

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRÓNOMICAS**

**RECONOCIMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA LA DETERMINACIÓN DE
ZONAS DE RECARGA HÍDRICA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO PINULA,
JURISDICCIÓN DE SANTA CATARINA PINULA, GUATEMALA**

TESIS

**PRESENTADA A LA HONORABLE JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE
AGRONOMÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

POR:

DANIEL ESTEBAN MÁNZO BARRIENTOS

En el acto de investigación como

INGENIERO AGRÓNOMO

EN

RECURSOS NATURALES RENOVABLES

EN EL GRADO ACADÉMICO DE

LICENCIADO

Guatemala, octubre del 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

RECTOR

Lic. CARLOS ESTUARDO GÁLVEZ BARRIOS

JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA

DECANO	MSc. Francisco Javier Vásquez Vásquez
VOCAL PRIMERO	Ing. Agr. Waldemar Nufio Reyes
VOCAL SEGUNDO	Ing. Agr. Walter Arnoldo Reyes Saravia
VOCAL TERCERO	MSc. Danilo Ernesto Dardón Avila
VOCAL CUARTO	Br. Rigoberto Morales Ventura
VOCAL QUINTO	Br. Miguel Armando Salazar Donis
SECRETARIO	MSc. Edwin Enrique Cano Morales

Guatemala, octubre del 2008

Honorable Junta Directiva
Honorable Tribunal Examinador
Facultad de Agronomía
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señores miembros

De conformidad a las normas establecidas con la Ley Orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a vuestra consideración, el trabajo de tesis titulado:

***RECONOCIMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA LA DETERMINACIÓN
DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA EN LA SUBCUENCA DEL RIO
PINULA, JURISDICCIÓN DE SANTA CATARINA PINULA, GUATEMALA***

Presento como requisito previo a optar el título de Ingeniero Agrónomo en Sistemas de Producción Agrícola, en el grado académico de Licenciado.

En espera que la presente investigación llene los requisitos necesarios para su aprobación, expreso mis agradecimientos y muestras de respeto, por su atención a la presente.

Atentamente,

f. _____
Daniel Esteban Mánzo Barrientos

ACTO QUE DEDICO

A:

- DIOS:** Fuente Divina que me ha iluminado y ayudado siempre para poder alcanzar mis metas.
- Mis Hijas:** Daniela y Paula, por ser la fuente de inspiración y el motor de mi vida para dar lo mejor de mí persona y para ellas.
- Mis Padres:** Cesar Hegilio Mánzo Juárez e Irma Yolanda Barrientos de Mánzo, por los esfuerzos realizados, el apoyo y amor brindado en cada etapa de mi vida el cual se expresa mediante este logro.
- Mi Esposa:** Por estar siempre a mi lado, la paciencia que me tuvo y el cuidado de Daniela y Paula, especialmente en los tiempos que estuve fuera del país.
- Mis Hermanos:** David y Javier, por apoyarme durante mi formación profesional y especialmente el apoyo que les han dado a mis hijas.
- Mis Abuelas:** Felipa de Jesus y María Asunción †, que siempre me apoyaron en toda mi vida y siempre me dijeron que lo material me lo pueden quitar pero lo he aprendido y aprenderé nunca y con esto puedo conseguir lo que quiera.
- Mis Tíos y Tías** Beto, Letty, Gudiel, Rosita, Chendo, Mila, Salva, Marta, Ronny, Shen y Telma, por el cariño y apoyo que han brindado a mí y a mí familia.
- Primos y Primas** Con aprecio y cariño.
- Mis Amigos** Como aprecio de una sincera amistad y de las experiencias compartidas, especialmente Rolando Velarde, Eduardo Tojín y Ruben Carcamo.

TESIS QUE DEDICO

A:

DIOS

MI PATRIA GUATEMALA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL

**FAMILIARES, AMIGOS, COMPAÑEROS Y PERSONAS EN GENERAL QUE
CONTRIBUYERON A MI FORMACIÓN.**

AGRADECIMIENTO

A:

Mi asesor de tesis, Ing. Agr. Isaac Herrera Ibáñez, por su valiosa orientación y compartir sus conocimientos en la realización del presente trabajo de tesis y mi formación profesional.

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CUADROS.....	iv
INDICE DE FIGURAS.....	v
RESUMEN.....	vi
1. INTRODUCCION.....	1
2. DEFINICION DEL PROBLEMA	3
3. MARCO TEORICO.....	4
3.1 MARCO CONCEPTUAL	4
3.1.1 Recarga Hídrica.....	4
3.1.1.1 Descarga Subterránea.....	4
3.1.1.2 Recarga al Acuífero	4
3.1.1.3 Recarga por Infiltración de la Lluvia	5
3.1.1.4 Recarga por Infiltración de las Corrientes.....	5
3.1.2 Acuífero	6
3.1.3 Tipos de Acuíferos.....	7
3.1.3.1 Acuíferos Libres.....	7
3.1.3.2 Acuíferos Semi-confinados.....	7
3.1.3.3 Acuíferos Confinados.....	7
3.1.3.4 Acuíferos Semi-libres	8
3.1.4 Agua Subterránea.....	8
3.1.4.1 Importancia del Agua Subterránea.....	8
3.1.4.2. Distribución del Agua Subterránea	9
3.1.4.3 Movimiento de la Humedad del Suelo.....	10
3.1.4.4 Manifestaciones Exteriores del Agua Subterránea.....	10
3.1.4.5 Los Sistemas de Flujo	12
3.1.5 Ciclo Hidrológico	13
3.1.5.1 Influencia del Hombre en el Ciclo Hidrológico.....	13
3.1.6 Precipitación	14
3.1.6.1 Precipitación Pluvial.....	14
3.1.7 Precipitación Efectiva.....	14
3.1.7.1 Factores que Intervienen en la Precipitación Efectiva	15
3.1.8 Evapotranspiración	16
3.1.9 Constantes de Humedad.....	17
3.1.9.1 Capacidad de Campo	17
3.1.9.2 Punto de Marchites Permanente	17
3.1.10 Escorrentía	18
3.1.10.1 Tamaño de la Cuenca	18
3.1.10.2 Forma de la Cuenca.....	18
3.1.10.3 Distribución de los Cursos del Agua	18
3.1.10.4 Pendiente de Cuenca.....	19
3.1.10.5 Almacenamiento de la Cuenca	19
3.1.10.6 Geología de la Cuenca.....	19
3.1.10.7 El Uso de la Tierra.....	19
3.1.11 Relaciones Entre Precipitación y Escorrentía.....	20
3.1.12 Regiones Hidrogeológicas de Guatemala	20
3.1.12.1 Llanuras Aluviales del Pacífico	20
3.1.12.2 Altiplano Volcánico.....	21
3.1.12.3 Tierras Altas Cristalinas.....	22

3.1.12.4	Región Sedimentaria Septentrional	23
3.1.13	Identificación y Mapeo de Áreas de Recarga Hídrica	24
3.1.13.1	Mapa Geológico.	24
3.1.13.2	Mapa de Serie de Suelos o Clasificación Taxonómica.....	25
3.1.13.3	Mapa de Uso de la Tierra y de Cobertura.....	25
3.1.13.4	Mapa de Áreas de Influencia de las Estaciones Meteorológicas.....	26
3.1.14	Estratigrafía.....	26
3.1.14.1	Columnas Estratigráficas.....	27
3.1.15	Disponibilidad de Agua	28
3.1.16	Orígenes del Agua Subterránea	29
3.1.17	Descarga de Aguas Subterráneas.....	29
3.2	MARCO REFERENCIAL.....	30
3.2.1	Características Generales de la Superficie Geográfica.....	30
3.2.1.1	Ubicación Geográfica	30
3.2.1.2	Limites	30
3.2.1.3	Superficie Geográfica.....	31
3.2.1.4	Población.....	31
3.2.1	Vías de Comunicación Terrestres	36
3.2.3	Descripción Físico-natural del Área de estudio	36
3.2.3.1	Suelo	36
3.2.3.2	Zonas de Vida.....	41
3.2.4	Hipsometría	42
3.2.5	Hidrografía.....	44
3.2.6	Hidrología	45
3.2.7	Fisiografía.....	47
3.2.8	Geología	47
3.2.8.1	Lavas Volcánicas del Terciario (Tva)	48
3.2.8.2	Sedimentos Fluvio – Lacustres (Qpal).....	49
4.	OBJETIVOS	52
4.1	GENERAL	52
4.2	ESPECIFICOS.....	52
5.	METODOLOGIA.....	53
5.1	Delimitación del Área de Estudio	53
5.2	Geología	53
5.3	Hidrogeología.....	54
5.3.1	Características del Acuífero.....	54
5.3.1.1	Transmisividad.....	54
5.3.1.2	Coeficiente de Almacenamiento.....	55
5.3.1.3	Niveles y Movimientos de las Aguas Subterráneas.....	55
5.4	Hidrología Superficial.....	55
5.4.1	Aforo de Ríos	55
5.5	Pruebas de Infiltración	56
5.6	Precipitación Pluvial.....	57
5.7	Determinación de Precipitación Efectiva.....	57
5.8	Muestreo de Suelos	58
5.9	Determinación de la Escorrentía Superficial.....	58
5.10	Evapotranspiración	58
5.10.1	Determinación de la Evapotranspiración Potencial.....	58

5.10.2 Determinación de la Evapotranspiración Real	59
5.11 Determinación de la Humedad del Suelo Final del Mes Actual	60
5.12 Determinación de la Recarga Hídrica por el Método de Variación lineal de la Evapotranspiración Real.....	60
5.13 Balance de Humedad de Suelos.....	60
5.14 Identificación y Mapeo de Unidades de Recarga Hídrica.....	61
6. RESULTADOS	62
6.1. Geología	62
6.1.1 Geología Estructural.....	62
6.1.2. Geología Local	67
6.1.2.1. Grupo Volcánico Terciario	67
6.1.2.2. Grupo Volcánico Cuaternario	69
6.1.3. Hidrogeología.....	70
6.1.3.1 Acuíferos del Área de Estudio	70
6.1.3.2 Características Hidrogeológicas	72
6.1.3.3 Transmisividad.....	72
6.2. Hidrología Superficial.....	77
6.2.1. Escorrentía de la Subcuenca del Río Pinula	77
6.2.1.1. Aforos Diferenciales de Ríos	77
6.2.2. Precipitación Pluvial.....	81
6.2.3 Precipitación Efectiva.....	82
6.2.4. Determinación de la Infiltración Básica	84
6.2.5 Evapotranspiración	87
6.2.6 Lamina de Humedad del Suelo	87
6.3 Propuesta de Manejo y Uso Sostenible para Recurso el Hídrico.....	92
6.3.1. Lineamientos.....	92
6.3.1.1. Conservación	92
6.3.1.2. Investigación	93
7. CONCLUSIONES	95
8. RECOMENDACIONES.....	97
9. BIBLIOGRAFÍA	98
10. ANEXOS.....	101

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1	Coordenadas subcuenca del río Pinula.	30
Cuadro 2	Colindancias naturales y políticas, subcuenca del río Pinula.....	30
Cuadro 3	Valores Medios mensuales de radiación solar extraterrestre (mm/día)	59
Cuadro 4	Datos de Tiempo-Abatimiento del pozo de bombeo de la Cabecera municipal, Sta. Cat. Pinula.....	73
Cuadro 5	Resultados de los aforos diferenciales, subcuenca río Pinula.....	79
Cuadro 6	Datos de precipitación mensuales en milímetros.	82
Cuadro 7	Velocidad de infiltración en mm/día y porcentaje en tanto por uno.....	85
Cuadro 8	Valores de precipitación efectiva por unidad de recarga hídrica.	86
Cuadro 9	Calculo de la evapotranspiración potencial, método Hargreaves mensual.....	87
Cuadro 10	Constantes de humedad y densidad aparente de 10 muestras de suelo.....	88
Cuadro 11	Valores de profundidad de raíces para diferentes usos del suelo según Sandoval.....	88
Cuadro 12	Lamina y volumen de recarga total media anual por áreas, con datos mensuales de Precipitación, en la subcuenca del Río Pinula, con el método de variación lineal.....	90
Cuadro 13A	Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 1, a través del método de variación lineal.....	114
Cuadro 14A	Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 2, a través del método de variación lineal.....	115
Cuadro 15 A	Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 3, a través del método de variación lineal.....	116
Cuadro 16A	Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 4, a través del método de variación lineal.....	117
Cuadro 17A	Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 5, a través del método de variación lineal.....	118
Cuadro 18A	Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 6, a través del método de variación lineal.....	119
Cuadro 19A	Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 7, a través del método de variación lineal.....	120
Cuadro 20A	Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 8, a través del método de variación lineal.....	121
Cuadro 21A	Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 9, a través del método de variación lineal.....	122
Cuadro 22A	Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 10, a través del método de variación lineal.....	123
Cuadro 23A	Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 11, a través del método de variación lineal.....	124
Cuadro 24A	Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 12, a través del método de variación lineal.....	125

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación cuenca del Lago de Amatitlán	32
Figura 2 Ubicación subcuenca del río Pinula, jurisdicción de Santa Catarina Pinula.....	33
Figura 3 Ubicación en hoja topográfica subcuenca del río Pinula, jurisdicción de Santa Catarina Pinula.....	34
Figura 4 Mapa de división administrativa y centros poblados.....	35
Figura 5 Mapa de clasificación de suelos Simmons.....	40
Figura 6 Mapa de zonas de vida.....	43
Figura 7 Mapa hipsométrico e hidrográfico.....	46
Figura 8 Mapa fisiográfico.....	50
Figura 9 Mapa geológico.....	51
Figura 10 Mapa geológico para perfiles.....	64
Figura 11 Perfil geológico A - A' - A''-A'''.....	65
Figura 12 Perfil geológico B - B'.....	66
Figura 13 Mapa de red de flujo.....	71
Figura 14 Curva de Tiempo-Abatimiento de la prueba de la cabecera municipal Santa Catarina Pinula, método de Jacob utilizando el software AquiferTest.....	75
Figura 15 Curva de Tiempo-Abatimiento de la prueba de bombeo del pozo de la de la cabecera municipal, Santa Catarina Pinula, método de Theis utilizando el software AquiferTest.....	76
Figura 16 Mapa de aforos diferenciales.....	78
Figura 17 Hidrograma de los puntos de aforo de los ríos Pinula y Panasequeque, agosto 2003 – julio 2004.....	80
Figura 18 Mapa de unidades de recarga hídrica.....	83
Figura 19 Mapa de zonas de recarga hídrica.....	91
Figura 20A Mapa de Ocupación del Suelo, Año 2001.....	102
Figura 21A Mapa de Pendientes.....	103
Figura 22A Prueba de infiltración de suelos 1.....	104
Figura 23A Prueba de infiltración de suelos 2.....	105
Figura 24A Prueba de infiltración de suelos 3.....	106
Figura 25A Prueba de infiltración de suelos 4.....	107
Figura 26A Prueba de infiltración de suelos 5.....	108
Figura 27A Prueba de infiltración de suelos 6.....	109
Figura 28A Prueba de infiltración de suelos 7.....	110
Figura 29A Prueba de infiltración de suelos 8.....	111
Figura 30A Prueba de infiltración de suelos 9.....	112
Figura 31A Prueba de infiltración de suelos 10.....	113

RECONOCIMIENTO HIDROGEOLÓGICO PARA LA DETERMINACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO PINULA, JURISDICCIÓN DE SANTA CATARINA PINULA, GUATEMALA

HYDROLOGY RECOGNITION FOR THE HYDRIC RECHARGE DETERMINATION ZONES IN THE PINULA RIVER BASIN, JURISDICTION OF SANTA CATARINA PINULA, GUATEMALA

RESUMEN

En la subcuenca del Río Pinula se ha generado poca información sobre caracterización, planificación y manejo de los recursos naturales especialmente en aguas subterráneas y zonas de recarga hídrica. En los años 60s se realizó el estudio de aguas subterráneas en el valle de la ciudad de Guatemala, el cual incluía el área de estudio a nivel macro.

La principal fuente de agua dentro de la subcuenca que incluye la cabecera municipal de Santa Catarina Pinula es aprovechada por la explotación de los acuíferos. Estos también son una de las principales áreas de recarga hídrica y de abastecimiento para el valle de la ciudad de Guatemala, específicamente para las zonas 9, 10 y 14 de la ciudad capital, principalmente de aguas superficiales del Río Pinula, aportando un caudal promedio anual de 4.6 millones de m³/año, según datos de producción de la planta El Cambray, ERIS (9).

Debido al crecimiento urbanístico en Santa Catarina y San José Pinula, actualmente se hacen sobreexplotaciones de pozos con una tendencia a una demanda mayor del recurso hídrico tanto cuantitativa como cualitativamente, que se refleja en el aumento de perforaciones de pozos en las distintas colonias y a mayores profundidades que andan en promedio de los 300 metros, sin que se lleve un monitoreo exhaustivo, ni se toman medidas de un uso sostenible y sustentable.

Se determinaron las zonas y el potencial de recarga hídrica en 1.5 millones de m³ para el año hidrológico 2,003 – 2,004, tomaron en cuenta los factores físicos del suelo, pendiente, geología, ocupación del suelo según datos extraídos con fotografías aéreas del 2,002, y los datos meteorológicos reportados de la estación INSIVUMEH, la cual es la única que tiene radio de influencia en la subcuenca.

La información generada está orientada a efectuar estudios básicos y actualizados que brindan lineamientos para lograr un mejor conocimiento y manejo de los acuíferos, por lo que la investigación permite tener un amplio conocimiento de la hidrogeología y la superficie geográfica de recarga hídrica para su protección y que pueda garantizar la disponibilidad del recurso hídrico en calidad y cantidad.

1. INTRODUCCION

Guatemala tiene una superficie de 108,889 km² donde están incluidas 4 grandes provincias fisiográficas, y se encuentran grandes planicies, cordilleras, laderas, valles, quebradas, cañones cortados por ríos, formando cuencas hidrográficas. Las poblaciones que habitan en las cuencas, ejercen una fuerte presión sobre los recursos naturales allí presentes, haciéndose notar sus efectos en la disminución de calidad de vida y aumentando el costo de esta al ser más escasos los recursos físicos. Esto presenta un problema, debido a no contar con planes de manejo dentro del sistema cuenca para garantizar la sostenibilidad de las áreas

Guatemala posee diversidad de recursos naturales que sirven de base para la vida de sus habitantes lo que constituye que cada año se vayan agotando, debido al aumento poblacional y por ende al aumento de la demanda de agua, energía, servicios de salud y de alimentos, por lo que la tierra constituye el recurso indispensable para la producción de los mismos.

A nivel mundial existe una escasez generalizada de agua dulce, no por la demanda, si no por la mala utilización y contaminación que el mismo hombre ejerce sobre el vital líquido. Según la (OPS/OMS) se estima que el 97.3% de agua en el mundo es salada y el 2.7% es agua dulce, pero sólo el 0.66% de agua dulce es usada para suministro a nivel mundial. La destrucción paulatina y la creciente contaminación de los recursos hídricos, la deforestación y la pérdida de los recursos naturales, han disminuido los caudales de los manantiales existentes en las cuencas hidrográficas, que poco a poco se han ido perdiendo y con ello disminuye el 0.66 % de agua dulce que a nivel mundial se utiliza para varios propósitos y servicios básicos como agua para consumo humano, diversión, saneamiento, agricultura, industria y otras actividades.

El agua es el recurso natural que más se utiliza en todo el mundo y el más importante para la vida, pero la necesidad de obtener otros servicios indispensables como lo es la producción de madera y alimentos a través de la agricultura, hace que los habitantes hagan un uso irracional del bosque, debilitando las cuencas hidrográficas y así provocando la pérdida del suelo, agua, flora y la extinción de varias especies de animales y aumentando la impermeabilización de los suelos por el crecimiento de las zonas urbanas.

Al no existir cobertura vegetal en la zona de recarga, disminuye la infiltración, no recarga el acuífero y disminuyen su caudal poco a poco, hasta un punto en el cual se secan los ríos completamente y sólo drenan esporádicamente cuando hay precipitaciones pluviales.

Debido al mal manejo de los recursos naturales que los habitantes le dan a éstos, poco a poco el agua va disminuyendo a un punto tal que en el futuro hará falta, por lo que para evitar la pérdida paulatina de los recursos naturales, se deben implementar lineamientos de manejo para la protección de los recursos naturales.

2. DEFINICION DEL PROBLEMA

La subcuenca del Río Pinula, jurisdicción del municipio de Santa Catarina Pinula, ubicada en la parte este de la cuenca del Lago de Amatitlán, departamento de Guatemala, cuenta con poca información relacionada con sus recursos naturales, principalmente hidrogeología, uso y cobertura del suelo, y crecimiento urbano.

En el mundo y Guatemala que no es la excepción, el recurso agua ha venido sufriendo un gran deterioro por el efecto sobre el medio originado por la degradación acelerada de los recursos físicos debido a la variabilidad natural de las precipitaciones pluviales, la constante y creciente deforestación y la erosión de los suelos. Aunado a esto está el aumento en la demanda de agua como consecuencia del crecimiento demográfico y migración hacia los centros poblados; ya que para el año 1954, 1984 y 2001 las zonas urbanas o construidas abarcaban 22.83 Ha (1.3 %), 147.56 Ha (8.38 %) y 544.58 Ha (31 %) respectivamente de un total 1,760 Ha, que cubre el área de estudio, Mánzo (28).

Esto ha provocado una reducción considerable en la disponibilidad de calidad y cantidad de agua con características adecuadas para el aprovechamiento antropico, forzando al hombre a explotar el recurso hídrico de una manera insostenible, lo que provoca un desbalance en las entradas y salidas en el sistema cuenca originado por la sobreexplotación de los acuíferos.

Al haber deterioro del poco bosque existente en la subcuenca y suelos desprotegidos los cuales están susceptibles a la erosión y con la impermeabilización de suelos por el establecimiento de zonas urbanas, especialmente en la parte alta de la subcuenca en donde se encuentran pendientes mayores de 16 % y actualmente tierras con uso de vegetación natural que está siendo y tendrá cambios de uso del suelo a proyectos de urbanización, conlleva a que exista una reducción de la recarga hídrica, lo que genera dicho desbalance. Es por ello que existió la importancia de realizar un estudio que permite conocer la situación actual y potencial de uso de los recursos naturales y sentar bases sólidas a la conservación de los mismos.

3. MARCO TEORICO

3.1 MARCO CONCEPTUAL

3.1.1 Recarga Hídrica

Es el proceso que implica un incremento de agua hasta la zona de saturación, donde se encuentra el nivel de las aguas subterráneas, Es decir, es la cantidad de agua adicionada (recarga artificial) o absorbida (recarga natural) en un acuífero. Además, puede ser directa (infiltración de la lluvia) y lateral (aporte de otras áreas o cuencas).

Los principales procesos de transferencia del ciclo hidrológico de una cuenca son: Precipitación pluvial, infiltración, evapotranspiración y escorrentía superficial. Estos son los elementos importantes en la estimación del balance hídrico de toda la cuenca (sin aporte de otras cuencas) para cuantificar la recarga al acuífero, Herrera (13).

3.1.1.1 Descarga Subterránea

Es el agua liberada de la zona de saturación, es decir, es la salida natural del agua subterránea proveniente de un acuífero, que generalmente define un manantial.

3.1.1.2 Recarga al Acuífero

El agua subterránea se deriva de la infiltración de las aguas superficiales que provienen directamente de la lluvia, de corrientes superficiales y lagos alimentados por lluvia.

Lo anterior se demuestra sobre la base de datos cuidadosamente analizados, tales como los de penetración de la lluvia a través de los estratos, las pérdidas en las corrientes por infiltración, la pendiente del nivel freático, desde las áreas de entrada hasta las de descarga, Herrera (13).

3.1.1.3 Recarga por Infiltración de la Lluvia

Las recargas de agua en la zona de saturación provenientes de fuentes superficiales, comprenden tres pasos:

- A. Infiltración del agua desde la superficie a la zona de suelos.
- B. El movimiento descendente del agua a través de los materiales comprendidos en la zona de aireación, y
- C. La emigración de parte del agua al manto freático, aumentando así las reservas subterráneas.

La infiltración se produce debido a la acción combinada de las fuerzas de gravedad y atracción molecular. La atracción molecular se expresa como un gradiente de potencia en aquellos lugares donde la humedad del suelo no está en equilibrio. Una vez que la zona de los suelos ha recibido agua a toda su capacidad, toda el agua adicional desciende por gravedad, ya sea directamente hasta el manto freático o a la zona intermedia. En virtud de que la zona intermedia no es afectada por el fenómeno de la evaporación o absorción de las raíces de las plantas, normalmente retiene mucha agua, no obstante esto, la mayor parte del agua tiende a moverse hacia abajo en respuesta a la fuerza de gravedad.

3.1.1.4 Recarga por Infiltración de las Corrientes

En general, las corrientes se pueden clasificar en incurrentes o influentes y excurrentes o efluentes, influentes si aportan agua al acuífero, si escurren encima del nivel freático aumentando su caudal de agua y excurrentes si escurren en un nivel inferior que el nivel freático, en cuyo caso el acuífero aporta agua a la corriente.

La recarga se debe principalmente a la penetración en el subsuelo de la lluvia, sin embargo, si la lluvia cae más rápidamente que la infiltración, el agua correrá sobre la superficie formando la escorrentía superficial. Las condiciones que influyen en la cantidad de la recarga del agua subterránea son dos:

A. Las que se refieren a la precipitación pluvial

En general, la proporción de agua infiltrada aumenta en cierto grado con la precipitación si ocurre en forma de lluvias ligeras y escasas, puede ser absorbida por el suelo. Las lluvias que caen una vez satisfechas las deficiencias del suelo son las que enriquecen las reservas subterráneas. Si la lluvia cae a una intensidad alta de corta duración, solo una pequeña parte del agua se infiltra y otra parte aún más pequeña alcanzará el nivel freático.

B. Las que se refieren a las facilidades de entrada

Por ciertas condiciones que hacen variar el porcentaje de la lluvia infiltrada. La más importante es la permeabilidad del terreno. Formaciones tales como calizas cavernosas, rocas fracturadas, grava o arena de grano grueso, permiten en gran parte que las lluvias alcancen el nivel freático, en cambio un suelo arcilloso sólo permite el paso del agua a poca profundidad.

Las facilidades para la infiltración del agua desde la superficie son controladas, en parte por el carácter de la formación subyacente de la cual se derivó el suelo (origen y tectónica), y por otra parte por el estado de desarrollo del mismo suelo, la vegetación y otros como la topografía del terreno que también tiene gran influencia en la infiltración del agua. En general, la infiltración es mayor en terrenos planos que inclinados.

La cantidad de recarga de un acuífero depende en cierto modo de la extensión del área de entrada. De hecho, los acuíferos más productivos son los lechos permeables, situados en áreas extensas. Por otra parte, la infiltración es mayor cuando en el área de entrada ocurren no solo la precipitación local, sino el escurrimiento superficial de alguna área tributaria, como sucede en pendientes aluviales que reciben aguas superficiales provenientes de áreas montañosas con fuerte precipitación.

3.1.2 Acuífero

Es una unidad geológica saturada capaz de suministrar agua a pozos y manantiales, los que a su vez sirven de fuentes de abastecimiento de líquido. Para que un acuífero sea funcional, sus poros o intersticios deben de estar llenos de agua y ser lo suficientemente grandes como para que permitan que el agua se desplace hacia los pozos y manantiales con un caudal apreciable, Herrera, (14).

3.1.3 Tipos de Acuíferos

3.1.3.1 Acuíferos Libres

Son una capa permeable parcialmente saturada de agua y situada sobre una capa relativamente impermeable, su límite superior está formado por una superficie libre de agua o de nivel freático, a una presión igual a la atmósfera. El nivel del agua en un pozo que se haya penetrado en un acuífero libre no está, en general, por encima del nivel freático. En acuíferos de material granular fino o medio, el drenaje por gravedad de los poros no es instantáneo, de aquí que después de un bombeo, el nivel freático tarda en estabilizarse, cuando esto sucede los acuíferos se llaman libres con rendimiento retardado.

3.1.3.2 Acuíferos Semi-confinados

Son de este tipo los acuíferos que están totalmente saturados de agua, y en su límite inferior hay una capa impermeable o semipermeable, y en su límite superior una capa semipermeable (acuitardo). Una capa es semipermeable cuando la permeabilidad es baja, pero aún medible. Para detectar el movimiento principalmente vertical de este tipo de acuíferos, es necesario instalar un piezómetro tanto en el acuífero como en la capa semipermeable superior, y a veces también en la inferior. También en este caso el nivel piezométrico es superior al que tiene el agua dentro del acuífero, ya que se encuentra a mayor presión que la atmosférica, y en general, el descenso del nivel del agua en la capa semipermeable es muy pequeño en comparación con el descenso del nivel piezométrico del acuífero.

3.1.3.3 Acuíferos Confinados

Un acuífero confinado es el que está totalmente saturado de agua y sus límites superiores e inferiores son capas relativamente impermeables. En general, son poco comunes y en ellos la presión del agua suele ser mayor que la atmosférica, así como el nivel del agua en los pozos de observación es más alto que el nivel del límite superior del acuífero. Al agua que contienen estos acuíferos se les llama Confinada o artesiana. Si al perforar un pozo en un acuífero de este tipo, el agua supera el nivel de la superficie del terreno, entonces el pozo es surgente.

3.1.3.4 Acuíferos Semi-libres

Se presentan cuando la conductividad hidráulica de la capa de material granular fino en un acuífero semiconfinado es tan grande que la componente horizontal del flujo no puede despreciarse, (como se hace en semiconfinados), entonces, el acuífero está situado entre los semilibres y los semiconfinados, Taracena, (37).

3.1.4 Agua Subterránea

3.1.4.1 Importancia del Agua Subterránea

El uso del agua subterránea se conoce desde hace muchos siglos, quizá desde los tiempos bíblicos, aunque lógicamente en aquellas épocas la explotación se hacía en forma rústica y primitiva.

En la antigüedad, probablemente la hazaña más grande en explotación de aguas subterráneas fue la construcción de largas galerías de infiltración que drenaban aguas de los conos aluviales de deyección y de las rocas sedimentarias blandas. Tales obras, llamadas KANAATS, se originaron en Irán desde hace más de 3,000 años y de ahí se extendieron a Afganistán y Egipto, en donde aún hay algunas en servicio, en aquellos tiempos, el agua que ocupaban se usaba tanto para fines domésticos como agrícolas.

Durante la edad media, el uso del agua subterránea fue impulsado en Europa por el descubrimiento de los llamados pozos artesianos surgentes, y en épocas más modernas (siglo XVIII), este fue el motivo que impulsó el desarrollo de las técnicas de perforación. La Hidrogeología se vislumbra como ciencia desde el siglo XVII, su desarrollo es más bien moderno y comienza formalmente en el siglo pasado, con los estudios de Darcy, Dupuit, Theis y otros, Herrera (14).

