpolación utilizando el programa SURFER (versión 15.2.305) y en la figura 3.1 podemos ver una representación esquemática de las direcciones de flujo, así como de las líneas isofreáticas que representan la disminución del nivel freático considerando la elevación del terreno de la subcuenca, todo lo anterior se encuentra montado en el mapa hidrogeológico de la subcuenca del río amayo.



**Figura 3.1.** Direcciones de flujo del agua subterránea evidenciado por los pozos estudiados, mostrado sobre las unidades acuíferas encontradas en la zona de estudio, obtenido del mapa hidrogeológico de El Salvador de escala 1:100,000 (ANDA, 2011).

Adicionalmente, en la figura 3.2 se puede apreciar la representación de las direcciones de flujo, así como de las líneas isofreáticas trazadas en un mapa 3D de elevación.



**Figura 3.2.** Direcciones de flujo del agua subterránea evidenciado por los pozos estudiados, mostrado sobre el mapa en 3D de elevación de la zona de estudio, elaboración propia a partir de la base de datos del CNR.

En la figura 3.2 se puede apreciar que las direcciones de flujo siguen la orografía y la dirección de disminución de nivel del terreno de la zona de estudio, esto es característico de un acuífero libre.

### **3.2. Interpretación de los niveles freáticos con respecto a la precipitación en la Subcuenca del Río Amayo.**

Para poder hacer el análisis de cómo responden los niveles freáticos medidos con respecto a la precipitación que se registra en la zona de estudio por medio del pluviómetro instalado de acuerdo a lo mostrado en la figura 2.3 y figura 2.4, se plotearon los datos y se obtuvieron las curvas mostrados en la figura 3.3, la cual muestra la precipitación registrada en la zona en función del tiempo y el nivel freático en función del tiempo en los pozos estudiados, adicional a esta figura, en la figura 3.4 se colocó la nomenclatura de colores usados en la figura 3.3 para poder identificar cada uno de los pozos. La figura 3.3 muestra un resumen de los datos recopilados de precipitación, nivel freático y días muestreados para todos los pozos monitoreados, que en total son 9. Por otro lado, en la figura 3.5 se muestran dichas variables, pero en gráficos individuales, es decir, un gráfico por cada pozo, esto último, fue realizado para poder tener un mejor detalle de la variación del nivel freático de cada pozo con respecto a la precipitación registrada en la zona.

En un primer lugar, al observar las figuras 3.3, 3.4 y 3.5, se puede apreciar que los niveles freáticos registrados en todos los pozos son susceptibles a la precipitación registrada en la subcuenca, es decir, que es fácilmente notable que luego del primer mes de lluvia, los niveles freáticos aumentan, algunos alcanzando un máximo nivel como lo son los pozos PO-1, PO-6 y PO-7. El resto de pozos tienen un aumento en su nivel freático más gradual y con una variación más pequeña (de 1 a 5 metros), hasta finalizar el periodo de muestreo de precipitación y de niveles freáticos que fue en noviembre. Sin embargo, se aprecia que esta variación en los pozos PO-2, PO-3, PO-4, PO-5, PO-8 y PO-9, se encuentra en función de la precipitación registrada, puesto que, justo después de un pico de precipitación, existe un aumento de nivel freático, con un tiempo de respuesta de algunos días y hasta una semana para ciertos pozos.

De acuerdo a lo observado en las figuras 3.1, los pozos del 1 al 8 se encuentran en las unidades de rocas no acuíferas, por lo tanto, dado que todos los pozos mantienen un nivel freático todo el año, se puede aseverar que este se trata de un acuífero local de roca fracturada, es decir, un acuífero en formaciones de roca dura fisurada o fracturada. Se sabe en general que, aunque depende mucho del caso en específico, este tipo de acuíferos constan de tres zonas diferenciables en su geología ( (SÁNCHEZ, 2022): **Zona alterada,**

**Zona rocosa fisurada y basamento de roca inalterada, con fisuras escasas.** Debido a que todos los pozos estudiados son excavados y únicamente el pozo PO-2 es perforado podemos decir que los datos de nivel freático registrado corresponden a la zona alterada (la cual constituye material no consolidado) y que el pozo PO-2 puede estar alcanzando la zona de rocas fisurada. Pese a la afirmación anterior, no se tiene certeza de ello, puesto que se requiere mayor estudio de la zona, para poder diferenciar con más claridad las zonas de este acuífero libre de roca fracturada se requeriría respaldar las observaciones con prospección geofísica, entre otras. Para una revisión más amplia de la estructura de rocas duras, referirse a (SÁNCHEZ, 2022).

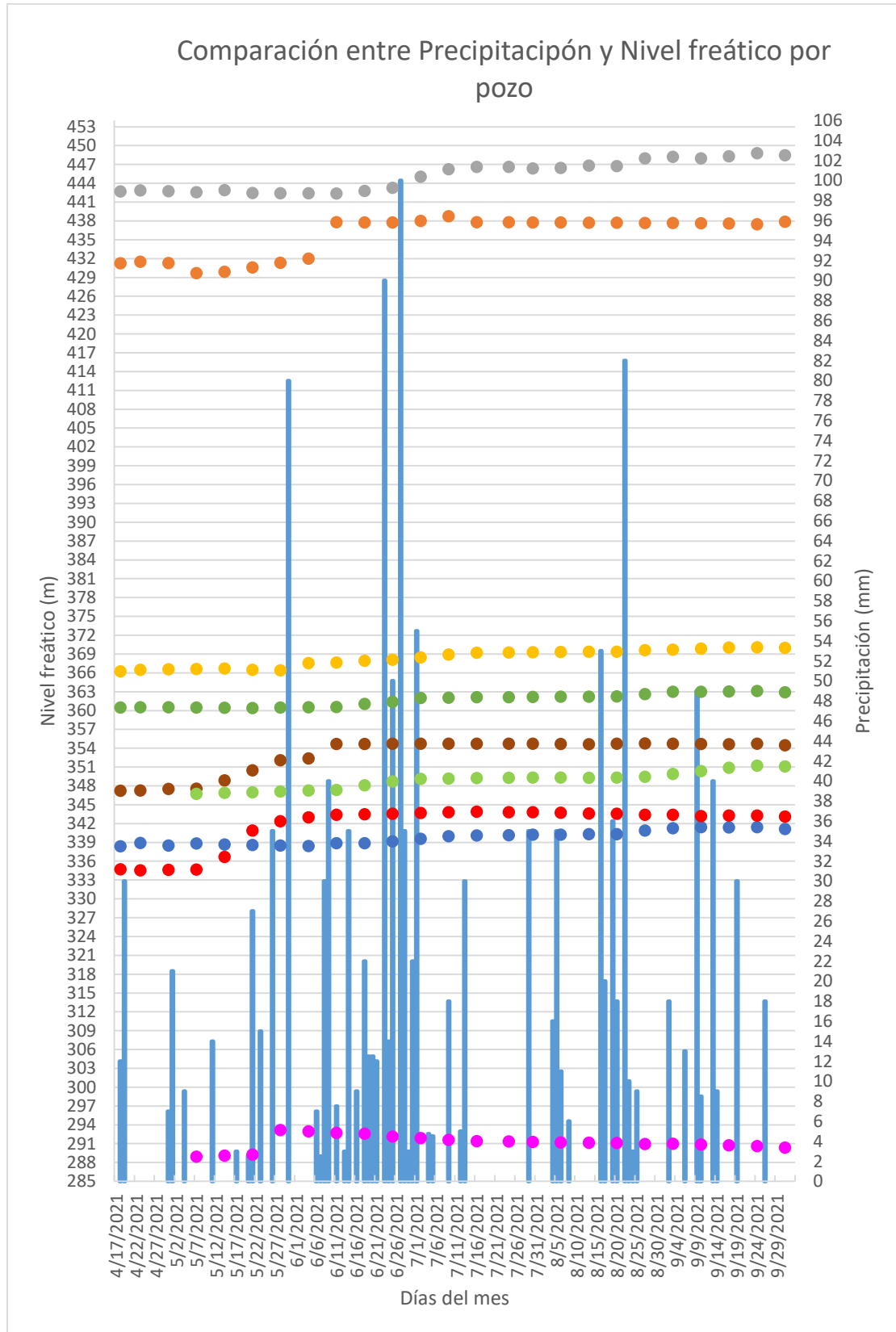
Lo anterior es respaldado con la geología encontrada en la zona de estudio. En la figura 3.6 se puede apreciar que todos los pozos excepto el PO-9 se encuentran en los miembros ch1, ch2 correspondientes a la formación Chalatenango y el miembro m2a correspondiente a la formación Morazán. De acuerdo al Lexico Estratigráfico de El Salvador (Baxter, 1984) que se discutió en el apartado 1.5 de este documento, los miembros ch1, ch2 y m2a están constituidas por formaciones rocosas que entran en la definición de unidades acuíferas constituidas por rocas duras.

De acuerdo a la figura 3.5, el pozo PO-9 se encuentra ubicado en la formación geológica Cuscatlán, específicamente en el miembro c1, de acuerdo al Léxico Estratigráfico de El Salvador (Baxter, 1984), este miembro puede constituir unidades acuíferas por la porosidad primaria que pueden presentar debido a que son materiales no consolidados, en la figura 3.1 se puede apreciar que por dicha razón el pozo PO-9 se encuentra ubicado en la Unidad acuífero poroso de gran extensión. Cabe mencionar que la porosidad de las rocas duras es secundaria y se da exclusivamente por fisuras.

Volviendo al comportamiento de los niveles freáticos de los pozos, los pozos PO-3, PO-4, PO-5 y PO-8 presentan un aumento del nivel freático más retardado que el de los demás pozos encontrados en las unidades de rocas no acuíferas, puesto que el nivel de los cuatro pozos en mención aumenta gradualmente, con cada pico de precipitación medido, se da un aumento correspondiente pero no es súbito y al presentarse otro pico de precipitación, el nivel también aumenta. Adicionalmente, estos pozos tienen un cambio de nivel que ronda valores de 1 y 4 metros, considerando esto y que como se observa en la figura 3.2 y 1.3 estos pozos se encuentran en un valle, de acuerdo a (SÁNCHEZ, 2022) esto es

evidencia de que estos 4 pozos en discusión registran flujo regional. De acuerdo a la tabla 2.10 y a la figura 3.5, el pozo PO-9 posee una variación de su nivel freático al finalizar la época lluviosa de 1.4 metros, lo cual evidencia que registra un flujo regional. Por lo tanto, en términos generales se puede decir que la subcuenca del Río Amayo es una zona con flujos de agua subterránea local y que en las zonas de los valles se registran flujos regionales.

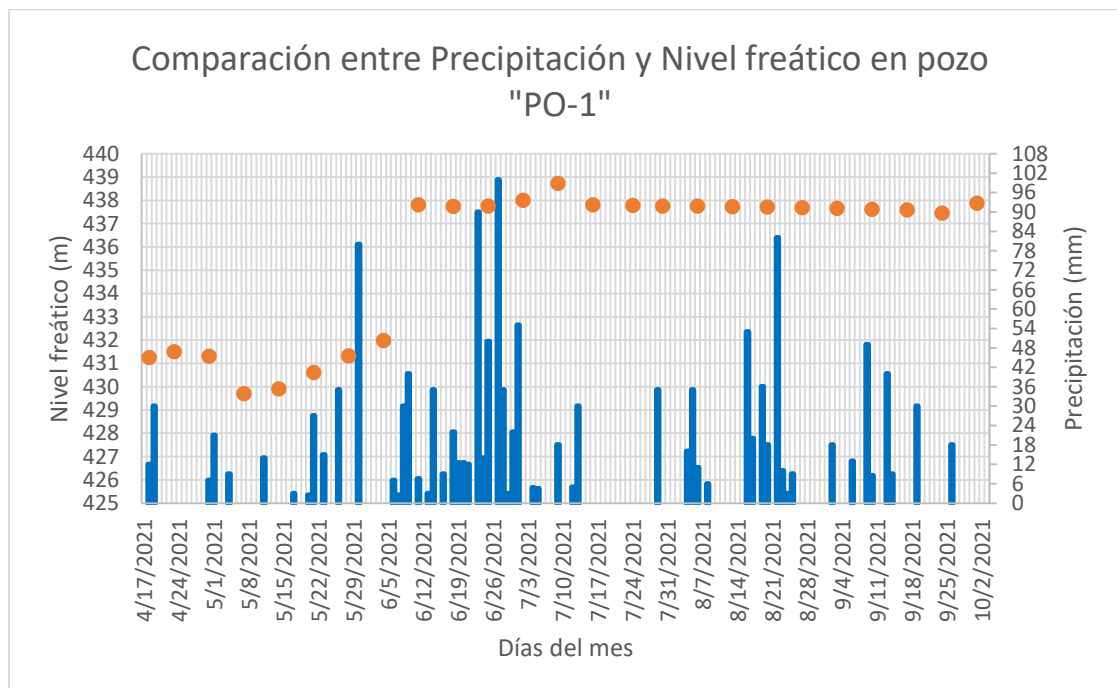
Por último, solo se hace la recapitulación de que la subcuenca del Río Amayo posee dos unidades acuíferas, en la subcuenca baja, se encuentra la Unidad acuífero poroso de gran extensión con flujos regionales y una influencia leve a la recarga local como lo demuestra la figura PO-9 en su aumento en el nivel al inicio de la época lluviosa. Además, en la subcuenca media y alta se cuenta con un acuífero local libre de roca fracturada con flujo subterráneo regional en los valles y en mayor medida un flujo local.



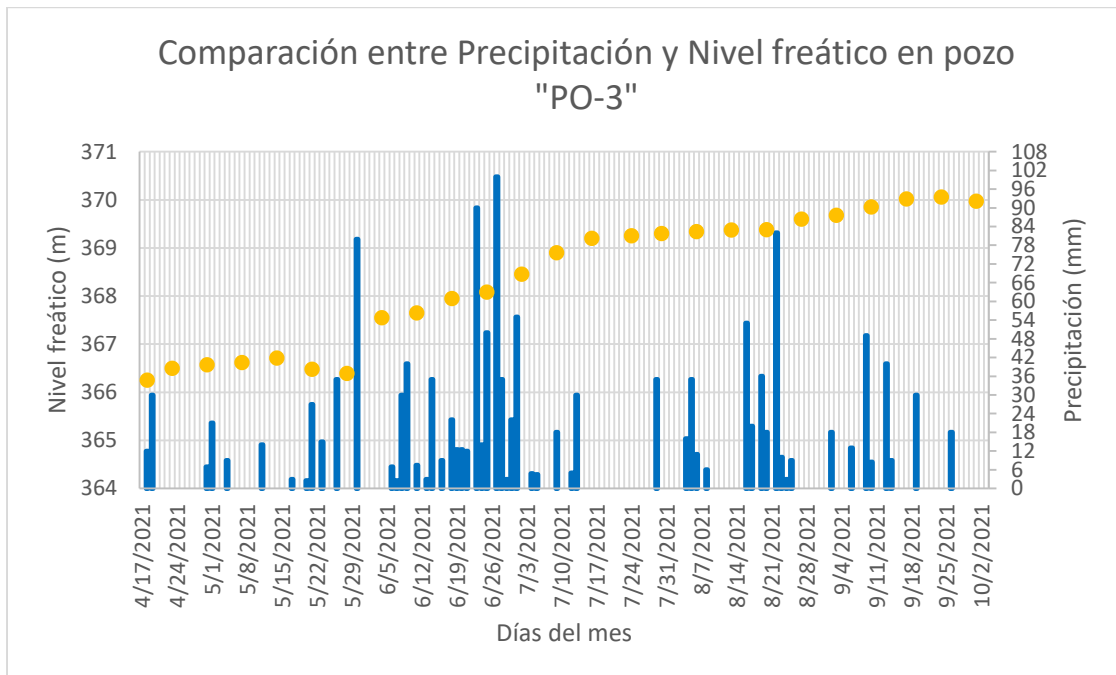
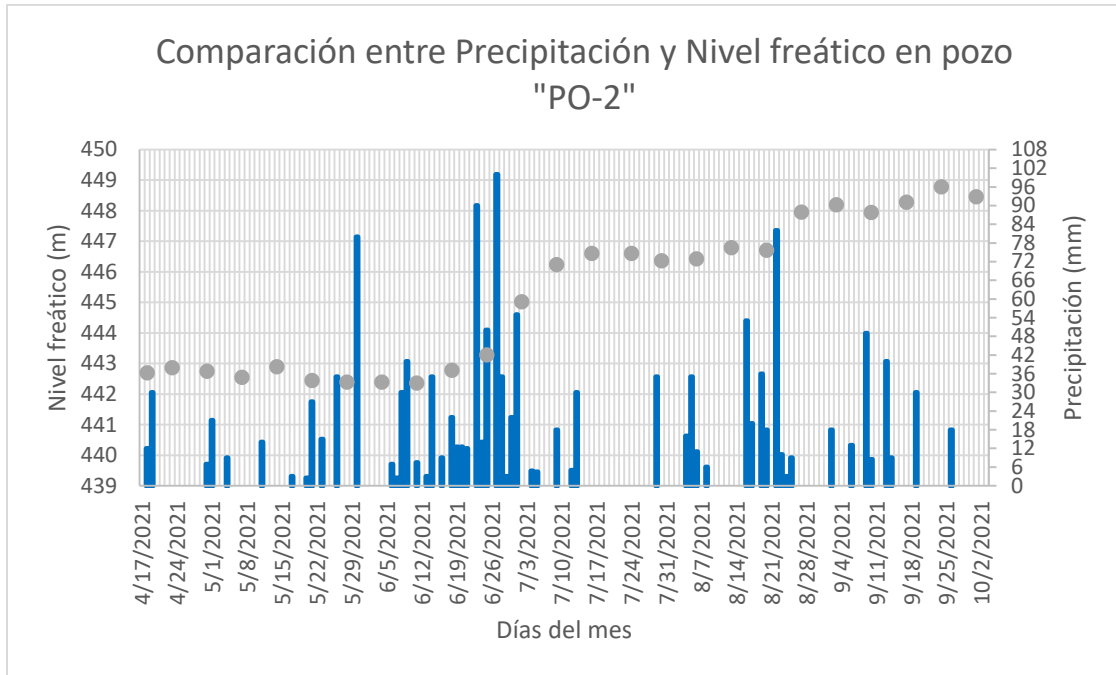
**Figura 3.3.** Respuesta del nivel freático de los pozos estudiados con respecto a la precipitación registrada en la zona de estudio (de Abril a Noviembre).



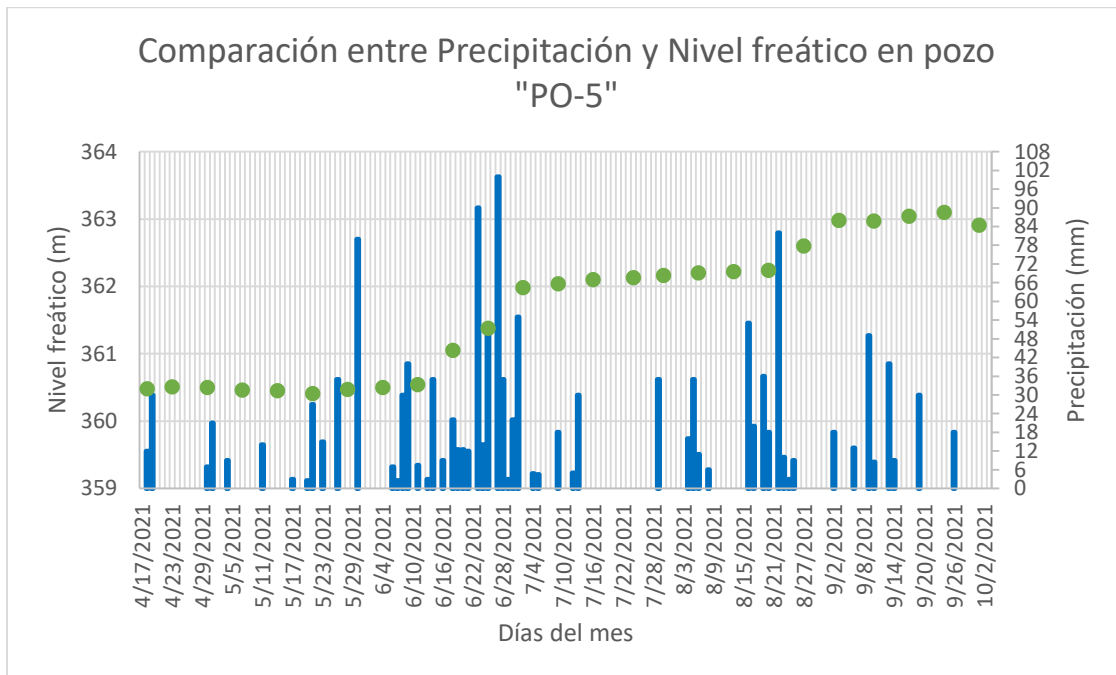
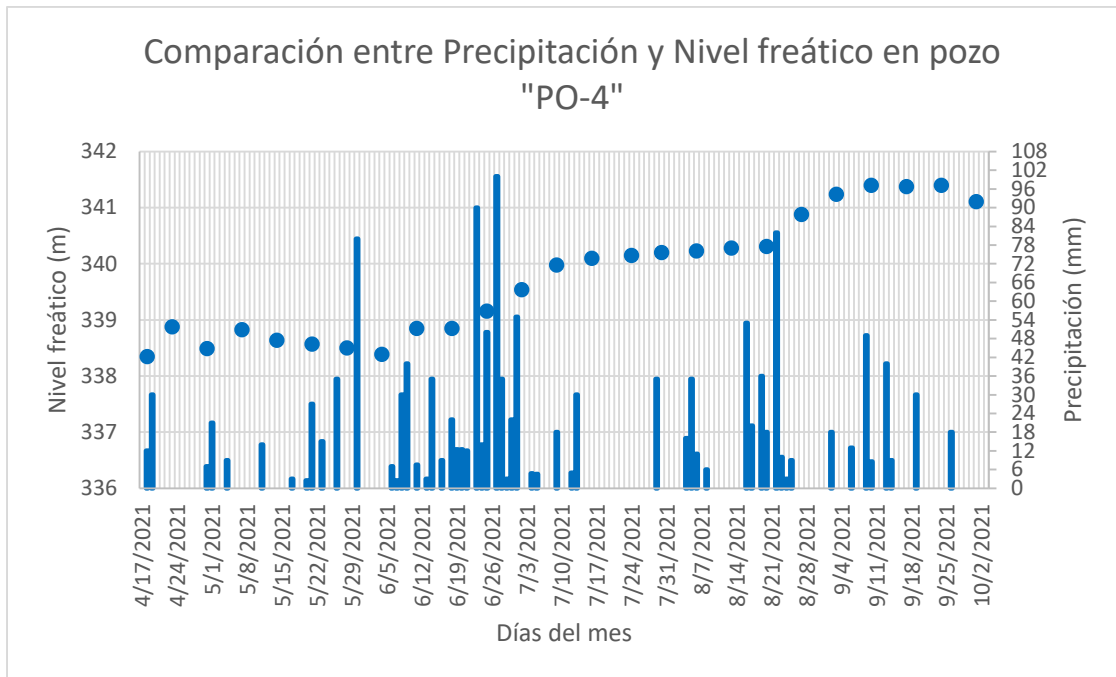
**Figura 3.4.** Nomenclatura de colores usados para identificar los gráficos de los pozos mostrados en la figura 3.3 y 3.4.



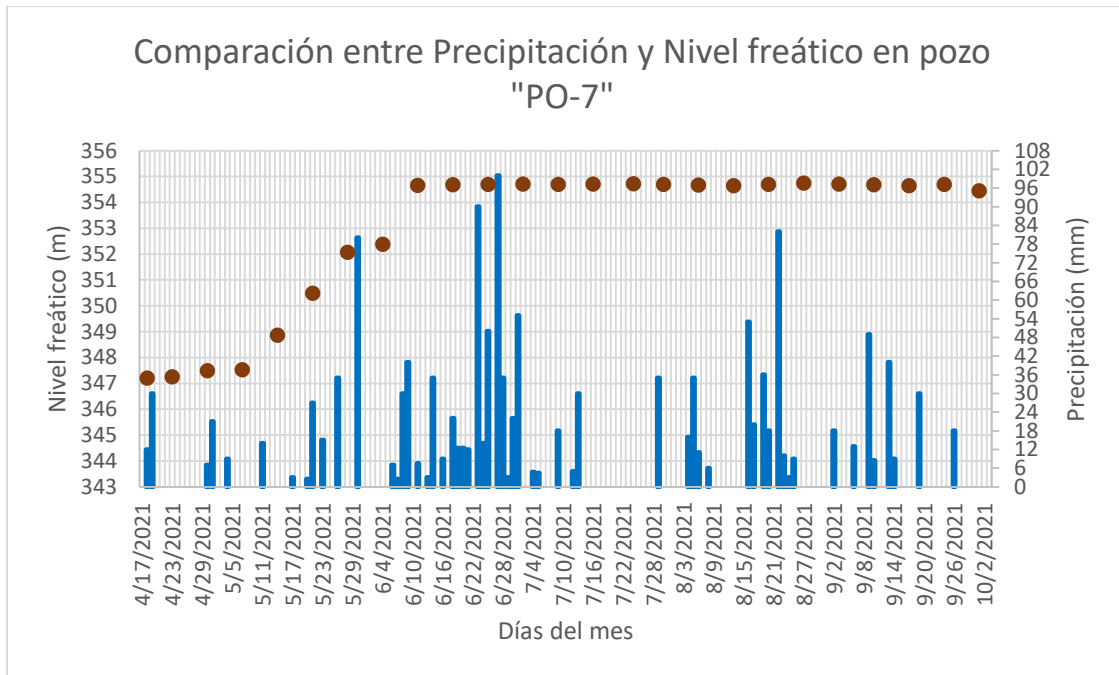
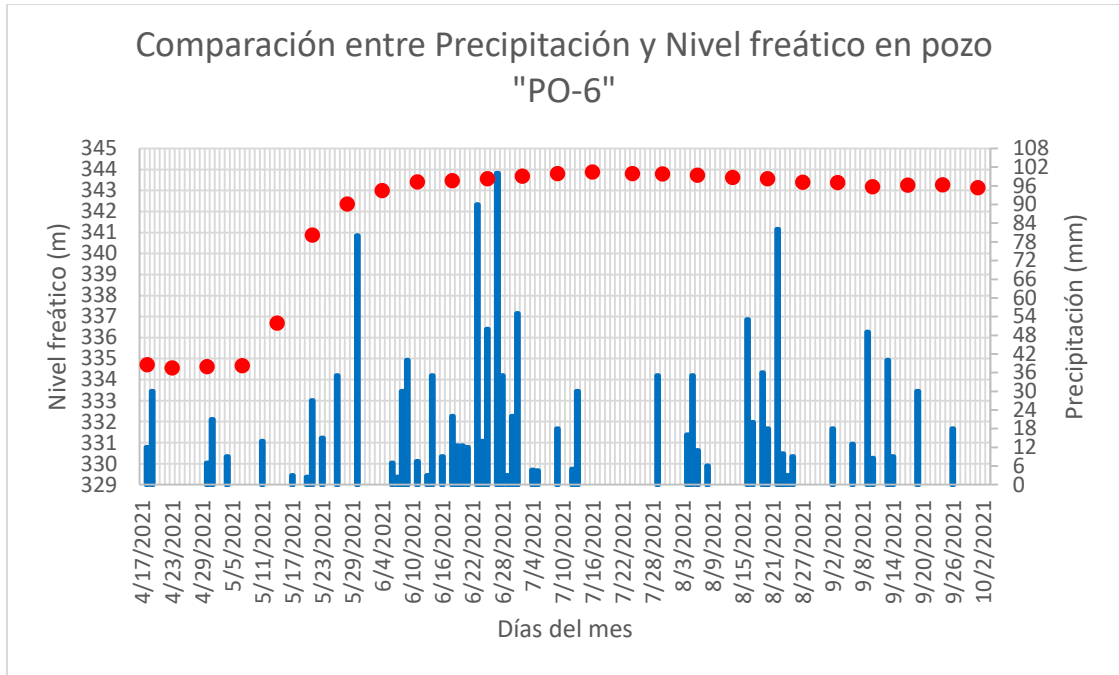
**Figura 3.5.** Respuesta del nivel freático de los pozos estudiados con respecto a la precipitación registrada en la zona de estudio (de Abril a Noviembre) para los pozos PO-1.



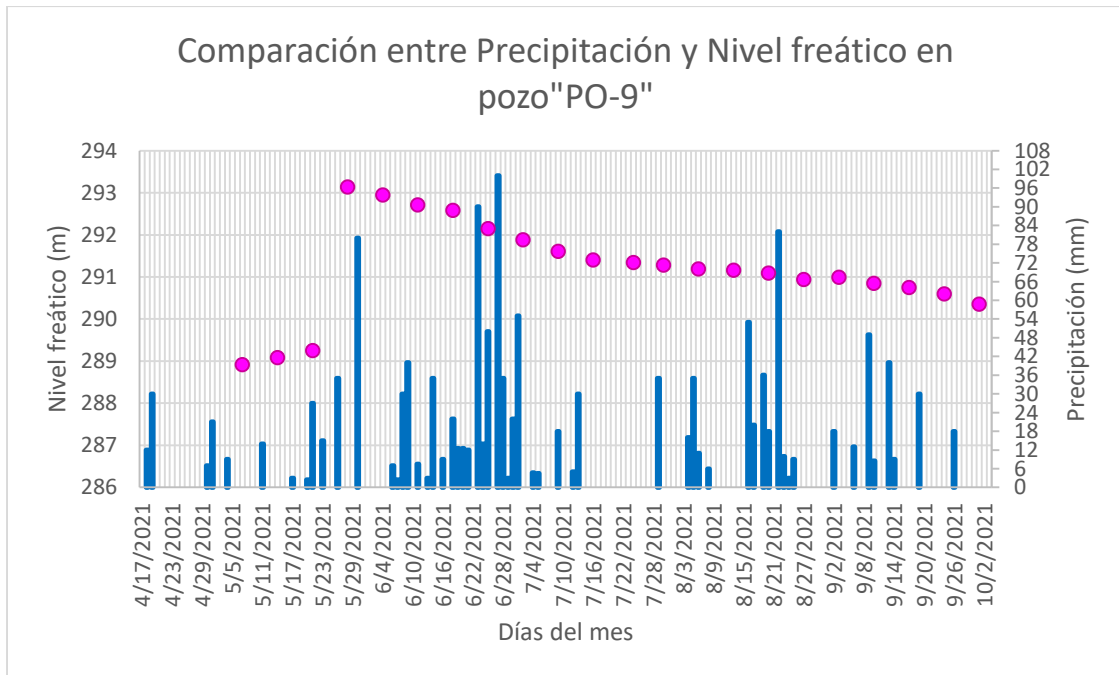
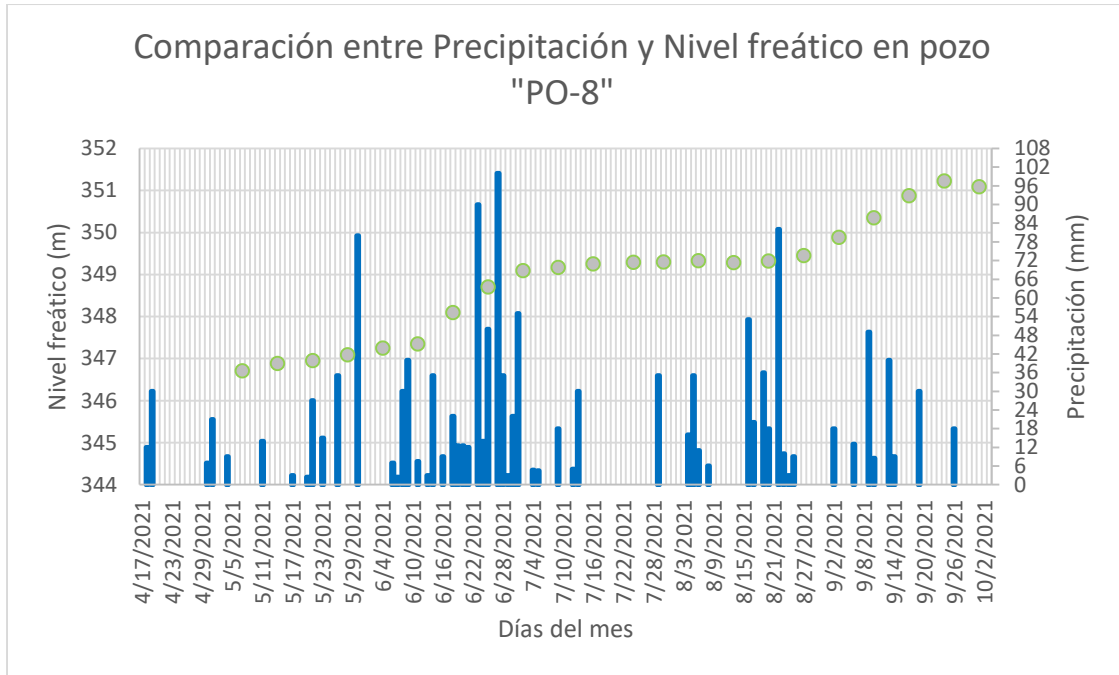
**Figura 3.5.** Continuación. Respuesta del nivel freático de los pozos estudiados con respecto a la precipitación registrada en la zona de estudio (de Abril a Noviembre) para los pozos PO-2 y PO-3.



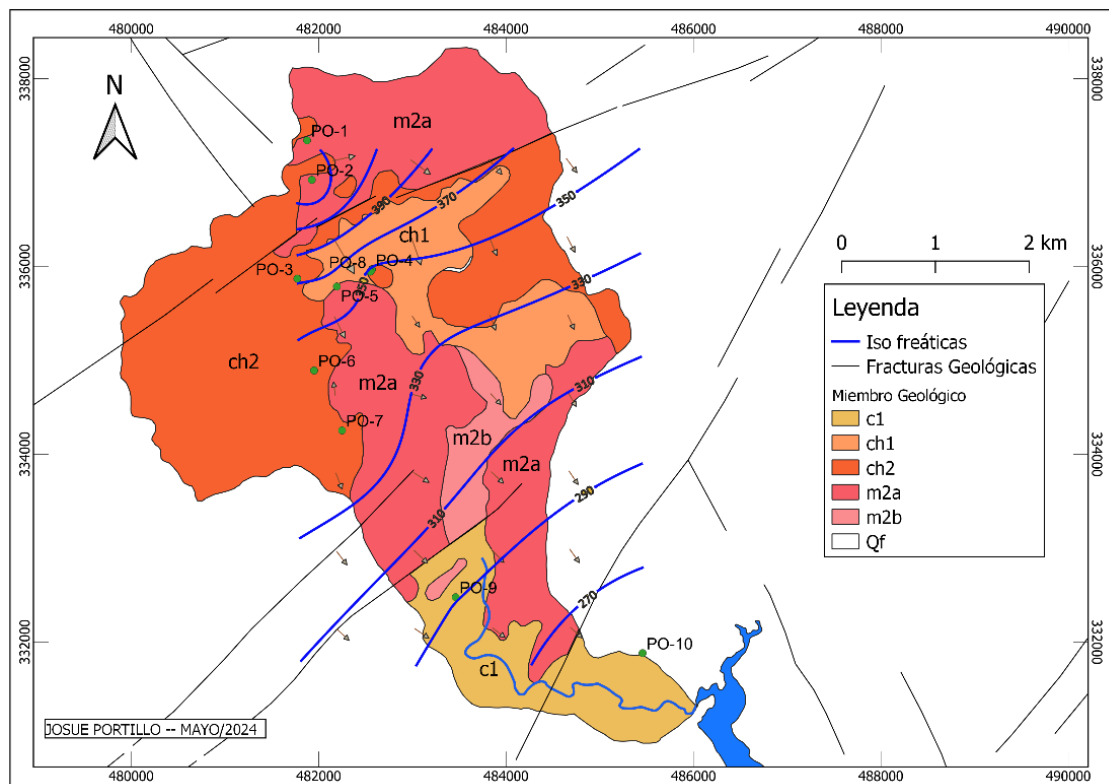
**Figura 3.5.** Continuación. Respuesta del nivel freático de los pozos estudiados con respecto a la precipitación registrada en la zona de estudio (de Abril a Noviembre) para los pozos PO-4 y PO-5.



**Figura 3.5.** Continuación. Respuesta del nivel freático de los pozos estudiados con respecto a la precipitación registrada en la zona de estudio (de Abril a Noviembre) para los pozos PO-6 y PO-7.



**Figura 3.5.** Continuación. Respuesta del nivel freático de los pozos estudiados con respecto a la precipitación registrada en la zona de estudio (de Abril a Noviembre) para los pozos PO-8 y PO-9.



**Figura 3.6.** Direcciones de flujo del agua subterránea evidenciado por los pozos estudiados, mostrado sobre el mapa geológico de la Subcuenca del Río Amayo. Corte hecho a partir del mapa Geológico de la República de El Salvador de escala 1:100,000 (Misión Geológica Alemana, 1978).

### 3.3. Recarga hídrica.

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos del cálculo de la recarga por medio de la metodología de Schosinsky, la cual se calculó con dos valores diferentes de Evapotranspiración (una con parámetros de temperatura medidos por el Ministerio de Medio Ambiente y la otra con temperatura superficial obtenida a partir de Imágenes satelitales Landsat 8), además, se analizarán los resultados de recarga obtenidos con la metodología de Variaciones de Niveles Freáticos.

#### 3.3.1. Recarga hídrica utilizando la metodología de Schosinsky y ETP con Temperatura proporcionada por MARN.

En el apartado 2.3.2 de este documento se ha proporcionado una descripción detallada de las consideraciones necesarias y la selección de los parámetros para la determinación de

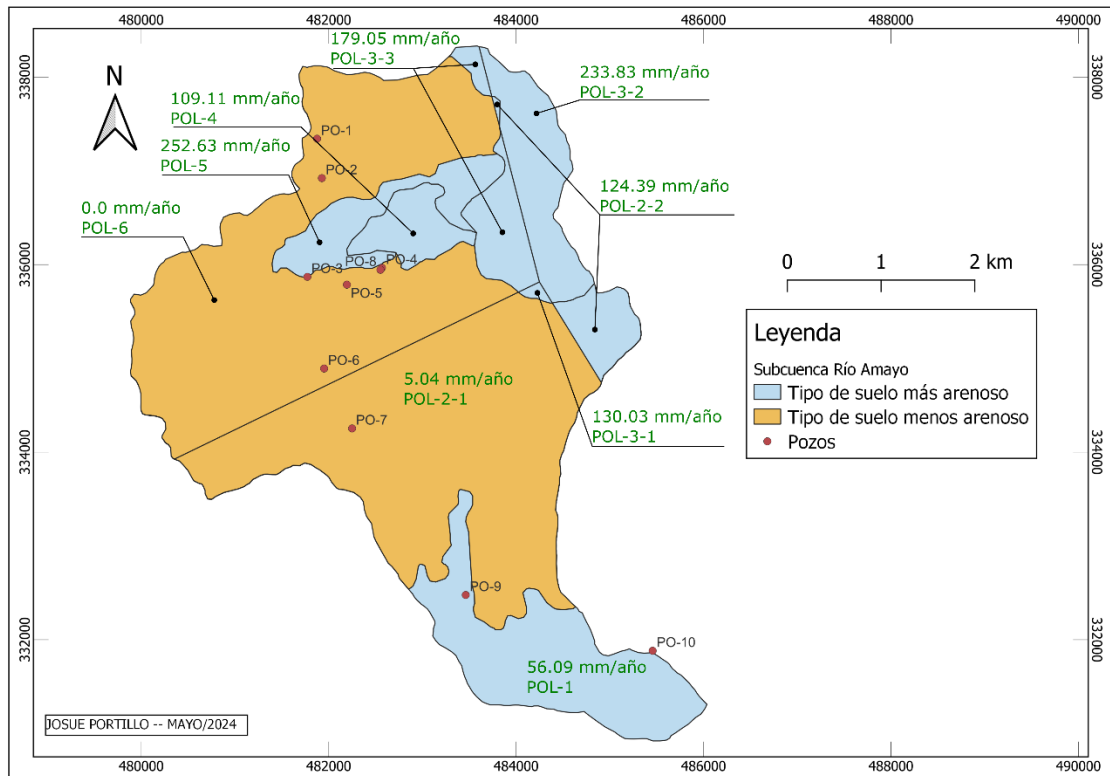
la recarga utilizando la metodología de Schosinsky tanto para este apartado como para el siguiente, el resumen de esto se puede apreciar en la tabla 2.9. Los resultados se muestran en la tabla 3.1 y en el mapa de la figura 3.7 se puede apreciar la distribución de estas áreas con su respectiva recarga en mm/año para cada una de las zonas en las que se dividió la subcuenca del Río Amayo.