3.1.4.2. Distribución del Agua Subterránea

En general, todos los materiales de la corteza terrestre, a mayor o menor profundidad tienen cierto espesor en el que son porosos, a esta parte se le conoce como zona porosa, a su vez estos poros pueden estar llenos total o parcialmente de agua.

El estrato superior, donde los poros no están completamente llenos de agua, es a lo que se le llama zona de aireación, debajo de ésta, donde los poros están totalmente llenos, se localiza la zona de saturación.

A su vez, la zona de aireación se divide en tres franjas:

- A. La humedad del suelo, de gran importancia para la vegetación, ya que proporciona el agua necesaria para el desarrollo de las plantas; esta agua es retenida por atracción molecular y acción capilar contra la fuerza de gravedad.
- B. La franja intermedia que se encuentra por debajo de la anterior, su espesor es variable. El agua que contiene es un almacenamiento inútil o fósil, puesto que no se puede recuperar para utilizarla; esta parte funciona como tránsito del agua, de la zona húmeda hacia la franja capilar y la zona de saturación.
- C. La franja capilar, situada inmediatamente arriba de la zona de saturación, sobre la que se retiene agua por acción capilar, contrarrestando la acción de la gravedad. Su espesor y la cantidad de agua que retiene depende del tamaño de los granos del material, llegando a alcanzar hasta 3 metros de altura en materiales finos como limos y arcillas.

El agua que se encuentra en la zona de saturación es la que propiamente se conoce como agua subterránea, agua del subsuelo o agua profunda. Esta agua subterránea puede encontrarse en forma de un solo cuerpo continuo o en estratos separados. Su espesor varía desde unos pocos metros hasta centenares, dependiendo de factores tales como la geología local, la presencia de poros intersticios en las formaciones, la recarga, grado de fracturación y el

movimiento o desplazamiento del agua desde las zonas de recarga hasta las de descarga, Velasco (36).

3.1.4.3 Movimiento de la Humedad del Suelo

La infiltración es el movimiento del agua a través de la superficie del suelo hacia el interior del mismo, diferente a la percolación, que es el movimiento del agua a través del suelo profundo y las rocas. Una vez que el agua está en contacto con el suelo, el agua gravitacional penetra hacia abajo a través de los intersticios más gruesos, mientras que los más pequeños toman agua por capilaridad. El agua gravitacional, en su trayecto de descenso, también es interceptada por los intersticios capilares. A medida que los poros capilares de la superficie se llenan de agua, la tasa de infiltración disminuye. En suelos homogéneos, la infiltración disminuye gradualmente hasta la zona de aireación saturada. Normalmente, el suelo es estratificado y las capas inferiores son menos permeables que en las capas superficiales; en este caso, la tasa de infiltración se reduce a la tasa de percolación del estrato menos permeable.

La infiltración a partir de una lluvia se caracteriza por la formación de capas de agua muy delgadas en la superficie del suelo, que se extienden sobre áreas de considerable magnitud. Las cantidades de agua infiltrada son en general muy pequeñas (unos pocos centímetros por día) raramente son capaces de saturar una profundidad considerable del suelo cuando la lluvia cesa, el agua gravitacional presente aún en el suelo continúa su trayectoria descendente y es también interceptada por los intersticios capilares. Generalmente el agua infiltrada se distribuye dentro de las capas superiores del suelo, aportando muy poco al abastecimiento de agua subterránea, a menos que el suelo sea muy permeable o que la zona vadosa sea muy delgada, Amisial (1).

3.1.4.4 Manifestaciones Exteriores del Agua Subterránea

En general, en las áreas de recarga existe un déficit de humedad en el suelo en ciertas épocas del año, por lo menos en climas templados y con mayor razón en climas áridos y semiáridos. Por ello se caracterizan por tener una vegetación mucho más pobre que la existente en las zonas de

descarga próximas. Este empobrecimiento de la vegetación también va acompañado de un suelo pobre, lo cual es un fenómeno ligado al anterior. Por otro lado, las zonas de recarga tienden a tener un sistema más homogéneo y estable que las de descarga.

En las zonas de descarga, que con frecuencia son además de extensión superficial más reducida que las de recarga, el terreno tiene un aporte de humedad suplementario que puede compensar total o parcialmente el déficit hídrico de ciertas épocas del año, produciendo así un fuerte contraste de vegetación según las circunstancias de ese aporte hídrico. Si el exceso de humedad es grande, en las zonas de descarga se inicia la red de drenaje permanente a través de manantiales o zonas de rezume, con frecuencia acompañadas de rasgos morfológicos erosivos y acumulación superficial de sales.

La descarga de aguas viene señalada por la existencia de un nivel piezométrico creciente en profundidad, de modo que es posible construir pozos surgentes en acuíferos libres sin necesidad de que medie ninguna cobertura impermeable. En los mapas hidrogeológicos que señalan la amplitud del nivel piezométrico a lo largo del año, las zonas de descarga suelen coincidir con los mínimos de variación. En general las zonas de descarga se sitúan al pie de zonas más elevadas y la calidad y temperatura del agua es alóctona.

En ausencia de manantiales vistos, puede recurrirse a localizar zonas de descarga subterránea a través de los rasgos de campo que indican un exceso de humedad, los cuales varían con el clima, ambiente y topografía del punto de descarga.

La presencia de manantiales, cuyo caudal varía según el clima, régimen de recarga y volumen de embalse útil, se delata en ocasiones por la existencia de una depresión circular o semicircular. A veces por la presencia de agua en el cauce del río en épocas frías, pueden aparecer nieblas debido al fuerte contraste térmico entre el ambiente y el agua (a la temperatura media anual aproximadamente o algo más caliente), Herrera (14)

3.1.4.5 Los Sistemas de Flujo

El primer paso para determinar la recarga es conocer el sistema de flujo del acuífero. Las características de circulación del agua subterránea dependen primariamente de tres factores que condicionan la recarga, presencia en el terreno y descarga:

- A. Climatología e hidrología
- B. Geología (litología y tectónica)
- C. Geomorfología

En un sistema con cierta geología, geomorfología y clima. Se establece un sistema de flujo en el que existen áreas de recarga, áreas de descarga y áreas de transferencia. En las primeras el flujo tiene una composición vertical descendente, en las segundas una componente vertical ascendente y en las terceras el flujo es predominantemente horizontal. En un esquema simple, las zonas de recarga y de descarga están conectadas por una zona de transferencia. Las variaciones del potencial hidráulico en la vertical de un lugar delata el carácter de la zona

No obstante en la realidad los sistemas son muchas veces complejos, con una o varias áreas de recarga y una o varias áreas de descarga y varios modos de transferencia según el lugar y la profundidad. A este respecto es preciso tener en cuenta que el agua puede circular por terrenos considerados poco permeables y también a notables profundidades, aunque lo haga muy lentamente, quizá a solo pocos metros por año, ya sea en medios porosos o a través de fisuras.

Un terreno al que se considera como no acuífero, desde el punto de vista de que su aptitud para que en él se establezcan captaciones de agua subterránea, puede conducir grandes cantidades de agua subterránea si el gradiente y el espesor saturado es elevado y ello es de gran importancia geodinámicamente e hidrogeológicamente. El movimiento a través de esos acuitardos puede explicar muchos fenómenos a los que se les había buscado explicaciones complicadas y poco realistas.

3.1.5 Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico inicia con la evaporación del agua en los océanos transportándose hacia los continentes a través de masas móviles de aire que bajo condiciones adecuadas se condensan y forman nubes o también puede transformarse en precipitación. La precipitación se dispersa parte es retenida por el suelo regresando a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas. Otra porción viaja por la superficie en forma de escorrentía y una pequeña parte llega a los acuíferos en forma de agua subterránea. Por gravedad tanto el agua superficial como la subterránea llega en algún momento a ser parte de los océanos aunque hay pérdidas por evaporación, transpiración, escorrentía superficial y subterránea, (UNEPAR 1,981) en Santos (33).

El ciclo hidrológico se refiere a la circulación general que resulta del hecho de que en promedio hay más precipitación que evaporación sobre la superficie continental de la tierra. El agua precipitada sobre la tierra pasa a través de varios medios de almacenamiento que pueden referirse como subsistemas del ciclo hidrológico.

3.1.5.1 Influencia del Hombre en el Ciclo Hidrológico

La influencia directa del hombre en el ciclo hidrológico se restringe principalmente a la parte del agua superficial. Cerca de una tercera parte de esta tierra puede cultivarse. Casi toda la precipitación que cae sobre la tierra se deriva directamente de los océanos y solamente cerca del 10% de ésta, aún en las más grandes masas de tierra, se origina de la superficie terrestre. Por lo tanto, muy poco puede hacer el hombre para incrementar la precipitación o nieve. Bajo un limitado rango de condiciones favorables la siembra de sustancias en las nubes para producir lluvia artificial, ha producido precipitación extra y algunos éxitos se han logrado en la prevención del granizo.

3.1.6 Precipitación

3.1.6.1 Precipitación Pluvial

Cantidad de agua caída en una zona determinada, ya sea en forma de lluvia, nieve, granizo o rocío. El pluviómetro es el instrumento más utilizado para la medición de las precipitaciones, que se expresan en litros o mm/m².

Según los fenómenos meteorológicos que las originan existen tres tipos de precipitación, convectiva, frontal o ciclónica y orográfica o lluvia de relieve, Custodio y Llamas (7).

Los aspectos fundamentales de un evento de precipitación que son de interés para la recarga hídrica son la duración, intensidad y frecuencia.

Los factores que determinan el desigual reparto de las precipitaciones son múltiples y complejos, desde los de ámbito general hasta los regionales o locales:

- A. Los factores de alcance general son los responsables de que en los climas ecuatoriales las lluvias sean fundamentalmente de convección, y en los climas tropicales las estaciones lluviosas coincidan con los solsticios.
- B. Los factores regionales o locales determinan aspectos tales como la mayor humedad de las zonas costeras y la mayor frecuencia de lluvias en las barreras montañosas, en especial en su vertiente orientada al mar.

3.1.7 Precipitación Efectiva

Es la porción de la precipitación pluvial que puede infiltrarse en el suelo y estar disponible para las raíces de las plantas o bien infiltrarse al acuífero, por lo que es la precipitación que sirve para estimar el balance hídrico, Linsley (27).

3.1.7.1 Factores que Intervienen en la Precipitación Efectiva

A. Intensidad de Precipitación

Al aumentar la intensidad de precipitación hasta el grado de rebasar la velocidad de infiltración del suelo, entonces el agua comienza a perderse por escurrimiento y no es aprovechada por el cultivo.

B. La Velocidad de Infiltración en el suelo

Está íntimamente relacionada con la intensidad de precipitación y depende de las características físicas del suelo, tales como la textura, estructura, compactación etc., y del contenido de humedad, pues al aumentar éste la cantidad de agua infiltrada disminuye.

C. Cobertura Vegetal

Esta obstaculiza el escurrimiento por lo cual aumenta el tiempo de contacto suelo-agua y por consiguiente habrá mayor infiltración del agua de lluvia.

Gran cantidad de lluvia que cae durante la primera parte de una tormenta es depositada en la cobertura vegetal como intercepción.

Aún cuando el efecto de la cobertura no tiene mayor importancia en las avenidas más grandes, la intercepción debida a algunos tipos de vegetación puede representar una porción considerable en la lluvia anual.

La capacidad de almacenamiento por intercepción es generalmente satisfecha en las primeras horas de una tormenta, de manera que un alto porcentaje de lluvia durante las tormentas de corta duración es interceptada. Después de que la vegetación esté saturada, la intercepción cesará a no ser porque una cantidad apreciable de agua puede evaporarse a partir de la enorme superficie mojada de la vegetación.

La capacidad de intercepción se reduce a mayor velocidad del viento, pero la tasa de evaporación aumenta. Se ha encontrado que un bosque de árboles maderables de gran tamaño intercepta hasta un 20% de lluvia.

D. Topografía

La topografía influye debido al tiempo de contacto del agua con la superficie, porque al llover sobre una superficie plana el agua se infiltra, cosa que no ocurre en topografías accidentadas donde el agua comienza a escurrir hacia las partes bajas y planas, Herrera (11).

3.1.8 Evapotranspiración

El fenómeno físico de la evaporación no es más que el paso del agua líquida al estado de vapor a la temperatura ambiente y constituye un proceso de suma importancia porque contribuye como factor dinámico en el ciclo hidrológico del agua. Según Costumer, dice que la evaporación depende de la energía calorífica recibida por el sol, de la temperatura, de la humedad del ambiente, de la velocidad del viento y dirección, de la constitución química del agua, de la presión barométrica del agua, Basso (3).

El efecto del viento es el de remover las masas de aire húmedo en contacto con la superficie evaporante, facilitando la llegada de aire más seco. Es por ello que existe un incremento de la evaporación a medida que los valores de temperatura y viento son mayores. La humedad relativa influye en una forma inversamente proporcional en la evaporación, ya que la tensión del vapor que se manifiesta cuando la atmósfera se satura de humedad actúa frenando la tasa de evaporación o sea que a una mayor humedad relativa del aire menor evaporación.

Es un proceso por el cual el agua se evapora del terreno, ya sea por la superficie del suelo o por la superficie de las hojas de las plantas, la transpiración resulta del desprendimiento del agua en forma de vapor de las hojas de las plantas, la cual ha sido absorbida desde el suelo y llevada a través de los tallos hasta la superficie foliar de donde pasa a la atmósfera.

La evapotranspiración, aun en igualdad de suelo, planta y clima, es variable, por una parte con la humedad que retenga el suelo en el momento considerado y, de otra, con el estado de la vegetación, por eso es llamada evapotranspiración actual para conocer la evapotranspiración en un momento dado, Herrera (13).

3.1.9 Constantes de Humedad

La capacidad de los suelos para retener el agua es una característica muy importante en el balance hídrico, mientras menor sea la capacidad de los suelos para retener el agua infiltrada, mayores serán las posibilidades de que esta agua pase a formar parte de la humedad de estratos inferiores hasta alcanzar la zona saturada (acuíferos). De esta manera para el cálculo del balance hídrico de suelos se determinan las constantes de humedad de un suelo, las cuales son:

3.1.9.1 Capacidad de Campo

Se define como el contenido de humedad que tiene un suelo inmediatamente después de que el agua gravitacional ha drenado, o sea que es la máxima cantidad de agua que un suelo puede retener en contra de la fuerza de la gravedad. El concepto de capacidad de campo es de gran utilidad por ser el límite superior de agua aprovechable o disponible para el desarrollo de las plantas y además porque es el porcentaje de humedad al que la zona radicular debe regarse para que no exista desperdicios ni falta de agua a la planta.

La tensión a la cual el agua está retenida en un suelo libre de sales cuando se está a capacidad de campo varía entre 1/10 de atmósfera para suelos arenosos y 1/3 de atmósfera para suelos arcillosos, aunque se han encontrado suelos arenosos en los cuales la tensión es de 0.06 de atmósfera y suelos en los cuales la tensión es de 0.07 de atmósfera.

3.1.9.2 Punto de Marchites Permanente

Se define como el porcentaje o contenido de humedad del suelo al cual las plantas no pueden obtener suficiente humedad para satisfacer sus requerimientos de transpiración. Al alcanzar el suelo valores de PMP las plantas se marchitan y no son capaces de recuperarse aún cuando se coloquen durante una noche en una atmósfera saturada en la que casi no se produce consumo de agua. Al medio día muchas veces las plantas se marchitan, pero luego al enfriarse el día se recuperan, este es solo un marchitamiento temporal.

El PMP corresponde al límite inferior del agua disponible a las plantas y la tensión a la cual el agua está retenida por el suelo, varía de 7 a 32 atmósferas, dependiendo de la velocidad de utilización del agua por la planta (transpiración), del tipo de cultivo, textura del suelo y contenido de sales en el suelo. Cuando aumenta la velocidad de transpiración, el marchitamiento se produce con tensiones más bajas y contenido de humedad mayor. Para la mayoría de los cultivos comerciales el PMP se alcanza cuando la tensión de la humedad en el suelo es de 15 atmósferas y es por esto que también el PMP se le define como el contenido de humedad que tiene el suelo cuando el agua está retenida a 15 atmósferas, Sandoval (32).

3.1.10 Escorrentía

La escorrentía está afectada por factores topográficos y geológicos que son:, Savenije (34).

3.1.10.1 Tamaño de la Cuenca

Entre mayor área haya en una cuenca, el tiempo requerido para que el área de captación total contribuya a la escorrentía pico es mayor.

3.1.10.2 Forma de la Cuenca

Si tenemos la misma área de captación pero con forma distinta podemos observar que la cuenca alargada necesita mayor tiempo para alcanzar el pico que una cuenca en forma de medio círculo u ovalada.

3.1.10.3 Distribución de los Cursos del Agua

El patrón y arreglo de los cursos de corrientes naturales determinan la eficiencia del sistema de drenaje. Para otros factores constantes, el tiempo requerido por el agua para fluir una distancia dada es directamente proporcional a la longitud.

3.1.10.4 Pendiente de Cuenca

La pendiente de la superficie constituye un factor importante, puesto que las muy inclinadas favorecen la escorrentía superficial y, si son menos fuertes, retienen por más tiempo el agua favoreciendo la infiltración. En algunas áreas pareciera que las pendientes moderadas ofrecen condiciones mejores para la infiltración que las enteramente planas. Estas últimas a menudo desarrollan suelos herméticos. La textura del suelo juega un papel importante en el proceso de infiltración puesto que está influida por la pendiente del terreno.

Mientras mayor sea la pendiente de captación viajará más rápidamente la escorrentía superficial. El tiempo al pico será más corto. La capacidad de infiltración en pendientes altas es muy baja.

3.1.10.5 Almacenamiento de la Cuenca

Ya que el almacenamiento debe llenarse primero antes de vaciarse, este tiene un retardatorio y modificador de la forma del hidrograma.

3.1.10.6 Geología de la Cuenca

La pedología y geología de la cuenca influencia primordialmente al componente de agua subterránea y las pérdidas. Altas tasas de infiltración reduce la escorrentía superficial. El tipo de corriente predominante en una cuenca puede tener impacto substancial en la forma del hidrograma.

3.1.10.7 El Uso de la Tierra

El uso de la tierra puede influenciar fuertemente el coeficiente de escorrentía. áreas urbanizadas pueden tener un coeficiente del 100%, La vegetación natural puede tener baja escorrentía. Laboreo, drenaje, intensidad de cultivos, plantación de bosques, etc., también tienen un efecto considerable en la escorrentía, Savenije (34).

3.1.11 Relaciones Entre Precipitación y Escorrentía

El flujo en un río está controlado primordialmente por variaciones en la precipitación y escorrentía y los métodos para distribuir la escorrentía a través del tiempo, son la base para una predicción eficaz de la operación de proyectos hidráulicos, para la extensión de registros de caudal en ríos con estaciones limnimétricas y para la estimación de caudales en ríos sin estaciones de medida. Se hace una distinción entre las relaciones precipitación-escorrentía de corta y larga duración. Las relaciones precipitación-escorrentía de corta duración describen el proceso de cómo la precipitación extrema se convierte en escorrentía directa. Esta produce flujos pico e hidrogramas que pueden usarse para el diseño de estructuras. La relación de larga duración pretende el establecimiento del rendimiento de la captación con propósitos de evaluación de recursos hídricos, Linsley (27).

3.1.12 Regiones Hidrogeológicas de Guatemala

En 1,991 la Dirección Técnica de Riego y Avenamiento, realizó un estudio hidrogeológico en el cual se identificaron de manera general cuatro distintas regiones hidrogeológicas en la república de Guatemala, las cuales son:

3.1.12.1 Llanuras Aluviales del Pacífico

Esta región hidrogeológica, según DIRYA (8), presenta las siguientes características, está constituida por depósitos aluviales cuaternarios los cuales se extienden por toda la costa del océano pacífico, a lo largo de una longitud de 260 Km y un ancho entre 10 y 60 Km, con una elevación máxima en la parte más ancha de aproximadamente de 300 m.s.n.m.. La zona de vida es zona cálida seca, con un bosque seco sub-tropical en la parte sur, con precipitaciones entre 500 y 1,000 mm anuales, y temperaturas medias anuales entre 19 y 26 °C. Y en la parte norte con una zona cálida húmeda, con bosque húmedo sub-tropical cálido, con precipitaciones de 1,200 y 2,000 mm anuales y con una temperatura promedio anual de 27 °C.

Está formada por depósitos aluviales cuaternarios, estos depósitos se encuentran en las llanuras del pacífico donde cubren prácticamente toda la región, con una superficie de

aproximadamente de 7,500 km². Los depósitos aluviales están formados por materiales de varios tamaños como gravas, arenas y arcillas, como producto de la erosión de los depósitos volcánicos cuaternarios y terciarios del altiplano. Los depósitos aluviales cuaternarios casi siempre constituyen un acuífero con porosidad primaria, con valores altos de almacenamiento (0.10 á 0.20) y transmisividad (150 hasta 2,000 m²/día) de muy buena productividad. En los Aluviones del Altiplano se ha efectuado registros de caudales de entre 3 y 58 L/s (promedio 30 l/s sobre 7 pozos), con capacidad específicas muy variables, de entre 0.1 y 5 L/s/m y niveles de bombeo entre 20 y 135 metros. La calidad de las aguas subterráneas es generalmente buena ya sea para agua potable o riego.

Se reportan algunas características químicas bastante aceptables, con valores de 150 á 250 ppm de sólidos disueltos; conductividad eléctrica entre 200 á 400 micromhos/cm y un pH entre 6 á 7, clasificándolas entre las clases C1-S1 y C2-S1. Así mismos se reporta una infiltración media de 282 mm de agua, lo que corresponde al 14% de las precipitaciones medias anuales, las que en esta zona son de 2,000 mm.

3.1.12.2 Altiplano Volcánico

Esta región se encuentra al norte de llanuras del pacífico y se extiende de oeste-noroeste hacia este-sureste, a lo largo de una franja de 350 Km. de largo. Esta área está constituida por rocas volcánicas terciarias y cuaternarias, principalmente lavas, tobas y cenizas, las cuales descansan sobre un basamento levantado, formado por rocas carbonatadas e ígneas, en el que se originaron grandes depresiones tectónicas que fueron rellenados por depósitos piroclásticos, las cuales son los valles de Quetzaltenango, Guatemala y Chimaltenango. Esta región presenta las siguientes características hidrogeológicas, se encuentran lavas basálticas, andesíticas y riolíticas y además materiales como arenas, bombas, escorias, cenizas y lahares provenientes de los conos volcánicos, el espesor de estos materiales puede ser muy variable y hasta un máximo de 500 m. Todo el conjunto de materiales constituyen a esta región como un acuífero muy permeable, con permeabilidad primaria y secundaria, además es un área de recarga muy importante.

En esta región hidrogeológica se encuentran varias unidades hidrogeológicas entre las que se encuentran las siguientes, depósitos piroclásticos cuaternarios, esta unidad presenta valores de transmisibilidad de 50 a 750 m²/día en el valle de Guatemala y entre 100 y 300 m²/día en el valle de Quetzaltenango. Valores de coeficiente de almacenamiento entre 0.01 y 0.03 m²/día. Lavas cuaternarias, en esta unidad en varias zonas del altiplano y reportados por el proyecto miniriego de DIGESA en pozos a profundidades de 150 m se encontraron caudales entre 10 y 45 L/s con capacidades específicas medias de 0.8 L/s/m y niveles de bombeo entre 30 y 90 m. Lavas y tobos terciarias, esta unidad presenta valores de transmisibilidad en varios pozos del valle de Guatemala de entre 500 y 5,000 m²/día, en el valle de Ipala los caudales varían entre 12 y 30 L/s con capacidades específicas de alrededor de 1 l/s/m y niveles de bombeo de entre 35 y 90 m y en el valle de Guatemala caudales de 4 á 15 l/s con capacidades específicas de 0.4 á 1.8 L/s/m y niveles de bombeo de entre 30 y 90 m. En cuanto a la calidad del agua según la conductividad eléctrica se reportan valores menores de 500 micromhol/cm, DIRYA (8).

3.1.12.3 Tierras Altas Cristalinas

Ubica esta región inmediatamente al norte del altiplano volcánico y está formado por una serie de cadenas montañosas orientadas de oeste hacia este-noreste, relacionada a los más importantes rasgos tectónicos regionales (fallas del Motagua y San Agustín), esta región presenta una longitud de aproximadamente 350 Km; comprendiendo varias cadenas montañosas como la sierra de Chuacús, la sierra de las Minas y la sierra del Merendón.

Esta región está constituida principalmente por rocas ígneas de diferente naturaleza, rocas metamórficas como mármol, esquistos, lutitas, gneis, serpentinas. Esta región presenta precipitaciones anuales entre 400 y 2,500 mm y temperaturas entre 15 y 26°C. Hidrogeológicamente todas estas rocas presentan un comportamiento muy similar, siendo prácticamente impermeables. Pudiéndose desarrollar condiciones locales de una modesta circulación y acumulación de aguas subterráneas, DIRYA (8).

3.1.12.4 Región Sedimentaria Septentrional

Esta región ocupa la restante parte de Guatemala al norte de la faja de rocas cristalinas y puede ser dividida en dos subregiones, tierras altas sedimentarias y la región sedimentaria del Petén.

Las tierras altas sedimentarias están definidas al norte por los márgenes de la cuenca del Petén, al sur por las fallas que la separan de las tierras altas cristalinas y se extiende desde la frontera con México en el oeste hacia las montañas de El Mico en el este. Está constituida por calizas cretácicas que presentan fenómenos de karstificación.

La cuenca sedimentaria del Petén se extiende al norte de las tierras altas sedimentarias, a altitudes entre 300 y 600 m.s.n.m. en la parte más meridional, está formada por calizas cretácicas y en la parte centro septentrional por rocas sedimentarias de origen marino, que van desde el cretácico hasta el Terciario y terminan con las grandes depósitos cuaternarios del río Chocop-San Pedro y del norte de Belice. El clima de toda esta región presenta precipitaciones pluviales entre 500 y 4,100 mm.

Toda esta región constituye un acuífero de buena potencialidad, si bien por las condiciones de permeabilidad por fracturación y circulación karstica, de muy difícil evaluación debido a variaciones amplísima de valores de coeficientes hidráulicos, reportándose algunos datos de permeabilidad de 1 – 2 m/día, con caudales específicos de unos 0.3 L/s/m. Al sur del lago de Petén Itzá donde se registraron permeabilidades de la caliza karstificada de 1 – 2 m/día, con caudales específicos de unos 0.3 L/s/m. Los datos de permeabilidad en las calizas fracturadas y karstificadas presentan rangos de variación, extremadamente grandes, entre 0.1 m/día hasta 4,000 y mas m/día. Los manantiales tienen una alta potencialidad presentándose caudales de varios L/s.

En la parte norte de la ciudad de Guatemala se han reportado valores de transmisividad en calizas muy variables, de 10 á 80, m²/día en calizas poco fracturadas, de 250 a 500 m²/día y hasta 1,000 á 3,000 m²/día en calizas muy fracturadas. Los caudales tan bien son muy variables, desde 5 á 20 L/s hasta 50 a 60 L/s DIRYA (8).

3.1.13 Identificación y Mapeo de Áreas de Recarga Hídrica

Para identificar las zonas de recarga hídrica a considerar en un análisis, se debe partir siempre de la ubicación y delimitación de una cuenca hidrográfica.

Se debe contar con por lo menos cuatro mapas fundamentales, que son:

- A. Mapa geológico, substrato de roca que recibe, almacena y conduce el agua.
- B. Mapa de serie de suelos o clasificación taxonómica de suelos.
- C. Mapa de uso de la tierra o de tipos de cobertura vegetal.
- D. Mapa de áreas de influencia de estaciones meteorológicas obtenido por el método de Thiessen o de Isoyetas.

3.1.13.1 Mapa Geológico

La geología está íntimamente relacionada con la evaluación de las aguas subterráneas, y que es en los materiales rocosos donde se realiza la circulación y almacenamiento de las mismas. Su localización y posterior aprovechamiento están íntimamente ligados al conocimiento de las rocas y estructuras en las que pueden encontradas aguas en cantidad y calidad suficientes, como para constituirse en una fuente de abastecimiento adecuado desde el punto de vista tectónico y económico, Herrera (14).

Existen mapas geológicos de la república de Guatemala a escala 1: 250,000 que cubren todo el territorio y en algunas partes a escala 1: 50,000, también se han realizado estudios particulares. Es importante contar con información detallada para poder definir de forma más precisa las unidades de interés hidrogeológicas, y determinar el comportamiento de las aguas subterráneas.

3.1.13.2 Mapa de Serie de Suelos o Clasificación Taxonómica

En Guatemala existen 2 fuentes principales de información en este aspecto. El mapa de series de suelos cuyos autores son Simmons, Tarano y Pinto, mapa que se encuentra a escala 1:250,000, creado en los años 1950, y el mapa de Clasificación Taxonómica de los suelos de la república de Guatemala, realizado por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, publicado en el año 2001, cuya escala de trabajo es 1:250,000.

El estudio de recarga hídrica normalmente se realiza a una escala grande (nivel de cuenca, subcuenca o microcuenca), y cartografía utilizada comúnmente está a escala 1:50,000, por lo que la clasificación de suelos que se utilice deberá ser adaptada a esta escala.

3.1.13.3 Mapa de Uso de la Tierra y de Cobertura

Se entiende por éste, cualquier tipo de actividad que se lleve a cabo en una área de terreno, ya sea de carácter natural (bosque, lagos etc), o inducida por el hombre (cultivos, construcciones, etc).

Esta actividad consiste en generar información geográfica y actualizada de mapas de los recursos físicos del área de estudio, por medio del uso de fuentes de información tales como las fotográficas aéreas e imágenes de satélite, de las cuales se extrae la mayor cantidad de datos con un grado alto de exactitud y veracidad que nos permiten proveer información básica sobre los recursos naturales y el uso actual del suelo.

Para generar el mapa es necesario obtener fotografías aéreas recientes del área de estudio, a escala conveniente (1:25,000 a 1:60,000), fotointerpretarlas y complementar la información en base a recorridos de campo.

El mapa de cobertura vegetal ayudará a definir la profundidad radicular y determinar la evapotranspiración a utilizar en el cálculo de recarga hídrica, así como la retención vegetal de agua de lluvia, que varía con el tipo de cobertura presente y el uso del suelo.

3.1.13.4 Mapa de Áreas de Influencia de las Estaciones Meteorológicas

Para obtener este mapa, se debe contar con la ubicación de las estaciones meteorológicas que se encuentran dentro o cerca del perímetro de la cuenca hidrográfica objeto de este estudio.