**Tabla 3.1.** Resume por zona de la recarga obtenida con la metodología de Schosinsky y ETP proporcionada por MARN.

ZONA	RECARGA POTENCIAL (mm/año)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	VOLUMEN DE RECARGA (m <sup>3</sup> /año)	Porcentaje de (%)
POL-1	56.09	2817262	158020	15.2
POL-2-1	5.04	7423516	37415	3.6
POL-2-2	124.39	546214	67944	6.5
POL-3-1	130.03	37580	4887	0.5
POL-3-2	233.83	1325321	309900	29.8
POL-3-3	179.05	752920	134810	13.0
POL-4	109.11	641232	69965	6.7
POL-5	252.63	1021385	258032	24.8
POL-6	0.0	7945292	0.0	0.0
Recarga media:	121.13	Volumen total:	1040973	100

De acuerdo a los resultados mostrados en la tabla 3.1 y la figura 3.7, las zonas con mayor recarga son las que poseen tipos de suelos más arenosos (marcadas con color celeste en la figura), estas pasan de suelos franco a arenosos, en estas zonas es donde se estimaron las tasas de recarga anuales mayores. En las zonas donde los suelos pasan de francos a arcillosos, la recarga estimada es casi nula, ya que en la zona POL-2-1 posee 5.04 mm/año y la zona POL-6 no percibió recarga. Esto se puede explicar ya que las infiltraciones medidas y la precipitación que infiltra en estas zonas fue la menor de todas, es decir que, esta combinación de variables presenta un escenario desfavorable para que el suelo proporcione recarga al acuífero. En la tabla 3.1 se muestra un porcentaje de recarga, este fue calculado a partir de la recarga en metros cúbicos por año y esta a su vez fue calculada multiplicando el área de cada zona por su respectiva tasa de recarga en mm/año. El volumen de recarga anual estimado está en función de la tasa de recarga en mm/año y por el área, es decir que, pese a que la zona POL-3-1 posee una tasa 130.03 mm/año, al tener un área pequeña, el volumen de recarga es del 0.5% de toda la recarga en la subcuenca,

así la zona POL-3-2 posee el mayor porcentaje de recarga (29.8%), esto es debido a la extensión de área y a la buena tasa de recarga, la cual es de 233.83 mm/año.



**Figura 3.7.** Recarga potencial determinada por zona utilizando la metodología de Schosinsky y ETP proporcionada por MARN.

Hablando particularmente de la zona POL-2-1, esta fue la que percibió menos recarga potencial de las zonas con suelos más arenosos, esto se debe a que la profundidad de raíz fue la más grande de las demás zonas, esto provocó que su recarga potencial fuera menor.

### 3.3.2. Recarga hídrica utilizando la metodología de Schosinsky y ETP con temperatura a partir de Imágenes satelitales Landsat 8.

Para obtener esta recarga lo que se cambió fue la ETP, esta se calculó nuevamente utilizando el modelo de Hargreaves y la temperatura obtenida por medio de Teledetección Térmica usando imágenes satelitales Landsat 8 descargadas para cada mes del año 2021. Los resultados de ETP usando este procedimiento pueden apreciarse en la tabla 2.4. Los resultados de la recarga según Schosinsky y este procedimiento están mostrados en la tabla 3.2 y en la figura 3.8 se pueden apreciar las zonas en las que se dividió la subcuenca de estudio con los valores de recarga en mm/año para cada una de las zonas especificadas.

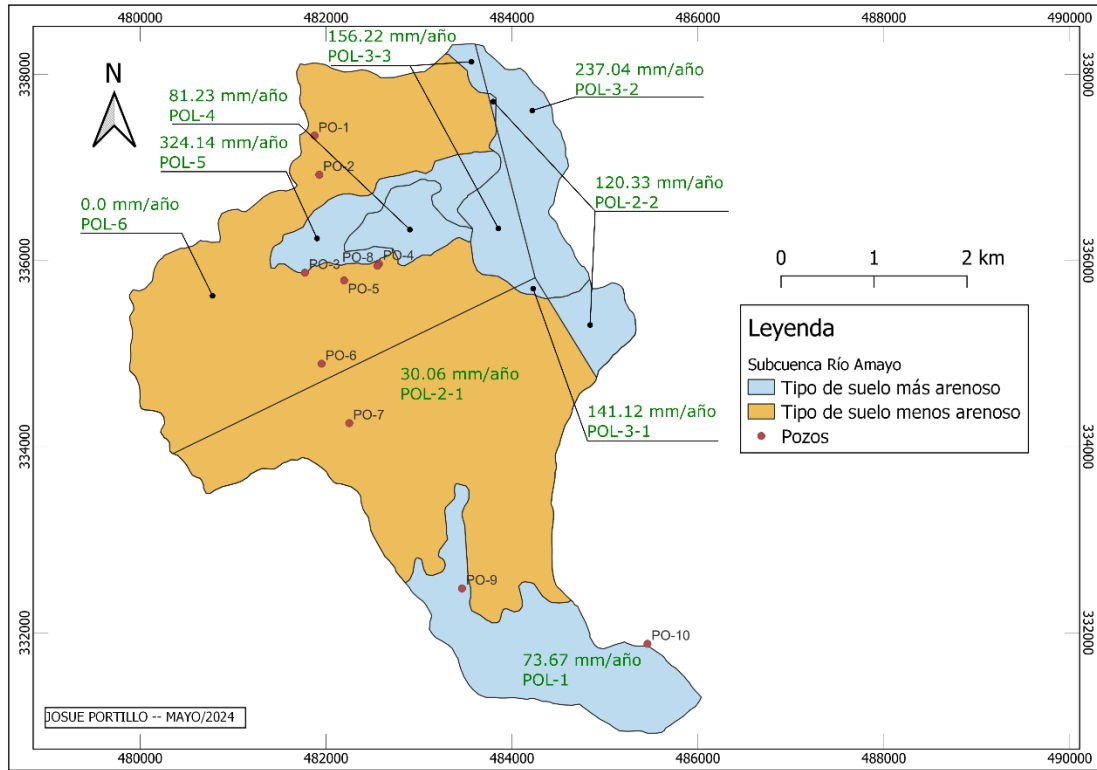
En este caso, la tendencia de las zonas que poseen los mayores valores de recarga es la misma que las obtenidas con la ETP del MARN presentadas en el apartado anterior, es decir que, los suelos más arenosos poseen los mayores valores de cantidad de recarga potencial. Sin embargo, los valores de recarga en mm/año cambiaron con respecto a los del apartado anterior, unos aumentaron y otros disminuyeron, en general la tendencia fue al aumento. Esto es debido a que la ETP que se calculó cambió en función de la temperatura, puesto que esta última estaba distribuida por toda el área de estudio, presentando valores específicos para cada zona en la que se dividió la subcuenca. En otras palabras, la temperatura tenía un valor promedio para cada zona porque el cálculo de la ETP se obtiene a partir de los valores de la imagen satelital la cual divide la zona en pixeles y cada pixel posee un valor de temperatura en específico.

**Tabla 3.2.** Resume por zona de la recarga obtenida con la metodología de Schosinsky y ETP usando Temperatura calculada a partir de Teledetección Térmica.

ZONA	RECARGA POTENCIAL (mm/año)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	VOLUMEN DE RECARGA (m <sup>3</sup> /año)	Porcentaje de (%)
POL-1	73.67	2817262	207548	15.8
POL-2-1	30.06	7423516	223151	16.9
POL-2-2	120.33	546214	65726	5.0
POL-3-1	141.12	37580	5303	0.4
POL-3-2	237.04	1325321	314154	23.9
POL-3-3	156.22	752920	117621	8.9
POL-4	81.23	641232	52087	4.0
POL-5	324.14	1021385	331072	25.1
POL-6	0	7945292	0	0.0
Recarga media:	129.31	Volumen total:	1316662	100.0

Lo anterior se refleja al analizar el promedio de recarga en todas las zonas de estudio, la recarga potencial promedio en mm/año obtenida a partir de los valores de ETP proporcionados por el MARN es de 121.13 mm/año y el promedio que se obtuvo a partir de los valores de ETP calculados usando los datos de la imagen satelital fue de 129.31 mm/año. Se puede decir entonces que, ya que la diferencia de los dos valores anteriores solo es de 8.18 mm/año, y su variación porcentual es de 6.75%, ambas fuentes de datos arrojan valores de recarga potencial que no tendrán diferencias considerables entre sí. Sin embargo, se considera que los valores obtenidos usando datos satelitales son más

representativos de la zona de estudio porque las temperaturas son tomadas específicamente en el área de interés.



**Figura 3.8.** Recarga potencial determinada por zona utilizando la metodología de Schosinsky y ETP usando Temperatura calculada a partir de Teledetección Térmica.

### 3.3.3. Recarga hídrica utilizando el método de Variación de Niveles Freáticos.

La obtención de la recarga a partir del método de Variación de Niveles Freáticos se describió en el apartado 2.3.3. En este caso el resultado se ve influenciado directamente por la variación del nivel freático en el tiempo de estudio seleccionado y por el rendimiento específico ( $S_y$ ) de la roca o suelo donde se encuentre el pozo. Como ya se especificó en el apartado 2.3.3 esta metodología se aplicó para todos los pozos estudiados haciendo las acotaciones necesarias considerando que esta metodología solo es aplicable a acuíferos libres y matrices con porosidad primaria, la cual es característica de materiales no consolidados. Los valores obtenidos en esta metodología se muestran en la tabla 3.3.

Si se calcula una recarga ponderada por este método para los pozos del PO-1 al PO-8, ubicados en el acuífero libre de roca fracturada de la subcuenca media y alta, se obtiene

un valor de 361.7 mm/año, dicho valor está solamente 10.1 mm por debajo de la recarga que registrada en el pozo PO-9 el cual es de 371.8 mm/año, esto indica que, aunque los medios porosos son con distintas características poseen similares recargas. Los pozos del PO-1 al PO-8 corresponden a sistemas fracturados de flujos locales, son de una rápida descarga debido a que su porosidad es secundaria, reflejan un llenado muy alto, pero no lo mantienen en el tiempo. Como ya se dijo en el apartado 3.2 los pozos PO-3, PO-4, PO-5 y PO-8 reflejan un flujo regional y poseen las recargas individuales más pequeña con respecto a los otros pozos.

**Tabla 3.3.** Resumen de resultados de la Recarga Potencial obtenida a partir del método de Variaciones de Niveles Freáticos.

Pozo	Textura	$S_y$	$\Delta h$ (m)	Recarga (mm/año)
PO-1	Arcillas y arenas	0.07	6.62	463.4
PO-2	Arcillas y arenas	0.07	5.76	403.2
PO-3	Arcillas y arenas	0.07	3.72	260.4
PO-4	Arcillas y arenas	0.07	2.76	193.2
PO-5	Arcillas y arenas	0.07	2.43	170.1
PO-6	Arcillas y arenas	0.07	8.42	589.4
PO-7	Arcillas y arenas	0.07	7.25	507.5
PO-8	Arcillas y arenas	0.07	4.38	306.6
PO-9	Arenas medias	0.26	1.43	371.8

El pozo PO-9 se encuentra ubicado de acuerdo a la figura 3.1 en la unidad acuífero poroso de gran extensión y de acuerdo a la figura 3.6 se encuentra ubicado en la formación Cuscatlán y en el miembro c1. Cabe mencionar que la variación de nivel freático de este pozo fue la menor registrada en todos los pozos que se estudiaron en la zona como se observa en la tabla 3.3. Inicialmente el nivel freático ascendió a un valor máximo cerca del 23 de mayo de 2021 con las primeras lluvias y luego su valor estuvo en descenso sin presentar aumentos debidos a las lluvias registradas en los siguientes días, esto se puede apreciar en la figura 3.5 para el pozo PO-9. Ya que se sabe que esta unidad acuífera es muy extensa, este pozo representa una pequeña aproximación del comportamiento del nivel freático en toda la extensión del acuífero y también en el tiempo, sin embargo, refleja correctamente un acuífero extenso y con flujos regionales en los valles.

En general, todos los pozos se vieron afectados por la precipitación, y su nivel depende mucho de esta, es decir, predomina la recarga local, y solo en los pozos PO-3, PO-4, PO-5, PO-8 y PO-9 se registra un flujo regional que se debe a una recarga regional.

### 3.3.4. Comparación de resultados de recarga.

Como se observa en la figura 3.9, hay zonas en las cuales se aplicó la metodología de Schosinsky en la que no hay pozos estudiados, estos son las zonas: POL-2-2, POL-3-1, POL-3-2, POL-3-3, POL-4 y POL-5. Por lo tanto, la comparación de este apartado se realizará por unidad acuífera, es decir, utilizando la figura 3.1 y para el acuífero poroso de gran extensión se comparará la recarga obtenida por Schosinsky en la zona POL-1 y la recarga obtenida por variación de niveles freáticos en el pozo PO-9. Del mismo modo, para el acuífero libre de roca fracturada se usará el valor de recarga por Schosinsky para el resto de zonas y la recarga por variación de niveles freáticos para el resto de pozos los cuales son: PO-1, PO-2, PO-3, PO-4, PO-5, PO-6, PO-7 y PO-8; para ambos casos se obtendrá un valor ponderado de la recarga. Esta información se presenta en la tabla 3.4 y 3.5 respectivamente. Notar que las tablas 3.4 y 3.5 comparan además la recarga por Schosinsky obtenida con los datos que proporcionó el MARN y los datos que se obtuvieron a partir de las imágenes satelitales Landsat 8.

Se hace la aclaración de que la metodología de Schosinsky se aplica a toda la superficie de la subcuenta del Río Amayo, donde para acuíferos de roca fracturada esta zona se conoce como **Zona Alterada** la cual forma una franja de material no consolidado en la superficie, esto es cierto para las unidades de rocas no acuíferas.

Como se puede observar en las tablas 3.4 y 3.5, los valores obtenidos por la metodología de recarga por niveles freáticos son superiores a los obtenidos por medio de Schosinsky. Esto puede deberse a que el acuífero libre de roca fracturada posee una porosidad que no es fácil ponderar ni predecir, además, está conformado por una geología heterogénea, lo que provoca flujos preferenciales que pueden alimentar de agua zonas específicas y dejar sin la misma a otras. Las pendientes que posee la zona y que se muestran en la figura 1.3 pueden favorecer estos flujos preferenciales, haciendo que los pozos posean más recarga de la que se mide con la metodología de Schosinsky. Es necesario que se utilicen más herramientas para describir este acuífero como lo son la prospección geofísica y técnicas hidrogeoquímicas.



Se puede mencionar que hay una conexión entre el acuífero libre de gran extensión ubicado en la subcuenca baja y el acuífero libre de roca fracturada ubicado en la subcuenca media y alta del Río Amayo, esto puede hacer que el nivel del pozo PO-9 presente mayor valor de recarga por el método de variación de niveles freáticos (ver tabla 3.5). De la pequeña variación de nivel freático de la época seca a la lluviosa se interpreta que el pozo PO-9 es alimentado en su mayoría por flujo regional y en una considerable parte por flujo local (ver figura 3.5). Los flujos regionales no son percibidos por la metodología de Schosinsky.

Por lo tanto, de acuerdo a la metodología planteada en esta investigación, la recarga regional predomina en la unidad acuífero poroso de gran extensión de la subcuenca baja. Por otro lado, en la subcuenca media y alta, predomina una recarga más local, puesto que los pozos que evidencian el flujo regional se encuentran juntos entre sí (Pozos PO-3, PO-4, PO-5 y PO-8) y en los valles como se observa en la figura 1.3 y 3.9, mientras que los pozos que reflejan flujo local se encuentran más dispersos y su recarga por Variación de niveles freáticos predomina en el valor promedio como se observa en la tabla 3.3 y 3.4.

#### **3.4. Comparación de precipitación obtenida in situ y obtenida por el MARN.**

En la zona donde se encuentra la subcuenca no todos los meses se registran lluvias, de parte de este estudio se comenzó a registrar la precipitación a partir del 11 de abril del año 2021, y los meses de noviembre y diciembre no se registró lluvia. En la tabla 3.6 se puede apreciar una comparación entre la precipitación registrada por el MARN en la estación meteorológica ubicada en Nueva Concepción (G03) para el año 2020 y la que se registró en el terreno donde se encuentra el pozo de la junta de agua del Caserío Aguacayo para el año 2021.

En los meses anteriores a abril no se posee registro para asegurar que la precipitación fue nula, sin embargo, por comentarios de los habitantes de la zona, estos aseguran que esencialmente no llueve esos meses al igual que los meses de noviembre y diciembre tal como se registró, por lo tanto, la “x” que se muestra en la tabla 3.5 para los meses mencionados representa que no existe medida. Las medidas mostradas a partir de abril

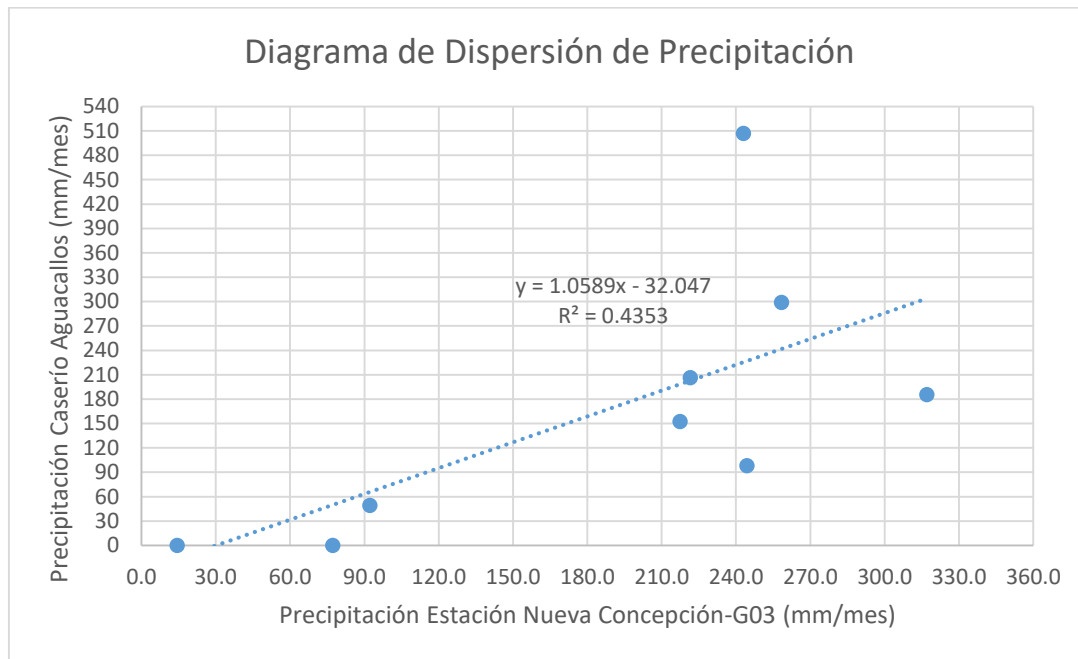
hasta diciembre de 2021 se pudieron tomar hasta que se logró obtener la valiosa participación comunitaria de las personas que residen en la Subcuenca del Río Amayo.

**Tabla 3.6.** Comparación entre la precipitación registrada por la estación Nueva Concepción (G03) y la que se registró en el Caserío Aguacayo.