En estudios de balance hídrico es necesario conocer la precipitación media sobre una cuenca. Ya que la cantidad de lluvia que cae en un sitio dado difiere de la que cae en los alrededores aunque sea en sitios cercanos. Para cálculos ingenieriles, generalmente se utiliza lluvia media en una zona dada, que puede ser una región, una cuenca, un municipio, una finca, etc.

Se puede utilizar la metodología de polígonos de Thiessen o de Isoyetas para dividir la cuenca en las diferentes áreas con precipitaciones distintas.

3.1.14 Estratigrafía

La estratigrafía es la rama de la geología que trata de la formación, composición, distribución, cronología, clasificación, secuencia y correlación temporal de las rocas dispuestas en capas o estratos. La unidad principal es el estrato, que es la capa o unidad sedimentaria comprendida entre dos superficies paralelas que corresponden a discontinuidades o a bruscas variaciones petrográficas, que permiten separarla otras unidades de los materiales próximos. Herrera (14).

Es de gran importancia realizar un estudio de la geología y estratigrafía de la zona, es decir conocer la disposición de los diferentes materiales geológicos, ya que estos pueden afectar grandemente la cantidad de recarga hídrica, por ejemplo, puede existir una cuenca cuyas características climáticas, de suelo y de cobertura vegetal favorezcan la infiltración de agua en el suelo, pero si existe una capa de material impermeable, no permitirá el paso del agua a mayor profundidad, y se genera un flujo subsuperficial que alimentara un río o cauce cercano y no recargara un acuífero.

Lógicamente cabe pensar que los estratos no son infinitos, sino que poseen un principio y un fin. Estos extremos distales son conocidos geológicamente por piso y techo del estrato.

Estos dos conceptos, que corresponden a superficies aproximadamente paralelas y planas, son llamados planos o juntas de estratificación y representa en la estratigrafía de la región, una interrupción temporal en el proceso sedimentario que posteriormente se reanuda con depósitos del mismo o distinto tipo.

En la realidad se acostumbra hablar de base y techo de formaciones geológicas, es decir, de un conjunto de estratos de características litológicas y sedimentos muy parecidas (es decir de facies análogas de gran extensión), prescindiendo de las individuales que corresponderían a cada estrato.

El espesor o potencia de los mismos, es otro concepto importante. Se define como la mínima distancia que existe entre el piso y el techo del estrato, o conjunto de ellos que le corresponde lógicamente a la distancia media perpendicularmente entre ambos. Ello es más importante en los estratos ligeramente inclinados, cuya apreciación, desde la superficie puede dar lugar a errores de consideración, en relación con el espesor aparente de los mismos.

3.1.14.1 Columnas Estratigráficas

Los estratos o capas no se presentan aislados individualmente, sino formando parte de un conjunto de mayor o menor extensión y espesor, que recibe el nombre de serie o columna estratigráfica, ya que gráficamente suelen representarse en forma de columnas.

Cuando se estudia hidrogeológicamente un área determinada, el trabajo se realiza analizando las rocas de los afloramientos (lugares donde está expuesta la roca a la superficie terrestre), que son limitados en número y extensión. Al hacer columnas estratigráficas del afloramiento, se puede unir o comparar con los registros de las perforaciones (columna litológica) más o menos alejadas, que puedan alcanzar distinta profundidad.

Además se pueden relacionar sondeos de registros geofísicos, especialmente de registros eléctricos (basados en diferencia de resistividad de las rocas), debido a su economía en la exploración de las aguas subterráneas, comparativamente con la perforación de terrenos para extraer núcleos de roca. Sin embargo, hay que tener en cuenta que se pueden presentar cambios

de facies, fenómeno muy frecuente y que consiste en “la variación de composición litológica de estratos de la misma edad geológica”, es decir, estratos sincrónicos. Algo importante a esto, es tener claro que a veces, las unidades se pueden engrosar y adelgazar en algunas zonas.

Hay que tener presente que para un estudio de aguas subterráneas, es importante definir unidades hidrogeológicas, que son unidades litológicas con características similares en permeabilidad y porosidad. Herrera (14).

3.1.15 Disponibilidad de Agua

Según Bandes (2), en cualquier proyecto hídrico es importante realizar una evaluación y predicción en la disponibilidad del agua para que sea comparada con la demanda, estos criterios son:

- A. Volumen escurrido: se refiere al volumen de escorrentía total.
- B. Volumen aprovechable potencial: parte del volumen escurrido que de acuerdo con el conocimiento general del país, en lo climatológico, topográfico y geológico principalmente, se estima podría llegar a ser aprovechado a un futuro.
- C. Volumen aprovechable factible: Es aquella parte del volumen escurrido calculado en base al conocimiento actual de las posibilidades físicas con que cuenta el país de aprovechar los recursos hidráulicos y con los medios de aprovechamiento hoy disponibles.
- D. Volumen aprovechable efectivo: Es aquella parte del volumen escurrido que está siendo aprovechada mediante obras físicas construidas o que será aprovechada por obras cuya construcción ha sido decidida o propuesta.

3.1.16 Orígenes del Agua Subterránea

Linsley (27), indica que gran parte de las aguas subterráneas provienen de las precipitaciones pluviales o sea el agua meteórica. Esta llega a formar parte del agua subterránea por infiltración y percolación de corrientes y lagos. El proceso más efectivo en la recarga del agua subterránea es la percolación directa, especialmente en los suelos con alta permeabilidad o donde la capa freática está bastante cerca de la superficie del terreno.

3.1.17 Descarga de Aguas Subterráneas

Una cuenca alcanza su estado de equilibrio luego que descarga el excedente de agua a través de manantiales proveniente de la infiltración o recarga..

A los ríos que interceptan la capa freática y reciben agua subterránea se les llama ríos de corrientes efluentes, por el contrario a los ríos que infiltran o aportan cierta cantidad de agua hacia la capa freática se les llama corrientes influentes.

Los manantiales o nacimientos de agua se forman debido a que el acuífero en ciertos puntos sale a la superficie de la tierra, Linsley (27).

3.2 MARCO REFERENCIAL

3.2.1 Características Generales de la Superficie Geográfica

3.2.1.1 Ubicación Geográfica

La subcuenca del Río Pinula se localiza dentro y al este de la cuenca del Lago de Amatitlán, la cual pertenece a la vertiente del Océano Pacífico, (Figura 1 y 2). Se ubica en las hojas topográficas escala 1:50,000 2959-I, Ciudad de Guatemala; y hoja 2159-IV, San José Pinula. (IGN, 1,983 y 1,989). (Figura 3).

Cuadro 1 Coordenadas subcuenca del río Pinula.

	GEOGRAFICAS	UTM
Latitud norte	14° 35' 00"	1,614,000
Latitud norte	14° 31' 22"	1,607,000
Longitud oeste	90° 31' 20"	767,000
Longitud oeste	90° 27' 18"	774,300

3.2.1.2 Limites

El área de estudio de la subcuenca del Río Pinula incluye los Municipios de Santa Catarina Pinula y Guatemala, incluye lugares conocidas como 20 calle de la zona 10, Santa Catarina Pinula, El Pueblito, finca San Miguel Buena Vista, Puerta Parada, Don Justo, El Canchón, entre otras,(Figura 4), y colinda con las siguientes divisiones políticas y naturales, cuadro 2.

Cuadro 2 Colindancias naturales y políticas, subcuenca del río Pinula.

LIMITE	SUBCUENCA	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO
Norte	Río Las Vacas	Guatemala	Guatemala
Sur	Río Las Minas	Sta. Catarina Pinula y Villa Canales	Guatemala
Este	Ríos Las Cañas	San José Pinula y Fraijanes	Guatemala
Oeste	Río Villa Lobos	Guatemala	Guatemala

3.2.1.3 Superficie Geográfica.

El área de la subcuenca del Río Pinula jurisdicción de Santa Catarina Pinula, comprende 17.60 kilómetros cuadrados, constituyendo aproximadamente el 4.63 % de la extensión total de la cuenca del Lago de Amatitlán. (Figura 2).

3.2.1.4 Población

Dentro de la subcuenca se encuentran 89 poblados de diferentes categorías, con una población de 23,124 habitantes según datos geoespaciales proporcionados por el INE (22), del censo poblacional del año 2,002.



Figura 1 Ubicación cuenca del Lago de Amatitlán

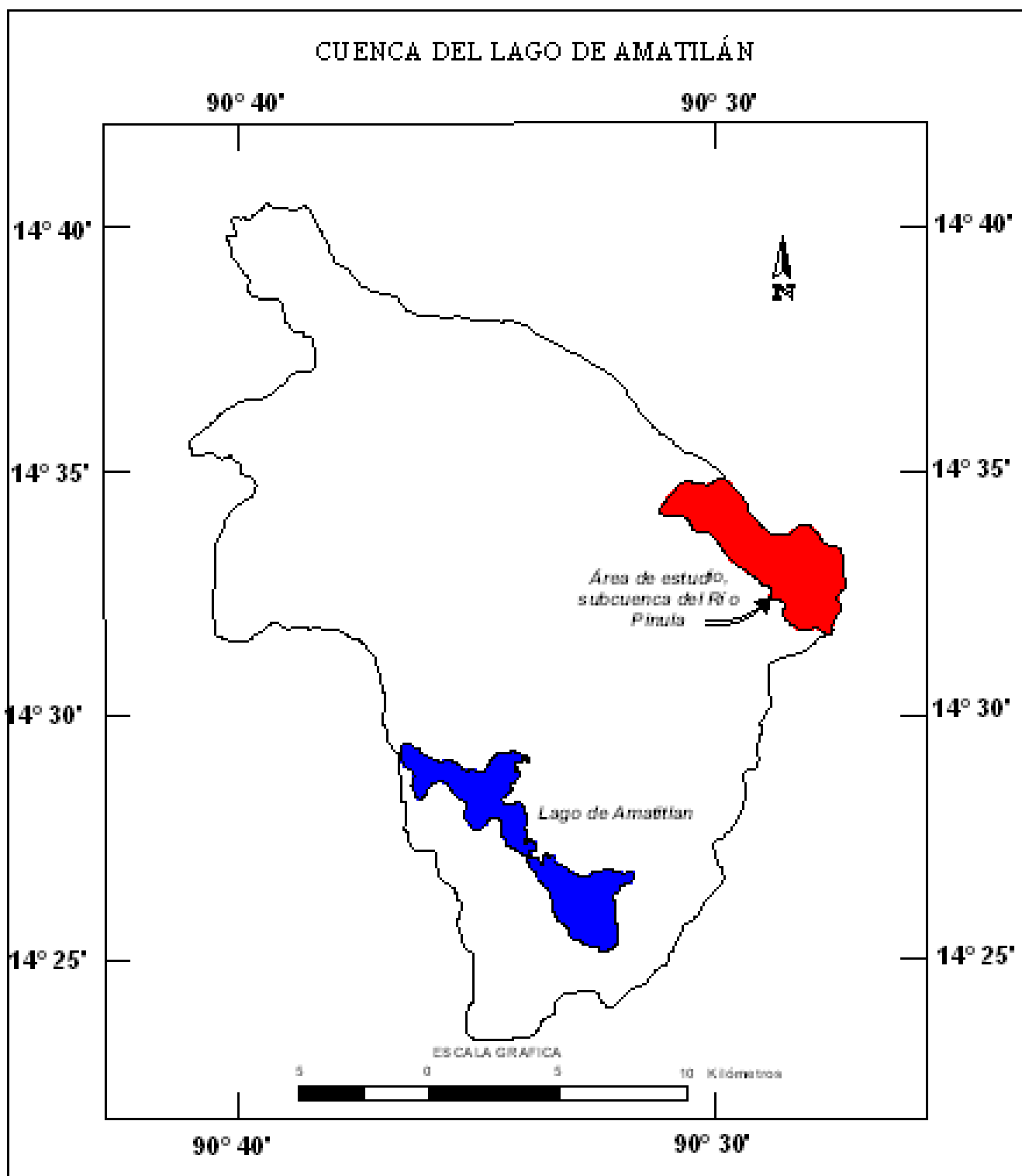


Figura 2 Ubicación subcuenca del río Pinula, jurisdicción de Santa Catarina Pinula



Figura 3 Ubicación en hoja topográfica subcuena del río Pinula, jurisdicción de Santa Catarina Pinula.

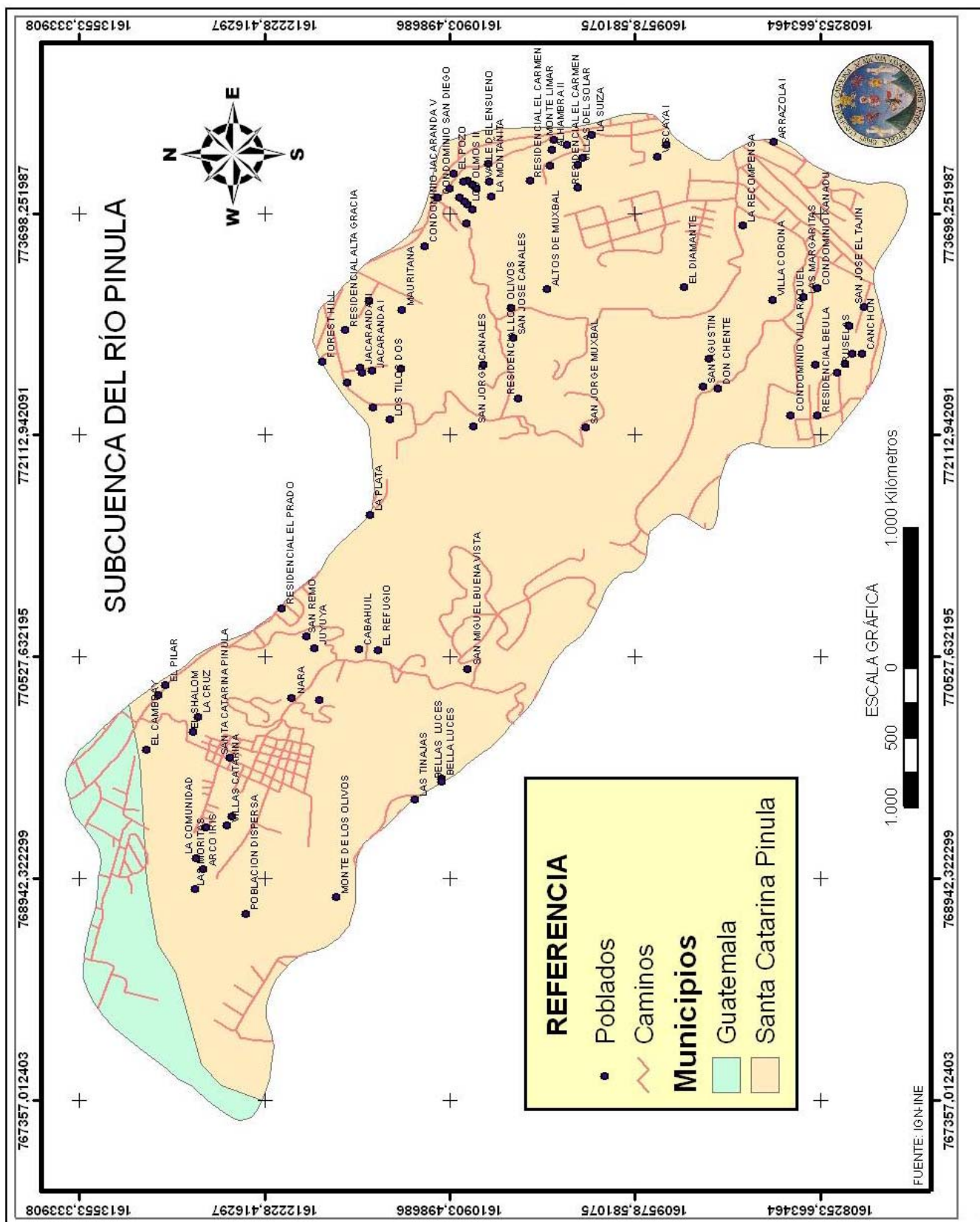


Figura 4 Mapa de división administrativa y centros poblados.

3.2.1 Vías de Comunicación Terrestres

La subcuenca tiene varias vías de comunicación terrestres con revestimiento de asfalto, siendo la principal la carretera CA-1 que es transitable todo el año, de afirmado sólido de dos ó más vías. Se ubica en el Municipio de Santa Catarina Pinula, forma parte del límite de la subcuenca del Río Pinula. Tiene conexión con los municipios de San José Pinula, Fraijanes y la ciudad Capital.

Además posee vías alternas asfaltadas que comunican entre la carretera CA-1 – Muxbal – 20 calle de la zona 10, Ciudad Capital – Aldea El Pueblito y el Casco Urbano de Sta. Catartina Pinula. Posee otras vías de comunicación que conecta la Aldea El Pueblito con la Aldea El Porvenir; y El pueblito con Boca del Monte, todas con revestimiento de asfalto y pavimento. Se encuentran también caminos de terracería y con diferentes tipos de revestimiento que comunica con las aldeas, caseríos, colonias y fincas comprendidas dentro de la cuenca, (Figura 3).

3.2.3 Descripción Físico-natural del Área de estudio

3.2.3.1 Suelo

Según la clasificación Simmons et. al. Simmons (35), en la cuenca del río Pinula, existen las siguientes series de suelos: (Figura 5).

A. Morán (Mr):

Ocupan la parte alta y media de la subcuenca cubriendo un área de 11 km². Se caracterizan por relieves de inclinados a ondulados. Las pendientes varían del 5 – 15 % localizados a altitudes que van de medianas a superiores en la parte sur central de Guatemala.

Los suelos Morán son profundos, bien drenados, y desarrollados sobre ceniza volcánica pomácea en un clima húmedo-seco. Se asemejan a los suelos Guatemala y Cauqué, siendo más rojos que éstos.

Perfil del suelo: Morán Franco Arcilloso

- Ho. A El suelo superficial, a una profundidad de 20 á 30 cm., es franco arcilloso friable de color café muy oscuro y cuando está húmedo es café rojizo oscuro. El contenido de materia orgánica es de alrededor del 4 %. La estructura es granular. La reacción es de mediana a ligeramente ácida, pH alrededor de 6.0.
- Ho. AB El suelo adyacente al superficial, a una profundidad de alrededor de 50 cm, es franco arcilloso friable de color café oscuro a café rojizo oscuro. En muchos lugares se encuentran escamas pequeñas de mica. La reacción es de mediana a ligeramente ácida, pH alrededor de 6.0.
- Ho. B El subsuelo, a una profundidad de alrededor de 100 cm., es arcilla café rojiza, la estructura es de fuertemente cúbica a prismática. Es duro cuando está seco y pegajoso cuando esta húmedo. La reacción es de ligeramente ácida a neutra, 6.5.
- Ho. C A una profundidad de 150 cm. ó más, se extiende una capa de color café amarillenta de ceniza volcánica pomácea, de descompuesta a parcialmente descompuesta que contiene muchos fragmentos de poma. La reacción es de ligeramente ácida a neutra, pH 6.0 á 6.5.
- Ho. Rocoso El substrato es piedra pómez blanca débilmente cementada. Casi todos los fragmentos son menores de 2 cm. de diámetro, pero se encuentran porciones grandes.

La profundidad del suelo varía hasta dos metros y en algunos lugares aparece un suelo fósil debajo de las capas 3 ó 4. El horizonte superficial ha sido lavado por la erosión y el subsuelo está expuesto en algunos lugares.

B. Áreas Fragosas (AF):

Es una clase de terreno donde barrancas de ladera perpendiculares de casi 100 metros de profundidad, cortan la planicie de Guatemala y otros cercanos, dejando inaccesibles unas partes potenciales arables. Estos suelos se encuentran desde la parte media a baja de la subcuenca que abarcan un área de 11 km².

C. Guatemala (Gt):

Estos suelos se encuentran en la parte norte y baja de la subcuenca y prácticamente se encuentran impermeabilizados por zonas urbanas. Estos cuentan con un área de 1.7 km².

Son suelos profundos, bien drenados, desarrollados sobre ceniza volcánica débilmente cementadas, en un clima húmedo y seco. Ocupan un relieve que es casi plano, con algunas partes onduladas o suavemente onduladas.

Los suelos Guatemala están asociados con los suelos Cauqué, pero se distinguen de éstos porque se encuentran en planicies y los otros, en relieve de ondulado a inclinado. Además, porque los suelos Guatemala son más profundos. La profundidad del suelo varía según el grado de erosión al cual ha estado sujeto durante su desarrollo. Incluidos están unos suelos desarrollados sobre superficies más antiguas de terrenos que emergen a través del material acumulado más reciente; algunos están sobre materiales volcánicos y otros sobre materiales sedimentarios como caliza y esquisto arcilloso.

Perfil del suelo: Guatemala franco arcilloso

- Ho. A El suelo superficial, a una profundidad alrededor de 25 cm, es franco arcilloso, café muy oscuro. Tiene un contenido de alrededor del 4 % de materia orgánica. La estructura granular está bien desarrollada en algunos lugares pero en la mayor parte se ha destruido a causa de cultivos y exposición al sol, de modo que se vuelve duro cuando está seco y es plástico cuando está húmedo. Es evidente una estructura granular casi cúbica. Grietas de 1 á 2 cm. de ancho y de más de 30 cm. de profundidad se desarrollan durante la estación seca. La reacción es de mediana a ligeramente ácida, pH alrededor de 6.0.
- Ho. AB El suelo adyacente al superficial, a una profundidad de alrededor de 40 cm., es franco arcilloso o arcilloso de café a café oscura. El contenido de materia orgánica es bajo (0.8 %). Se ha desarrollado una estructura cúbica, siendo los agregados angulares de 3 á 5 mm de lado. Los planos de clivaje verticales son más definidos que los horizontales dando apariencia de una macro-estructura prismática. Es duro

cuando está seco y plástico cuando esta húmedo. La reacción es ligeramente ácida, de pH 6.0 a 6.5.

- Ho. B el suelo, a una profundidad alrededor de 1 m., es arcilla café rojiza. La estructura micro-cúbica y la estructura macro-prismática están desarrolladas hasta cierto grado. Los agregados prismáticos son de 2 á 4 mm de lado y los prismas tienen un espesor de alrededor de 10 cm. Es friable bajo condiciones bajo condiciones óptimas, pero es duro cuando está seco y plástico cuando esta húmedo. La reacción es ligeramente ácida, pH de 6.0 á 6.5.
- Ho. C El subsuelo más profundo en la parte superior del sustrato es franco arcilloso o franco arcilloso arenoso café amarillento y cementado. Este material es masivo en la mayoría de lugares y se conoce localmente como talpetate. La reacción es ligeramente ácida, pH de 6.0 a 6.5.
- Ho. Rocoso El sustrato es de piedra pómez gruesa cementada débilmente. Casi todos los fragmentos tienen un grueso de alrededor de 1 cm. Se excava fácilmente y las paredes verticales se sostienen por años sin soporte alguno. Una separación en tamaño de partículas tuvo lugar, asumiéndose por esto, que estos valles fueron rellenos durante un periodo de actividad volcánica intensa acompañada de fuertes lluvias, lo que dio por resultado la formación de una masa semifluida, pero lo suficientemente consistente como para haber sido contenida en un área restringida.

3.2.3.2 Zonas de Vida

De acuerdo a la clasificación climática de Holdridge, citado por Illescas (21), el área se encuentra ubicada dentro de dos zonas de vida que son:

A. Bosque Húmedo Subtropical Templado (bh-s(t))

Esta zona de vida se presenta en una forma muy extensa en la subcuenca del Río Pinula, (Figura 6), y tiene varias asociaciones edáficas diferentes y se presenta en los municipios de Guatemala, Fraijanes y Santa Catarina Pinula.

El periodo en que las lluvias son más frecuentes y corresponden a los meses de mayo a noviembre, variando en intensidad según la situación orográfica que ocupa las áreas de la zona.

Se caracteriza por tener una relación de evapotranspiración potencial entre 1.00 – 0.50 y biotemperatura media anual entre 20 y 26 °C. Así como la precipitación oscila entre 1,000 a 2,000 milímetros; precipitación promedio entre 1,100 a 1,349 milímetros.

Los terrenos correspondientes a esta zona de vida son de relieve ondulado a accidentado y escarpado.

La vegetación natural está constituida especialmente por la siguientes especies: *Pinus oocarpa*, *Ficus spp*, *Quercus sp*, *Eritrina spp*, *Curatella americana*, que son las especies más indicadoras de esta zona.

B. Bosque Humedo Montano Bajo (bh-MB):

Dentro de la subcuenca esta zona se encuentra ubicada en la parte alta y media. (Figura 6)

El patrón de lluvias varía entre 1,057 mm y 1,588 mm, con un promedio de 1,344 mm de precipitación anual. Las biotemperaturas oscilan entre 15 a 23 °C. La evapotranspiración potencial puede estimarse en promedio de 0.75.

La topografía en general es plana y está dedicada a uso urbano y pastos naturales, sin embargo las parte accidentadas están cubiertas de vegetación.

Entre la vegetación típica o natural está representada por: *Quercus spp*, *Pinus pseudostrobus*, y *Pinus montezumae*, pueden observarse *Juniperos*, *Ostrya spp*.

3.2.4 Hipsometría

La subcuenca presenta una altura máxima de 2,000 metros sobre el nivel del mar, y su punto más bajo (punto de aforo) a 1,340 msnm, IGN (18 y 20). La diferencia de altura entre la altura máxima y el punto de aforo, es determinante en el tipo de y distribución del drenaje, además influye en el arrastre de sedimentos. (Figura 7).

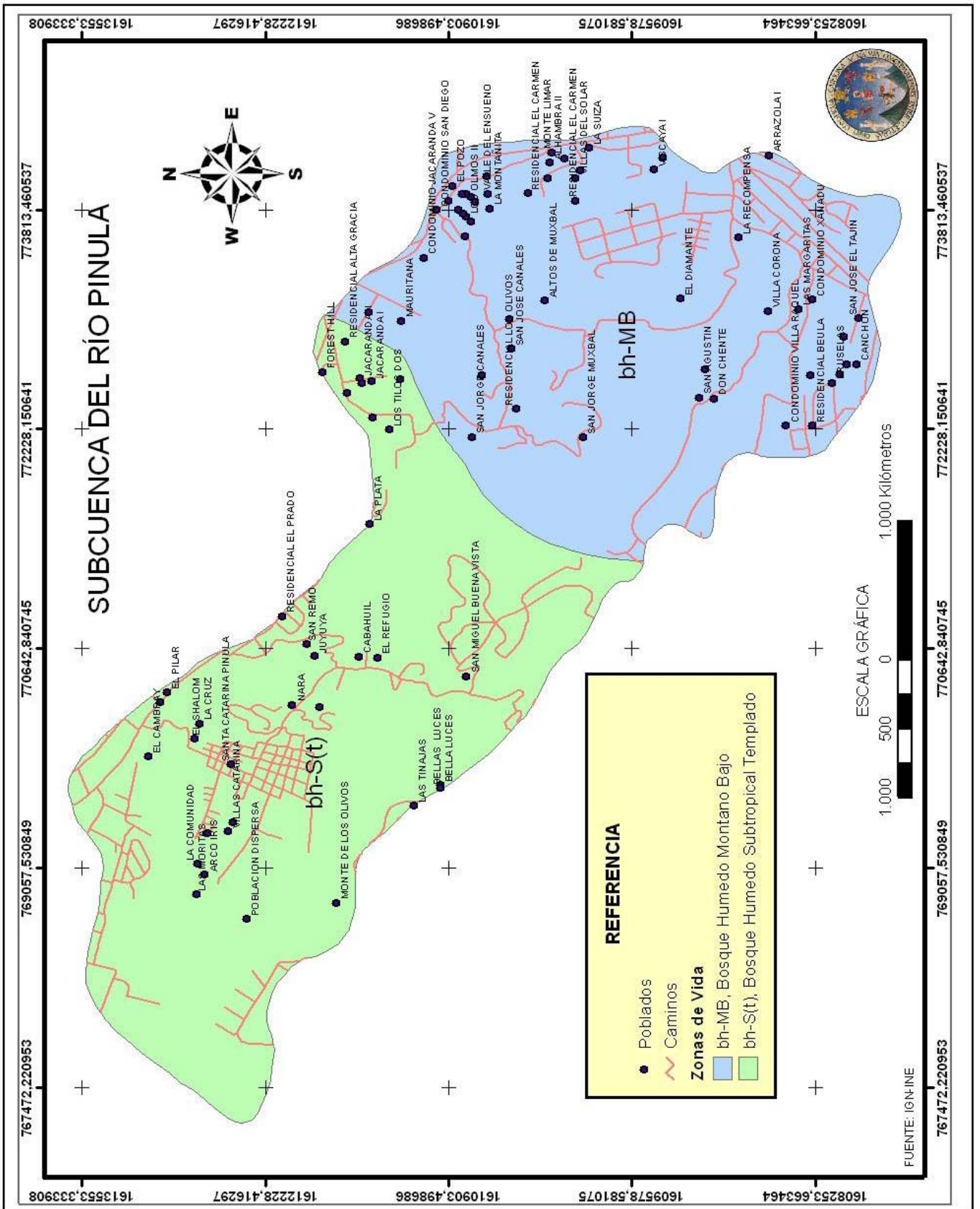


Figura 6 Mapa de zonas de vida.

3.2.5 Hidrografía

Con base a los mapas topográficos 2059 – I, Ciudad de Guatemala; y mapa 2159 – IV, San José Pinula, IGN,(18 y 20), se estableció que el río Pinula abarca toda la subcuenca y se origina en la aldea El Canchón, dentro de la finca y lotificación Los Diamantes, rodea a la aldea El Pueblito y el Casco urbano de Sta. Catarina Pinula, por la parte norte.

El río Panaseque se origina desde el Cerro Guachisote, rodeando la aldea El Pueblito y el casco urbano de Santa Catarina Pinula por la parte sur. Este se une con el río Pinula, pasando cerca de la aldea Cuchilla del Carmen, llegando al punto de aforo del área de estudio donde se encuentra la represa de EMPAGUA, Estación Hincapié, ubicada en la finca Shangrila al final de la avenida Hincapié. (Figura 3 y 7).

Existe el Sistema de Abastecimiento de la Planta de Tratamiento de Agua potable el Cambray, la cual, se encuentra ubicada en el Km. 7 Carretera a Santa Catarina Pinula, su producción diaria aproximadamente es de 19,500 m³/día (225 cm³/s).