Meses	Precipitación estación – Nueva Concepción- G03 (mm/mes) (2020)	Precipitación - Caserío Agaucayo (mm/mes) (2021)
Enero	0.0	x
Febrero	0.0	x
Marzo	32.4	x
Abril	109.0	49.0
Mayo	392.5	206.5
Junio	305.2	507.0
Julio	304.2	152.3
Agosto	325.4	299.0
Septiembre	225.0	185.5
Octubre	217.6	98
Noviembre	134.1	0
Diciembre	7.7	0
<b>Total anual:</b>	<b>2053.1</b>	<b>1497.3</b>

Cabe resaltar que los valores para la estación de Nueva Concepción como ya se dijo corresponden al año 2020, ya que de parte del MARN solo se obtuvieron datos hasta este año y eran los más cercanos al 2021 con los que se contaban. Se puede apreciar que los datos obtenidos en el caserío Aguacayo se encuentran con significativas diferencias a los proporcionados por el MARN. Por ejemplo, en el mes de junio, se reportan 507.0 mm de lluvia para Aguacayo, una cifra significativamente mayor a la registrada en la estación la cual posee un valor de 305 mm y como se puede apreciar en la tabla 3.6 en Aguacayo se registró precipitación con un valor significativamente menor a lo que se registró en la estación. Adicionalmente, la distancia entre la estación Nueva Concepción y el punto donde se instaló el pluviómetro en el Caserío Aguacayo es de 13.63 Km.

En la figura 3.10 se puede apreciar el diagrama de dispersión entre la Precipitación proporcionada por el MARN tomada en la estación Nueva Concepción – G03 plotada en el eje “X” y la precipitación registrada en Caserío Aguacayo plotada en el eje “Y”.



**Figura 3.10.** Precipitación registrada en la estación Nueva Concepción (datos del año 2020) comparada con la precipitación registrada en Aguacayo (año 2021). Se incluye además, la línea de tendencia con su respectiva relación.

Por medio del valor del coeficiente de determinación  $R^2$  obtenido, se puede decir que, las variaciones de los valores de precipitación en la zona de estudio pueden ser explicadas en un 49.61% por medio de la ecuación de regresión encontrada. Analizando el coeficiente de correlación  $R$  el cual tiene un valor de 0.7043 positivo, este indica que hay una correlación positiva cercana fuerte entre los valores de precipitación medidos en Aguacayo y los medidos por el MARN en la estación Nueva Concepción. Por lo tanto, podemos decir que los valores de precipitación medidos en Aguacayo son representativos de la zona de estudio.

## CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES.

- 1- El sistema Hidrogeológico de la Subcuenca del Río Amayo, está dividido en dos unidades acuíferas, de acuerdo al mapa Hidrogeológico de El Salvador (ANDA, 2011), en la subcuenca baja se encuentra la Unidad acuífero poroso de gran extensión y en la subcuenca media y alta se encuentran las Unidades de rocas no acuíferas, de la cual se sabe como resultado de este estudio que constituye un acuífero local libre de roca fisurada, puesto que las personas que residen dentro del perímetro de la subcuenca se abastecen de pozos como el PO-2 el cual es perforado. Además, el resto de pozos estudiados, desde el PO-1 hasta el PO-8 poseen nivel freático que se pudo registrar durante todo el año y las personas los usan para la ganadería y usos domésticos. Por lo tanto, es de vital importancia el estudio de este acuífero.
- 2- El monitoreo de los niveles freáticos de los pozos estudiados en la Subcuenca del Río Amayo demuestra que las direcciones de flujo del agua subterránea se encuentran regidas por la topografía de la zona, no existe ningún obstáculo o formación geológica que represente una condición que cambie la dirección que va de mayor nivel topográfico al menor.
- 3- La recarga calculada por la metodología de Schosinsky proporciona mayores valores de recarga potencial para las zonas donde los suelos son más arenosos y los valores más pequeños corresponden a las zonas donde los suelos tienden a ser más arcillosos. Las zonas POL-1, POL-3-1, POL-2-2, POL-3-2, POL-3-3, POL-4 y POL-5 son las que proporcionan los mayores valores de recarga potencial, por consiguiente, son las zonas que se deben proteger más, no permitir que los suelos se alteren mucho para no perder la capacidad de los dos sistemas acuíferos para poder ser recargados.
- 4- Las zonas POL-2-1 y POL-6 son las que proporcionaron poca y nula recarga potencial, al ser zonas de gran extensión territorial (68.27%) comparada con el total del área de la subcuenca, podemos afirmar que poco más de la mitad la Subcuenca del Río Amayo tiene suelos que no son buenos para recarga, por tal razón el resto de zonas que proporcionan valores altos de recarga potencial deben ser cuidados para no poner en riesgo el recurso hídrico de la zona de estudio.

- 5- La recarga potencial obtenida con la metodología de Schosinsky y los datos de temperatura calculados a partir de las imágenes satelitales Landsat 8 poseen poca variación con respecto a la recarga potencial obtenida por la metodología de Schosinsky usando los datos de ETP proporcionados por el MARN. Es posible afirmar que el uso de los datos del MARN o los datos de las imágenes satelitales no representa una diferencia considerable para la aplicación de la metodología de Schosinsky.
- 6- Los resultados de recarga potencial obtenida con la metodología Schosinsky usando los datos de ETP obtenidos a partir de la temperatura calculada con las imágenes satelitales es más representativa de la zona de estudio ya que fueron datos de temperatura calculados para el área que cubre la Subcuenca del Río Amayo. Lo anterior es cierto, ya que la imagen satelital divide el área de la subcuenca en pixeles y se calcula un valor de temperatura por cada uno de los pixeles que conforman la subcuenca. De este modo se obtiene un promedio de ETP por cada área en la que se dividió la subcuenca, esto no sucede con los datos que se obtuvieron del MARN ya que la estación que proporciona la ETP se encuentra ubicada a 13 Km aproximadamente de la zona de estudio.
- 7- La aplicabilidad de la metodología de Variación de Niveles Freáticos para calcular la recarga indica que solamente se puede usar en acuíferos libres y que no proporciona datos confiables si se aplica a roca fracturada porque no se pueden medir correctamente el almacenamiento específico. Aun considerando esto, la aplicación de este método a los pozos encontrados en el acuífero libre de roca fracturada demuestra que los valores de recarga promedio para ambas unidades acuíferas difieren solamente en 10.1 mm/año, esto significa que, aunque los medios porosos poseen distintas características poseen similares recargas. La diferencia radica en que los pozos del acuífero libre de roca fracturada alcanzan niveles freáticos altos, pero no los mantienen en el tiempo y de acuerdo a las personas que habitan la cuenca la época seca los deja sin agua para su aprovechamiento puesto que son de rápida recarga y rápida descarga.
- 8- Las diferencias entre la recarga obtenida por Schosinsky y la obtenida por la metodología de variación de niveles freáticos pueden deberse a flujos

preferenciales que favorecen el aumento del nivel freático de los pozos estudiados y por ello la recarga obtenida con esta metodología presenta valores superiores. Estos flujos preferenciales son explicados por lo heterogéneo de la geología encontrada en la zona y por la porosidad debida a fisuramiento encontrada en una matriz de roca fracturada como lo es la del acuífero de la subcuenca media y alta.

- 9- Generalmente en la práctica, la recarga obtenida en El Salvador por Schosinsky suele dar valores menores que los obtenidos por el método de Variaciones de Niveles Freáticos, y a su vez el método que da resultados más cercanos a lo obtenido en campo es el de Thornthwaite y L. sierra. Los valores de recarga por Schosinsky obtenidos en este trabajo son útiles para identificar directamente zonas de recarga y los obtenidos por el método de Variaciones de Niveles Freáticos son valores considerados como más cercanos a lo que se podría obtener en la realidad.
- 10- De acuerdo a la metodología planteada en esta investigación, la recarga regional predomina en la unidad acuífero poroso de gran extensión de la subcuenca baja. Por otro lado, en la subcuenca media y alta, predomina una recarga más local, puesto que los pozos que evidencian el flujo regional se encuentran juntos entre sí (Pozos PO-3, PO-4, PO-5 y PO-8) y en los valles, mientras que los pozos que reflejan flujo local se encuentran más dispersos (pozos PO-1, PO-2, PO-6 y PO-7) y su recarga por Variación de niveles freáticos predomina en el valor promedio.
- 11- Los datos de precipitación medidos en el caserío Aguacayo tienen una correlación positiva cercana fuerte con los datos de precipitación proporcionados por el MARN. Por lo tanto, los datos de precipitación medidos en el caserío Aguacayo son representativos de la zona de estudio. Sin embargo, es preferible aumentar el volumen de datos de precipitación midiendo durante más años para mejorar la capacidad del modelo para explicar mejor la correlación entre la precipitación medida por el MARN y la que se mide en el caserío Aguacayo.
- 12- Debido a que, durante la época seca, se reporta que el cauce del río no tiene caudal (esto fue comprobado por visitas técnicas realizadas a la zona en época seca), se puede concluir que existen flujos preferenciales que provocan que no exista caudal del río todo el año. Éstos flujos preferenciales pueden estar controlados por la fisuración de la roca, y puede haber un vaciado del nivel renovable del acuífero

libre de roca fracturada, provocando que la subcuenca sea bastante seca comparada con otras.

## **CAPÍTULO V: RECOMENDACIONES.**

- 1- Elaborar un plan de manejo de las zonas donde se presentaron los mayores valores de recarga potencial por medio de la metodología Schosinsky para asegurar que estas zonas no se vean afectadas por actividades antropogénicas (agricultura, ganadería, o cualquier otra actividad económica que involucre la afectación de los suelos) que puedan disminuir la capacidad que tienen de recargar al sistema. La vulnerabilidad del acuífero no se debe ver afectada por actividades como la ganadería, entre otras.
- 2- Implementar un sistema de medición piezométrica en la mayor cantidad de pozos en la zona de estudio para poder monitorear en una mayor extensión territorial el nivel freático de la zona, en un periodo de estudio más largo y con intervalos de tiempo entre medición lo más corto que se pueda, así se tendrá una mejor comprensión del nivel freático en el tiempo y el espacio.
- 3- Realizar estudios hidrológicos, hidrogeológicos y de prospección geofísica para mejorar la descripción del acuífero libre de roca fracturada. De este modo se tendrán aproximaciones relacionadas con el flujo de aguas subterráneas, un mayor conocimiento del comportamiento del acuífero en el tiempo y en el espacio y una delimitación geométrica más certera con zonas de recarga mejor definidas.
- 4- Realizar estudios de isotopos e hidrogeoquímicos para corroborar la procedencia del agua subterránea del acuífero libre de roca fracturada. Con este tipo de metodologías se podrá confirmar si efectivamente una parte de la recarga es local y confirmar que los pozos PO-3, PO-4, PO-5, PO-8 y PO-9 evidencian un flujo regional y poder cotejar la procedencia de esas aguas regionales.
- 5- Realizar estudios de caracterización de suelos que incluyan la determinación de parámetros como textura de suelos, densidad aparente, capacidad de campo y punto de marchitez para mejorar los datos utilizados en los cálculos de recarga para obtener de mejor manera el almacenamiento específico y mejorar los cálculos de recarga para determinar los valores de escurrimiento. Esto ayudará a dimensionar el alcance de los proyectos de captación de agua lluvia que se propongan en el futuro, para que las comunidades no dependan únicamente del agua subterránea.

- 6- Efectuar estudios Hidrogeoquímicos para confirmar si existe conexión entre el flujo de agua subterránea del acuífero libre de roca fracturada y la unidad acuífero poroso de gran extensión. Además, estos estudios servirán para clasificar y caracterizar las aguas regionales que se han registrado en la presente investigación.
- 7- Se deben promover proyectos en la Subcuenca del Río Amayo que vayan dedicados a la captación de agua lluvia. Se propone esto, ya que en la zona se registran lluvias considerables y por el tipo de acuífero que está dominado por fisuras o fracturas, la época seca es muy marcada con un caudal inexistente del río y con pozos artesanales que no logran suplir de suficiente recurso hídrico a los habitantes.
- 8- Es necesario cuidar del recurso hídrico en la Subcuenca del Río Amayo, los efectos del cambio climático pueden agravar la condición de sequía en la zona de estudio. Es necesario tomar todas las medidas necesarias para disminuir el efecto invernadero para evitar que las condiciones ambientales con las que gozamos actualmente se vean afectadas adversamente.

## CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. Obtenido de <https://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm#Contents>
- ANDA. (2011). *Mapa Hidrogeológico de el Salvador*. San Salvador, El Salvador.
- ANDA. (2017). *Plan Nacional de Agua Potable y Saneamiento de El Salvador*. San Salvador.
- Baxter, S. (1984). *Léxico Estratigráfico de El Salvador*. San Salvador. CEL.
- Carlson, T., & Ripley, D. (1997). On the Relation between NDVI, Fractional. *Remote Sensing of*, 62. 241-252.
- Chander, G., Markham, B., & Helder, D. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of environment*, 113: 893-903.
- Chow, V. T., Maldment, D., & Mays, L. (1988). *APPLIED HYDROLOGY*. Singapur: McGraw-Hill.
- CNR. (1996). *Mapa de Uso de Suelos*. San Salvador, El Salvador.
- Coll, C., Galve, J., Sánchez-Tomás, J., & Caselles, V. (2010). Validation of Landsat-7/ETM+ Thermal-Band Calibration and Atmospheric Correction with Ground-Based Measurements. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 48. 547 - 555.
- Elrick, D. E., Reynolds, W. E., & Tan, K. S. (1989). Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. *Ground Water Monit. rev.* 9, 184-193.
- Elrick, D., Reynolds, W., & Tan, K. (1989). Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated. *Ground Water Monit. Rev.* 9, 184-193.
- Gabriels, D., Lobo, D., & Pulido, M. (2014). Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos. *Venesuelos*, 7-22.
- Grassi, C. (1976). Resumen de propiedades físicas. En C. GRASSI.. Mérida, Venezuela.
- Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 91-109.
- Johnson, A. I. (1967). Specific yield - Compilation of Specific Yields for Various Materials. *US Geol Surv Water-Supply Paper 1662-D*, 74 pp.
- MAG. (1966). *Mapa de tipos de suelos. Escala 1:50,000*.
- MARN. (2017). *Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico de El Salvador, con énfasis en zonas prioritarias*. San Salvador, El Salvador.

- Martínez Barbáchano, R. (2020). Estimación de la temperatura superficial en imágenes históricas Landsat 5 mediante corrección atmosférica monocanal en el térmico para la cuenca del río Tempisque-Bebedero (Costa Rica). *Revista Geográfica de América Central*, 17-32.
- Meinzer, O. E. (1923). The occurrence of groundwater in the United States with a discussion of principles. *US Geol Surv Water Supply*, 489, 321.
- Misión Geológica Alemana. (1978). Mapa Geológico de la República de El Salvador. Escala 1:100,000. San Salvador, El Salvador.
- Reynolds, W. D., & Elrick, D. E. (1987). A laboratory and numerical assessment of the Guelph permeameter method. *Soil Sci.*, 144: 282-299.
- Rickly Hydrological Co. (2006). *1003-100 Guelph Permeameter*. Columbus, OH.
- SÁNCHEZ, F. J. (2022). *Hidrogeología Superficial y Subterránea*. Kindly Direct Publishing.
- Schosinsky N, G. (2006). CÁLCULO DE LA RECARGA POTENCIAL DE ACUÍFEROS. *Revista Geológica de América Central*, 34-35: 13-30.
- Schosinsky, G., & Losilla, M. (2000). MODELO ANALÍTICO PARA DETERMINAR LA INFILTRACIÓN. *Revista Geológica de América Central*, 43-55.
- SNET. (2005). *Balance Hídrico Integrado y Dinámico en El Salvador*. San Salvador, El Salvador.
- Sobrino, J., Jiménez-Muñoz, J., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90. 434-440.
- Sobrino, J., Sobrino, J., Raissouni, N., Kerr, Oliso, López, M., Belaid, El-Kharraz, J., Cuenca, J., & Dempere. (2000). *Teledetección*.
- Valor, E., & Caselles, V. (1996). Mapping Land Surface Emissivity from. *Remote Sensing of Environment*, 57, 167-184.

## **ANEXOS.**

### **ANEXO N° 1: Registro de Precipitación medida en caserío Aguacayo, El Tigre, Municipio de la Reina.**

En el presente ANEXO se muestran tabulados las medidas registradas en el pluviómetro instalado en Caserío Aguacayo, en el Cantón El Tigre del Municipio de La Reina. Las medidas se presentan en dos tablas, la tabla 1 muestra las medidas de enero a junio y la tabla 2 muestra las medidas de julio a diciembre.

La “x” en las medidas de enero, febrero, marzo y abril significa que para esas fechas no se posee medida debido a que aún no se contaba con la valiosa colaboración comunitaria de las personas que residen en la zona.

**Tabla 1 ANEXO N°1.** Medidas de precipitación tomadas en Pluviómetro instalado en el Caserío Aguacayo, Cantón El Tigre, Municipio de La Reina. Medidas tomadas de enero a junio durante el año 2021.

Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio	
Días	P (mm)	Días	P (mm)	Días	P (mm)	Días	P (mm)	Días	P (mm)	Días	P (mm)
1	x	1	x	1	x	1	x	1	21	1	0
2	x	2	x	2	x	2	x	2	0	2	0
3	x	3	x	3	x	3	x	3	0	3	0
4	x	4	x	4	x	4	x	4	9	4	0
5	x	5	x	5	x	5	x	5	0	5	0
6	x	6	x	6	x	6	x	6	0	6	7
7	x	7	x	7	x	7	x	7	0	7	2.5
8	x	8	x	8	x	8	x	8	0	8	30
9	x	9	x	9	x	9	x	9	0	9	40
10	x	10	x	10	x	10	x	10	0	10	0
11	x	11	x	11	x	11	x	11	14	11	7.5
12	x	12	x	12	x	12	x	12	0	12	0
13	x	13	x	13	x	13	x	13	0	13	3
14	x	14	x	14	x	14	x	14	0	14	35
15	x	15	x	15	x	15	x	15	0	15	0
16	x	16	x	16	x	16	x	16	0	16	9
17	x	17	x	17	x	17	0	17	3	17	0
18	x	18	x	18	x	18	12	18	0	18	22
19	x	19	x	19	x	19	30	19	0	19	
20	x	20	x	20	x	20	0	20	2.5	20	25
21	x	21	x	21	x	21	0	21	27	21	12
22	x	22	x	22	x	22	0	22	0	22	0
23	x	23	x	23	x	23	0	23	15	23	90
24	x	24	x	24	x	24	0	24	0	24	14
25	x	25	x	25	x	25	0	25	0	25	50
26	x	26	x	26	x	26	0	26	35	26	
27	x	27	x	27	x	27	0	27	0	27	100
28	x	28	x	28	x	28	0	28	0	28	35
29	x			29	x	29	0	29	0	29	3
30	x			30	x	30	7	30	80	30	22
31	x							31	0		

**Tabla 2 ANEXO N°1.** Medidas de precipitación tomadas en Pluviómetro instalado en el Caserío Aguacayo, Cantón El Tigre, Municipio de La Reina. Medidas tomadas de julio a diciembre durante el año 2021.

Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
Días	P (mm)	Días	P (mm)	Días	P (mm)	Días	P (mm)	Días	P (mm)	Días	P (mm)
1	55	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
2	0	2	0	2	18	2	0	2	0	2	0
3	0	3	0	3	0	3	0	3	0	3	0
4	4.8	4	16	4	0	4	0	4	0	4	0
5	4.5	5	35	5	0	5	0	5	0	5	0
6	0	6	11	6	13	6	10	6	0	6	0
7	0	7	0	7	0	7	0	7	0	7	0
8	0	8	6	8	0	8	0	8	0	8	0
9	18	9	0	9	49	9	0	9	0	9	0
10	0	10	0	10	8.5	10	0	10	0	10	0
11	0	11	0	11	0	11	0	11	0	11	0
12	5	12	0	12	0	12	0	12	0	12	0
13	30	13	0	13	40	13	0	13	0	13	0
14	0	14	0	14	9	14	0	14	0	14	0
15	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15	0
16	0	16	53	16	0	16	0	16	0	16	0
17	0	17	20	17	0	17	0	17	0	17	0
18	0	18	0	18	0	18	0	18	0	18	0
19	0	19	36	19	30	19	50	19	0	19	0
20	0	20	18	20	0	20	9	20	0	20	0
21	0	21	0	21	0	21	0	21	0	21	0
22	0	22	82	22	0	22	9	22	0	22	0
23	0	23	10	23	0	23	0	23	0	23	0
24	0	24	3	24	0	24	0	24	0	24	0
25	0	25	9	25	0	25	0	25	0	25	0
26	0	26	0	26	18	26	20	26	0	26	0
27	0	27	0	27	0	27	0	27	0	27	0
28	35	28	0	28	0	28	0	28	0	28	0
29		29	0	29	0	29	0	29	0	29	0
30	0	30	0	30	0	30	0	30	0	30	0
31	0	31	0			31	0			31	0

**ANEXO N° 2: Descripción de características de los tipos de suelos encontrados en la Subcuenca del Río Amayo.**

A continuación, se presenta una descripción de cada tipo de suelo encontrado en la Subcuenca del Río Amayo de acuerdo a (MAG, 1966):

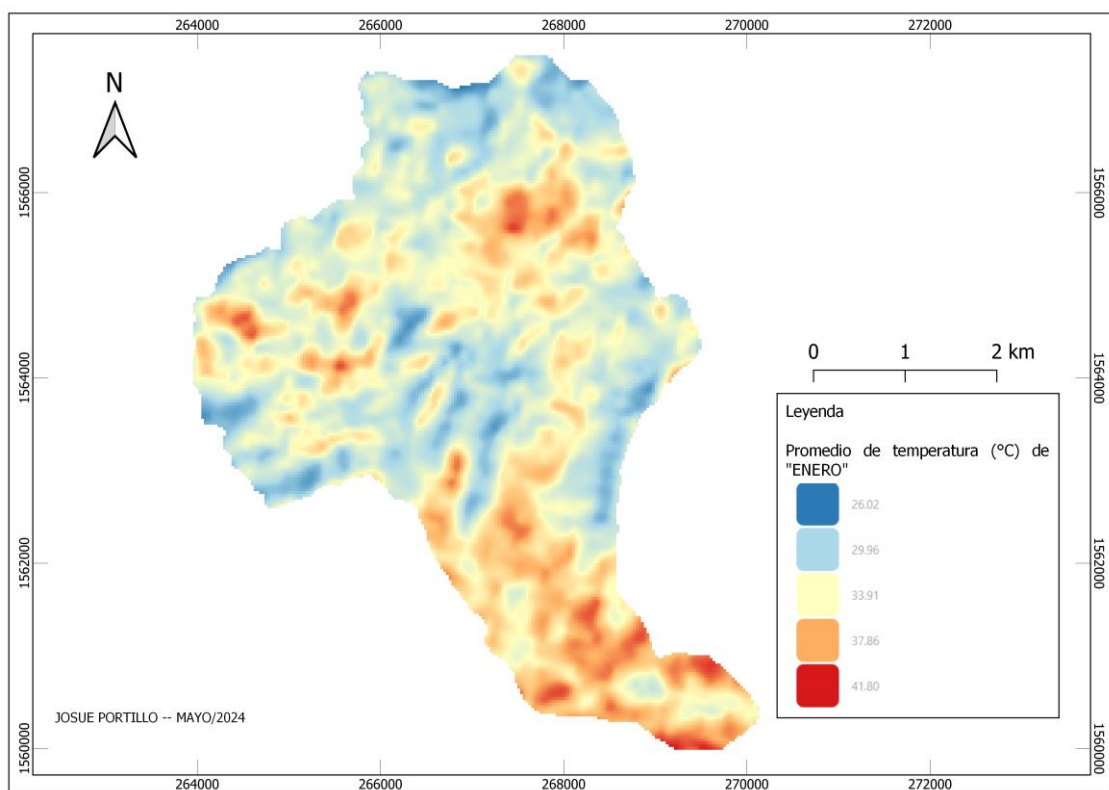
*Tabla 1 ANEXO N°2. Descripción de los tipos de suelo encontrados en la Subcuenca del Río Amayo.*

<b>Clasificación</b>	<b>Suelo</b>	<b>Fisio</b>
2358 II-Chlf	Los primeros poseen una capa superficial de ceniza volcánica, fina, pomicítica, de textura franca, de color café grisáceo claro y consistencia friable. Debajo de esta capa y aproximadamente a 40 cm, se encuentran abruptamente las arcillas acromáticas, negras, muy plásticas y pegajosas; más abajo se encuentran tobas duras impermeables	Se encuentra en áreas planas y onduladas, parcialmente diseccionadas por quebradas que forman la red de drenaje. Las pendientes oscilan de 0 a 6%. Las capas inferiores están constituidas por arcillas acromáticas, antiguos aluviones pedregosos y tobas duras a poca profundidad.
2358 II-Sid	Son suelos muy pedregosos y de poca profundidad sobre roca dura. Se encuentran muchos afloramientos de roca. Los suelos superficiales son francos y franco arcillosos, pedregosos, de color café oscuro. Generalmente no hay subsuelos, pero cuando existen, son de poco espesor y de texturas francosas a franco arcillosas, muy pedregosas y de color café amarillento a café rojizo, más abajo se encuentra la roca dura poco intemperizada. Son suelos de muy poca fertilidad y de utilidad limitada.	Se encuentra en montañas de relieve alto, bastante diseccionadas por quebradas. Las elevaciones varían de 300 a 700 mt sobre el nivel del mar. Las pendientes varían desde 30 a 70% y más, predominando las mayores de 40%. Las capas inferiores están formadas por lavas duras, oscuras, fracturadas y plegadas, principalmente andesíticas y basálticas.
2358 II-Tja	Son suelos superficiales, la capa superior de 5-10 cm es de textura franca a franco arenosa, pedregosa, de color café grisáceo de claro a oscuro; esta descansa sobre una capa inferior o roca madre formada por lavas claras, felsíticas poco intemperizadas. En menor proporción aparecen	Comprenden áreas fuertemente diseccionadas y muy accidentadas de relieve alto. Las pendientes predominantes son mayores de 50%. Las capas inferiores están constituidas de lavas claras, félsicas, plegadas y fracturadas; dentro de las cuales se encuentran a veces estratos de tobas claras.

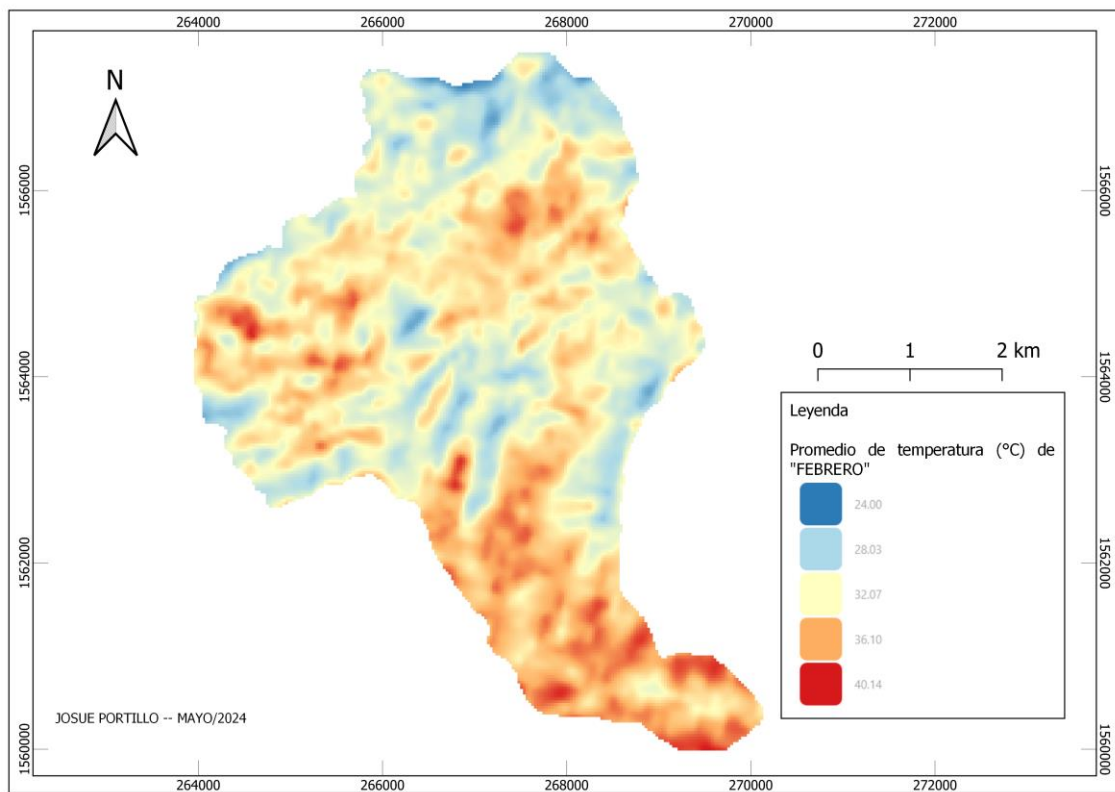
	tobas y lavas oscuras de origen basáltico. Hay pocos afloramientos de piedras. La utilidad es muy limitada y poseen baja fertilidad.	
2358 II-Chla	Actualmente enterrados por capas aluviales delgadas de ceniza volcánica. Tienen capas superficiales de 10 a 40 cm de espesor, de textura franca a franca ligeramente arenosa, de color café grisáceo oscuro, cambiando a más claro con la profundidad. Se encuentran abruptamente debajo de éstas las arcillas acromáticas muy negras, plásticas y muy pegajosas que son típicas de los Grumosoles. A profundidades de más de un metro se encuentran tobas duras. Son suelos difíciles de manejar y de productividad moderada.	Se encuentra en planicies casi a nivel, sin relieve; las pendientes en general son de 0 a 2%. Las capas inferiores son de arcillas acromáticas sobre tobas cementadas.
2358 II-Tjc	El suelo superficial de 10 a 20 cm de espesor es franco o franco arenoso fino, a veces pedregoso, de color café grisáceo claro a oscuro. El subsuelo está formado por lavas y rocas claras de origen felsítico que profundizan bastante. Aparecen algunas tobas y rocas basálticas que en ciertas partes afloran. La capacidad de producción es baja.	Está representada por partes de montañas de forma más o menos redondeada y de relieve moderado. Las pendientes varían generalmente de 10 a 20%, pero son más fuertes en las cercanías de las quebradas. Las capas inferiores están constituidas por lavas claras, felsíticas, plegadas y fracturadas, encontrándose a veces estratos de toba clara; en menor proporción se encuentran estratos de lavas oscuras.

### ANEXO N° 3: Mapas de temperatura obtenida a partir de imágenes satelitales Landsat 8 de la Subcuenca del Río Amayo.

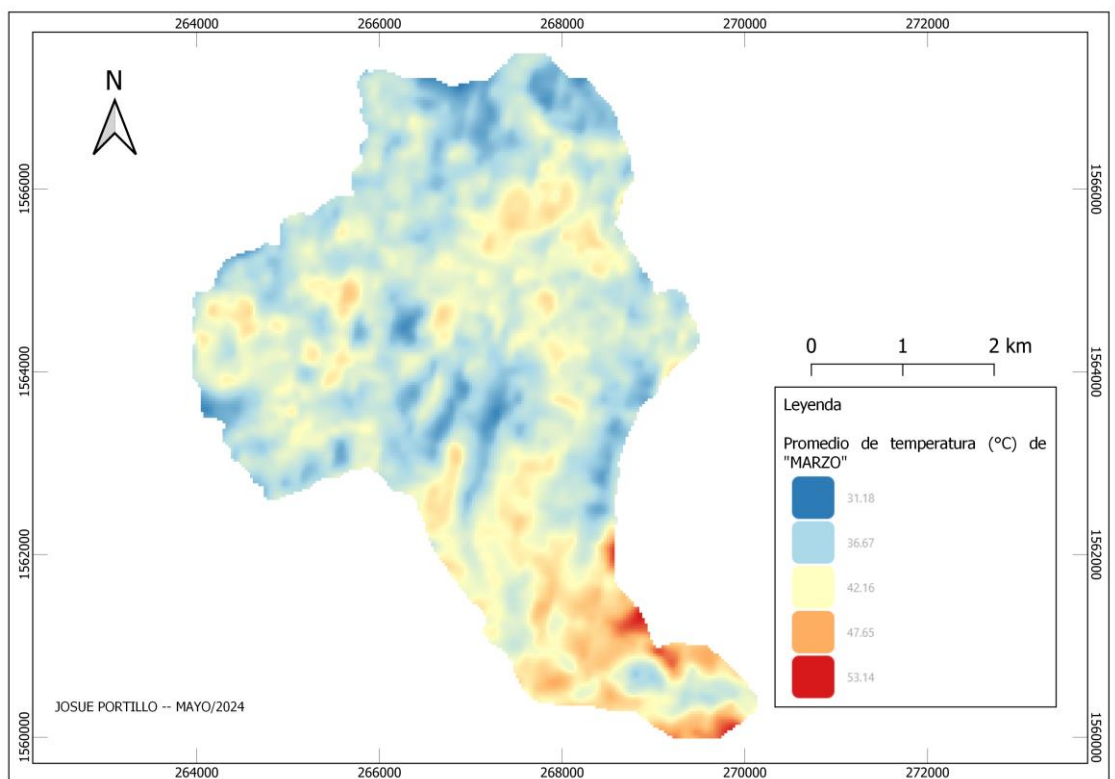
A continuación, se presenta una recopilación de los mapas mostrando los rasters de la distribución de temperatura obtenida utilizando imágenes Landsat 8 con un nivel de producto L2C2 (esto corresponde a datos crudos, sin correcciones) descargadas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS) para el área de la Subcuenca del Río Amayo. Se muestra un mapa por cada mes, en total son 12 meses del año 2021.



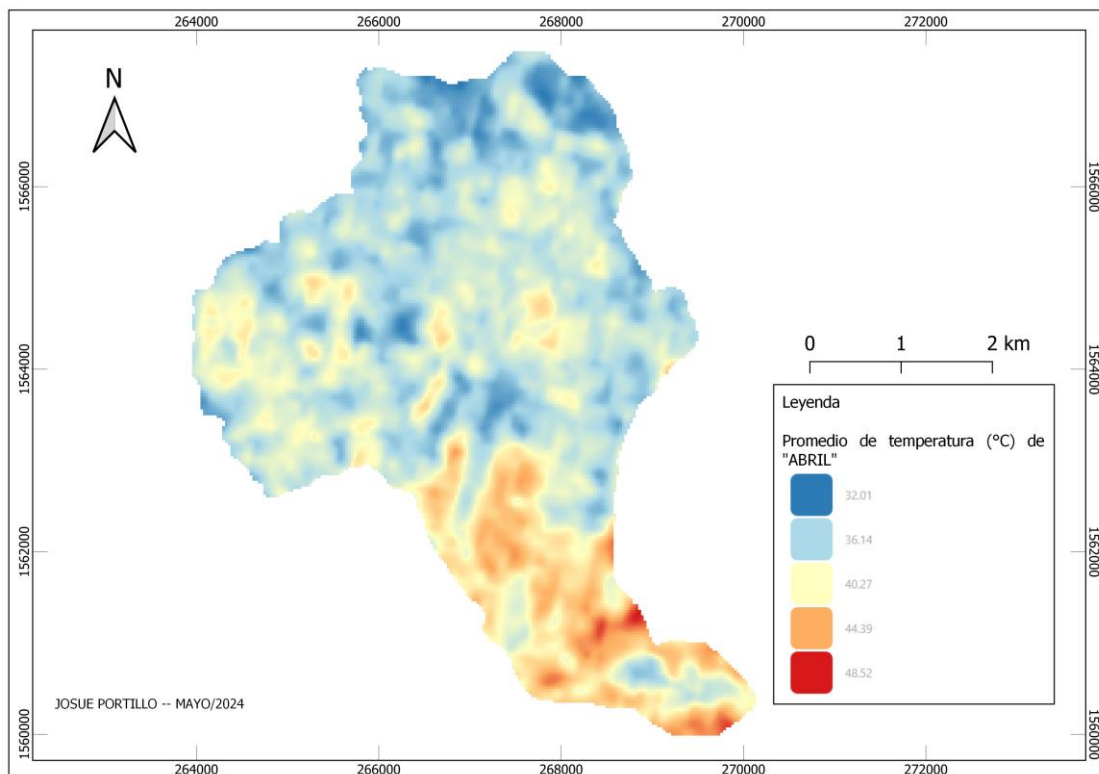
*Figura 1 ANEXO N°3. Temperaturas promedio del mes de Enero.*



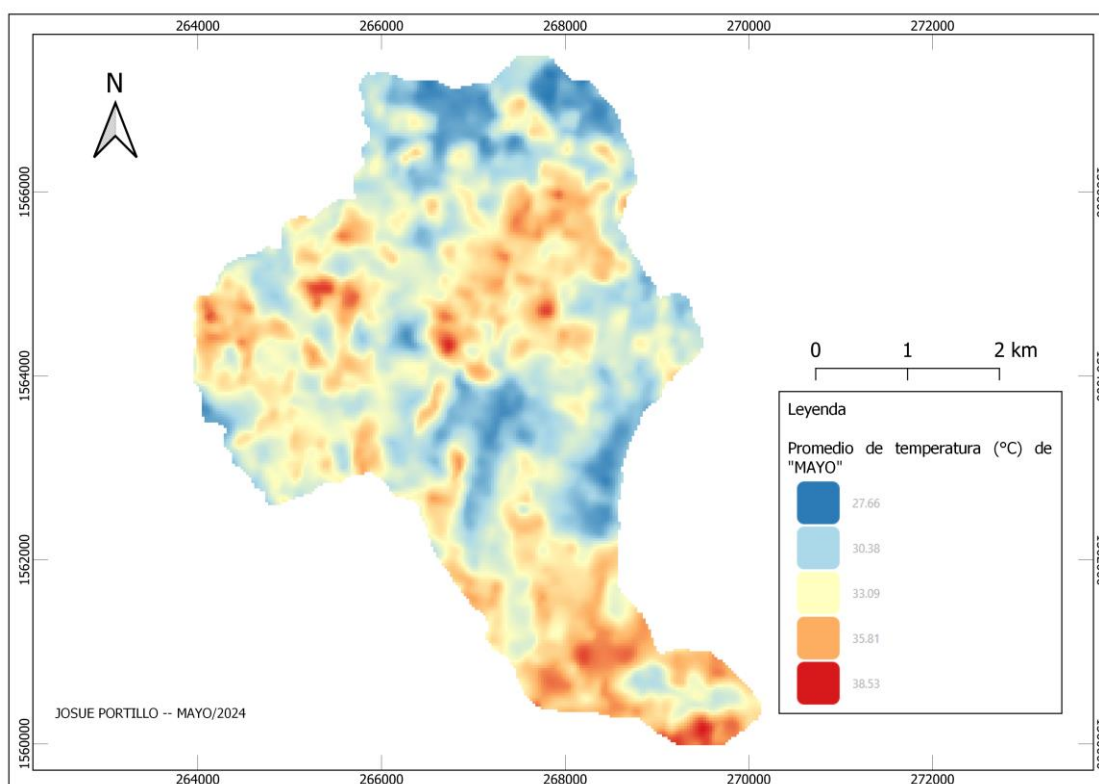
*Figura 2 ANEXO N°3. Temperaturas promedio del mes de Febrero.*