De origen colonial el sistema El Cambray es el más antiguo de la ciudad de Guatemala, pues se construyó precisamente cuando la Capitanía General se trasladó al Valle de la Ermita (1776) y cuyos vestigios aún se observan en el llamado Acueducto de Pinula (zonas 13 y 14) hoy en día está considerado Patrimonio Histórico Nacional. En 1963 se construyó el tanque circular de aguas claras y se completó el sistema con la planta de bombeo Hincapié (1968) y la perforación del pozo del mismo nombre (1970). Posteriormente, en 1999, la planta de tratamiento El Cambray fue rehabilitado con el apoyo técnico y financiero de la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA), ERIS (9).

Esta planta abastece la demanda de agua de la zona 14 y parte de la zona 10 con un promedio anual de 4,589,156.55 m³ según datos de años de 1996 a 2005

Se alimenta de una toma ubicada en las cercanías de la planta. Consta también de un pozo que descarga en el sistema de floculación.

Actualmente el sistema El Cambray consta de:

1. Presa de captación del río Pinula
2. Estación de bombeo Hincapié, que incluye una presa de captación, un tanque de alimentación, desarenador y 4 unidades de bombeo, 2 de 200 hp y 2 de 250 hp.

3.2.6 Hidrología

Según isoyetas del período que comprende de la década de 1976-1986, la precipitación media registrada fue de 1,150 mm anuales y de acuerdo al mapa de regiones hidrográficas e isoyetas del departamento de Guatemala. Las precipitaciones anuales oscilan entre 1,000 y 1,300 mm anuales, Illescas (21).

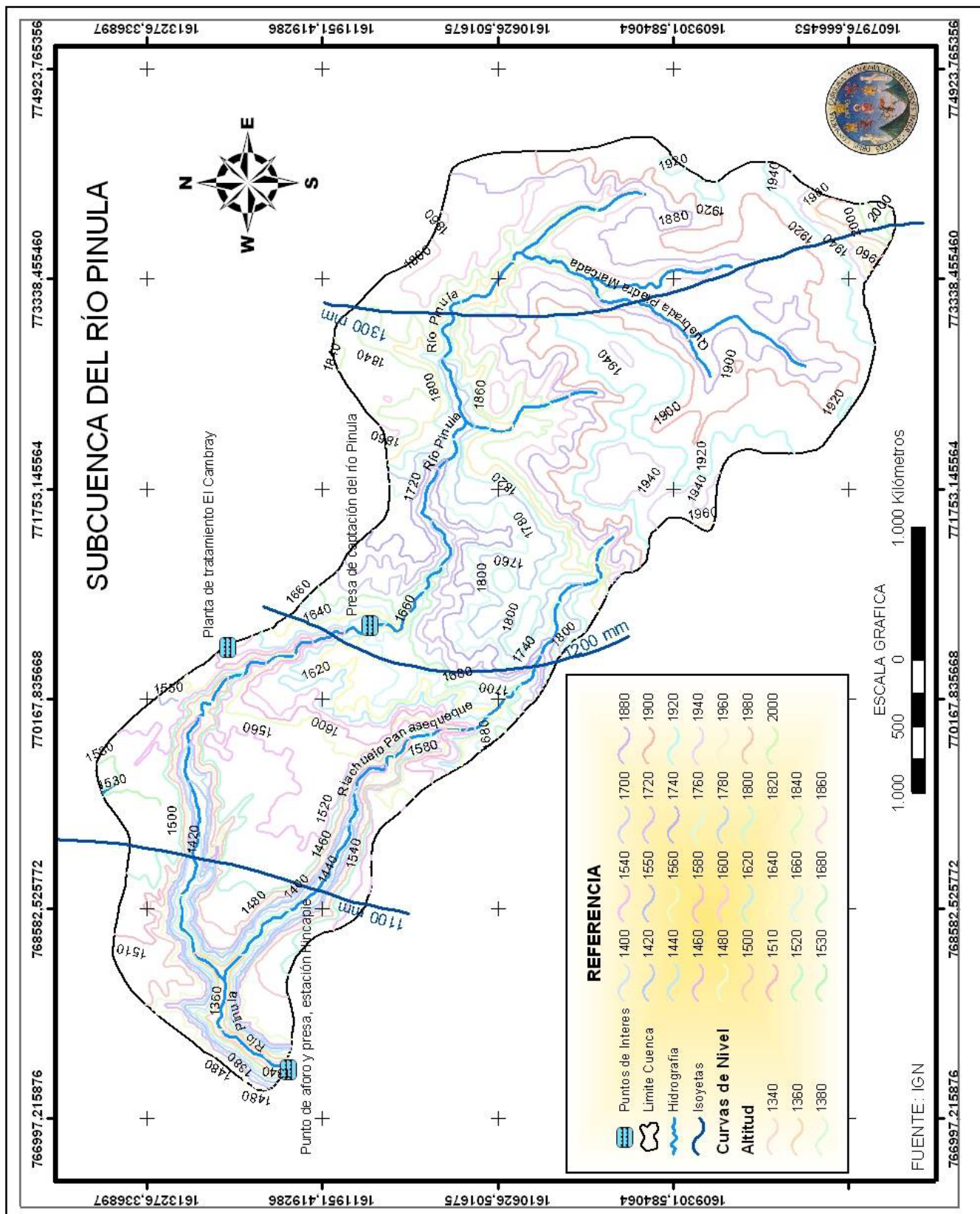


Figura 7 Mapa hipsométrico e hidrográfico.

3.2.7 Fisiografía

El análisis de la Fisiografía hace la relación de la Geomorfología (origen y desarrollo de la topografía de los continentes), y el patrón de distribución de los suelos (material que lo origina) en el área de estudio.

La evolución de los suelos está íntimamente relacionada a la diversidad de formas de la tierra, estas son debidas a los complejos procesos desarrollados en condiciones diversas, de temperatura, precipitación, pendiente, geología, uso de la tierra y otros. Estos son elementos determinantes en los procesos que definen la fisiografía de un área determinada.

La subcuenca se encuentra ubicada en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre, que incluye el gran paisaje de las Tierras Altas Cristalinas, se encuentran valles con terrazas planas y terrazas de ligera a moderadamente planas; cañones en el cauce principal del río Pinula; y montañas moderadamente escarpadas y fuertemente escarpadas, Illescas (21), (Figura 8).

3.2.8 Geología

La geología del área de estudio se presenta en el Mapa Geológico, en el cual se incluye en forma general a las unidades geológicas de interés hidrogeológico. El basamento está constituido por flujos de lavas andesíticas del Terciario, que constituye en gran porcentaje la zona saturada, mientras que la zona no saturada está constituida principalmente por piroclastos del Cuaternario.

En la parte sur del área del río Villalobos, los materiales sedimentarios constituidos por sedimentos fluvio-lacustres con tephras y diamictones pomáceos, así como, los aluviones del río, están saturados. De manera parecida, en las partes este y oeste de los ríos Pinula y Villalobos respectivamente, los sedimentos recientes se encuentran saturados.

Del periodo Terciario se encuentran las lavas andesitas-basálticas (Tab), que son de los tipos de lava más comunes en Guatemala, de color gris oscuro y de textura porfirítica, la mayoría de las veces hipocristalinas, macizas o vacuolares y escoriáceas.

Otra formación del Terciario son las Tobas (Tql), que se caracterizan por depósitos piroclásticos subáereo en frío que según su granulometría puede ser cinerítica, lapillica o blocosa. A veces se llama Tephra o depósito de caída (materiales transportados directamente por el aire, incluyendo ceniza, polvo volcánico, lapilli, escoria, pómez, bombas y bloques). Si contiene pómez su origen puede ser similar al de la ignimbrita y aglomerado. (Figura 9).

En el área de estudio se encuentran otras formaciones geológicas recientes del periodo Cuaternario, se localizan sedimentos volcánicos; uno compuesto principalmente de piedra pómez de diferente graduación, color y grado de consolidación con paleosuelos intercalados (Qt) y el otro de piedra pómez con intercalaciones masivas de pómez mal clasificado y sedimentos fluvio lacustres (Qpal) y aluviones (Qal).

3.2.8.1 Lavas Volcánicas del Terciario (Tva)

Coladas de lava de variada composición mineralógica, forman una gran cubierta sobre los depósitos cretácicos. Estas lavas provienen de zonas de profunda fisuración. Condiciones de enfriamiento brusco, y la pronunciada actividad tectónica después de los derrames determinaron una intensa fracturación según los planos de condiciones de esfuerzos críticos; en el mapa geológico se pueden apreciar estas agrupaciones geológicas y las diferentes fallas existentes en el área de estudio, Herrera (14).

Estos materiales son de color gris, de textura afanítica porfiritica, con plagioclasias, piroxenos, hornblenda, olivino y biotita.

La importancia de estos materiales es que contribuyen al acuífero principal de la zona formando un acuífero fracturado.

Se pueden encontrar otras formaciones geológicas en menor escala en el área de estudio tales como Trw (toba dacítica), Tql (cuarzo latita-toba soldada) y Trs (toba soldada riolítica, sedimentos volcánicos). (Figura 9).

3.2.8.2 Sedimentos Fluvio – Lacustres (Qpal)

Dentro de los depósitos de flujo de caída de ceniza se encuentran esparcidos dentro de una extensa zona, especialmente al sur de la divisoria continental, sedimentos aluviales de muy variada importancia; los más antiguos alcanzan en algunos afloramientos profundidades máximas de unos 30 mts., tanto del tipo fluvial como lacustre. Los sedimentos lacustres pueden actuar como límites impermeables.

Los aluviones más importantes por su magnitud son los de origen más recientes, constituyendo localmente unidades hidrogeológicas de gran interés. El régimen erosivo, transporte, carácter de las corrientes y naturaleza litológica de las formaciones geológicas, han condicionado la estructura granulométrica de los aluviones, su composición y granulometría. El material de relleno es de composición variada: grandes bloques, gravas y arenas de basalto, andesita, riolitas, etc., así como arenas y limos de pómez y arcillas. Los aluviones más importantes tienen profundidades máximas de 40 – 80 m, en el valle aluvial Pinula, Herrera (14).

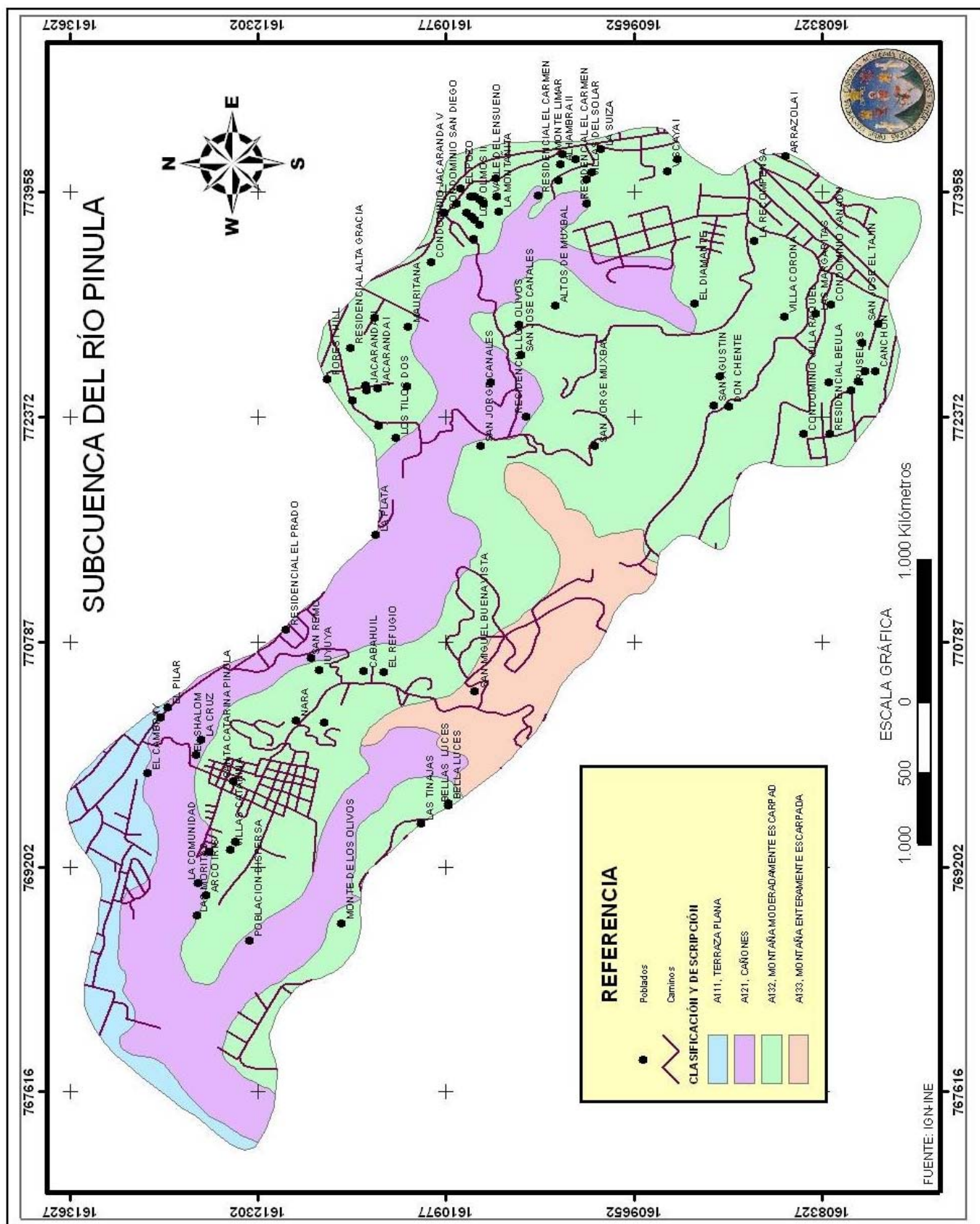


Figura 8 Mapa fisiográfico

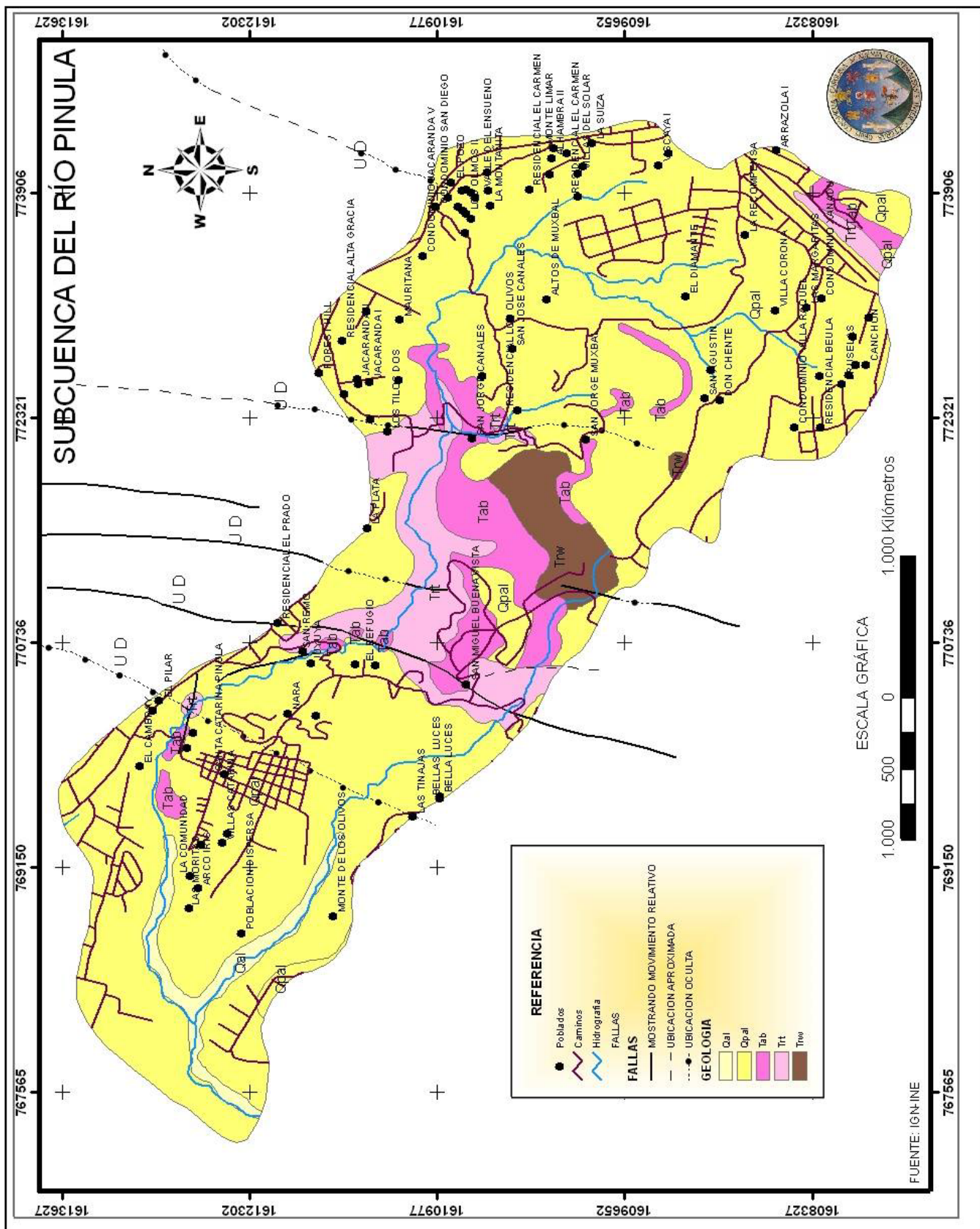


Figura 9 Mapa geológico

4. OBJETIVOS

4.1 GENERAL

Estudiar la hidrogeología y caracterizar las zonas de recarga hídrica de la subcuenca del Río Pinula, jurisdicción del Municipio de Santa Catarina Pinula y que sirva de base en la formulación de un plan de manejo de los recursos naturales del área.

4.2 ESPECIFICOS

- 4.2.1 Analizar la geología de la subcuenca, con el fin de definir las unidades hidrogeológicas, litológicas y la estratigrafía.
- 4.2.2 Caracterizar y evaluar los factores meteorológicos y de suelo, para estimar la recarga del acuífero por medio del balance hídrico.
- 4.2.3 Proponer lineamientos de manejo y uso sostenible del recurso hídrico en cuanto a conservación y explotación.
- 4.2.4 Identificar zonas potenciales de recarga hídrica para la futura formulación, planificación y ejecución de planes de manejo de los recursos naturales de la subcuenca.

5. METODOLOGIA

5.1 Delimitación del Área de Estudio

Con ayuda de los mapas cartográficos Guatemala y San José Pinula, escala 1:50,000, modelos de elevación digital (utilizando curvas de nivel a cada 10 mts), y ortofotos a escala 1:10,000 se delimitó el área de la subcuenca del Río Pinula, jurisdicción de Santa Catarina Pinula.

5.2 Geología

Se realizó la fotointerpretación de la subcuenca y lugares aledaños, donde se definieron contactos geológicos entre unidades superficiales y lineamientos de fallas, utilizando los mapas geológicos existentes de la zona de estudio a escala 1: 50,000.

Se realizó el reconocimiento geológico de campo, por medio de recorridos de caminos, veredas, ríos, quebradas y otros accidentes geográficos, para determinar principales unidades de rocas.

Por medio del estudio litológico en cortes de taludes de ríos y en pozos perforados dentro de la subcuenca, se correlaciono la estratigráfica.

Se elaboraron los perfiles hidrogeológicos de acuerdo a la información de afloramientos de rocas y de litología de pozos.

5.3 Hidrogeología

5.3.1 Características del Acuífero

se definieron de acuerdo a la información de geología y estratigrafía, pero principalmente de la información recabada de los pozos en el área de estudio, es decir, niveles estáticos, litología, caudales y profundidad de perforación.

5.3.1.1 Transmisividad

para calcularla se usará la prueba de bombeo, la cual ya fue realizada por Daho Pozos en los diferentes pozos que se incluyen en el área de estudio. Las pruebas incluyen tiempo y abatimiento, caudal constante en L/s, revestimiento, diámetro, profundidad total, columna de agua y nivel estático.

La transmisividad se calcula a través de los métodos de Jacob y Theis. El método de Jacob utiliza la relación siguiente:

$$T = \frac{2.3 Q}{4\pi \Delta s}$$

Donde: T, transmisividad (m²/día)
 Q, caudal de bombeo (m³/día)
 Δs, pendiente de la recta como la diferencia de abatimiento (m) entre dos valores de tiempo. Cuya relación sea de 10 en la escala X (un ciclo logarítmico).
 π, número Pi (3.1416)

El método de Theis, utiliza la curva patrón la cual se sobrepone sobre la curva de tiempo - abatimiento dada por la prueba de bombeo y utiliza la siguiente relación:

$$T = \frac{QW(u)}{4\pi \cdot s}$$

Donde: Q, caudal constante de bombeo (m³/día)
 W(u), función u del pozo, determinada por una integral exponencial.
 π , número Pi (3.1416)
 s, abatimiento (m)

5.3.1.2 Coeficiente de Almacenamiento.

Para este se utiliza el método de Jacob (1,946), el cual utiliza la siguiente fórmula:

$$S = 2.25 T t_0/r^2$$

Donde: T, transmisividad (m²/día)
 T₀, valor que se obtiene al intersectar la recta de abatimiento – tiempo en el eje de abatimiento igual a cero en días.
 r, distancia del pozo de observación al pozo de bombeo (m).

Este valor es adimensional y muestra si el acuífero es freático o confinado.

5.3.1.3 Niveles y Movimientos de las Aguas Subterráneas.

Estos fueron calculados y representados a través del cálculo de isofreáticas, utilizando datos de niveles estáticos en todos los pozos encontrados en el área de estudio y su posterior correlación. Las isofreáticas o líneas de igual nivel freático se calcularon en metros sobre el nivel del mar.

5.4 Hidrología Superficial

5.4.1 Aforo de Ríos

El método utilizado fue el de sección-velocidad, calculando la velocidad con flotador. Este método consiste en determinar por separado la sección transversal del cauce del río de acuerdo a las distancias recomendadas según el ancho del cauce, de tal manera que el caudal estará dado por:

$$Q = \text{Área} \times \text{Velocidad media, en m}^3/\text{seg. o lts}/\text{seg.}$$

$$\text{Así: Área} = \text{Ancho (canal)} \times \text{Altura (película de agua)}$$

La velocidad se obtuvo tomando el tiempo que tarda en recorrer un tramo de longitud conocida, siendo la velocidad el cociente de la distancia recorrida por el flotador entre el tiempo empleado en recorrerla, Herrera (11).

En la planta de EMPAGUA, Hincapié, la cual es el punto de aforo del área de estudio, se realiza el bombeo de las aguas que convergen en este punto hacia la planta de tratamiento el Cambray, para lo cual se interrumpe el paso de agua desviándola a un tanque de captación de donde se bombea y se llevan los registros de caudal en metros m³/día. De lo cual se cuenta con registros desde hace varios años. Además se procedió a realizar pruebas de aforo por el método sección velocidad, en un tramo del río antes de llegar a la presa, para tener certeza de los datos que se han generado con anterioridad.

Se realizaron 5 aforos diferenciales en puntos identificados de interés en el río con la ayuda de fotografías aéreas, mapas topográficos y recorrido de campo, para conocer el comportamiento de las ganancias y/o pérdidas en el caudal que se transporta en las diferentes partes de los 2 ríos, utilizando el método de sección velocidad.

5.5 Pruebas de Infiltración

Para determinar el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia dentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares, se utilizó el método de Porchet, el cual consiste en la excavación de un agujero de radio "R" a una altura conocida "h", y medir un cambio en el tiempo muy pequeño (dt) para suponer la capacidad de infiltración (f) como constante. Así, para determinar f, basta medir pares de valores (h₁, t₁) (h₂, t₂), de forma que t₂ y t₁ no difieran demasiado y se entre con los valores, utilizando la siguiente ecuación:

$$F_c = \frac{R}{2(t_2 - t_1)} \times \ln \frac{2h_1 + R}{2h_2 + R}$$

Las pruebas de infiltración se realizaron en las diferentes subunidades, resultado de intersectar, con la ayuda de los Sistemas de información geográficos, las unidades de ocupación del suelo, la clasificación de suelos Simmons et al, 1959 y la geología.

5.6 Precipitación Pluvial

Se utilizo los datos registrados de la única estación meteorológica tipo A que tiene influencia y la cual es la más cercana a la subcuenca, ubicada en las oficinas centrales del INSIVUMEH, en la zona 13 de la ciudad capital, en las coordenadas latitud norte 14°35'14" y longitud oeste 90°31'58" a una altura de 1,502 msnm. Para este estudio se utilizo los datos mensuales de los años 2003 y 2004.

5.7 Determinación de Precipitación Efectiva

Ya que la precipitación efectiva es afectada por factores como, intensidad, velocidad de infiltración, cobertura vegetal y topografía, se estimo la capacidad de infiltración por medio del método de Schosinsky 1,999, en Herrera (14), el cual considera los aspectos de relación entre la infiltración de agua en el suelo y la intensidad de lluvia.

Se debe considerar también la cantidad de agua de lluvia que no llega al suelo debido a la retención que ocurre en la cubierta vegetal (retención vegetal), que normalmente es de 12 % del total de lluvia mensual para cultivos anuales, y que puede llegar hasta 20 % en áreas boscosas.

La fórmula general a utilizada para la precipitación efectiva es la siguiente:

$$P_{ef} = P \times R \times K_{fc}$$

Donde: P_{ef} : Precipitación efectiva (precipitación que infiltra).
 P: precipitación mensual.
 R: 1 – Valor de retención (para bosques es de 0.20; para cultivos en general, 0.12 y para techos de casas, caminos y áreas construidas, es de 0.1 a 0.05).
 K_{fc} : Coeficiente de infiltración.

Schosinsky, obtuvo la ecuación que relaciona la capacidad de infiltración de agua en el suelo (infiltración básica) con la intensidad de lluvia, que es la siguiente:

$$K_{fc} = 0.267 \ln(i) - 0.000154(i) - 0.723$$

Donde: Kfc: Factor de infiltración de agua en el suelo e intensidad de lluvia.
 In: Logaritmo neperiano (natural).
 fc: Valor de infiltración básica en mm/día.

Con los valores de infiltración básica obtenidos en las pruebas de infiltración, se aplico la anterior formula y se obtienen los valores de Kfc.

5.8 Muestreo de Suelos

Los muestreos de suelos se realizaron en los mismos puntos donde se hicieron las pruebas de infiltración, procediendo a determinar la capacidad de campo, el punto de marchites permanente, la densidad aparente y textura a nivel de laboratorio.

5.9 Determinación de la Escorrentía Superficial

Se determina de la siguiente forma:

$$\text{Precipitación observada} - \text{precipitación efectiva} = \text{Escorrentía Superficial}$$

5.10 Evapotranspiración

5.10.1 Determinación de la Evapotranspiración Potencial

A. Método de Hargreaves:

Basándose en el método propuesto por Hargreaves, se tomaron las temperatura medias, humedad relativa mensuales, brillo solar incidente y Radiación solar.

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial mensual, se aplicaron las formulas:

$$\text{ETP} = 0.0075 * \text{TMF} * \text{RSM} \text{ (mm/mes)}$$

Donde: ETP = Evapotranspiración Potencial
 TMF = Temperatura media mensual en grados Fahrenheit (°F)
 RSM = Radiación Solar incidente mensual

$$RSM = 0.075 * RMM * S^{1/2}$$

$$RMM = R_s * \text{No. de días del mes.}$$

Radiación mensual extraterrestre.

R_s , Radiación solar que se determina por el cuadro 3

Cuadro 3 Valores Medios mensuales de radiación solar extraterrestre (mm/día)

Latitud Norte	Ene	Feb	Marz	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0	15.07	15.53	15.71	15.27	14.47	13.97	14.19	14.95	15.61	15.66	15.23	14.90
5	14.23	14.96	15.55	15.55	15.09	14.74	14.90	15.39	15.63	15.24	14.47	13.98
10	13.30	14.28	15.27	15.72	15.61	15.42	15.51	15.72	15.54	14.71	13.61	12.98
15	12.29	13.51	14.83	15.77	16.02	16.00	16.02	15.93	15.33	14.07	12.66	11.91
20	11.20	12.64	14.37	15.70	16.32	16.48	16.42	16.04	15.00	13.33	11.63	10.76

Tomado de: Herrera (13). Recarga Hidrica.

S = Brillo solar mensual en % (1 a 100) por

$$S = K_s * (100 - HR)^{1/2}$$

K_s = constante = 12.5

HR = Humedad Relativa en % (1 a 100)

5.10.2 Determinación de la Evapotranspiración Real

Se utilizo el método de variación lineal de la evapotranspiración real, el cual asume que la evapotranspiración real equivale a la evapotranspiración potencial, pero tomando en cuenta los factores del suelo, es decir la capacidad de campo y el punto de marchites.

ETR = ETP si la HD es mayor a:

CC – PM + ETP; de lo contrario,

$$ETR = HD * ETP / (CC - PMP - ETP)$$

$$HD = H_{Si} + P_i - PM$$

Donde: CC: capacidad de campo
 PM: Punto de marchites
 Hsi: Humedad del suelo inicial que equivale a la humedad del suelo final del mes anterior o en su efecto la CC o PM según en qué meses se comience el balance hídrico ya sea en época seca o lluviosa.
 RAD: Rango de Agua Disponible = CC – PM
 HD: Humedad Disponible
 ETP: Evapotranspiración Potencial

5.11 Determinación de la Humedad del Suelo Final del Mes Actual

$$\text{HSF(mes en estudio)} = \text{HD} + \text{PMP} - \text{ETR} + \text{RP}$$

Donde: HSF: Humedad del suelo final
 HSI: Humedad del suelo inicial
 ETR: Evapotranspiración Real
 RP: Recarga Potencial

5.12 Determinación de la Recarga Hídrica por el Método de Variación lineal de la Evapotranspiración Real

$$\text{HUMEDAD INICIAL} + \text{PRECIPITACIÓN INFILTRADA} - \text{ETR} = \text{RECARGA HIDRICA}$$

Si humedad del suelo final mensual es > capacidad de campo entonces existe recarga

5.13 Balance de Humedad de Suelos

Para esto se realizó el análisis y recopilación de información bibliográfica y de campo de los tres principales aspectos que intervienen en el balance hídrico (suelo clima y planta), es decir, precipitación, escorrentía superficial, evapotranspiración, capacidad de campo, punto de marchites y profundidad de raíces de las plantas. Es decir que la recarga fue estimada de acuerdo al balance de humedad del suelo, el cual involucra las constantes de humedad del suelo y se expresa en cm. (lámina), para transformar los datos de porcentaje a volumen de los datos obtenidos en el laboratorio se utilizará la siguiente ecuación:

$$\text{LHD (cm)} = \frac{(\text{CC}\% - \text{PMP}\%)}{100} * \text{Da (g/cm}^3) * \text{Pr (cm)}$$

Para el cálculo directo al acuífero el método que se utilizó el programa de cálculo de balance de humedad de suelos elaborado por Shoconsky y Losilla en el año 1999, en donde la recarga directa al acuífero se realiza una vez que el proceso de evaporación se ha efectuado y la capacidad de campo se ha completado.

5.14 Identificación y Mapeo de Unidades de Recarga Hídrica

Se siguieron los siguientes pasos:

- Se traslapo con la ayuda de un Sistema de Información Geográfico, los mapas de clasificación de suelos de Simmons et al (1959), uso y cobertura del suelo Geología y pendientes.
- Se identificaron las diferentes combinaciones que resultaron de realizar el paso anterior. A cada una de estas unidades se debe realizar el cálculo de recarga hídrica con los datos climáticos de la estación INSIVUMEH que es la única que influencia al área de estudio

6. RESULTADOS

6.1. Geología

6.1.1 Geología Estructural

Guatemala normalmente está caracterizada por cuatro provincias geológicas: 1) La región sedimentaria septentrional “planicies de Petén”, 2) Las tierras altas cristalinas, 3) El cinturón volcánico del terciario y cuaternario, y 4) Las planicies costeras aluviales del Pacífico en el sur.

La ciudad de Guatemala se encuentra en un Valle Geotectónico que corresponde a un graben (depresión tectónica) limitado por horst (pilares tectónicos). Dentro de la fisiografía del Valle de Guatemala es muy evidente el control estructural dado por los sistemas de fallas de Mixco y Santa Catarina Pinula, las cuales son fallas normales y de orientación N-S, fácilmente identificables por su escarpe de falla y que definen la estructura de graben de la ciudad de Guatemala.

Los flujos de lava se encuentran parcialmente tectonizados, que en algunos casos da la apariencia de una pizarra, resultado del levantamiento de la región, y específicamente por movimientos del sistema de fallas de Mixco al oeste del valle. Esto es importante ya que las rocas están altamente fracturadas y es por donde circula el agua subterránea, llegando a constituir el acuífero principal de la región. El acuífero sur está disectado y delimitado por sistemas de fallas paralelas al sistema principal con una orientación N-S, drenando las aguas superficiales y subterráneas al Lago de Amatitlán.

En el mapa geológico se trazaron lineamientos de fallas y fracturas en base a la fotogeología de fotografías aéreas, en donde se definieron una serie de pequeños graben y horst secundarios, que como se observa en el mapa, el sistema de fallas principales del área son paralelas al sistema definido por las fallas de Mixco y Santa Catarina Pinula, con una orientación preferencial N-S.

La ciudad de Guatemala el graben está limitado al noroeste por las fallas de Mixco y al sureste por las fallas de Santa Catarina Pinula.

La serie de tobas volcánicas, flujos y sedimentos son esencialmente horizontales a través del área. Aunque la estructura es compleja, existen abundantes depósitos de pómez del cuaternario que cubren las rocas del terciario en el área.

Las características fisiográficas dominantes en esta área es la falla de Santa Catarina Pinula, con una orientación dominante de norte-sur, la cual forma la parte este de la ciudad de Guatemala donado lugar a un horst al este y un graben al oeste. Esta falla está fuertemente disectada por los ríos, con una cantidad creciente de disecciones en dirección norte a sur. El río Panasequeque y Pinula, este último, principalmente, corta en cañones por las fallas y a través de la pómez que ha llenado los valles.

La falla de Santa Catarina Pinula puede ser trazada por 5 Km. al noreste del pueblo de Santa Catarina Pinula, cortando prácticamente la cuenca del Río Pinula. Mas del 90 % de la falla está enterrada por una capa gruesa de depósitos de pómez del cuaternario la cual lleno mucho del graben. Por esta razón la falla es difícilmente observable por sí sola. La tendencia de la falla, como sea, es fácilmente delineada por 300 m desde donde se forma. Se visualiza la falla en un área de posición todavía accesible localizada entre la población de Boca del Monte y El Pueblito.

Donde la capa de pómez que ha sido erosionada, los sedimentos terciarios y volcánicos son visibles. La falla es fácilmente reconocida a estas localidades por lo quebrado y lo brechado de la roca.

La geología del área local de estudio se presenta en la figura 10 (Mapa Geológico), y consiste principalmente en rocas terciarias y cuaternarias de interés hidrogeológico, representándose hidrogeológicamente en dos grupos: Grupo Volcánico del Terciario, formado por rocas altamente fracturadas que constituyen la zona saturada; y el Grupo Volcánico Cuaternario, formado por flujos piroclásticos que representan en gran porcentaje la zona no saturada, observándose en los perfiles hidrogeológicos A-A''' y B-B', figuras 11 y 12.

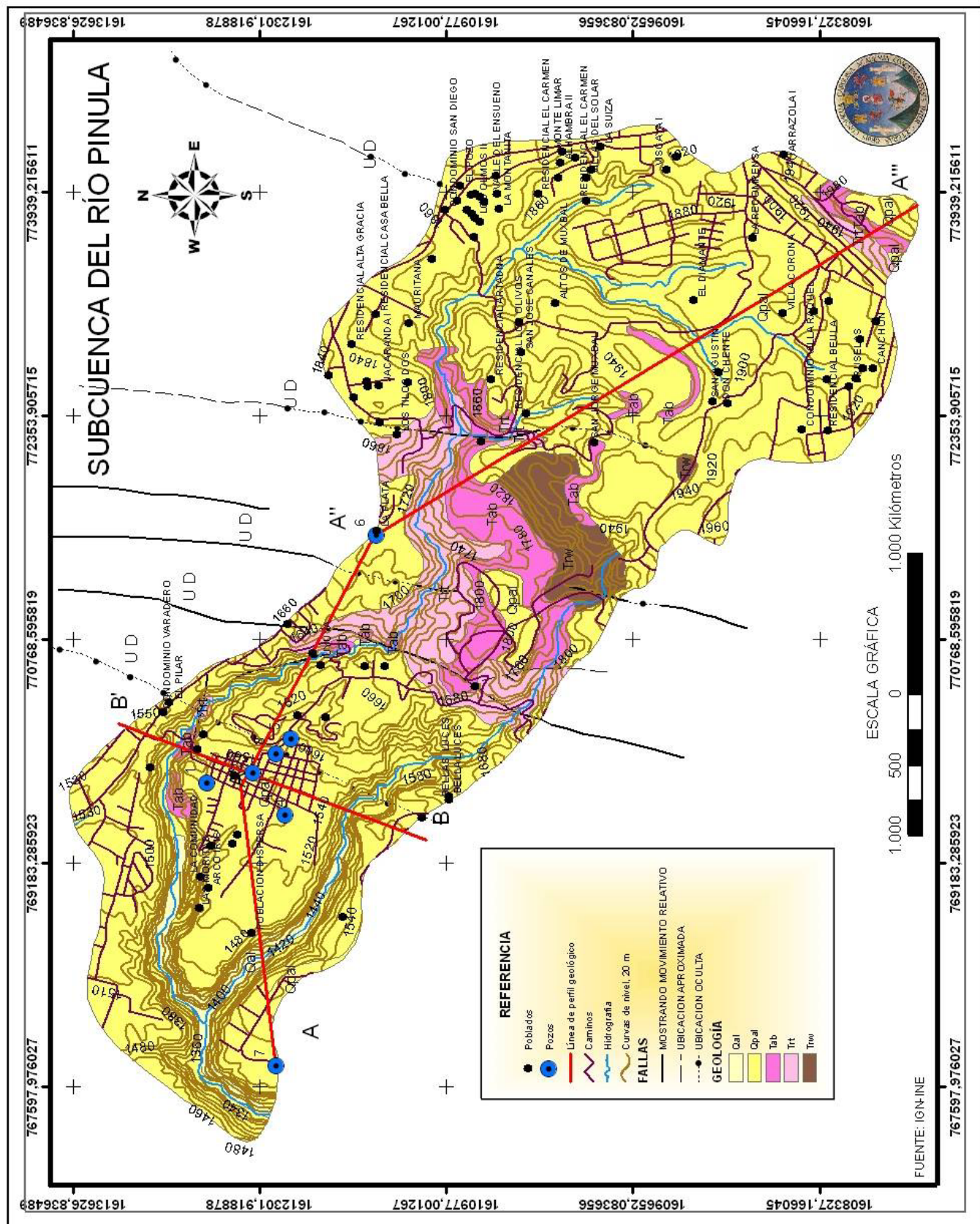


Figura 10 Mapa geológico para perfiles

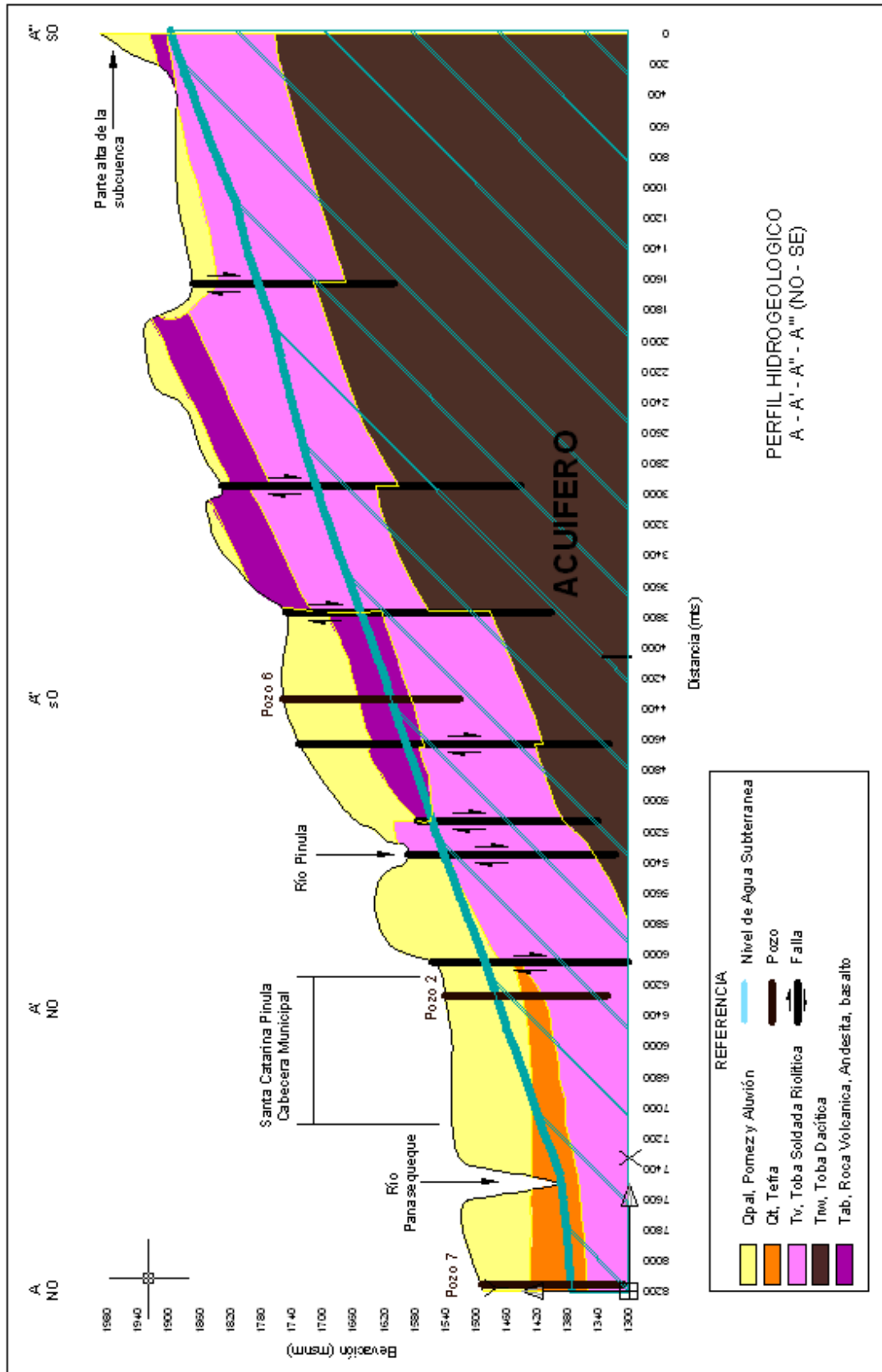


Figura 11 Perfil geol3gico A - A' - A'' - A'''

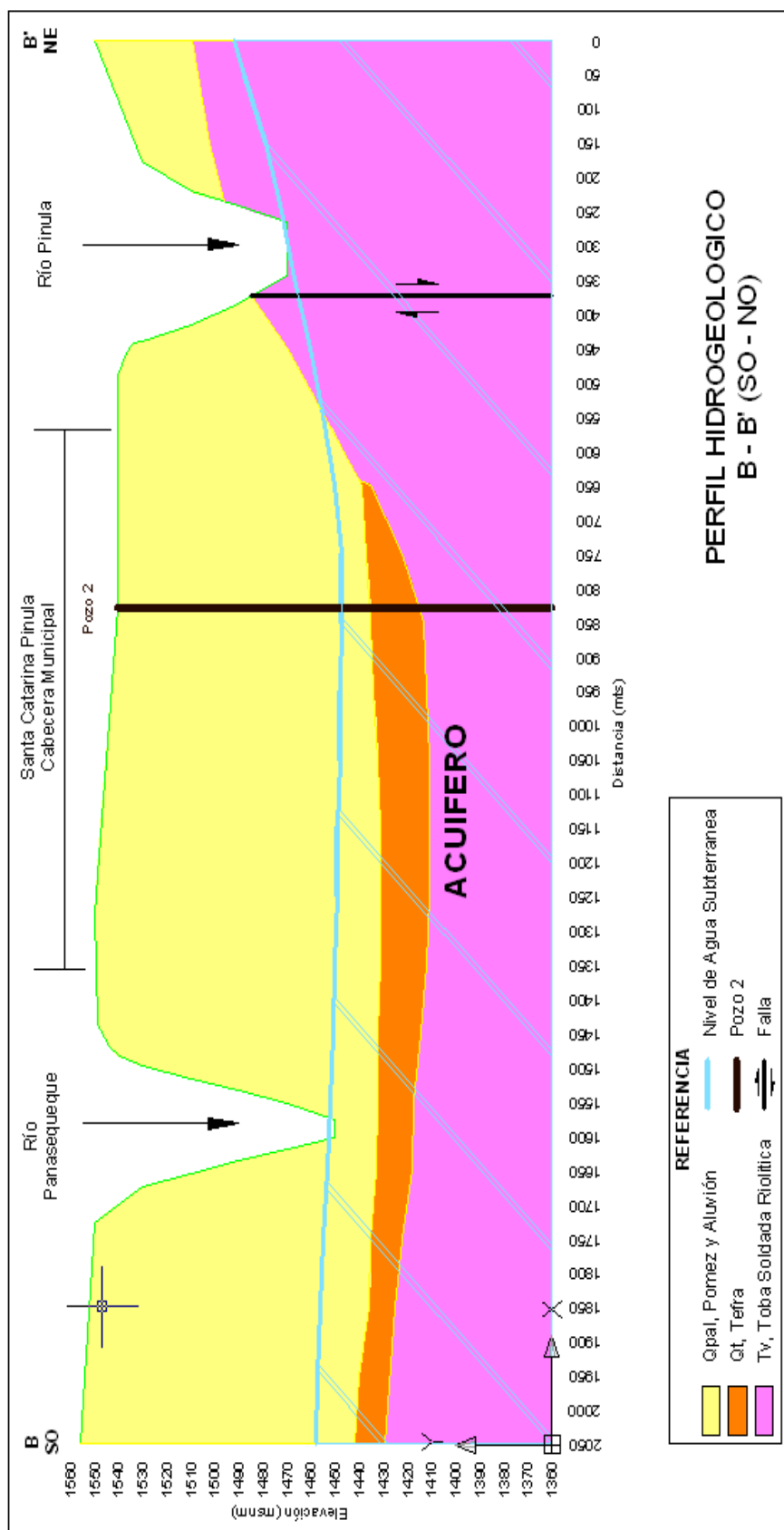


Figura 12 Perfil geológico B – B'.

6.1.2. Geología Local

6.1.2.1. Grupo Volcánico Terciario

El grupo volcánico terciario está constituido por

- Rocas Volcánicas de Tipo Andesita-Basalto
- Toba Soldada (Riolita)
- Toba Dacítica,

A. Rocas Volcánicas Andesita-Basálticas

Hay muchos afloramientos de andesita oscura. La andesita es de color gris oscura a negro y está caracterizada por formas esferoidales. Las rocas son afániticas con augita y plagioclasas. La plagioclasa es de 1 – 2 mm de largo, mayormente de tipo andesina. La Augita usualmente constituye un 10-15% de roca. Hay también menor presencia de biotita y magnetita. La andesita ocurre como flujos con una dirección nor-oeste. La andesita es próxima al último evento volcánico y tiende a conformar la topografía pre-existente.

La andesita basáltica es también de color gris oscuro a negra, afánitica, esferoidal, vesicular en algunas partes, y contiene augita, plagioclasa y hornblenda arriba de 8 mm. de largo, y a veces olivino.

B. Toba Soldada (Riolita)

La riolita por si sola es extremadamente vesicular y consiste en 50% de vidrio. El feldespato es sanidina aunque en cantidades menores en algunas zonas. El cuarzo visible ha experimentado una corrosión extrema y la variedad granulada es encontrada en masas de suelo. La hematita está presente como un mineral extra. Una estructura de flujo es caracterizada por un arreglo paralelo de biotita y sanidina en una masa de suelo vidriosa. El corte de camino expone un área caracterizada por abultamiento en forma de hongo como una estructura de flujo. Un ejemplo de este muestra la característica de la riolita en numerosas esferas.

Esta lava esferoidal esta probablemente y genéticamente asociada con las fallas y las brechas, con la riolita sugiere que la actividad de la falla continuo después que la lava fue extendida.

C. Toba Dacítica

Esta unidad de toba soldada es rica en vidrio volcánico y cuarzo. La unidad es distintiva en afloramiento, contiene vitrificación, bipiramidal y redondeado en una masa, típicamente de color gris-verdoso a un castaño pálido.

La roca es hipocristalina, La matriz muestra algunas veces silicificación. Exhibe de un moderado a un extremo soldamiento mostrando orientación variada con estructura de flujo. Fiames y fragmentos de pómez, son característicamente aplanados y soldados.

El cuarzo varia de 0.7 á 3.7 mm de diámetro. Constituyendo del 15 % a 20 % de la roca. La toba contiene bastantes cristales de cuarzo vetrificados y fragmentados en una matriz afanítica gris. La roca es vesicular, conteniendo algunas veces fragmentos de pómez y bastante feldespato caolinizado de color blanco. La silificación es pronunciada en esta área debido a la intensa alteración hidrotermal asociada a la falla del Río Pinula. En esta unidad el contacto de la falla inmediatamente en la sección del curso del río ocurre una ruptura de la roca intensamente, la fractura contiene sulfuro nativo en una capa fina amarillenta. En esta unidad se marca una sección con hierro de color rojo oscuro de noroeste – sureste siguiendo el curso bajo del Río Pinula.

La presencia de esta formación indica que la unidad había sufrido erosión antes de la efusión de la andesita. Esta unidad representa un periodo de límite de actividad volcánica precediendo al flujo de andesita y al fallamiento de las estructuras de horst y graben.

6.1.2.2. Grupo Volcánico Cuaternario

El grupo volcánico del cuaternario está constituido por:

- Pómez o Tefras
- Aluvión

A. Tephros o piroclastos con cenizas volcánicas del Cuaternario

Tephra o depósito de caída, es el término definido por Howel 1,957, Lamarre (26), para designar colectivamente a todos los materiales clásticos que durante una erupción son expulsados desde un cráter o algunos tipos de aberturas y transportados directamente por el aire, incluyendo ceniza, polvo volcánico, lapilli, escoria, pómez, bombas y bloques.

Estas tephros son materiales volcánicos de color pardo amarillento, compuestos de bloques de andesitas grisáceos entre 5 a 45 cm de tamaño, de forma angular y subredondeada. La matriz está compuesta por ceniza, lapilli, escoria y pómez blanca con mucho vidrio volcánico, cuarzo, minerales máficos y fragmentos líticos.

Esta unidad incluye los depósitos de pómez. La mayor porción de esta unidad es visible. La pómez ocurre en diferentes granulometrías y está caracterizada por un tipo fino y blanca, los fragmentos son de un tamaño de 1 a 8 cm y muestran depósitos por la acción del viento y no clasificados en su totalidad. En el río Pinula terrazas recientes y sub-recientes están constituidas por estos depósitos.

B. Aluvión

Es una unidad considerada como producto del aporte de deslizamiento, avalanchas volcánicas, flujos de barro y material arrastrado por el agua fluvial, provenientes principalmente de los cañones que se encuentran en el área de materiales ígneos de la cordillera volcánica, estando sobreyacida esta unidad por capas de espesores variables de cenizas y lapillís, así como de material coluvio-aluvial.

Estos depósitos yacen principalmente a lo largo de los valles y de las riberas de los ríos Pinula y Panaseque. La unidad se compone de sedimentos secundarios de los materiales volcánicos, por lo que es una unidad heterogénea donde existen sedimentos finos de pómez y ceniza volcánica, que alternan con sedimentos gruesos (cantos rodados) de piedra pómez y roca volcánica, de coloración clara (blanco a pardo amarillento) a oscura (pardo grisáceo a negra), con espesores variables, generalmente de 10 a 25 metros.

6.1.3. Hidrogeología

6.1.3.1 Acuíferos del Área de Estudio

Hidrogeológicamente la subcuenca del río Pinula, se encuentra conformada por dos acuíferos importantes: acuífero superior y acuífero inferior.

A. Acuífero superior

El acuífero superior está constituido esencialmente por depósitos cuaternarios de piroclastos pomáceos compactos hasta sueltos, mal clasificados y mal estratificados, en los cuales existen localmente intercalaciones de sedimentos fluvio-lacustres, paleosuelos y pómez. Se incluye dentro de este acuífero superior los sedimentos aluviales depositados en el río Pinula.

Los mayores espesores de los piroclastos se encuentran en la parte central y nor-oeste de la subcuenca, donde generalmente sobrepasan los 100 metros, tendiendo a disminuir al sur-este y parte alta.

B. Acuífero inferior

El acuífero inferior está constituido por lavas andesíticas, toba soldada y andesítica, las cuales subyacen al acuífero superior. Las características de permeabilidad alta por fracturamiento (secundaria), extensión y espesor, constituyen el principal acuífero del área. Tanto así, que en los pozos del sector el espesor de lavas es superior a 200 metros.

De acuerdo a la información de pozos su estratigrafía y niveles freáticos se realizó el mapa de red de flujos (Figura 13).

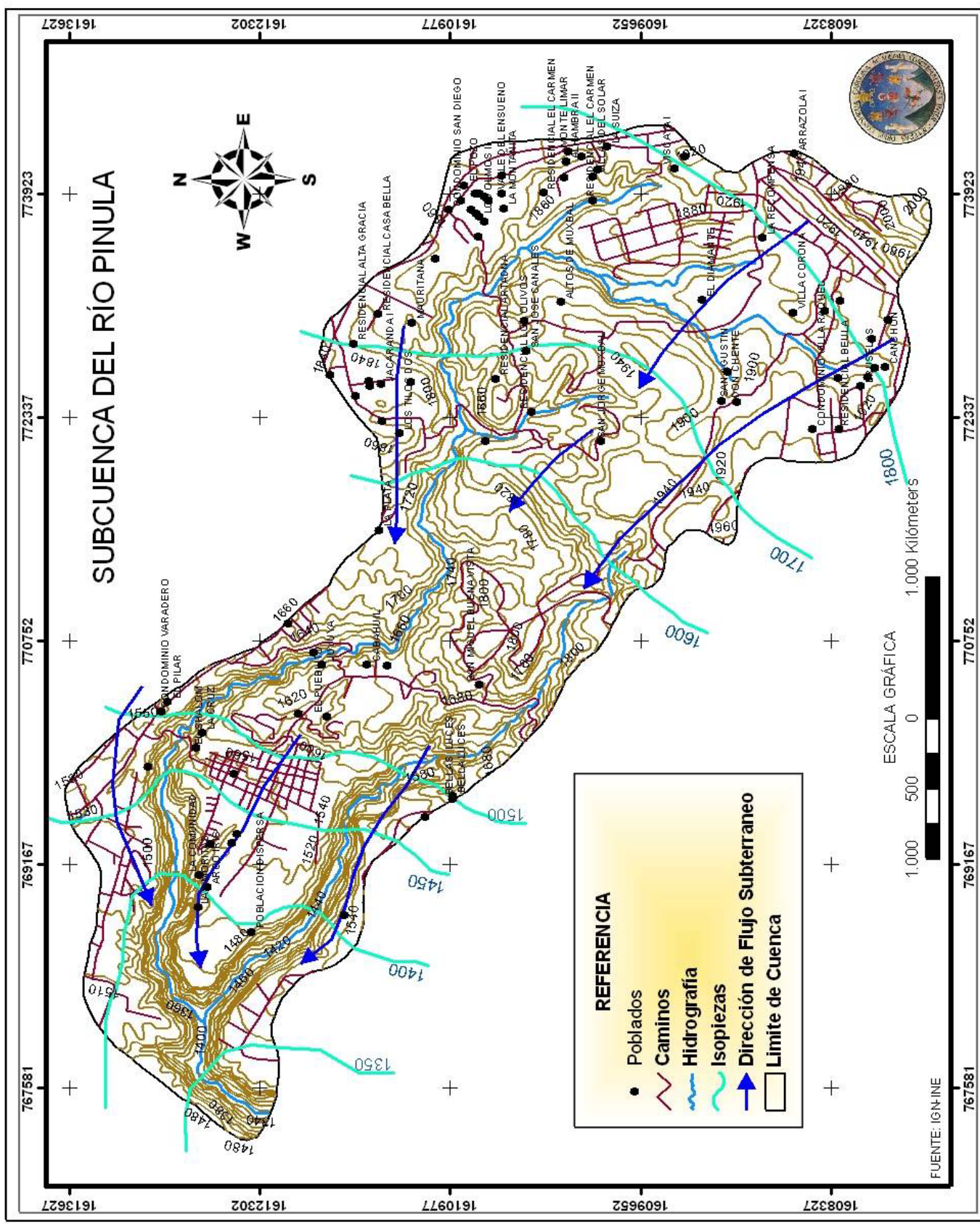


Figura 13 Mapa de red de flujo.

6.1.3.2 Características Hidrogeológicas

El acuífero superior tiene diferentes tamaños granulométricos, siendo el material de relleno de diferentes dimensiones que varían desde bloques- y gravas de rocas volcánicas hasta arenas de pómez, limos y arcillas, por lo que posee una permeabilidad primaria. El agua subterránea se encuentra en su mayor parte bajo condiciones libres.

Condiciones similares de la subcuenca del río Pinula con el río Villalobos muestran valores de transmisividad para los piroclastos que varían de 50 a 750 m²/día, mientras que los sedimentos aluviales tienen una transmisividad entre 150 a 2000 m²/día. Los valores de coeficiente de almacenamiento asignado para los depósitos piroclásticos es 0,09 y para los depósitos aluviales de 0,20, Velásquez 1998 citado por Yol (38).

La transmisividad de las rocas fracturadas varía entre 500 a 5000 m²/día, asignando un valor de coeficiente de almacenamiento para rocas volcánicas fracturadas de 0,014, Herrera (12).

6.1.3.3 Transmisividad

Kruseman (25), indica que es una de las características más importantes del acuífero y la define como la capacidad de un medio para transmitir agua, es decir, la razón por la cual fluye agua, a través de una franja vertical del acuífero de ancho unitario y de altura igual al espesor saturado del mismo cuando el gradiente hidráulico es igual a la unidad.

Los valores de transmisividad generalmente varían de menos 12 hasta 12,000 m²/día. Un acuífero cuya transmisividad sea menor de 12 m²/día, puede únicamente suministrar agua para usos domésticos, mientras si la transmisividad es del orden de 100 a 12,000 m²/día o mayor, el rendimiento será adecuado para propósitos industriales, municipales o de riego, Jhonson (24).

Los datos de las pruebas de bombeo fueron proporcionados por la Municipalidad de Santa Catarina Pinula, del pozo ubicado en la cabecera municipal, dentro de la subcuenca hidrográfica, el cual es un pozo con revestimiento de tubo de 8 pulgadas de diámetro, con una profundidad total de 395 metros y un nivel estático de 101.5 m. Los datos de tiempo y abatimiento se presentan en

el cuadro 4. En esta prueba el caudal de bombeo fue de 19.95 L/s (1,469.22 m³/día) y el tiempo de prueba fue de 15 horas, realizada el 16 de febrero de 2,003.

Cuadro 4 Datos de Tiempo-Abatimiento del pozo de bombeo de la Cabecera municipal, Sta. Cat. Pinula.

Tiempo (min)	Abatimiento (m)	Tiempo (min)	Abatimiento (m)	Tiempo (min)	Abatimiento (m)
1	21,6408433	30	51,8161036	180	56,0833122
2	30,7848616	35	52,4257048	210	55,1689103
3	31,3944628	40	53,0353061	240	54,5593091
4	32,6136652	45	53,0353061	270	54,5593091
5	34,1376683	50	53,0353061	300	54,5593091
6	35,6616713	55	53,9497079	360	54,5593091
7	37,490475	60	53,9497079	420	54,5593091
8	39,014478	70	54,5593091	480	55,1689103
9	41,1480823	80	54,5593091	540	56,0833122
10	43,2816866	90	55,1689103	600	56,6929134
12	45,4152908	100	55,1689103	660	57,3025146
15	48,1584963	110	55,1689103	720	57,9121158
18	48,7680975	120	56,0833122	780	58,8265177
21	49,6824994	135	56,0833122	840	58,8265177
24	50,2921006	150	56,0833122	900	58,8265177
27	50,9017018	165	56,0833122		

La transmisividad se calculó a partir de los datos del caudal de bombeo y de la pendiente de la recta tiempo-abatimiento, utilizando el programa AquiTest, desarrollado por la universidad de Waterloo Hydrogeologic inc. Ontario Canadá, basado en la formula de Jacob, Herrera (14):

$$T = \frac{2.3 Q}{4\pi \Delta s}$$

Donde: T, transmisividad (m²/día)
 Q, caudal de bombeo (m³/día)
 Δs, pendiente de la recta como la diferencia de abatimiento (m) entre dos valores de tiempo. Cuya relación sea de 10 en la escala X (un ciclo logarítmico).
 π, número Pi (3.1416)

En la figura 14, se muestra la grafica de la prueba de bombeo del pozo, obteniéndose por el método de Jacob una transmisividad de 4.74 x10⁻² m²/min (26 m²/día).