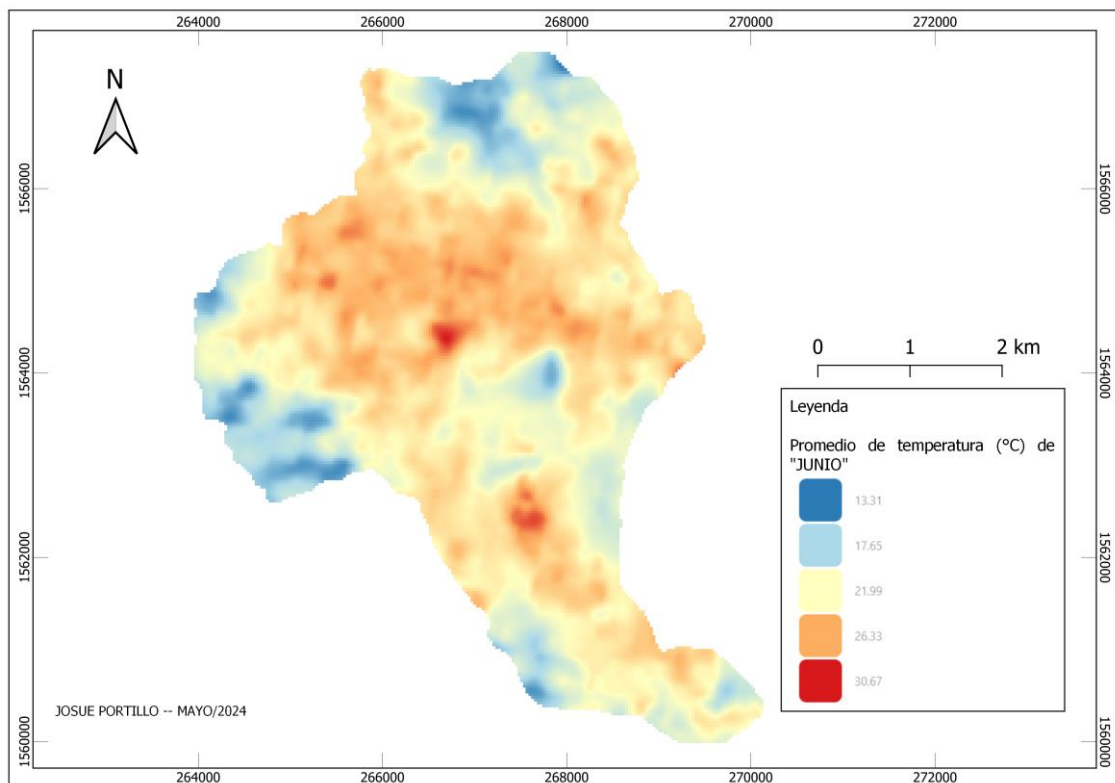
*Figura 3 ANEXO N°3. Temperaturas promedio del mes de Marzo.*



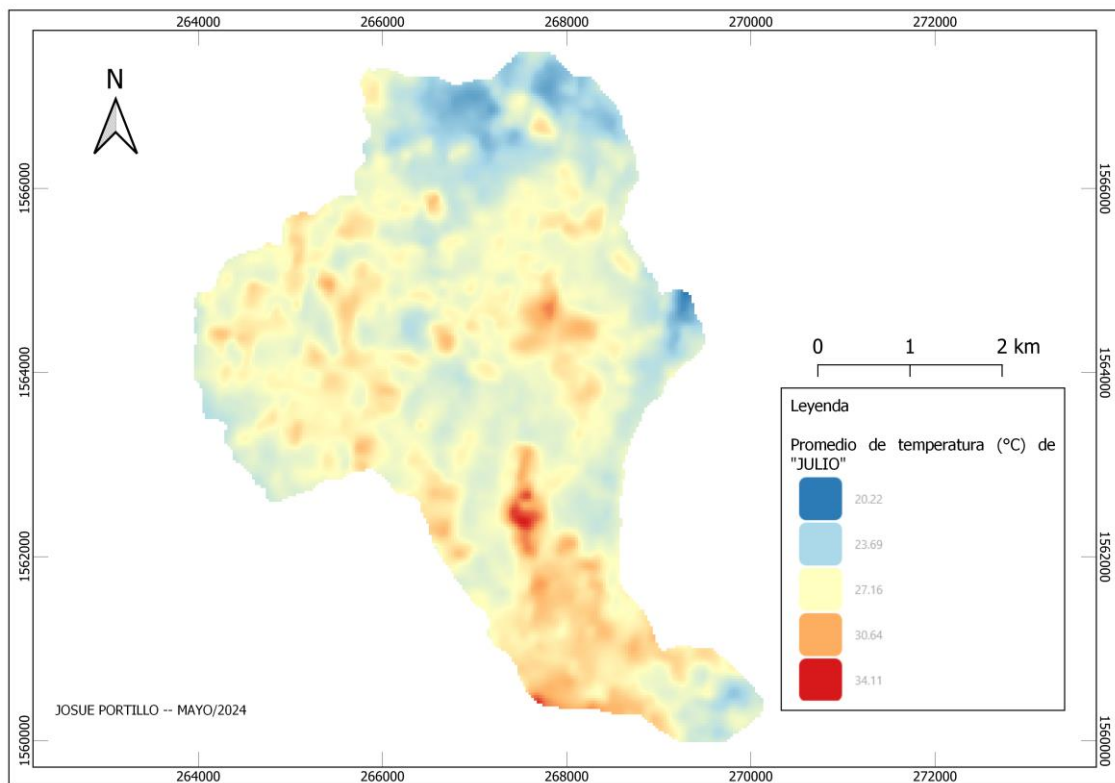
**Figura 4 ANEXO N°3. Temperaturas promedio del mes de Abril.**



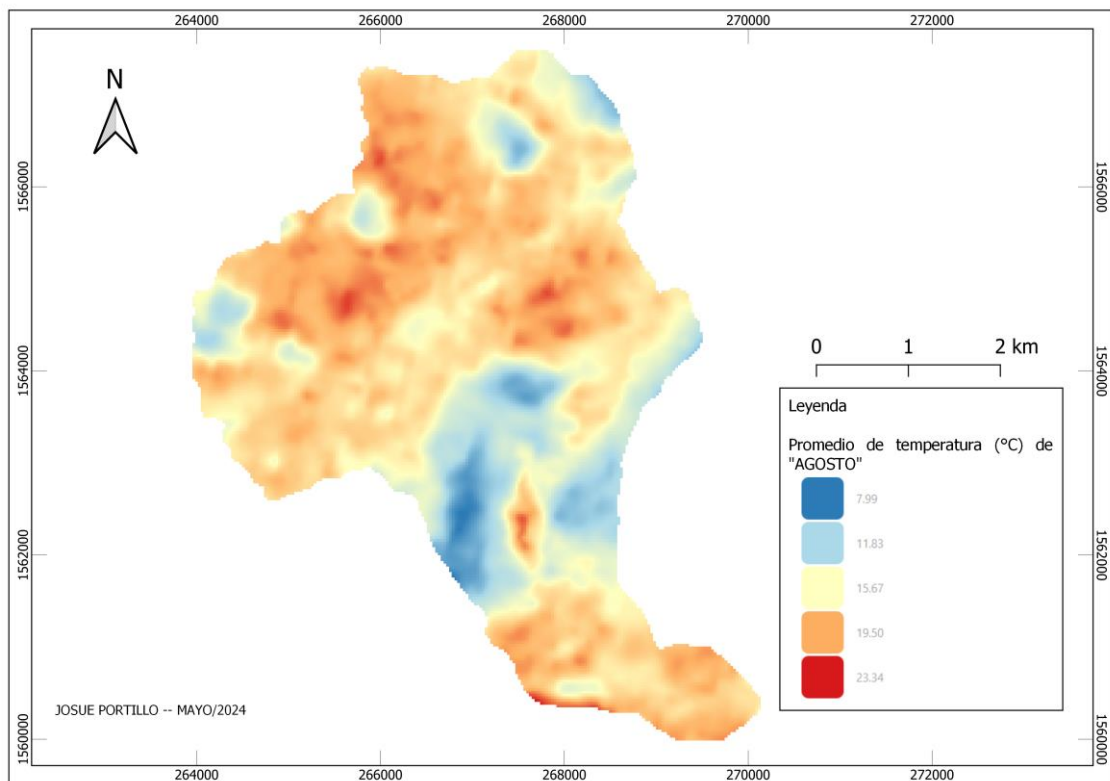
**Figura 5 ANEXO N°3. Temperaturas promedio del mes de Mayo.**



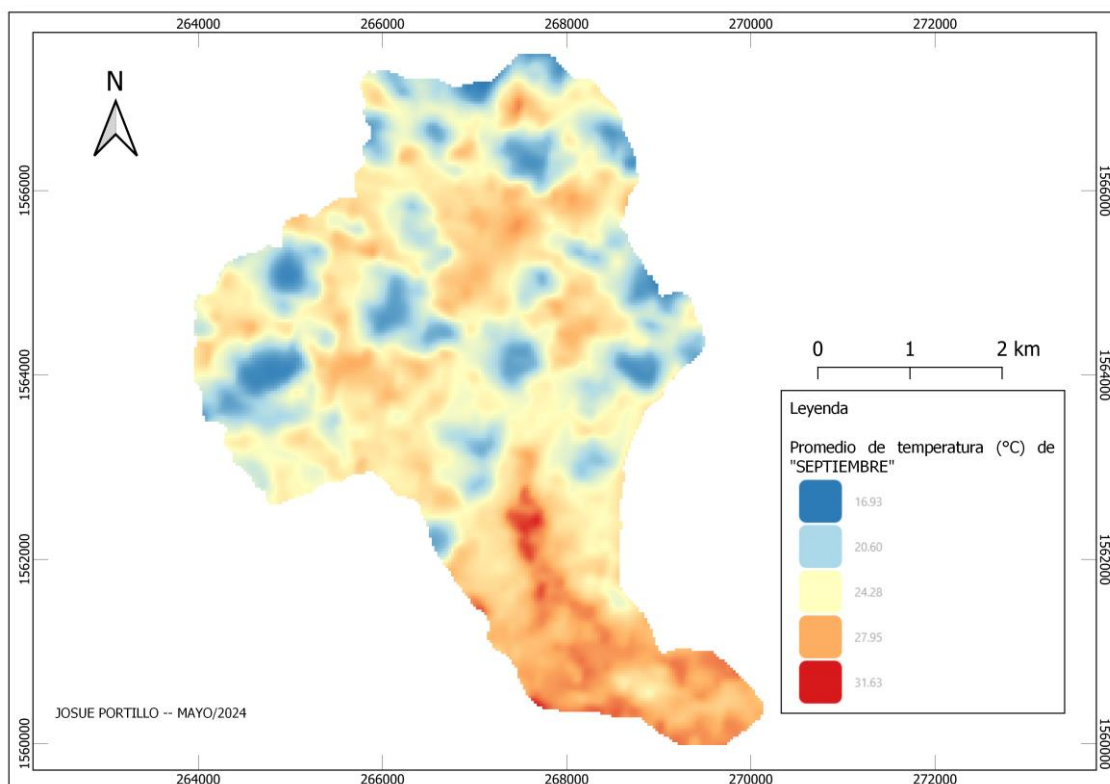
**Figura 6 ANEXO N°3. Temperaturas promedio del mes de Junio.**



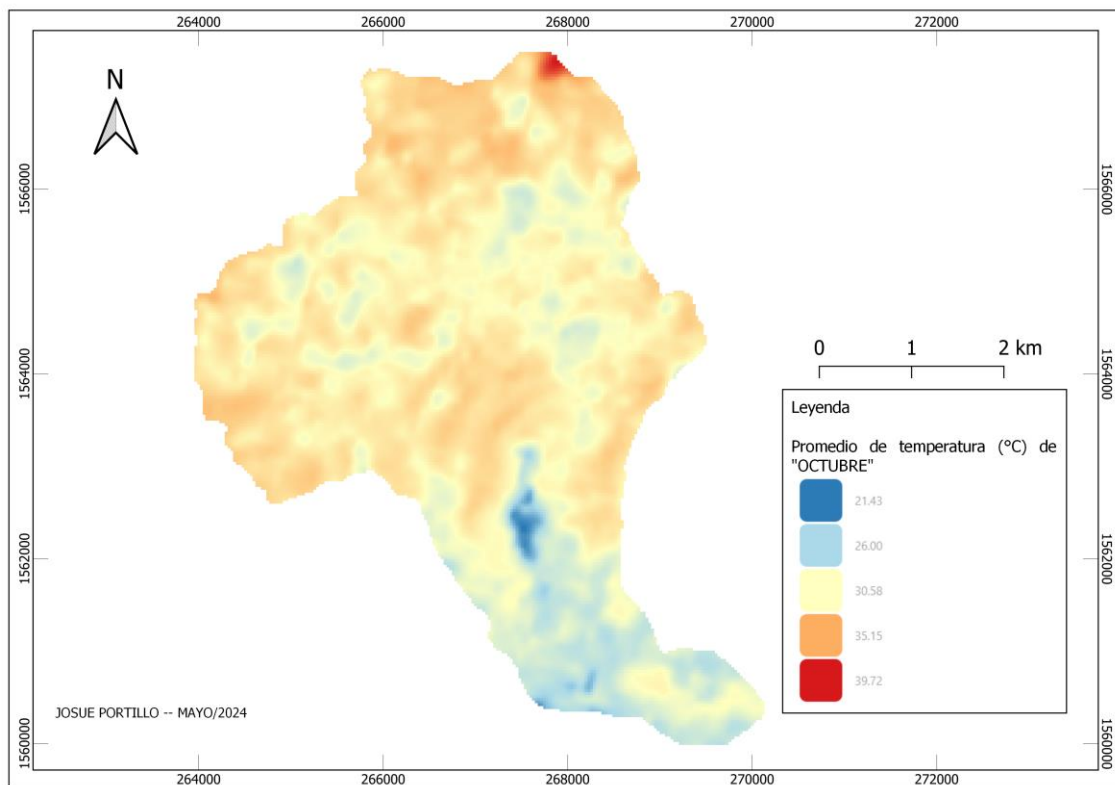
**Figura 7 ANEXO N°3. Temperaturas promedio del mes de Julio.**



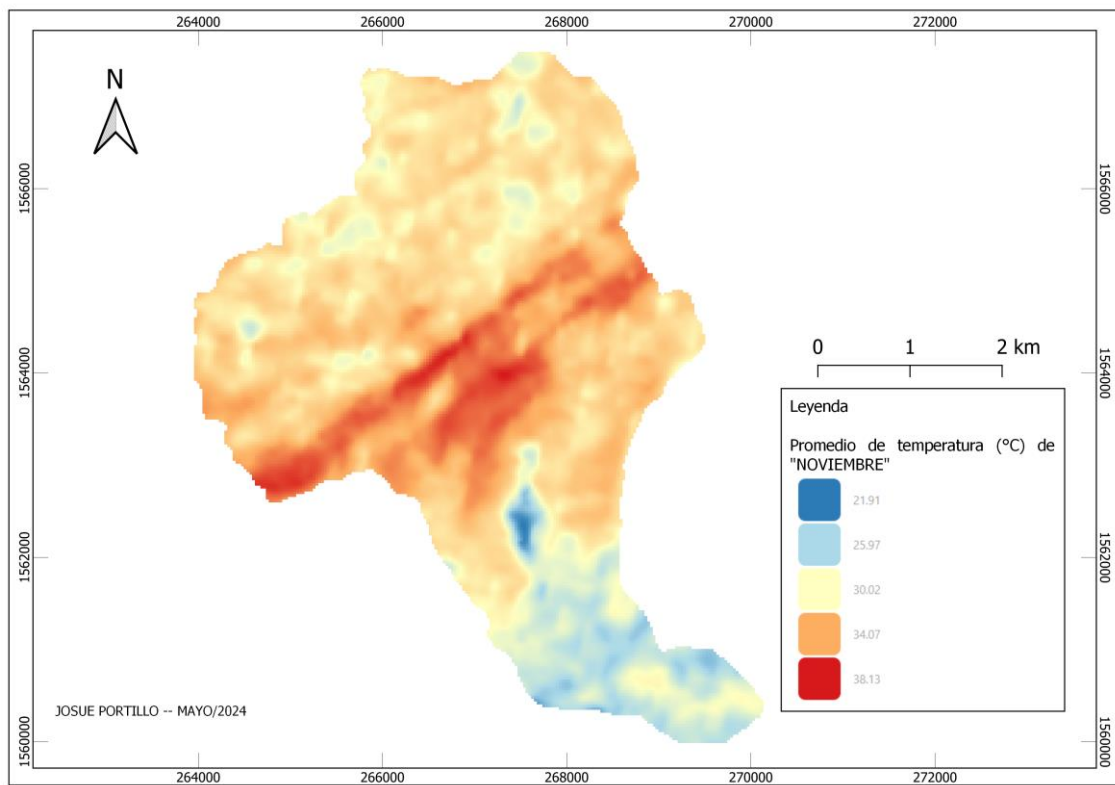
*Figura 8 ANEXO N°3. Temperaturas promedio del mes de Agosto.*



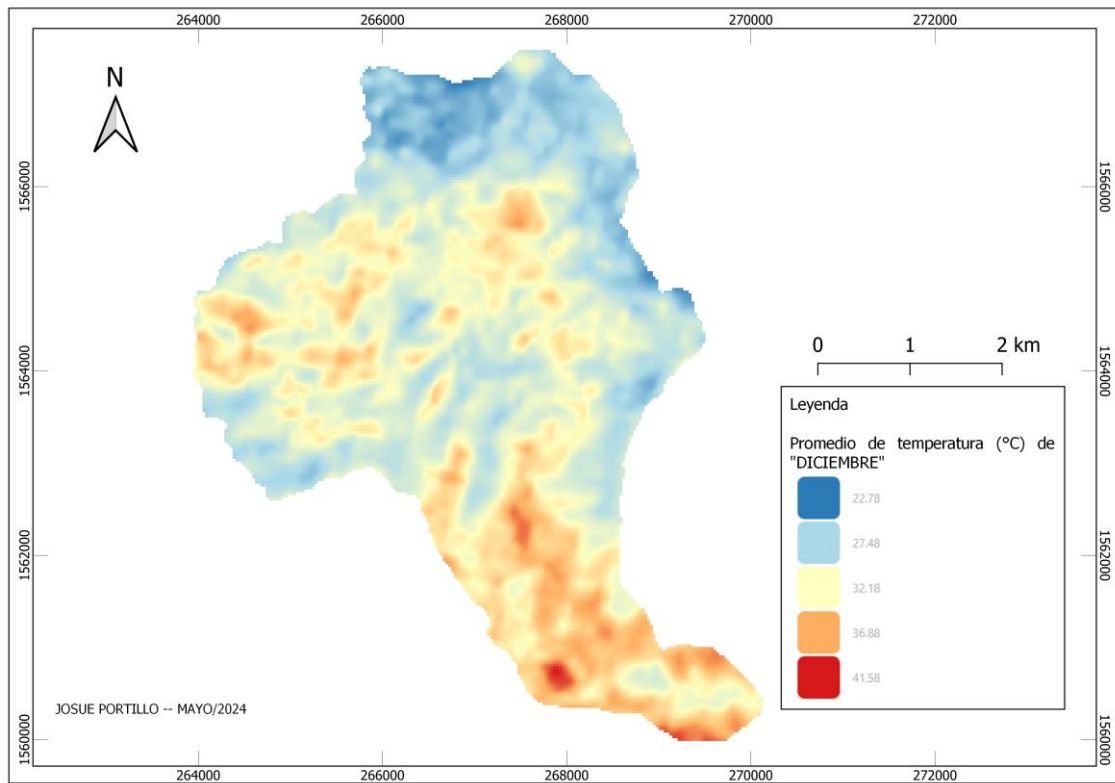
*Figura 9 ANEXO N°3. Temperaturas promedio del mes de Septiembre.*



**Figura 10 ANEXO N°3. Temperaturas promedio del mes de Octubre.**



**Figura 11 ANEXO N°3. Temperaturas promedio del mes de Noviembre.**



**Figura 12 ANEXO N°3. Temperaturas promedio del mes de Diciembre.**

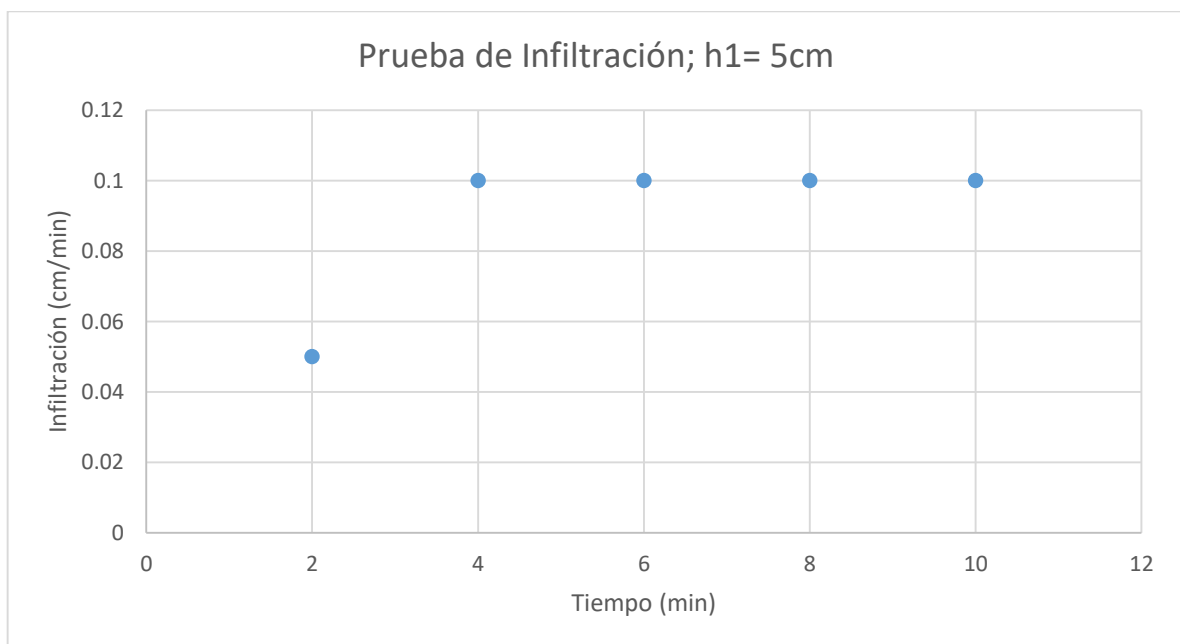
**ANEXO N° 4: Datos de campo de pruebas de Infiltración realizadas en la Subcuenca del Río Amayo.**

**PUNTO 1:** Prueba de infiltración realizada con permeámetro de Guelph en Colonia Guadalupe, Municipio de Tejutla.

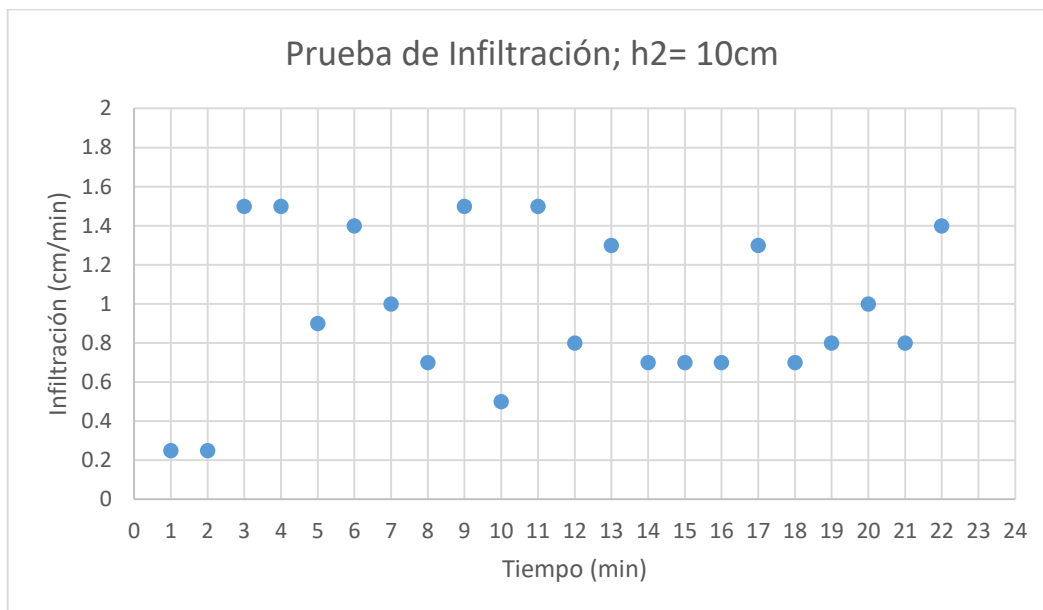
Fecha: 25-07-2021

Coordenadas: 14° 6'21.19"N; 89° 8'6.59"W.

<b>Carga h1= 5cm</b>				
<b>Tiempo (min)</b>	<b><math>\Delta t</math> (min)</b>	<b>h (cm)</b>	<b><math>\Delta h</math> (cm)</b>	<b><math>\Delta h/\Delta t</math> (cm/min)</b>
0	0	7.9	--	--
2	2	8	0.1	0.05
4	2	8.2	0.2	0.1
6	2	8.4	0.2	0.1
8	2	8.6	0.2	0.1
10	2	8.8	0.2	0.1



Carga h2= 10cm				
Tiempo (min)	$\Delta t$ (min)	h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta h/\Delta t$ (cm/min)
0	0	52	--	--
1	1	52.25	0.25	0.25
2	1	52.5	0.25	0.25
3	1	54	1.5	1.5
4	1	55.5	1.5	1.5
5	1	56.4	0.9	0.9
6	1	57.8	1.4	1.4
7	1	58.8	1	1
8	1	59.5	0.7	0.7
9	1	61	1.5	1.5
10	1	61.5	0.5	0.5
11	1	63	1.5	1.5
12	1	63.8	0.8	0.8
13	1	65.1	1.3	1.3
14	1	65.8	0.7	0.7
15	1	66.5	0.7	0.7
16	1	67.2	0.7	0.7
17	1	68.5	1.3	1.3
18	1	69.2	0.7	0.7
19	1	70	0.8	0.8
20	1	71	1	1
21	1	71.8	0.8	0.8
22	1	73.2	1.4	1.4

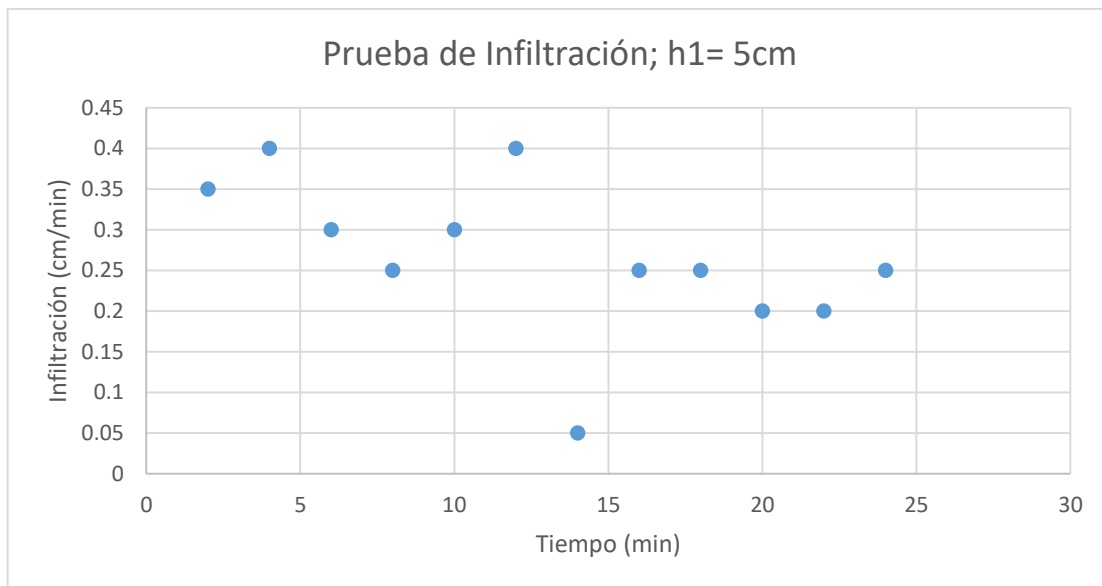


**PUNTO 2:** Prueba de infiltración realizada con permeámetro de Guelph en Colonia Aguaje Escondido, Municipio de Tejutla.

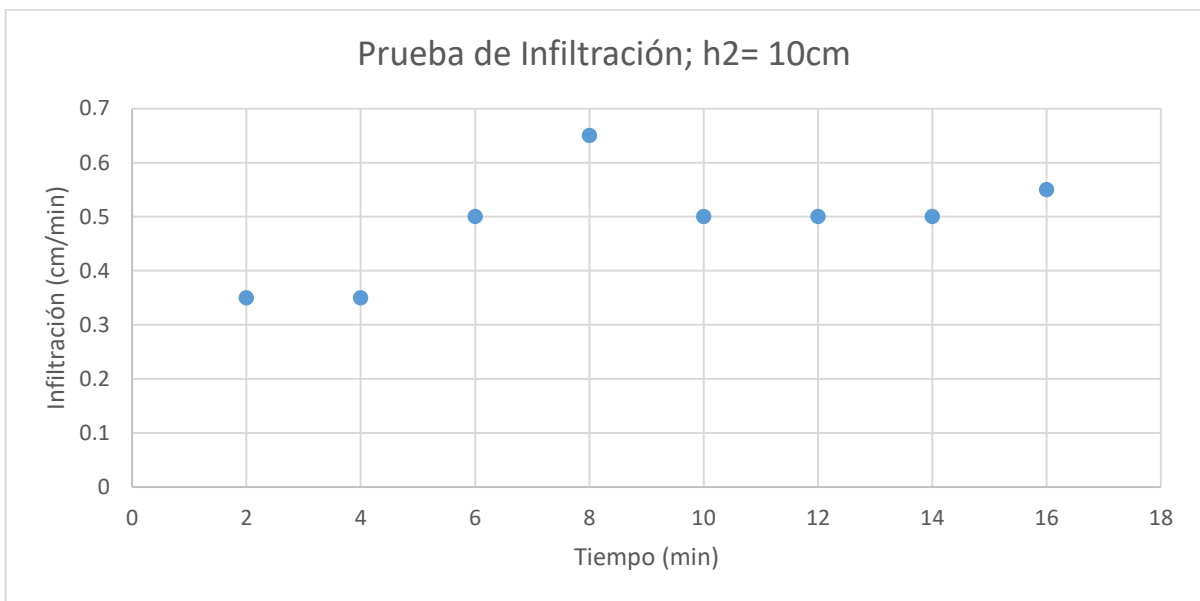
Fecha: 08-08-2021

Coordenadas: 14° 6'53.13"N; 89° 9'1.65"W.

<b>Carga h1= 5cm</b>				
<b>Tiempo (min)</b>	<b><math>\Delta t</math> (min)</b>	<b>h (cm)</b>	<b><math>\Delta h</math> (cm)</b>	<b><math>\Delta h/\Delta t</math> (cm/min)</b>
0	0	17.5	--	--
2	2	18.2	0.7	0.35
4	2	19	0.8	0.4
6	2	19.6	0.6	0.3
8	2	20.1	0.5	0.25
10	2	20.7	0.6	0.3
12	2	21.5	0.8	0.4
14	2	21.6	0.1	0.05
16	2	22.1	0.5	0.25
18	2	22.6	0.5	0.25
20	2	23	0.4	0.2
22	2	23.4	0.4	0.2
24	2	23.9	0.5	0.25



<b>Carga h2= 10cm</b>				
<b>Tiempo (min)</b>	<b><math>\Delta t</math> (min)</b>	<b>h (cm)</b>	<b><math>\Delta h</math> (cm)</b>	<b><math>\Delta h/\Delta t</math> (cm/min)</b>
0	0	27.4	--	--
2	2	28.1	0.7	0.35
4	2	28.8	0.7	0.35
6	2	29.8	1	0.5
8	2	31.1	1.3	0.65
10	2	32.1	1	0.5
12	2	33.1	1	0.5
14	2	34.1	1	0.5
16	2	35.2	1.1	0.55

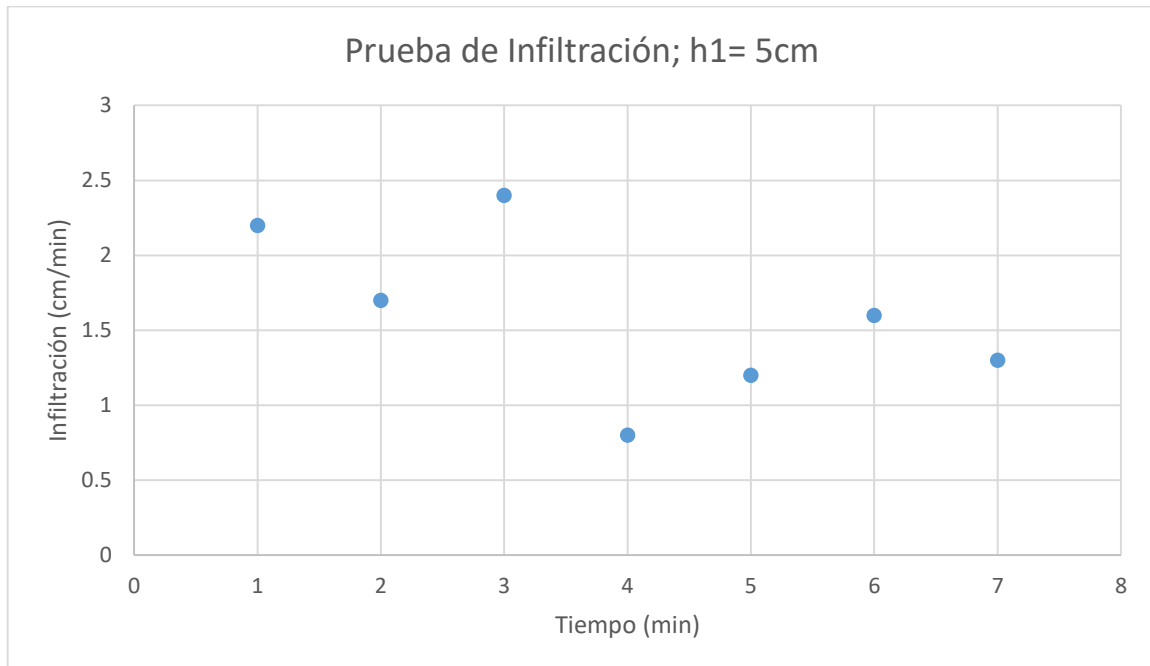


**PUNTO 3:** Prueba de infiltración realizada con permeámetro de Guelph en Cantón Las Peñas, Municipio de La Reina.

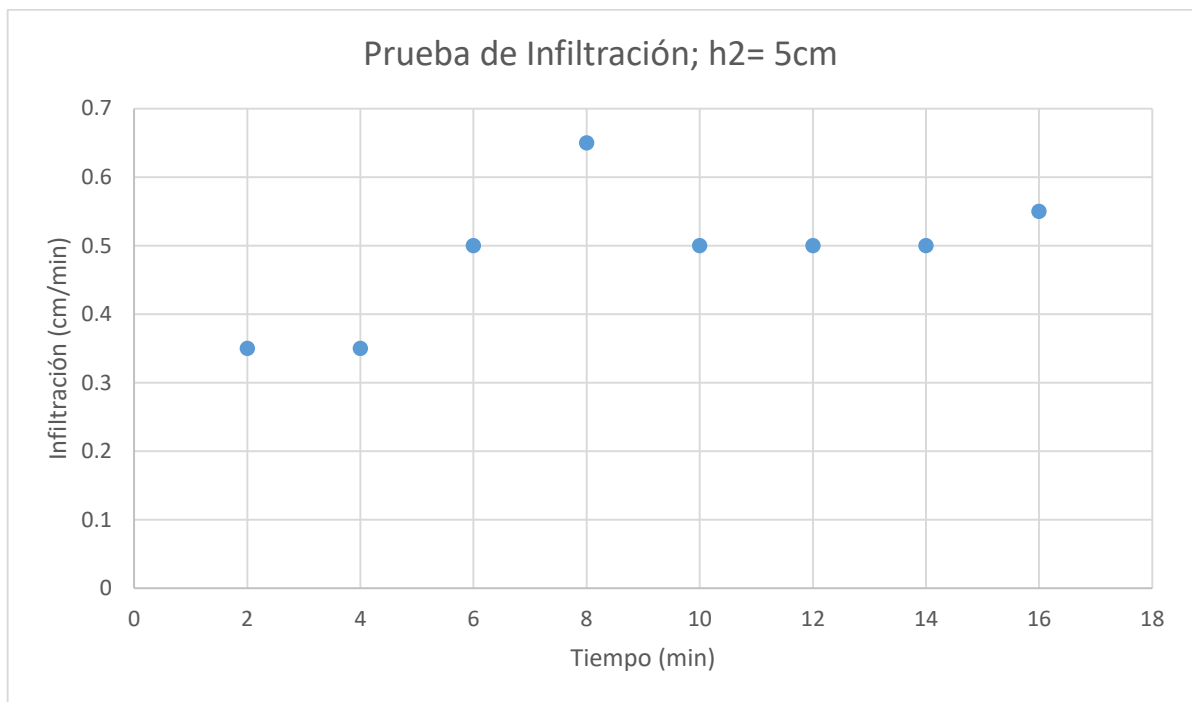
Fecha: 01-08-2021

Coordenadas: 14° 8'59.09"N; 89° 8'56.14"W.

Carga h1= 5cm				
Tiempo (min)	$\Delta t$ (min)	h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta h/\Delta t$ (cm/min)
0	0	12.5	--	--
1	1	14.7	2.2	2.2
2	1	16.4	1.7	1.7
3	1	18.8	2.4	2.4
4	1	19.6	0.8	0.8
5	1	20.8	1.2	1.2
6	1	22.4	1.6	1.6
7	1	23.7	1.3	1.3



Carga h2= 10cm				
Tiempo (min)	$\Delta t$ (min)	h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta h/\Delta t$ (cm/min)
0	0	27.4	--	--
2	2	28.1	0.7	0.35
4	2	28.8	0.7	0.35
6	2	29.8	1	0.5
8	2	31.1	1.3	0.65
10	2	32.1	1	0.5
12	2	33.1	1	0.5
14	2	34.1	1	0.5
16	2	35.2	1.1	0.55

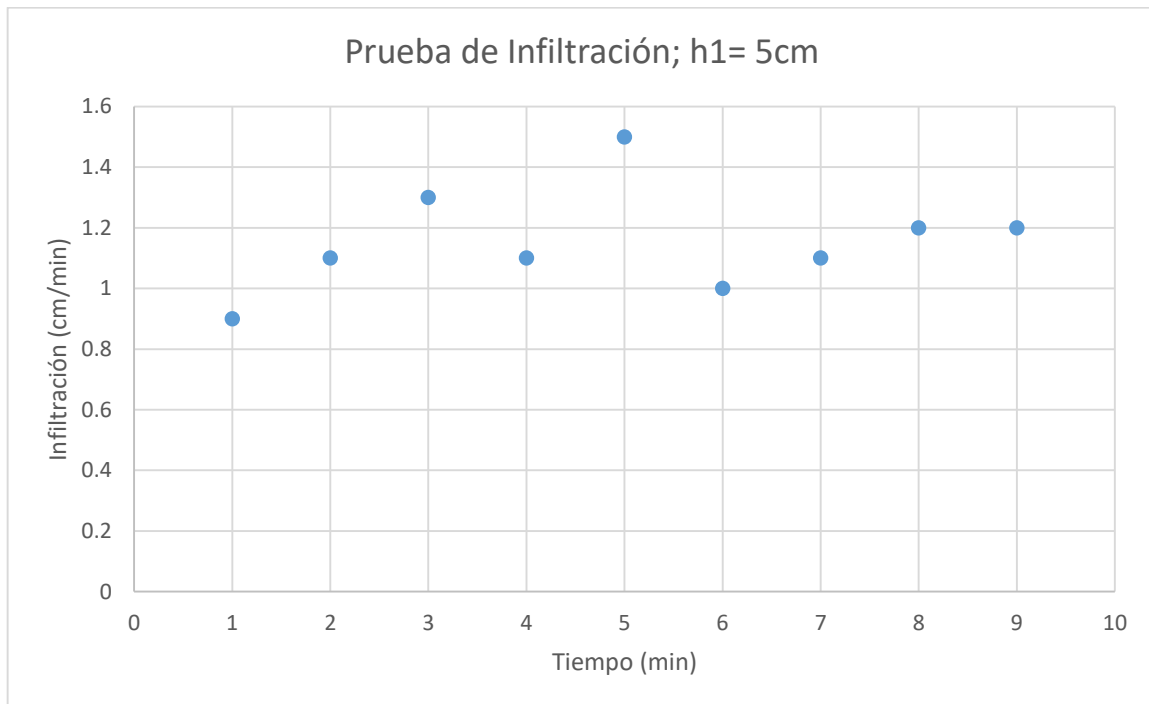


**PUNTO 4:** Prueba de infiltración realizada con permeámetro de Guelph en Cantón Las Peñas, Municipio de La Reina, junto a cancha de fútbol.