Además, utilizando el método de Theis, se obtuvo un valor de $2.03 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{min}$ ($29.23 \text{ m}^2/\text{día}$), esto con el propósito de comparar y tener certeza de los valores.

La curva patrón de Theis (1,935), compara el valor de la transmisividad utilizando la siguiente relación:

$$T = \frac{QW(u)}{4\pi \cdot s}$$

Donde: Q, caudal constante de bombeo ($\text{m}^3/\text{día}$)
 W(u), función u del pozo, determinada por una integral exponencial:
 $W(u) = -0.5772 - \ln u + u - u^2/2.2! + u^3/3.3! - u^4/4.4! + \dots$
 π , número Pi (3.1416)
 s, abatimiento (m)

En la figura 15 se muestra el resultado de la salida de la gráfica utilizando el programa AQUI-Test de la curva de patrón de Theis.

De acuerdo a los valores similares obtenidos por el método de Jacob y Theis de transmisividad, de 68.26 y $29.23 \text{ m}^2/\text{día}$, se asume el acuífero de acuerdo a sus características hidrogeológicas puede ser explotado de forma sostenible para uso doméstico por tener una transmisividad baja.

De acuerdo a la estratigrafía de pozos, que muestra como están distribuidas verticalmente las capas geológicas, y que sirvieron de base para realizar los perfiles geológicos. Se entonces, que el acuífero de la subcuenca es confinado. Además, es importante mencionar que el coeficiente de almacenamiento, necesario para determinar si un acuífero es confinado o no confinado, no se calculó debido a que en las pruebas de bombeo no se utilizó pozo de observación, ya que la información fue proporcionada por la municipalidad de Santa Catarina Pinula de las pruebas hechas en años anteriores.

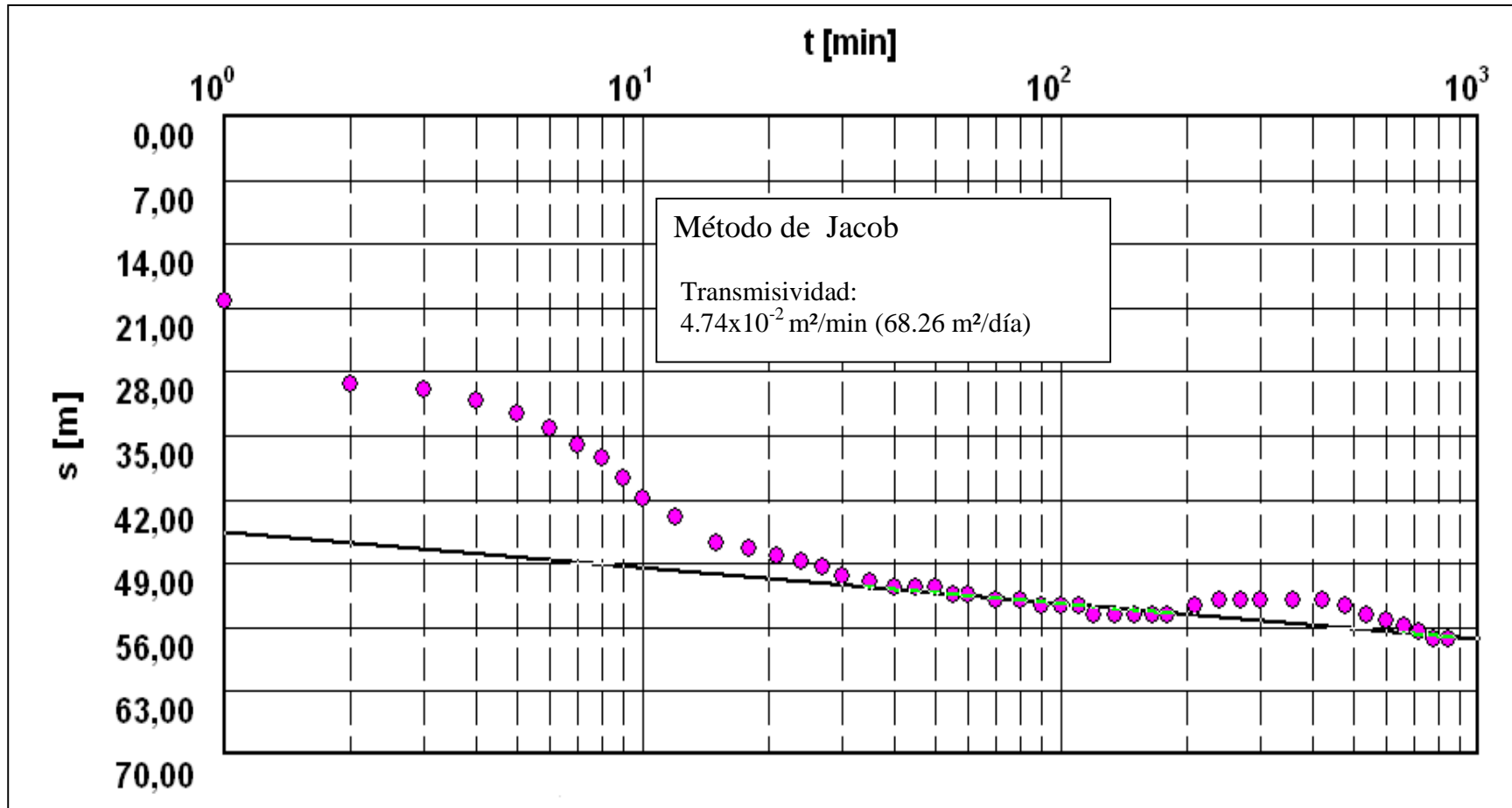


Figura 14 Curva de Tiempo-Abatimiento de la prueba de la cabecera municipal Santa Catarina Pinula, método de Jacob utilizando el software AquiferTest.

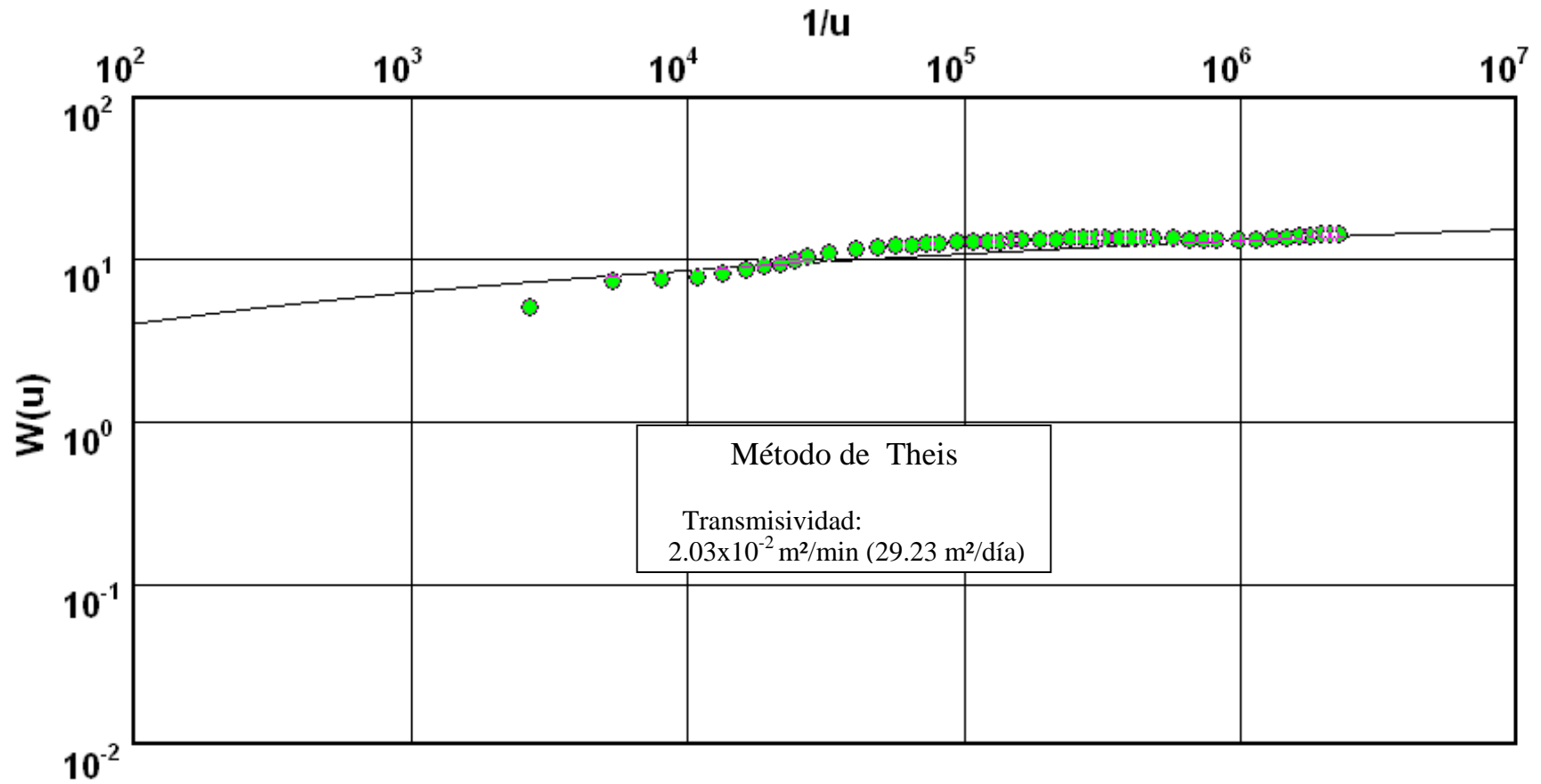


Figura 15 Curva de Tiempo-Abatimiento de la prueba de bombeo del pozo de la de la cabecera municipal, Santa Catarina Pinula, método de Theis utilizando el software AquiferTest.

6.2. Hidrología Superficial

Se analizaron principalmente los procesos de transferencia del ciclo hidrológico de la subcuenca: Precipitación pluvial, infiltración, escorrentía y evapotranspiración. Estos son los elementos importantes en la estimación del cambio de almacenamiento del agua. Se realizó el balance hídrico, tomando como unidades los factores de ocupación de suelo, clasificación de suelos Simmons et al (1959), geología y los datos climáticos de la estación INSIVUMEH, la cual es la única que tiene influencia en el área de estudio debido a la escasez de las mismas. Todos los factores anteriores se tomaron en cuenta para cuantificar la recarga del acuífero.

6.2.1. Escorrentía de la Subcuenca del Río Pinula

6.2.1.1. Aforos Diferenciales de Ríos

Estos se efectuaron con el propósito de determinar cambios en el caudal que transporta los ríos Pinula y Panasequeque. Los aforos fueron hechos una vez al mes, durante doce meses (agosto de 2003 á julio de 2004), y se realizaron en 5 sitios dentro de la subcuenca hasta el punto de aforo de la misma (figura16).

Los dos ríos que se encuentran dentro de la subcuenca (Pinula y Panasequeque) aumentan su caudal a lo largo de su recorrido debido al aporte de agua subterránea aumentando directamente su cauce. Es importante hacer notar que otro factor que influye al aumento de caudal, son las aguas servidas de las poblaciones que drenan directamente a los ríos. Esto se observa en los resultados presentados en el cuadro 5 y la grafica en la figura 16, los que muestran el cambio en el caudal de los ríos a lo largo de su curso.

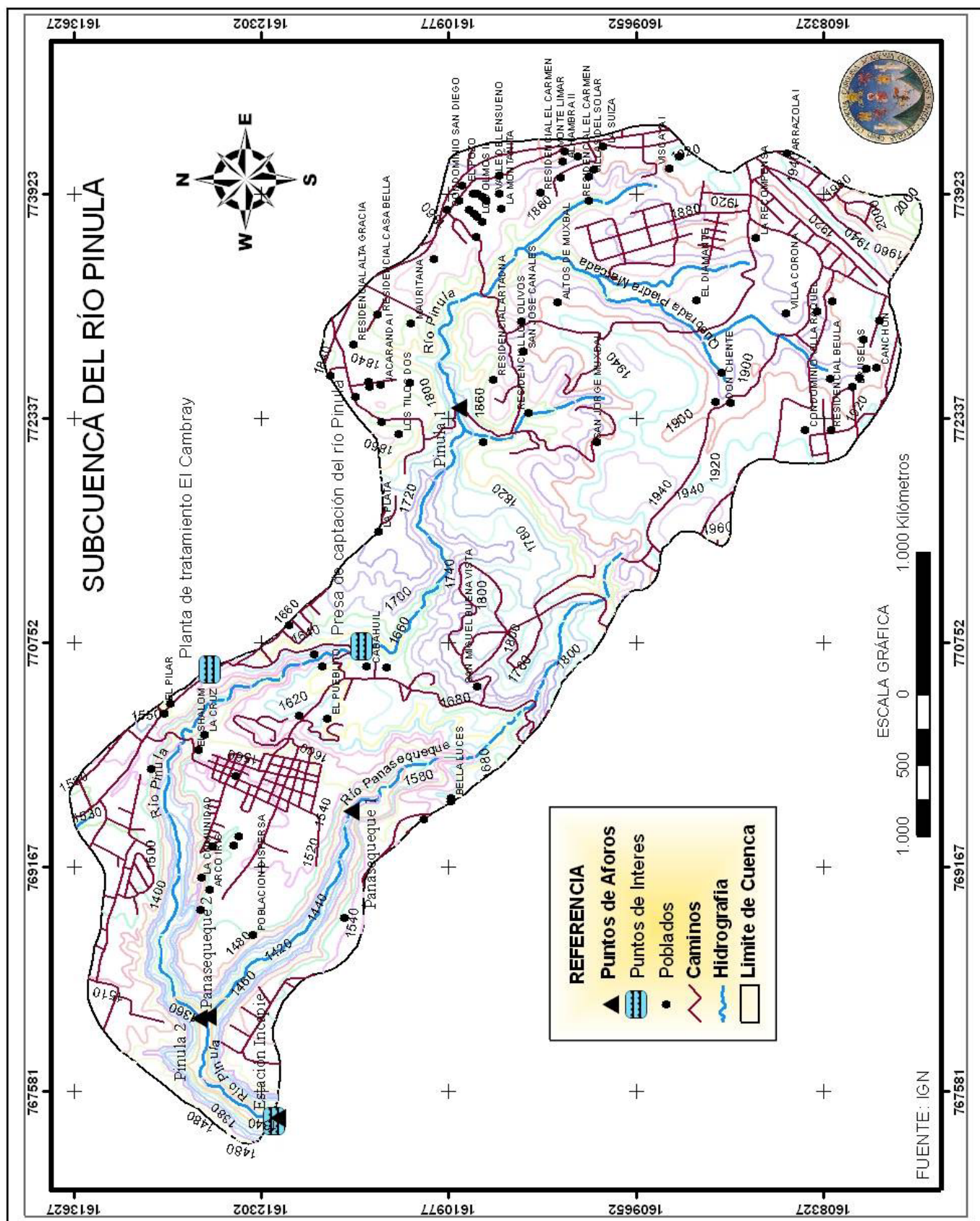


Figura 16 Mapa de aforos diferenciales.

Cuadro 5 Resultados de los aforos diferenciales, subcuenca río Pinula.

Mes	R1-Pinula 2 (A) caudal L/s	R1-Pinula 1 (B) caudal L/s	Diferencia (A)-(B)=(C) caudal L/s
Agosto	89,17	75,16	14,01
Septiembre	616,49	372,62	243,87
Noviembre	146,43	109,12	37,31
Diciembre	94,68	80,54	14,14
Enero	98,01	71,02	26,99
Febrero	143,66	82,80	60,87
Marzo	79,16	63,65	15,52
Abril	139,95	45,89	94,06
Mayo	104,84	44,27	60,57
Junio	167,96	95,72	72,24
Julio	343,11	218,42	124,69
Mes	R2-Panasequeque 2 (D) caudal L/s	R2-Panasequeque 1 (E) caudal L/s	Diferencia (D)-(E)=(F) caudal L/s
Agosto	22,16	14,94	7,22
Septiembre	115,76	60,29	55,48
Noviembre	24,12	22,95	1,17
Diciembre	25,19	16,02	9,17
Enero	23,31	9,47	13,84
Febrero	29,17	8,71	20,46
Marzo	25,30	5,08	20,22
Abril	22,54	3,24	19,30
Mayo	19,09	17,18	1,90
Junio	97,25	32,47	64,78
Julio	91,80	51,90	39,90
Mes	Unión (A)+(D)=G caudal L/s	Estación Incapie (H) caudal L/s	Diferencia (H)-(G)=(I) caudal L/s
Agosto	111,33	206,52	95,19
Septiembre	676,78	906,75	229,97
Noviembre	170,56	253,04	82,48
Diciembre	119,88	217,63	97,76
Enero	121,32	239,84	118,52
Febrero	172,83	170,02	-2,81
Marzo	104,47	181,13	76,66
Abril	162,49	212,24	49,75
Mayo	123,92	195,66	71,74
Junio	265,21	291,98	26,77
Julio	434,91	499,69	64,78

Referencias: R1, Río Pinula; R2, Río Panasequeque; R-1-2, Unión de Río Pinula y Panasequeque.

El río Pinula aumenta en promedio su caudal desde el primer punto de aforo R1-Pinula1 hasta el punto de aforo de este ramal R1-Pinula2 en 69.48 l/seg. La mayor y menor diferencia de caudales entre cada punto fue de 243.87 y 14.01 l/seg respectivamente. Es importante hacer notar que esta diferencia de caudales podría ser mayor debido a que del 70 al 100 % del caudal es desviado hacia la planta de tratamiento de agua El Cambray, desde el punto donde se encuentra

la represa de captación del río Pinula, para suplir las necesidades de la subcuenca vecina (zona 10 y 14 ciudad capital). La interrupción del caudal se da aproximadamente 3.5 km aguas arriba siguiendo el curso del río desde el punto de aforo R1-Pinula2, figura 16.

El río Panasequeque aumenta en promedio su caudal desde el primer punto de aforo R2-Panasequeque1 hasta el punto de aforo de este ramal R2-Panasequeque2 en 23.04 L/s. La mayor y menor diferencia de caudales entre cada punto fue de 55.48 y 1.17 L/s respectivamente.

En el punto de aforo de la subcuenca que corresponde a R-1-2-Estación Hincapié, se hace notar el aumento del caudal desde los puntos de unión R1-Pinula2 y R2-Panasequeque2 de los dos ramales, siendo este de 77.76 L/s como caudal medio anual. La mayor y menor diferencia de caudales fue de 174.49 y 26.76 L/s respectivamente.

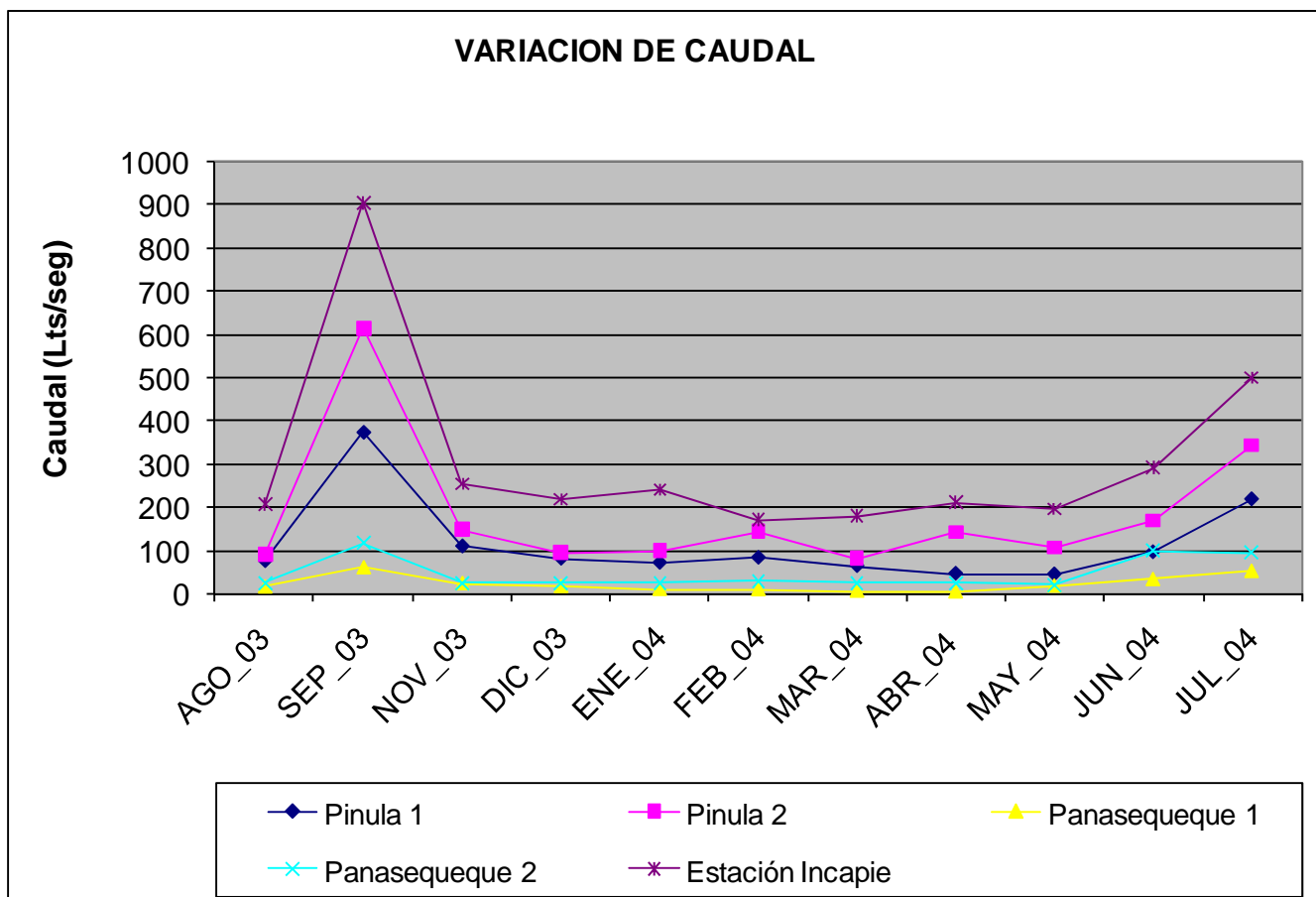


Figura 17 Hidrograma de los puntos de aforo de los ríos Pinula y Panasequeque, agosto 2003 – julio 2004.

La grafica anterior nos muestra claramente que el río Pinula tiene mayor caudal que el río Panasequeque.

Los mayores caudales en los diferentes puntos de aforo, concuerdan con el mes más lluvioso que fue septiembre de 2003, según la estación meteorológica INSIVUMEH, no así, para los menores caudales, lo que nos indica que el manto freático aporta agua en gran medida a los afluentes de agua. Aunado a lo anterior hay otros factores no estudiados, como lo es el agua extraída de los pozos y del sistema de tuberías, que aportan una cantidad de caudal como aguas servidas.

6.2.2. Precipitación Pluvial

Dentro de los componentes que conforman del ciclo hidrológico, la precipitación pluvial es la más importante, ya que se considera como la materia prima del sistema. Su distribución en el tiempo y espacio es variable, por lo que se considera un fenómeno discontinuo y que está influenciado en gran medida por la altitud, y en las últimas décadas por los cambios climáticos mundiales.

Se analizaron los datos de precipitación de la estación meteorológica INSUVUMEH, que se encuentran a 2 Km. fuera del micro cuenca, siendo la única analizada debido a la escasez de las mismas que puedan tener influencia sobre el área de estudio. Ver figura 13.

Se considero representativos los datos debido a que la estación se encuentra a una altura de 1502 msnm, siendo el punto más bajo de 1340 msnm y el más alto de 2000 msnm, habiendo una diferencia de alturas de 160 y 500 mts respectivamente. Se tomo en cuenta también, el mapa de isoyetas elaborado por Illescas (21), donde la parte alta de la cuenca tiene precipitaciones promedio de 1300 mm , y en la parte baja 1200 mm anuales.

Se analizaron los datos de precipitación de los años 2003 al 2004 (ver cuadro 6), para hacer la estimación de la recarga hídrica.

Cuadro 6 Datos de precipitación mensuales en milímetros.

MES	2003	2004	Promedio 2003-2001
Enero	0.9	0.2	0,55
Febrero	14.4	0.5	7,45
Marzo	20.3	23.9	11,6
Abril	36.8	5.2	21
Mayo	159.9	108.3	134,1
Junio	303.1	314.5	308,8
Julio	186.8	197.2	192
Agosto	109.4	97.6	103,5
Septiembre	374.2	201.2	287,7
Octubre	42.1	165.9	104
Noviembre	18.6	4.6	11,6
Diciembre	2.0	0.2	1,1
TOTAL	1266.5 mm	1119.3 mm	1193.9 mm

6.2.3 Precipitación Efectiva

La precipitación efectiva es la porción de precipitación que puede infiltrarse en el suelo y estar disponible para las raíces de las plantas o bien percolarse en el acuífero, Pacheco 1981, en Herrera (12).

La precipitación efectiva es afectada por varios factores, como:

- 1) intensidad de precipitación
- 2) Velocidad de infiltración
- 3) Cobertura Vegetal
- 4) Topografía

Para el cálculo de la precipitación efectiva se toma como referencia los mapas de ocupación del suelo (Apéndice 1), mapa de suelos Simmons et al (35), (figura 5) y el mapa geológico, (figura 9). Del traslape de los mapas anteriores que dio como resultado el mapa de unidades para determinación de recarga hídrica (figura 18). En estas unidades se realizaron las pruebas de infiltración y de análisis de suelo correspondientes para determinar las constantes de humedad (capacidad de campo y punto de marchites), así como la densidad aparente.

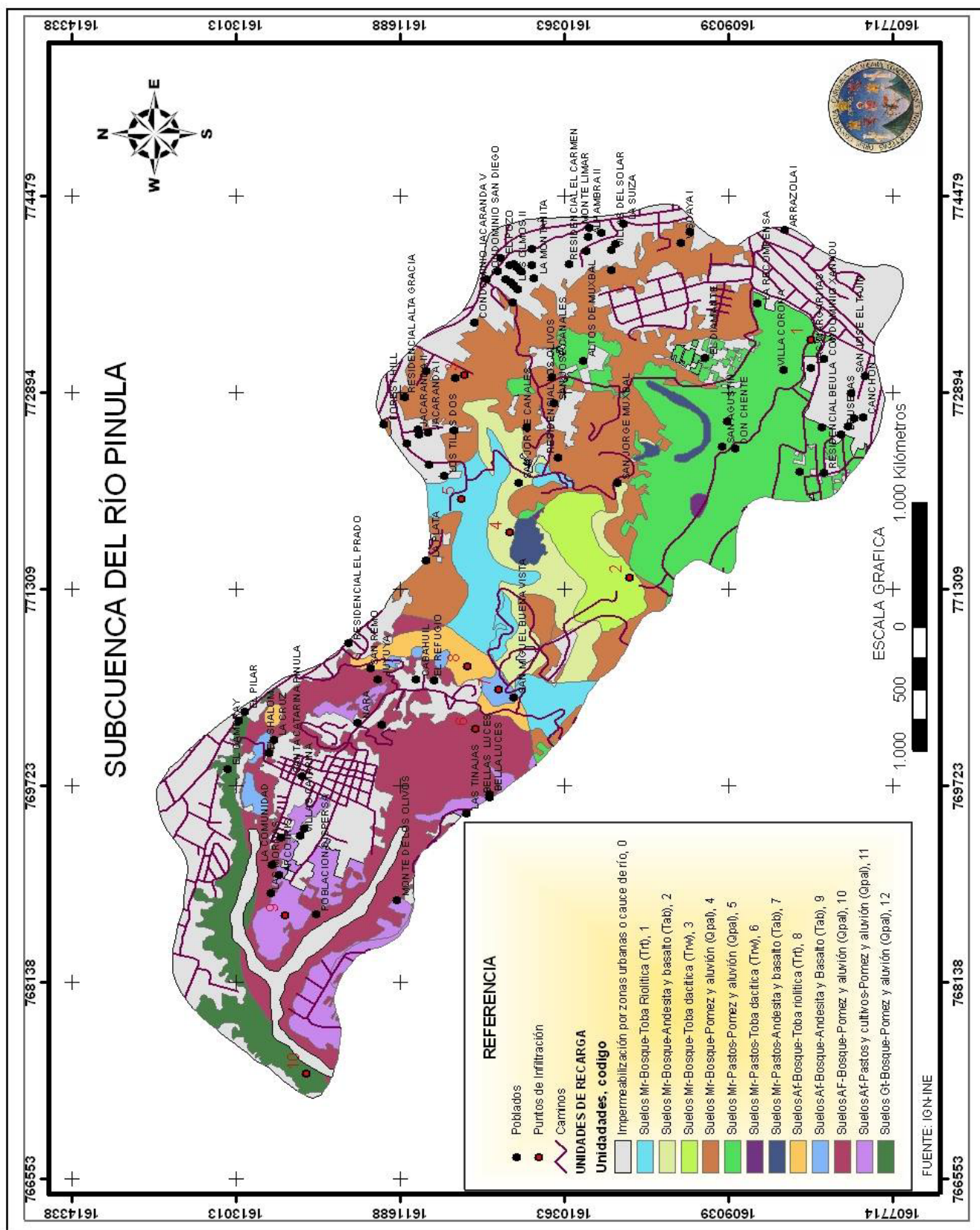


Figura 18 Mapa de unidades de recarga hídrica

6.2.4. Determinación de la Infiltración Básica

La infiltración básica se estimó por medio de diez pruebas para las trece unidades de determinación de recarga hídrica, de estas trece una corresponde a la zonas urbanas a la cual no se estima la recarga infiltración básica por la impermeabilización de los suelos, otra para las unidades con código 3 y 6, y una última para las unidades con código 2 y 7 por poseer mismas características de suelo y geología.

El método que se utilizó fue el de Porchet, el cual consiste en abrir un agujero en el suelo a una altura h y a un radio r , se agregó agua y se tomaron datos hasta encontrar una velocidad de infiltración constante. Los tiempos de toma de datos duraron 90 minutos y en algunos casos menos, debido a que las pruebas se hicieron en época lluviosa donde el suelo se encuentra a capacidad de campo. La localización de los puntos de las pruebas de infiltración, los cuales corresponden a la toma de muestra de suelos, se observan en la figura 18.

Las graficas de las figuras 22A á 31A en los anexos, muestran la variación de velocidad de infiltración en cm/hr con respecto al tiempo de la prueba.