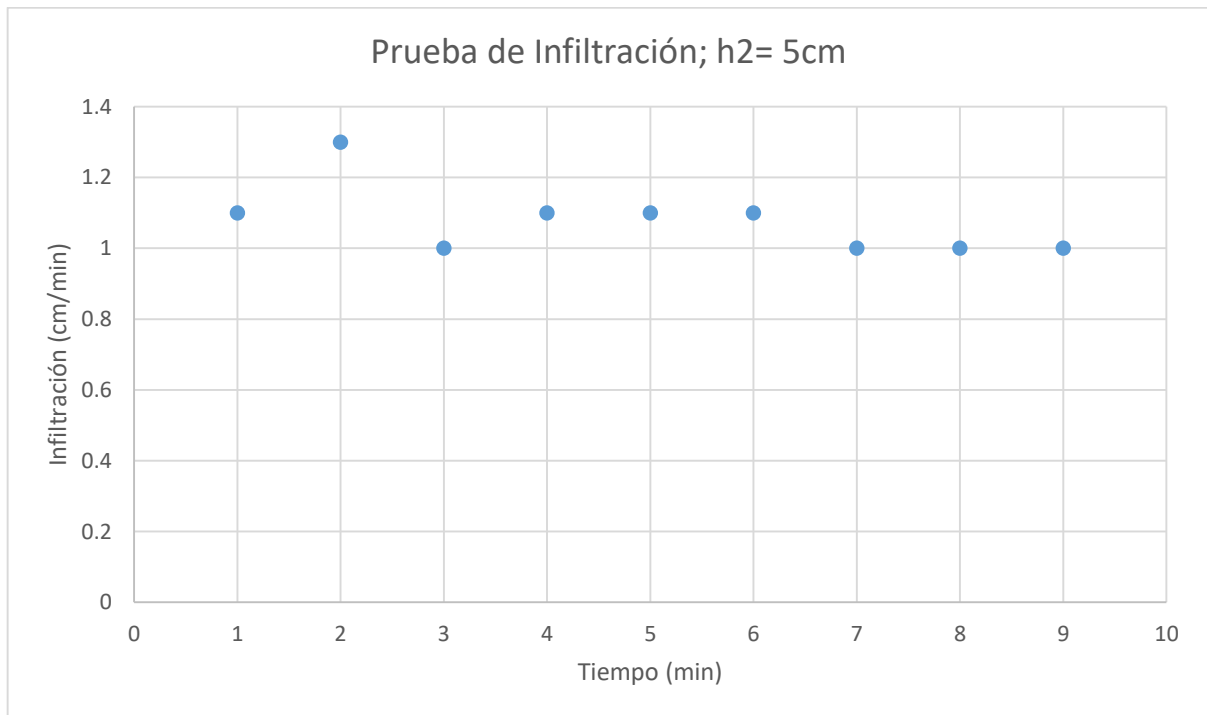
Fecha: 01-08-2021

Coordenadas: 14° 9'2.78"N; 89° 9'20.77"W.

Carga h1= 5cm				
Tiempo (min)	$\Delta t$ (min)	h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta h/\Delta t$ (cm/min)
0	0	8.1	--	--
1	1	9	0.9	0.9
2	1	10.1	1.1	1.1
3	1	11.4	1.3	1.3
4	1	12.5	1.1	1.1
5	1	14	1.5	1.5
6	1	15	1	1
7	1	16.1	1.1	1.1
8	1	17.3	1.2	1.2
9	1	18.5	1.2	1.2



Carga h2= 10cm				
Tiempo (min)	$\Delta t$ (min)	h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta h/\Delta t$ (cm/min)
0	0	22	--	--
1	1	23.1	1.1	1.1
2	1	24.4	1.3	1.3
3	1	25.4	1	1
4	1	26.5	1.1	1.1
5	1	27.6	1.1	1.1
6	1	28.7	1.1	1.1
7	1	29.7	1	1
8	1	30.7	1	1
9	1	31.7	1	1

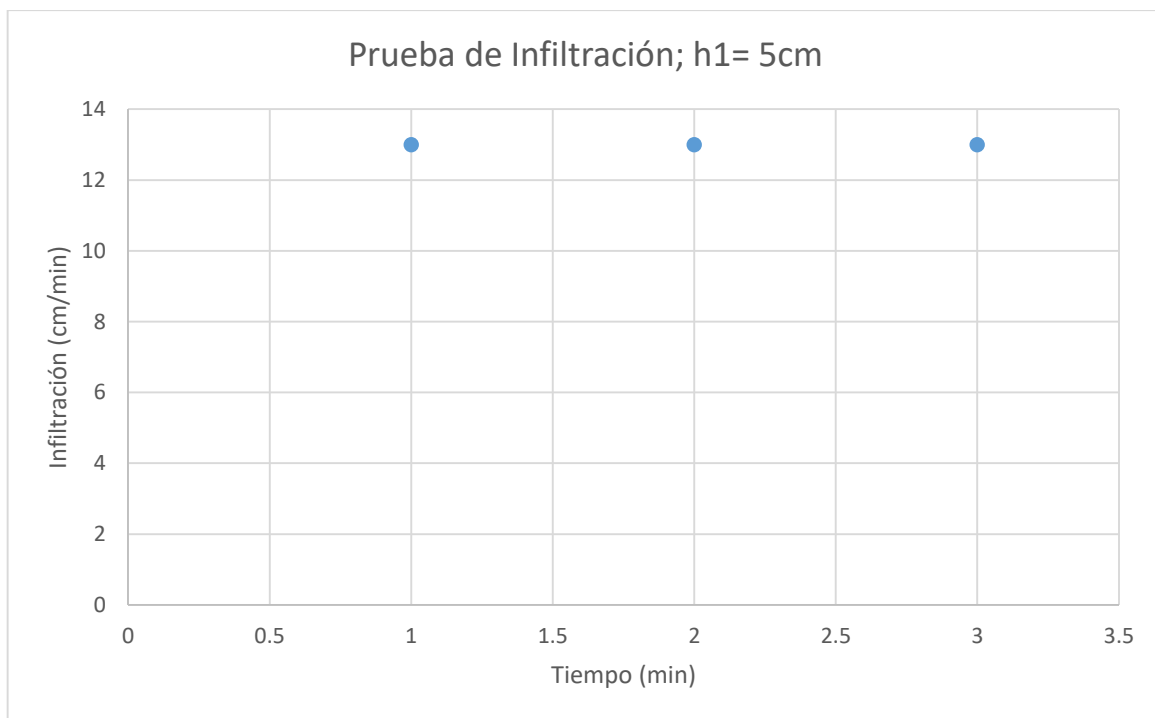


**PUNTO 5:** Prueba de infiltración realizada con permeámetro de Guelph en Las Isletas, Cantón Las Peñas, Municipio de La Reina.

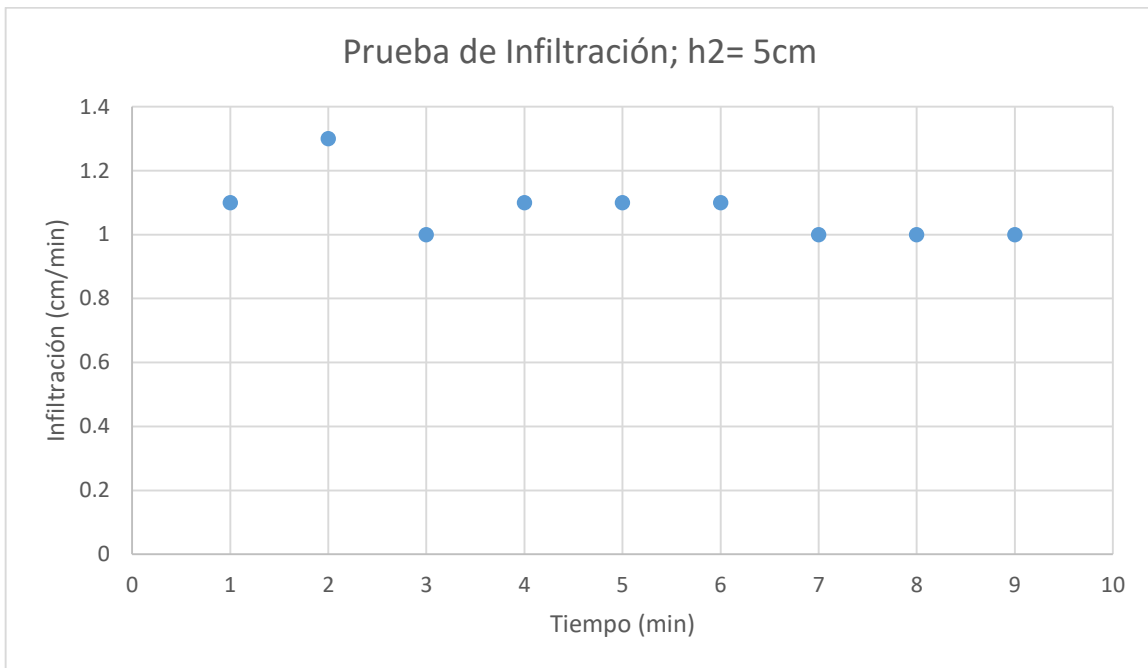
Fecha: 01-08-2021

Coordenadas: 14° 8'55.97"N; 89°10'6.07"W.

<b>Carga h1= 5cm</b>				
<b>Tiempo (min)</b>	<b><math>\Delta t</math> (min)</b>	<b>h (cm)</b>	<b><math>\Delta h</math> (cm)</b>	<b><math>\Delta h/\Delta t</math> (cm/min)</b>
0	0	26	--	--
1	1	39	13	13
2	1	52	13	13
3	1	65	13	13



Carga h2= 10cm				
Tiempo (min)	$\Delta t$ (min)	h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta h/\Delta t$ (cm/min)
0	0	22	--	--
1	1	23.1	1.1	1.1
2	1	24.4	1.3	1.3
3	1	25.4	1	1
4	1	26.5	1.1	1.1
5	1	27.6	1.1	1.1
6	1	28.7	1.1	1.1
7	1	29.7	1	1
8	1	30.7	1	1
9	1	31.7	1	1

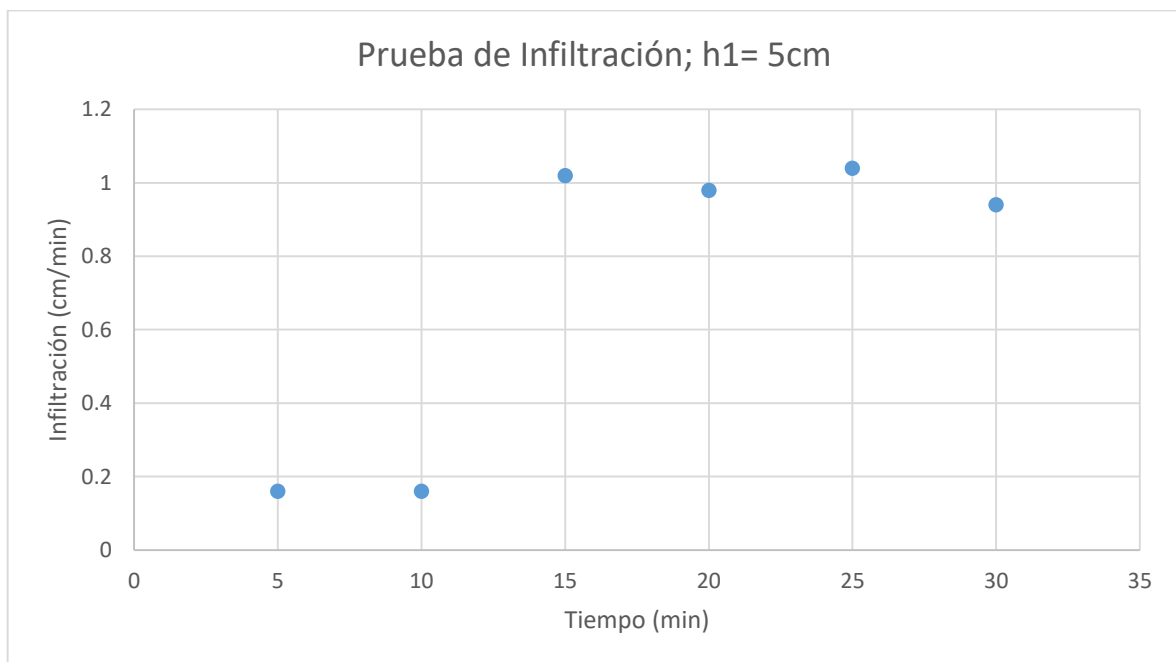


**PUNTO 6:** Prueba de infiltración realizada con permeámetro de Guelph en Aguacayo, Cantón El Tigre, Municipio de La Reina.

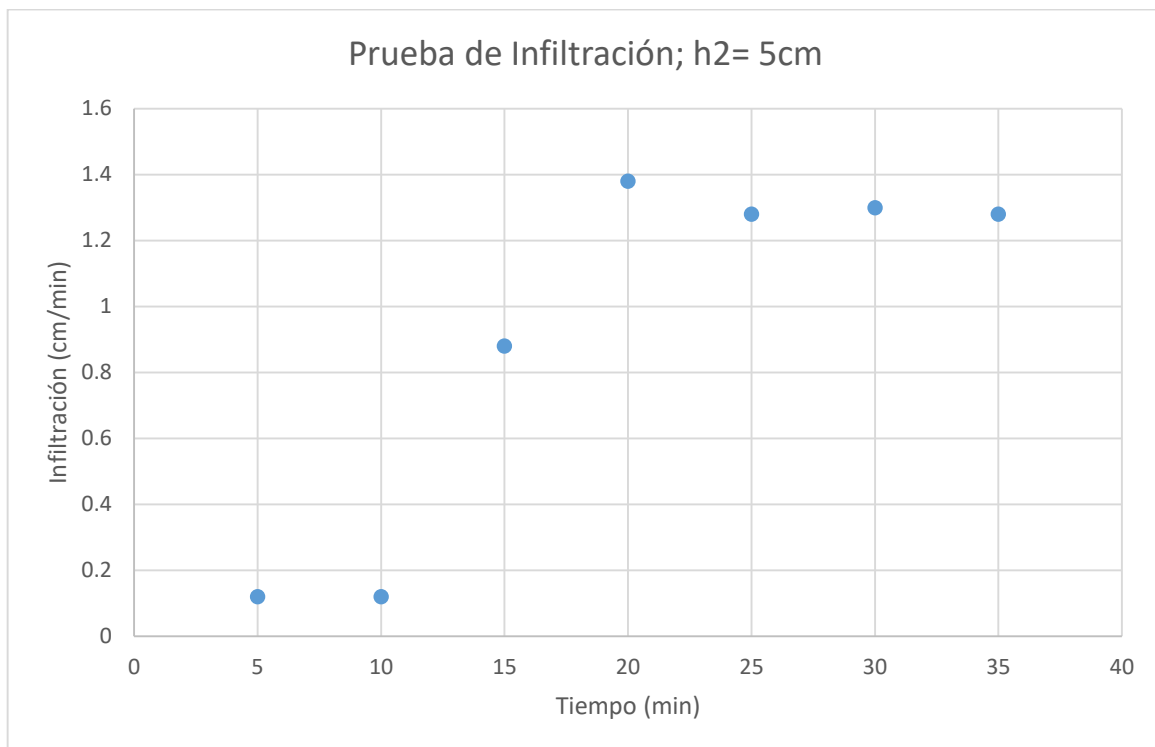
Fecha: 08-08-2021

Coordenadas: 14° 9'17.02"N; 89°10'2.73"W.

Carga h1= 5cm				
Tiempo (min)	$\Delta t$ (min)	h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta h/\Delta t$ (cm/min)
0	0	7.3	--	--
5	5	8.1	0.8	0.16
10	5	8.9	0.8	0.16
15	5	14	5.1	1.02
20	5	18.9	4.9	0.98
25	5	24.1	5.2	1.04
30	5	28.8	4.7	0.94



<b>Carga h2= 10cm</b>				
<b>Tiempo (min)</b>	<b><math>\Delta t</math> (min)</b>	<b>h (cm)</b>	<b><math>\Delta h</math> (cm)</b>	<b><math>\Delta h/\Delta t</math> (cm/min)</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>12.1</b>	<b>--</b>	<b>--</b>
<b>5</b>	<b>5</b>	<b>12.7</b>	<b>0.6</b>	<b>0.12</b>
<b>10</b>	<b>5</b>	<b>13.3</b>	<b>0.6</b>	<b>0.12</b>
<b>15</b>	<b>5</b>	<b>17.7</b>	<b>4.4</b>	<b>0.88</b>
<b>20</b>	<b>5</b>	<b>24.6</b>	<b>6.9</b>	<b>1.38</b>
<b>25</b>	<b>5</b>	<b>31</b>	<b>6.4</b>	<b>1.28</b>
<b>30</b>	<b>5</b>	<b>37.5</b>	<b>6.5</b>	<b>1.3</b>
<b>35</b>	<b>5</b>	<b>43.9</b>	<b>6.4</b>	<b>1.28</b>



**ANEXO N° 5: Registro de nivel freático medido en pozos estudiados.**

A continuación, se presenta una tabla conteniendo las medidas de nivel freático realizadas en los pozos estudiados en la subcuenca del Río Amayo durante la presente investigación.

**Tabla 1 ANEXO N° 5. Nivel freático registrado en los pozos de estudio de la subcuenca del Río Amayo medidos de abril a junio durante el año 2021.**

Meses	Abril			Mayo				Junio			
Días	18	23	30	7	14	21	28	4	11	18	25
PO-1	431.25	431.5	431.3	429.7	429.9	430.6	431.32	431.98	437.8	437.74	437.75
PO-2	442.7	442.87	442.75	442.55	442.9	442.45	442.39	442.39	442.36	442.78	443.28
PO-3	366.25	366.5	366.57	366.62	366.71	366.48	366.39	367.55	367.65	367.946	368.08
PO-4	338.35	338.88	338.49	338.83	338.64	338.57	338.5	338.39	338.85	338.85	339.16
PO-5	360.48	360.51	360.5	360.46	360.45	360.41	360.47	360.5	360.54	361.05	361.38
PO-6	334.7	334.55	334.61	334.66	336.69	340.88	342.35	342.99	343.4	343.47	343.55
PO-7	347.2	347.25	347.49	347.53	348.87	350.48	352.07	352.38	354.66	354.68	354.69
PO-8				346.71	346.88	346.95	347.09	347.25	347.35	348.09	348.7
PO-9				288.92	289.08	289.25	293.14	292.95	292.71	292.58	292.15
PO-10			251	251.18	251.29	251.47	251.51				

**Tabla 2 ANEXO N° 5. Nivel freático registrado en los pozos de estudio de la subcuenca del Río Amayo medidos de julio a agosto durante el año 2021.**

Meses	Julio					Agosto			
Días	2	6	16	24	30	6	13	20	27
PO-1	438	438.72	437.8	437.78	437.75	437.75	437.72	437.71	437.68
PO-2	445.02	446.24	446.6	446.61	446.36	446.43	446.79	446.71	447.96
PO-3	368.45	368.9	369.2	369.25	369.3	369.34	369.37	369.38	369.6
PO-4	339.54	339.98	340.1	340.15	340.2	340.23	340.28	340.31	340.88
PO-5	361.98	362.04	362.1	362.13	362.16	362.2	362.22	362.24	362.6
PO-6	343.68	343.8	343.87	343.8	343.78	343.72	343.61	343.55	343.39
PO-7	354.71	354.7	354.71	354.72	354.69	354.67	354.64	354.7	354.74
PO-8	349.09	349.17	349.25	349.29	349.3	349.33	349.28	349.32	349.45
PO-9	291.88	291.61	291.4	291.34	291.28	291.19	291.16	291.09	290.94
PO-10									

**Tabla 3 ANEXO N° 5.** Nivel freático registrado en los pozos de estudio de la subcuenca del Río Amayo medidos de septiembre a octubre durante el año 2021.

Meses	Septiembre				Octubre
	Días	3	10	17	
PO-1	437.65	437.61	437.58	437.45	437.87
PO-2	448.2	447.95	448.28	448.78	448.46
PO-3	369.68	369.85	370.02	370.06	369.97
PO-4	341.24	341.4	341.38	341.4	341.11
PO-5	362.98	362.97	363.04	363.1	362.91
PO-6	343.37	343.18	343.25	343.26	343.12
PO-7	354.71	354.68	354.64	354.7	354.45
PO-8	349.88	350.35	350.87	351.22	351.09
PO-9	290.99	290.85	290.75	290.6	290.35
PO-10					255.38