A partir de los resultados de las diez pruebas de infiltración, se obtuvieron los valores de capacidad de infiltración (f_c) en mm/día. Con los valores se aplicó la fórmula general desarrollada por Schosinsky (1997, inédita), para determinar el porcentaje de infiltración de la lluvia, la cual se aplica dentro de un rango de capacidad de infiltración de 72 a 2,880 mm/día. El cuadro 7, resume los resultados y valores calculados de capacidad de infiltración y porcentaje de infiltración por cada prueba.

Cuadro 7 Velocidad de infiltración en mm/día y porcentaje en tanto por uno.

Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Suelos Mr, pastos y pómez- aluvión (Qpal)	Suelos Mr, Bosque y Toba dacítica (Trw)	Suelos Mr, Bosque y pómez-aluvión (Qpal)	Suelos Mr, Bosque y Andesita-basalto (Tab)	Suelos Mr, Bosque y Toba riolítica (Trt)
fc	fc	fc	fc	fc
879.82	1069.01	609.66	720.00	219.22
Kfc	Kfc	Kfc	Kfc	Kfc
0.95	0.97	0.90	0.92	0.68
% Inf	% Inf	% Inf	% Inf	% Inf
0.94	0.97	0.87	0.90	0.65
Prueba 6	Prueba 7	Prueba 8	Prueba 9	Prueba 10
Suelos Af, Bosque y pómez y aluvión (Qpal)	Suelos Af, Bosque y Andesita-basalto (Tab)	Suelos Af, Bosque y Toba riolítica (Trt)	Suelos Af, pastos-cultivos y pómez-aluvión (Qpal)	Suelos Gt, Bosque y pómez-aluvión (Qpal)
fc	fc	fc	fc	fc
1195.20	1476.56	1452.02	146.68	2160.00
Kfc	Kfc	Kfc	Kfc	Kfc
0.98	0.998	0.997	0.58	0.994
% Inf	% Inf	% Inf	% Inf	% Inf
0.99	1.02	1.02	0.56	1.05665735

Donde fc = Capacidad de Infiltración en mm/día
 Kfc = Factor de infiltración de agua en el suelo
 % Inf = Porcentaje de infiltración en tanto por uno
 Mr = Suelos Moran, clasificación Simmons et al (36)
 Af = Suelos Áreas frágulas, clasificación Simmons et al (36)
 GT = Suelos Guatemala, clasificación Simmons et al (36)

Los resultados de precipitación efectiva mensuales en el año hidrológico abril 2003 a marzo 2004, necesarios para ser usados en el cálculo respectivo de recarga hídrica se presentan en el cuadro 8.

Cuadro 8 Valores de precipitación efectiva por unidad de recarga hídrica.

MES	pp mm	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
		pp. efec. mm	pp. efec. mm	pp. efec. mm	pp. efec. mm
Apr-03	36.8	28.72	28.70	26.36	27.84
May-03	159.9	124.78	124.66	114.53	120.99
Jun-03	303.1	236.54	236.31	217.10	229.35
Jul-03	186.8	145.77	145.64	133.80	141.35
Aug-03	109.4	85.37	85.29	78.36	82.78
Sep-03	374.2	292.02	291.74	268.03	283.15
Oct-03	42.1	32.85	32.82	30.15	31.85
Nov-03	18.6	14.515	14.50	13.32	14.07
Dec-03	2.0	1.56	1.56	1.43	1.51
Jan-04	0.2	0.15	0.15	0.14	0.15
Feb-04	0.5	0.39	0.40	0.36	0.37
Mar-04	23.9	18.65	18.63	17.12	18.08
TOTAL	1257.5	981.34	980.41	900.73	951.52
MES	pp mm	Prueba 5	Prueba 6	Prueba 7	Prueba 8
		pp. efec. mm	pp. efec. mm	pp. efec. mm	pp. efec. mm
Apr-03	36.8	20.09	28.99	29.38	29.36
May-03	159.9	87.29	125.99	127.67	127.57
Jun-03	303.1	165.46	238.82	242.00	241.83
Jul-03	186.8	101.98	147.18	149.14	149.04
Aug-03	109.4	59.72	86.20	87.35	87.29
Sep-03	374.2	204.28	294.85	298.77	298.56
Oct-03	42.1	22.98	33.17	33.61	33.59
Nov-03	18.6	10.15	14.65	14.85	14.84
Dec-03	2.0	1.09	1.58	1.59	1.60
Jan-04	0.2	0.10	0.15	0.16	0.16
Feb-04	0.5	0.27	0.39	0.40	0.40
Mar-04	23.9	13.05	18.83	19.08	19.07
TOTAL	1257.5	686.48	990.83	1004.02	1003.32
MES	Pp_mm	Prueba 9	Prueba 10		
		pp. efec. mm	pp. efec. mm		
Apr-03	36.8	19.42	29.27		
May-03	159.9	84.37	127.20		
Jun-03	303.1	159.93	241.11		
Jul-03	186.8	98.56	148.60		
Aug-03	109.4	57.72	87.02		
Sep-03	374.2	197.45	297.67		
Oct-03	42.1	22.21	33.49		
Nov-03	18.6	9.81	14.80		
Dec-03	2.0	1.06	1.59		
Jan-04	0.2	0.10	0.16		
Feb-04	0.5	0.26	0.40		
Mar-04	23.9	12.61	19.01		
TOTAL	1257.5	663.53	1000.31		

6.2.5 Evapotranspiración

Se define como la suma de los fenómenos de la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas.

Según Linsley (27), gran parte de la precipitación que llega a la tierra, vuelve a la atmósfera en forma de vapor de agua, directamente por evaporación, o directamente por transpiración de las plantas.

Para el cálculo de la ETP se utilizó la metodología propuesta por Hargreaves mensual. En el cuadro 9 se muestra en forma general los parámetros necesarios para determinar la evapotranspiración potencial, obteniéndose un total de 1547.6 mm.

Cuadro 9 Cálculo de la evapotranspiración potencial, método Hargreaves mensual.

MES	TM_°C	TMF_°F	RMM	HR_%	BRILLO SOLAR s=12.5(100-HR)	RSM	ETP_mm
Apr-03	20.6	69.08	473.1	74	63.74	283.28	146.77
May-03	20.7	69.26	496.62	81	54.49	274.93	142.81
Jun-03	19.1	66.38	480	84	50.00	254.56	126.73
Jul-03	20.3	68.54	496.62	81	54.49	274.93	141.33
Aug-03	20.0	68	493.83	76	61.24	289.83	147.81
Sep-03	19.7	67.46	459.9	83	51.54	247.62	125.29
Oct-03	20.2	68.36	436.17	81	54.49	241.47	123.80
Nov-03	19.2	66.56	379.8	76	61.24	222.91	111.28
Dec-03	17.5	63.5	369.21	69	69.60	231.01	110.02
Jan-04	18.5	65.3	380.99	71	67.31	234.44	114.82
Feb-04	18.6	65.48	378.28	73	64.95	228.65	112.29
Mar-04	20.1	68.18	459.73	71.0	67.31	282.89	144.66

6.2.6 Lámina de Humedad del Suelo

Para determinar la lámina de humedad en el suelo, se necesitaron los valores de constantes de humedad y densidad aparente reportados por el laboratorio de suelo y agua de la FAUSAC, obtenidos de las muestras de suelos procedentes del área de estudio de cada una de las diez muestras de suelo, que coinciden con los puntos de pruebas de infiltración, (figura 18). Estos valores fueron expresados en forma de lámina (cm), a través de la siguiente fórmula. Los

resultados se muestran en el cuadro 10 en porcentaje en peso seco.

$$\text{Humedad (cm)} = \frac{(\text{CC} - \text{PMP}) * \text{Dens. Apar. (g/cm}^3) * \text{Prof. Rad. (cm)}}{100}$$

Cuadro 10 Constantes de humedad y densidad aparente de 10 muestras de suelo.

Prueba	Coordenadas UTM, NAD 83		1/3 ATM (CC)	15 ATM (PMP)	D.A. (gr/cm ³)
	N	E			
1	773324.20	1608381.10	32.85	22.92	0.9250
2	771407.32	1609841.69	33.46	22.25	1.0250
3	773045.69	1611169.03	37.53	24.22	0.9524
4	771776.04	1610804.25	26.00	17.80	1.0256
5	772044.67	1611194.48	34.57	25.96	1.2121
6	770187.86	1611080.35	34.25	20.82	1.0526
7	770502.09	1610892.37	20.27	13.10	0.9000
8	770695.60	1611150.30	29.63	21.96	0.8750
9	768684.89	1612613.09	36.44	27.96	0.9000
10	767409.06	1612446.38	26.98	14.04	1.1100

CC= Capacidad de campo (% en peso seco)

PMP= Punto de marchites (% en peso seco)

El factor cobertura vegetal, específicamente la profundidad de raíces, fue estimado en el mapa de ocupación del suelo, donde se definen los diferentes tipos de cobertura y uso de suelo que posee el área, definiéndose unidades principales de bosque mixto, bosque de coníferas, bosque latifoliado, cultivos anuales, pastos naturales, área urbana y asociaciones de coberturas, como se muestra en la figura 20A de los anexos. Siguiendo el criterio de Sandoval (32), las profundidades radicales se presenta en el cuadro 11.

Cuadro 11 Valores de profundidad de raíces para diferentes usos del suelo según Sandoval.

Uso del Suelo	Bosque	Bosque – cultivos anuales	Pasto	Cultivos anuales y hortalizas	Matorral	Centros poblados	Bosque - Café
Profundidad de raíz (cm)	200	75	40	40	75	Impermeable	75

6.2.7. Balance Hídrico

Para el análisis de balance hídrico se tomaron en cuenta los factores clima, suelo, geología y ocupación del suelo. Al analizar estos criterios se definieron 13 unidades figura 18, usando de referencia los mapas de ocupación del suelo figura 20A, mapa de suelos Simmons et al, (36), figura 5 y el mapa de geología, figura 10.

La recarga directa se realizó de forma mensual para un año hidrológico (abril 2003 – marzo 2004), con el fin de asegurarse que la humedad inicial del suelo del periodo analizado sea la más próxima al punto de marchites. Se aplicó el método de Pehnman-Cridley, para lo cual se utilizó el programa de cálculo de balance de humedad de suelos de Shoconsky, donde la recarga directa al acuífero se realiza una vez que el proceso de evapotranspiración se ha efectuado y la capacidad de campo se completa.

El método utilizado fue el de variación lineal, cuyo criterio es que cuanto más se acerque el contenido de humedad al punto de marchites, mayor es la dificultad para que las raíces tomen agua del suelo. Los poros pequeños son los que tienen agua y la fuerza capilar para sacar el agua es mayor para la planta, además, las plantas cierran sus estomas para retener más humedad en su organismo. Esta es una situación más real, ya que a mayor déficit de humedad más le cuesta a la planta transpirar. Se asume que la evapotranspiración real es igual a la evapotranspiración potencial conjuntamente con los factores de suelo, o sea:

$$ETR=ETP[1-(Capacidad\ de\ campo-Humedad\ suelo\ inicial)/Rango\ de\ humedad\ disponible]$$

Los resultados de la lamina de agua por unidad se resumen en el cuadro 12, conjuntamente con su área de influencia y volumen de recarga al acuífero.

Cuadro 12 Lamina y volumen de recarga total media anual por áreas, con datos mensuales de Precipitación, en la subcuenca del Río Pinula, con el método de variación lineal.

UNIDAD	Recarga (mm)	Área (Ha)	Área (km ²)	% de área	Vol. recarga (m ³)	Recarga (m ³ /km ² /año)	Rango de recarga
0	0	581.46	5.81	33.02	0.00	0.00	Baja
Suelos Mr-Bosque-Toba Riolítica (Trt)	0	87.79	0.87	4.98	0.00	0.00	Baja
Suelos Mr-Bosque-Andesita y basalto (Tab)	114.79	77.769	0.77	4.41	89,271.03	114,790.00	Media
Suelos Mr-Bosque-Toba dacítica (Trw)	122.14	47.41	0.47	2.69	57,906.57	122,140.00	Media
Suelos Mr-Bosque-Pómez y aluvión (Qpal)	74.41	298.98	2.99	16.98	222,467.29	74,410.00	Media
Suelos Mr-Pastos-Pómez y aluvión (Qpal)	258.53	242.44	2.42	13.76	626,785.30	258,530.00	Alta
Suelos Mr-Pastos-Toba dacítica (Trw)	269.73	2.51	0.02	0.14	6,772.92	269,730.00	Alta
Suelos Mr-Pastos-Andesita y basalto (Tab)	237.47	15.85	0.16	0.90	37,627.12	237,470.00	Alta
Suelos Af-Bosque-Toba riolítica (Trt)	201.68	31.26	0.31	1.77	63,061.30	201,680.00	Alta
Suelos Af-Bosque-Andesita y Basalto (Tab)	195.99	14.75	0.14	0.83	28,924.20	195,990.00	Alta
Suelos AF-Bosque-Pómez y aluvión (Qpal)	109.23	219.87	2.20	12.48	240,170.55	109,230.00	Media
Suelos Af-Pastos y cultivos-Pómez y aluvión (Qpal)	70.9	80.19	0.80	4.55	56,859.67	70,900.00	Media
Suelos Gt-Bosque-Pómez y aluvión (Qpal)	112.33	60.56	0.60	3.43	68,032.665	112,330.00	Media
TOTAL	1767.2	1760.87	17.609	100.000	1,497,878.650		

De los resultados del balance hídrico por unidad de recarga, se determinaron los volúmenes de agua por km², como se muestra en el cuadro 12, los cuales se compararon con los rangos de infiltración preestablecidos por Herrera (15), que se detallan a continuación:

Muy alta: > de 300,000 m³/km²/año.
Alta: entre 150,000 a 300,000 m³/km²/año.
Media: entre 50,000 a 150,000 m³/km²/año.
Baja: < de 50,000 m³/km²/año.
Sin recarga

De la comparación de los resultados y rangos preescritos, se realizó el mapa de zonas de recarga hídrica, categorizando cada unidad de recarga (Figura 19).

En los cuadros 13A á 24A de los anexos se presentan los resultados de los balances hídricos de la subcuenca.

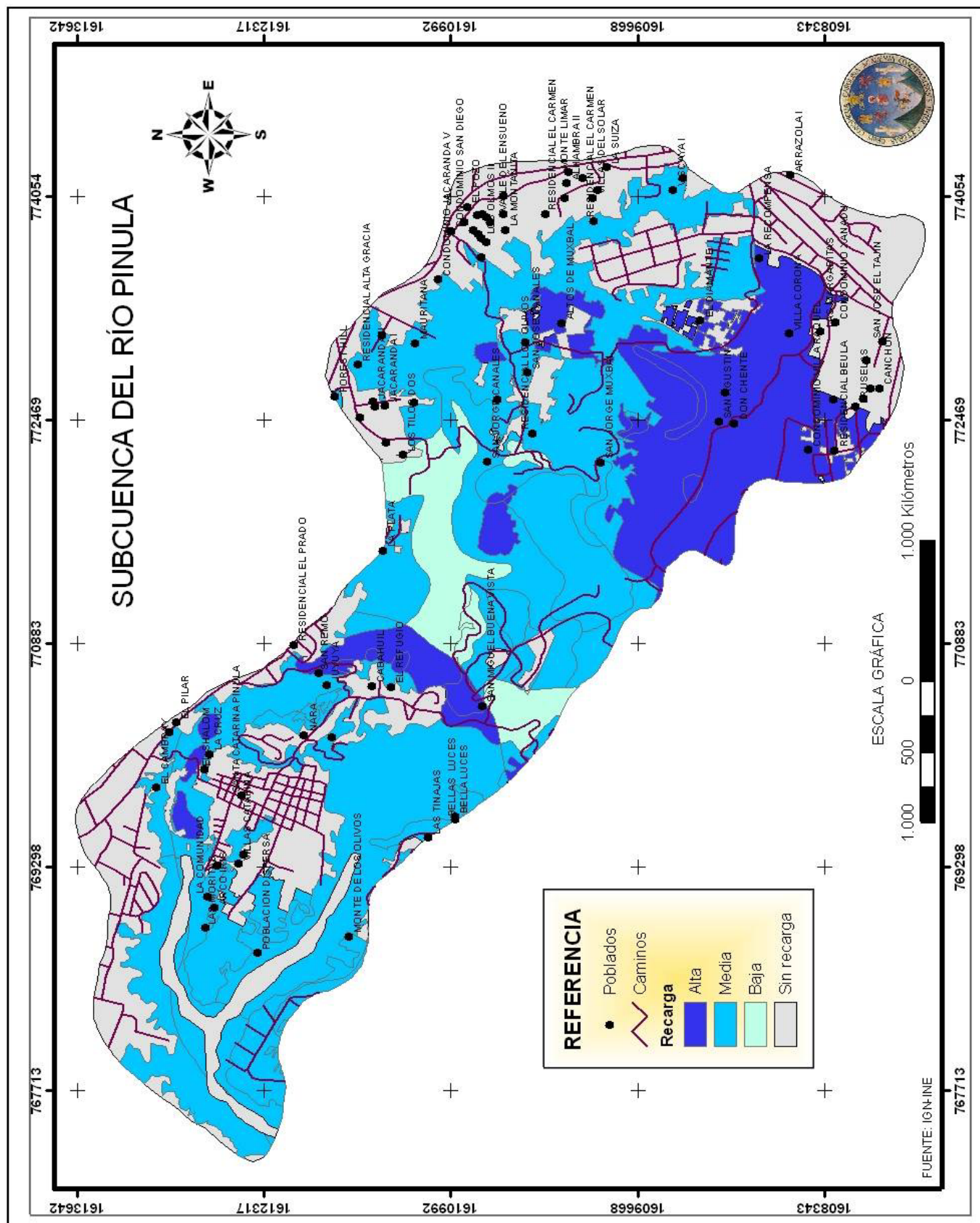


Figura 19 Mapa de zonas de recarga hídrica.

6.3 Propuesta de Manejo y Uso Sostenible para Recurso el Hídrico

Al considerar la información técnico-científica generada en este estudio en lo que respecta al recurso hídrico y algunas características del acuífero de la subcuenca, se definieron algunos lineamientos de administración sustentable de los recursos físicos y en especial el hídrico.

La disponibilidad de agua en el presente y en el futuro para el área de estudio depende del manejo sistematizado de los recursos naturales, factores ambientales y la influencia de la dinámica poblacional aunado a este último, el régimen de la propiedad de la tierra.

6.3.1. Lineamientos

6.3.1.1. Conservación

- A. El manejo y conservación de la subcuenca debe ser en forma integral, tomando en cuenta los resultados de la interpretación de uso y cobertura del suelo con fotografía aérea del año 2001, contando con una extensión territorial de 1,760.86 hectáreas (17.6 Km²), de los cuales 49.71% (875.31 Ha) de bosque, 0.52% (9.52 Ha) de cultivos anuales, 18.64% (1.06Ha) de cultivos anuales y pastos naturales, 17.55% (308.94Ha) de pastos naturales, 0.23% (4.12Ha) de pastos naturales y áreas construidas, y 30.93% (544.58 Ha) de área urbana.
- B. Se debe tomar en cuenta que el crecimiento de la infraestructura urbana del año 1954 a 1981 y de este a 2001, ha crecido en un 7.07 y 8.1 % respectivamente con una tendencia acelerada en la parte alta y pendientes que van de 0 a 32 %, además que las áreas en las que se desarrollan estas actividades son propiedad privada, de tal cuenta que se propone como mínimo la conservación de las áreas boscosas existentes en toda la subcuenca que concuerdan con una fisiografía de cañones y áreas con pendientes mayores al 16%.
- C. Debido a la topografía (pendiente) y el tipo de suelo, el cual es franco arcilloso y arenoso en mayor parte del área, se hace muy susceptible a la erosión hídrica, en base a lo anterior, las laderas con cobertura de matorral y pastos naturales generan escorrentía que esporádicamente en tiempo de lluvia erosionan el suelo, por lo que se recomienda practicas

de conservación de suelo y específicamente la reforestación para promover la conservación del recurso lo que conlleva a su vez a garantizar la calidad y cantidad del recurso suelo y agua en la zona.

6.3.1.2. Investigación

- A. La sostenibilidad y manejo de los recursos deben estar fundamentados y basados en la investigación, por lo que se proponen estudios exhaustivos con datos confiables y extensos que permitan generar modelos de las condiciones actuales y futuras según la demanda y oferta de recursos dentro y fuera de la subcuenca.
- B. Inicialmente se propone un estudio taxonómico de suelos a nivel detallado, ya que al contar con características fisicoquímicas por horizonte permite precisar el comportamiento tanto físico como químico por unidad de suelo tomando en cuenta los factores externos de cobertura y clima.
- C. Dentro de la subcuenca o cercana a ella se recomienda colocar por lo menos 2 estaciones meteorológicas sistematizadas con cubrimientos de 3 Km. de radio cada una, especialmente en la parte alta que es donde ocurren las mayores precipitaciones y no se cuenta con datos representativos, con lo que se pretende precisar los cálculos y comportamiento de las entradas y salidas del recurso hídrico superficial y subterráneo.
- D. Actualmente no se cuenta con un censo de pozos y sus explotaciones debido a que se hacen perforaciones sin las licencias correspondientes y tampoco existe la ubicación de pozos antiguos. La falta de datos como lo es niveles, movimiento, abatimiento, caudales de salida constantes y calidad de agua serán necesarios a mediano plazo para regular la explotación del agua subterránea bajo el concepto de sustentabilidad.
- E. Debido a que en la parte alta de la subcuenca correspondiente al área de 0-4 % y cobertura de suelo de pastos naturales, se obtuvo información de un pozo artesanal con un nivel de profundidad en el mes de septiembre del 2003 de 7.60 metros y en el mes de febrero del 2004 de 8.76 metros. De lo anterior se propone la ubicación de un

campo piezométrico, esto con el objetivo de poder determinar la fluctuación del nivel y el potencial de aguas subterráneas que se localiza en la parte alta y en base a ello definir políticas de uso del suelo para garantizar la disponibilidad y explotación del agua, ya que esta es la parte con recarga hídrica alta, pero por el mayor crecimiento poblacional conlleva a la impermeabilización del suelo.

- F. Es importante realizar pruebas de bombeo con piezómetros para determinar la transmisividad u el coeficiente de almacenamiento, que son las características más importante del acuífero

- G. Según datos de la planta de tratamiento de agua El Cambray de EMPAGUA, En promedio 4.6 millones de m³/año de agua potable provenientes de los causes de la subcuenca del Río Pinula son utilizados fuera de esta, no sabiéndose con exactitud el potencial de aguas superficiales, por lo que es necesario establecer estaciones hidrométricas, una a mitad del curso del Río Pinula y la otra en el punto de aforo para determinar el caudal en tiempo y espacio, esto con el objetivo de reducir la dependencia de agua de los mantos freáticos, los cuales se encuentran cada año a mayores profundidades, lo que refleja mayores costos de producción, capital que puede ser invertido en la implementación de dichas estaciones e infraestructuras para explotar las aguas superficiales de manera sostenible.

7. CONCLUSIONES

- 7.1 De acuerdo al estudio de suelos, geología y ocupación del suelo (bosque, pastos y cultivos anuales), se determinaron 13 unidades de recarga hídrica, en las cuales se hicieron pruebas de velocidad infiltración, y muestro de suelos para conocer las constantes de humedad y densidad aparente, todos estos valores necesarios para el cálculo de la recarga al acuífero, por medio del balance hídrico. A partir del balance hídrico se determinaron las laminas de agua de cada unidad, estimándose una recarga de 1.5 millones de metros cúbicos al acuífero para el año hidrológico agosto 2,003 a julio 2,004.
- 7.2 Del análisis de caudales diferenciales se concluye que los ríos Pinula y Panasequeque, son efluentes, es decir, que el agua subterránea aumenta los caudales de estos de manera directa por manantiales y el flujo subsuperficial que drena a través de las unidades de suelo y geología. El Río Pinula aumenta su caudal desde el primer punto de aforo R1-Pinula1 hasta el punto de aforo de este ramal R1-Pinula2 en 69.48 L/s como caudal medio anual. El Río Panasequeque aumenta su caudal desde el primer punto de aforo R2-Panasequeque1 hasta el punto de aforo de este ramal R2-Panasequeque2 en 23.04 L/s como caudal medio anual. Es importante hacer notar que no se tomaron en cuenta las aguas servidas que drenan directamente a los ríos especialmente en la cabecera municipal de Santa Catarina Pinula.
- 7.3 La precipitación media anual fue calculada en forma directa de los datos de la estación INSIVUMEH, debido a que es la única que tiene influencia y es la más cercana al área de estudio, reportando 1257 mm de precipitación para el año hidrológico 2003-2004, de los cuales al hacer el balance hídrico infiltraron en promedio 916 mm de lluvia y una escorrentía superficial de 340 mm.
- 7.4 El mapa geológico muestra 8 fallas entre las que se encuentra la de Santa Catarina Pinula, algunas muestran movimiento relativo. Estas prácticamente cortan las formaciones del Terciario, lo que favorece a la fracturación de la roca y la hace una zona con características adecuadas para el almacenaje como se observa en los perfiles hidrogeológicos, y a la vez favorece movimientos del agua tanto vertical como horizontalmente.

7.5 En la subcuenca del Río Pinula, específicamente en el área de la cabecera municipal del Municipio de Santa. Catarina Pinula, se determinó una transmisividad de 68.26 y 29.23 m²/día por los métodos de Jacob y Theis respectivamente. De los datos obtenidos se concluye que el acuífero tiene características adecuadas para su explotación de manera sostenible con propósitos de uso doméstico por tener una transmisividad baja.

7.6 De acuerdo a los resultados del balance hídrico de suelos en la subcuenca existe una recarga al acuífero aproximada de 1,5 millones de m³ para el año hidrológico abril 2003 a marzo 2004. Haciendo el supuesto de que dicho volumen de agua llegue directamente a recargar el acuífero, que aprovechable económica y técnicamente podría abastecer aproximadamente a 29,350 personas con un consumo de 140 lts/día per cápita manejándolo sustentablemente y tomando en cuenta que la actividad industrial y agrícola es mínima, según conocimiento y chequeos de campo.

8. RECOMENDACIONES

- 8.1 La forma adecuada para cuantificar la potencialidad del acuífero, es comparando los volúmenes totales de la recarga y de la extracción de las aguas subterráneas monitoreados de forma constante (mensual), con el fin de determinar las reservas potenciales y no afectar las reservas permanentes.
- 8.2 Debido a que el crecimiento demográfico es evidente, y con este aumenta la demanda de extracción de aguas subterráneas, es importante realizar con cada perforación de pozo existente y por existir pruebas de bombeo largas (más de 48 horas), con al menos un piezómetro instalado cerca de este, entre 5 a 30 metros de distancia y con rejilla en el mismo acuífero, para determinar los parámetros hidrogeológicos como la transmisividad, el coeficiente de almacenamiento y la distancia recomendable para que no exista interferencia entre pozos.
- 8.2 Es recomendable la instalación de estructuras de aforo en los ríos Pinula y Panasequeque para determinar la potencialidad de las aguas superficiales y que estas sean utilizadas dentro y fuera de la subcuenca de manera sostenible.
- 8.3 Es importante realizar muestreos tanto del agua superficial como subterráneas para determinar las propiedades físico-químicas y bacteriológicas del agua para garantizar la calidad para consumo humano.
- 8.4 Es importante tomar en cuenta las PROPUESTAS DE MANEJO Y USO SOSTENIBLE PARA EL RECURSO HIDRICO, para que se tomen las acciones técnicas, científicas y políticas para garantizar la sostenibilidad y sustentabilidad de la subcuenca del río Pinula.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Amisial L, RA. 1978. Aprovechamiento y modelos de aguas subterráneas. Mérida, Venezuela, CIDIAT. 75 p. (Serie hidrología).
2. Bandes, T. 1984. Curso interamericano sobre planificación de los recursos naturales renovables: recurso agua. Mérida, Venezuela, IDITA. 57 p.
3. Basso, E. 1967. Medidas de evaporación, proyecto de mejoramiento hidrometeorológico Centroamericano. Tegucigalpa, Honduras, UNESCO. p. 13–30.
4. Cifuentes B, JG. 2000. Estudio de la cobertura de tres cultivos sobre la erosión hídrica del suelo, en la parte media de la cuenca del río Itzapa, San Andrés Itzapa, Chimaltenango (fase III). Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 60 p.
5. Correu T, G. 1974. Manual para el alumbramiento de aguas subterráneas. México, FIRA. 211 p.
6. Cruz S, JR De la. 1973. Clasificación de las zonas de vida de Guatemala, basada en el sistema Holdridge. Guatemala, Instituto Nacional Forestal. 83 p.
7. Custodio, E; Llamas, MR. 2001. Hidrología subterránea. 2 ed. Barcelona, España, Omega. v. 1-2, 2,350 p.
8. DIRYA (Dirección Técnica de Riego y Avenimiento, GT). 1991. Plan maestro de riego y drenaje, hidrogeología-disponibilidad de agua subterránea. Guatemala, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. 72 p.
9. ERIS (Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, GT). 2005. Evaluación físico-químico de la planta de tratamiento de agua potable El Cambray, de la ciudad de Guatemala, informe de curso: química y microbiología del agua. Guatemala. 34 p.
10. González R, BE. 2002. Evaluación del efecto del crecimiento urbano, en la cobertura vegetal y uso del suelo en la subcuenca del río Platanitos, Guatemala. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 83 p.
11. Herrera I, IR. 1995. Manual de hidrología. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 223 p.
12. _____. 1998. Reconocimiento hidrogeológico de la cuenca del río Itzapa, departamento de Chimaltenango, Guatemala. MSc. Manejo Rec. Hídric. e Hidrogeol. Costa Rica, Universidad de Costa Rica, Escuela Centroamericana de Geología. 104 p.
13. _____. 2001. Recarga hídrica especialidad en planificación y manejo de recursos hídricos en Agronomía. MSc. Man. Sost. Suelo y Agua. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 35 p.

14. _____. 2002. Hidrogeología práctica. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. v. 1, 190 p.
15. _____. 2005. Estudio hidrogeológico de la cuenca norte del Lago de Atitlán, Solola, Guatemala. *In* Congreso latinoamericano de hidrogeología (2005, Managua, Nicaragua). Memorias. Managua, Nicaragua, s.e. 105 p.
16. IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT). 1977. Mapa geológico de la república de Guatemala; hoja Ciudad de Guatemala, no. 2059–IG. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
17. _____. 1980. Mapa geológico de la república de Guatemala; hoja San José Pinula, no. 2159–IVG. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
18. _____. 1983. Mapa topográfico de la república de Guatemala; hoja San José Pinula, no. 2159–IV. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
19. _____. 1987. Guía para la aplicación de sensores remotos. Guatemala. 70 p.
20. _____. 2000. Mapa topográfico de la república de Guatemala; hoja Ciudad de Guatemala, no. 2059–I. Guatemala. Esc. 1:50,000. Color.
21. Illescas F, OH. 1989. Diagnostico preliminar de los usos de la tierra (agrícola, urbano e industrial) y sus impactos ambientales en la subcuenca del lago de Amatitlán. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 95 p.
22. INE (Instituto Nacional de Estadística, GT). 2002. Censos nacionales XI de población y VI de habitación. Guatemala. 272 p.
23. INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, GT); IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT); ONU, GT. 1976. Estudio de las aguas subterráneas en el valle de Guatemala. Guatemala, Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas. 303 p.
24. Johnson Division, US. 1975. El agua subterránea y los pozos. Minnessota, US. 513 p.
25. Kruseman, G. 1975. Análisis y evaluación de los datos de ensayos por bombeo. Wageningen, The Netherlands, International Institute for Land Reclamation and Improvement. 1,212 p.
26. Lamarre, AL. *et al.* 1971. The geology of the San José Pinula quadrangle, Guatemala. US, Dartmouth College Hanover. 102 p.
27. Lynsley, RK; Kohler, MA; Paulhus, LH. 1988. Hidrología para ingenieros. Trad. por Alejandro Deeb, Jaime Iván Ordóñez y Fabio Castrillón. México, McGraw-Hill. 48 p.
28. Mánzo B, DE. 2004. Estudio multitemporal de la subcuenca del río Pinula, Santa Catarina Pinula, Guatemala. EPSA Investigación Inferencial. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 51 p.

29. Mendoza I, JA. 2000. Caracterización del sistema de producción agropecuario del noreste de los municipios de Santa Eulalia y San Pedro Soloma, Huehuetenango. Tesis Ing. Agr. Huehuetenango, Guatemala, USAC, Centro Universitario del Noroccidente. 70 p.
30. Mota, E. 2002. Determinación de zonas de recarga hídrica. Guatemala, INAB. 34 p.
31. Sánchez P, GA. 1998. Evaluación de la cobertura vegetal y manejo de tres cultivos, sobre la erosión hídrica en la parte media de la cuenca del río Itzapa (fase III). Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 57 p.
32. Sandoval I, JE. 1989. Principio de riego y drenaje. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 345 p.
33. Santos M, EG. 1997. Simulación hidrológica para la calibración de parámetros de escorrentía en la cuenca del río La Virgen, San Andrés Itzapa, Chimaltenango. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC. 95 p.
34. Savanije H, HG. 1995. Hidrología para ingenieros. *In* Curso nacional de drenaje agrícola y control de inundaciones a nivel de postgrado (1, 1995, Guatemala). Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 75 p.
35. Simmons, C; Tárano, JM; Pinto, JH. 1959. Clasificación de reconocimiento de los suelos de la república de Guatemala. Trad. Pedro Tirado Sulsona. Guatemala, José De Pineda Ibarra. 1000 p.
36. Velasco, I. 1981. Aspectos generales de la hidráulica de pozos. Chapingo, México, Universidad Autónoma de Chapingo. 51 p.
37. Taracena H, JJ. 1999. Determinación de la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo y propuestas de políticas y estrategias de uso en la cuenca del río Itzapa del departamento de Chimaltenango. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 103 p.
38. Yol Z, VE. 2002. Evaluación de propuesta de manejo y uso sostenible del recurso hídrico de la finca Sabana Grande, El Rodeo, Escuintla. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 107 p.

10. ANEXOS

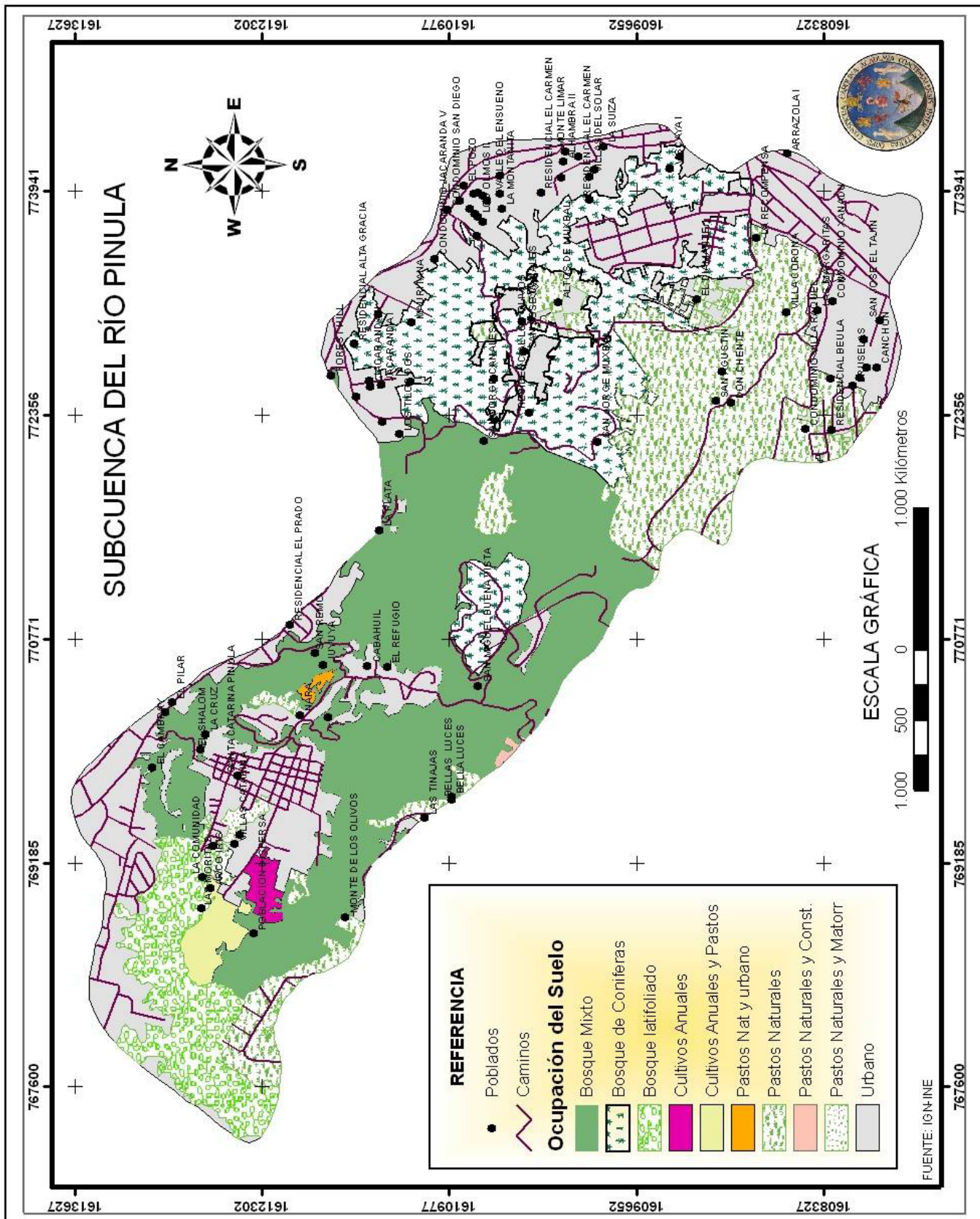


Figura 20A Mapa de Ocupación del Suelo, Año 2001.

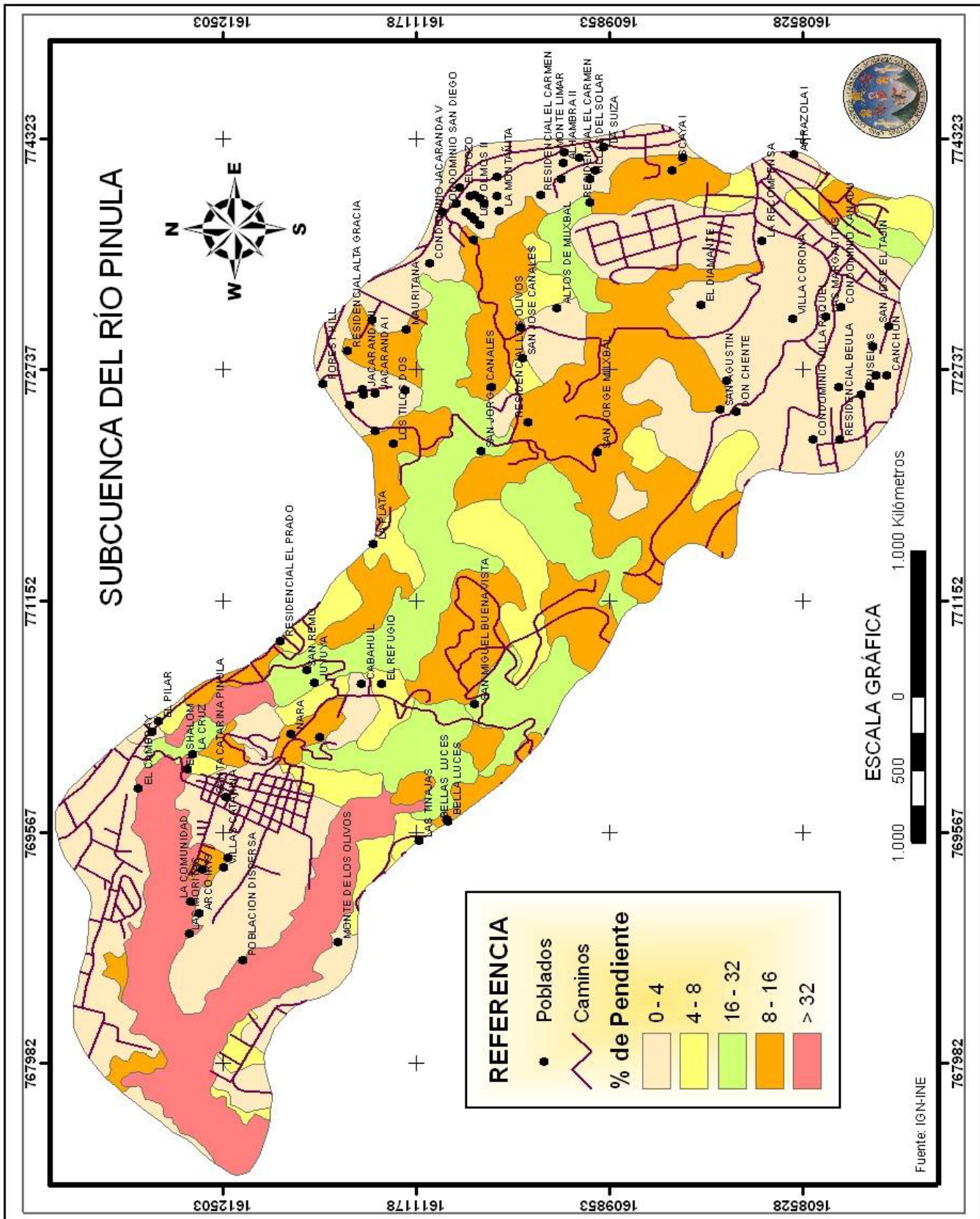


Figura 21A Mapa de Pendientes.

Velocidad de infiltración de agua en el suelo, prueba 1. Serie de suelos Moran, ocupación del suelo pastos naturales, y geología aluvión y sedimentos (Qpal).

Para determinar la velocidad de infiltración básica se promediaron por lo menos los últimos 5 datos, los cuales se consideraron estables, obteniendo valores de 3.6658 cm/hr o 879.82 mm/día. La figura 16 muestra la variación de velocidad con respecto al tiempo de prueba.

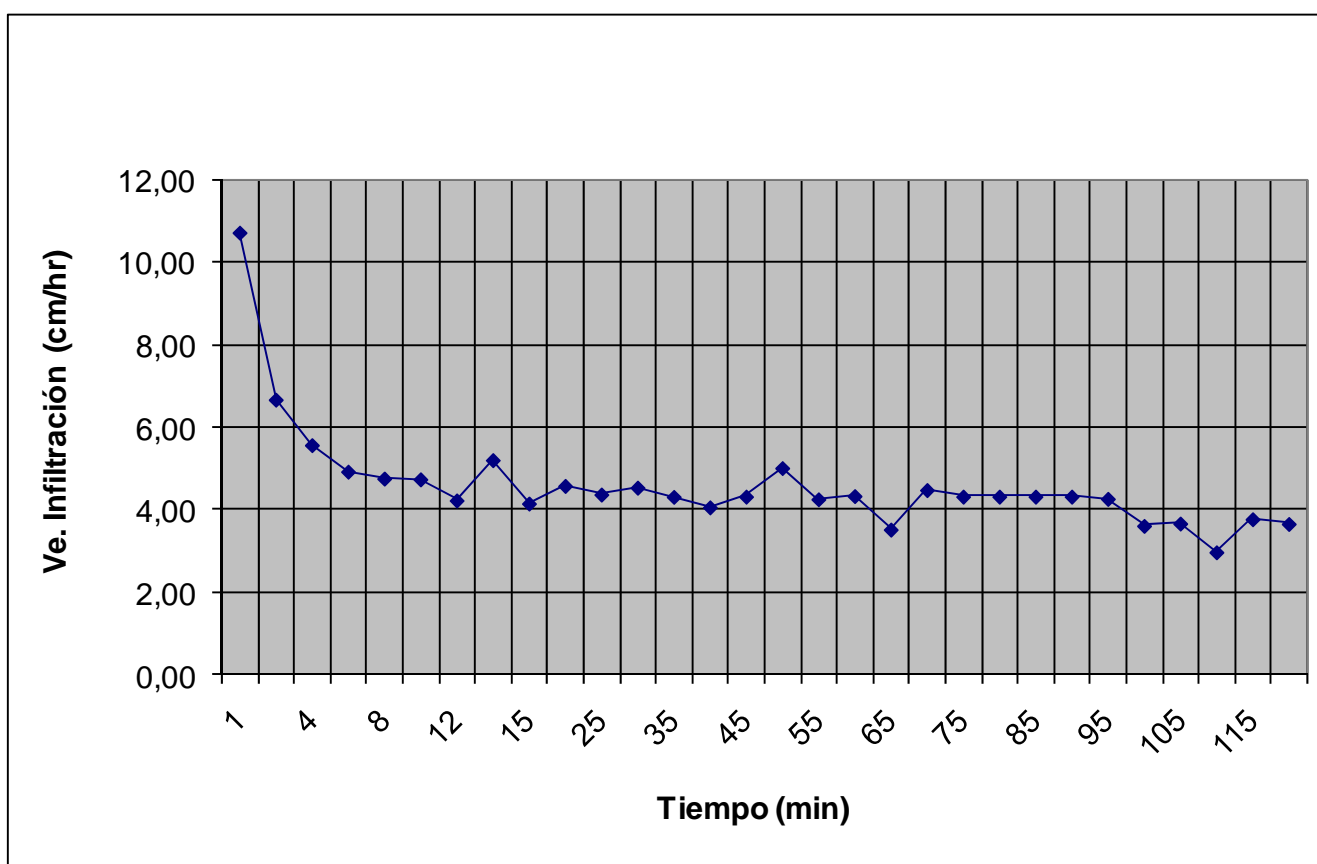


Figura 22A Prueba de infiltración de suelos 1.

Velocidad de infiltración de agua en el suelo, prueba 2. Serie de suelos Moran, ocupación del suelo bosque, y geología Toba dacítica (Trw)

Para determinar la velocidad de infiltración básica se promediaron por lo menos los últimos 5 datos, los cuales se consideraron estables, obteniendo valores de 4.4542 cm/hr o 1069.02 mm/día. La figura 17 muestra la variación de velocidad con respecto al tiempo de prueba.

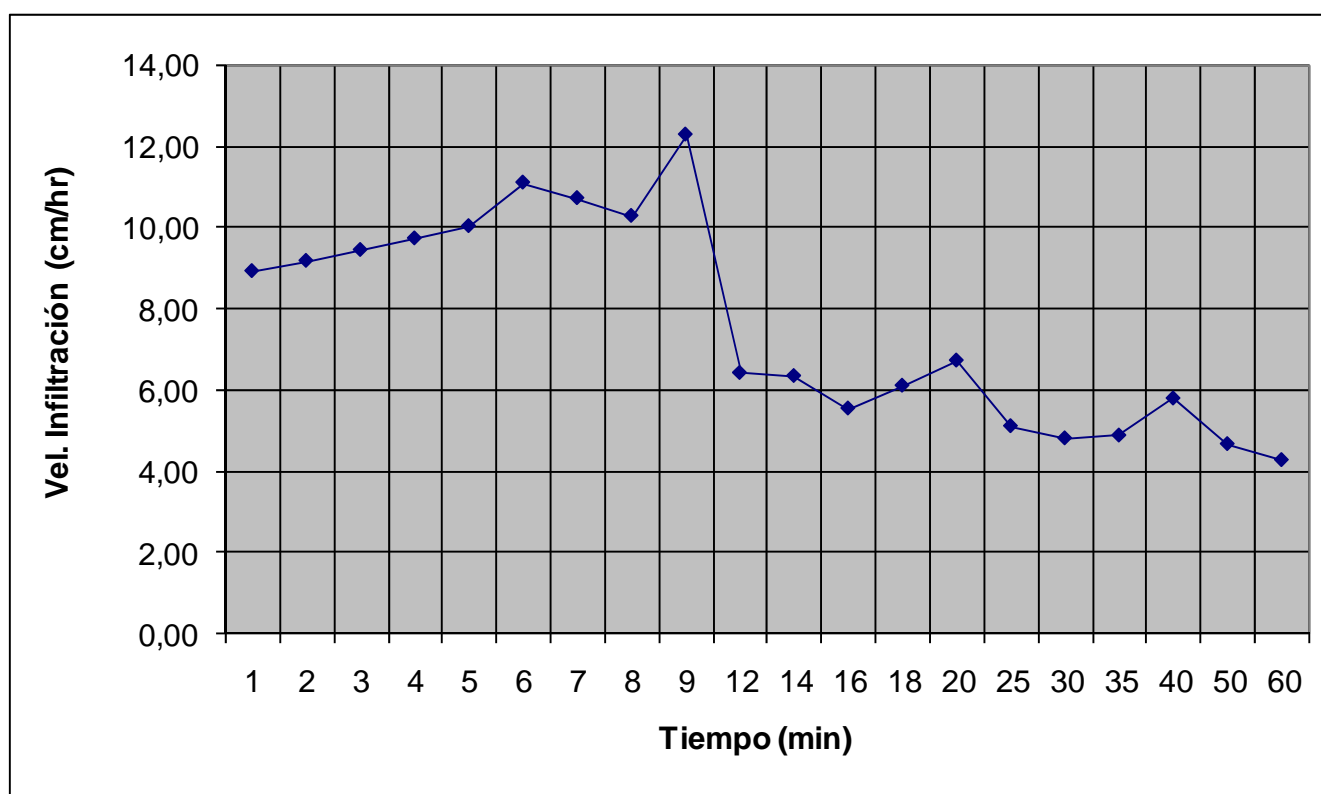


Figura 23A Prueba de infiltración de suelos 2.

Velocidad de infiltración de agua en el suelo, prueba 3. Serie de suelos Moran, ocupación del suelo Bosque y pómez - aluvión (Qpal)

Para determinar la velocidad de infiltración básica se promediaron por lo menos los últimos 5 datos, los cuales se consideraron estables, obteniendo valores de 2.5402 cm/hr o 609.666 mm/día. La figura 18 muestra la variación de velocidad con respecto al tiempo de prueba.

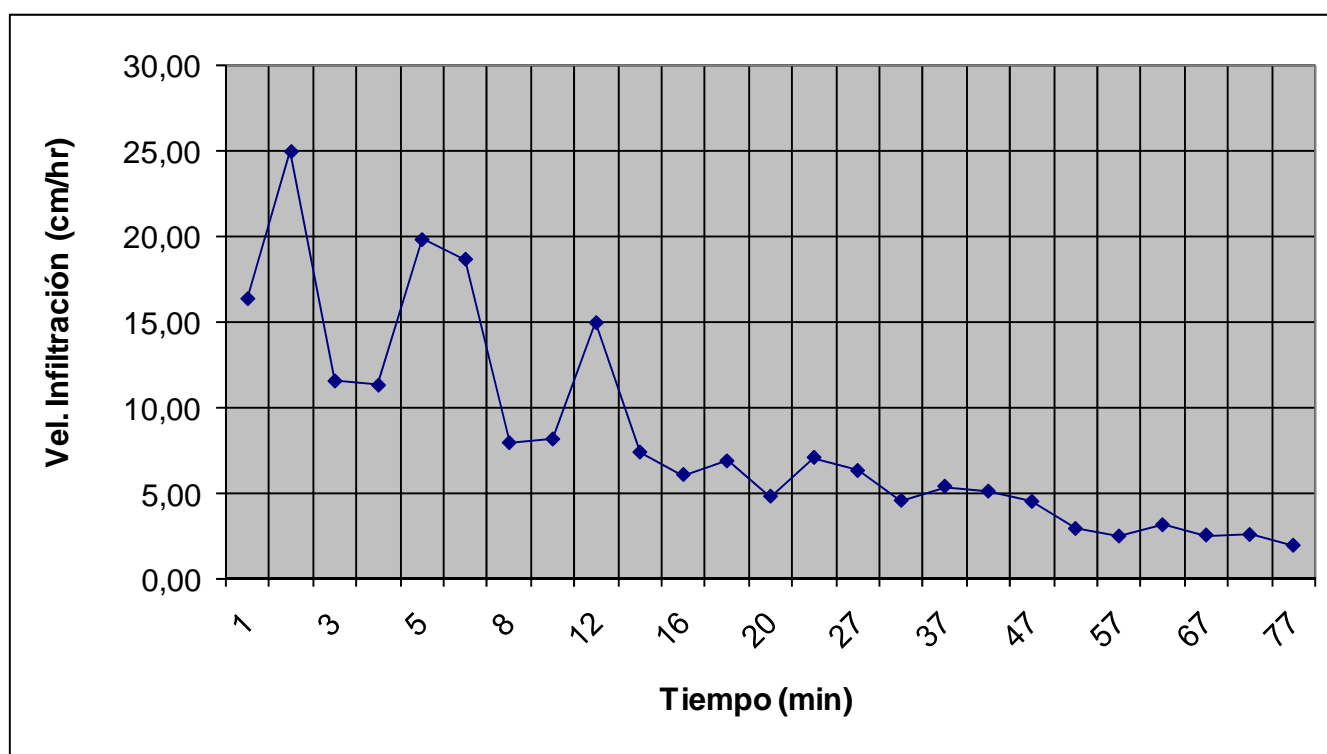


Figura 24A Prueba de infiltración de suelos 3.

Velocidad de infiltración de agua en el suelo, prueba 4. Serie de suelos Moran, ocupación del suelo Bosque y Andesita-basalto (Tab).

Para determinar la velocidad de infiltración básica se promediaron por lo menos los últimos 5 datos, los cuales se consideraron estables, obteniendo valores de 3.00 cm/hr o 720.00 mm/día. La figura 19 muestra la variación de velocidad con respecto al tiempo de prueba.

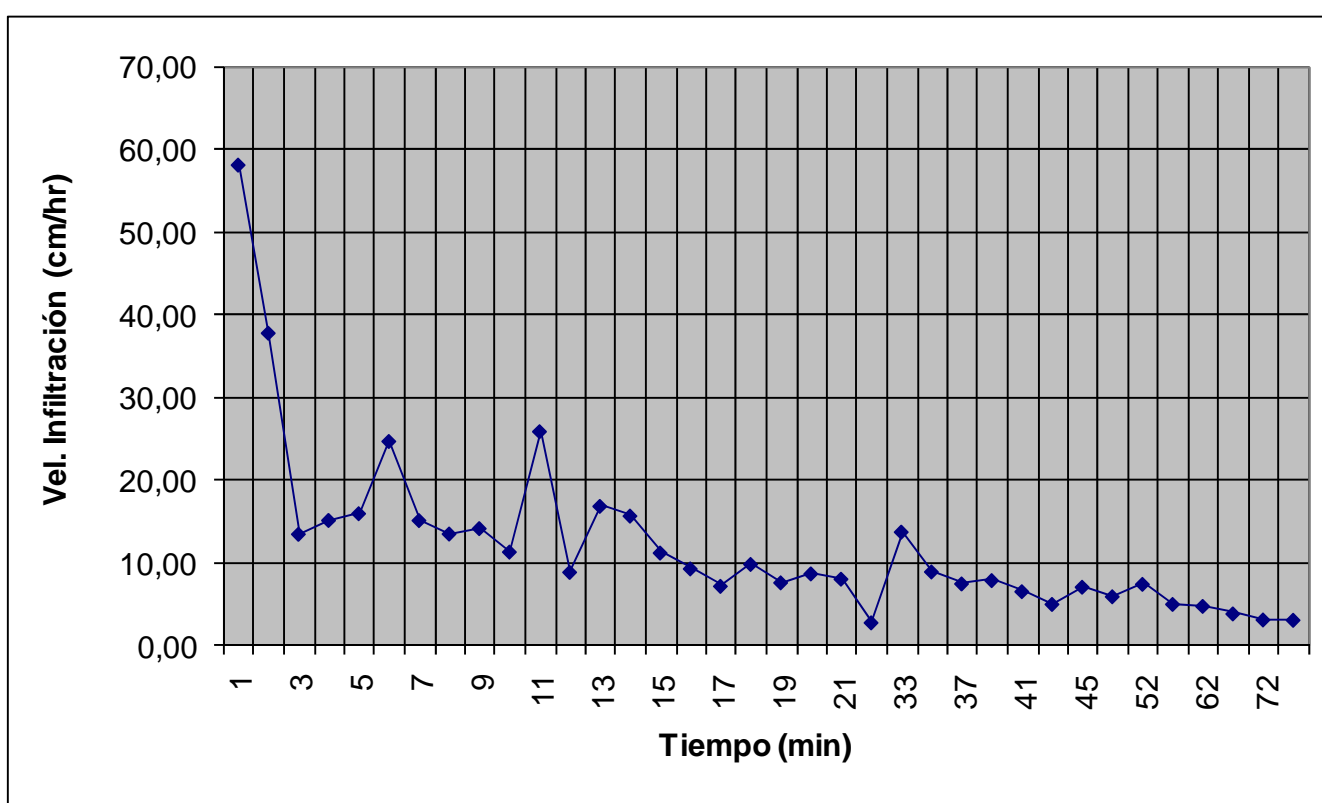


Figura 25A Prueba de infiltración de suelos 4.

Velocidad de infiltración de agua en el suelo, prueba 5. Serie de suelos Moran, ocupación del suelo Bosque y Toba riolítica (Trt).

Para determinar la velocidad de infiltración básica se promediaron por lo menos los últimos 5 datos, los cuales se consideraron estables, obteniendo valores de 0.9134 cm/hr o 219.22 mm/día. La figura 20 muestra la variación de velocidad con respecto al tiempo de prueba.

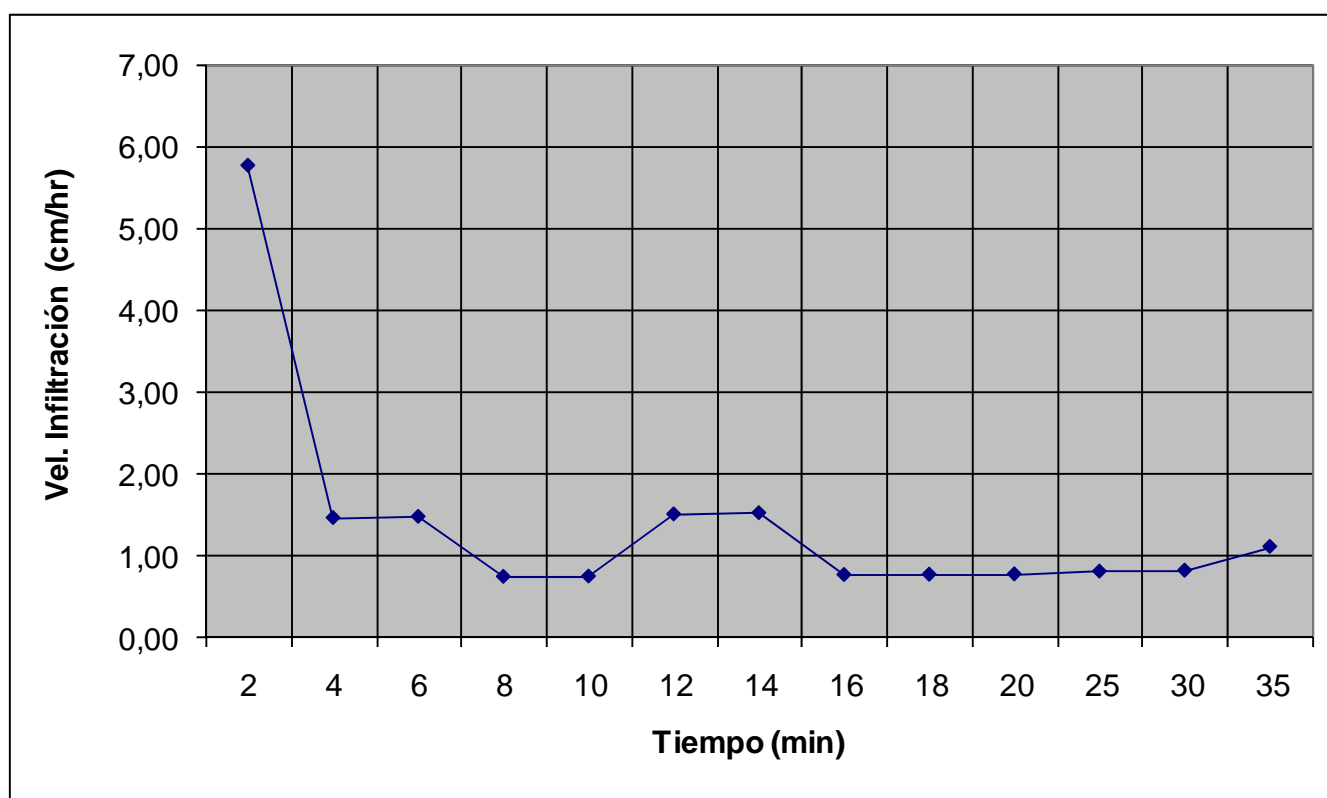


Figura 26A Prueba de infiltración de suelos 5.

Velocidad de infiltración de agua en el suelo, prueba 6. Serie de suelos Áreas Fragasas, ocupación del suelo Bosque y pómez y aluvión (Qpal)

Para determinar la velocidad de infiltración básica se promediaron por lo menos los últimos 3 datos, los cuales se consideraron estables, obteniendo valores de 4.98 cm/hr o 1195.2 mm/día. La figura 21 muestra la variación de velocidad con respecto al tiempo de prueba.

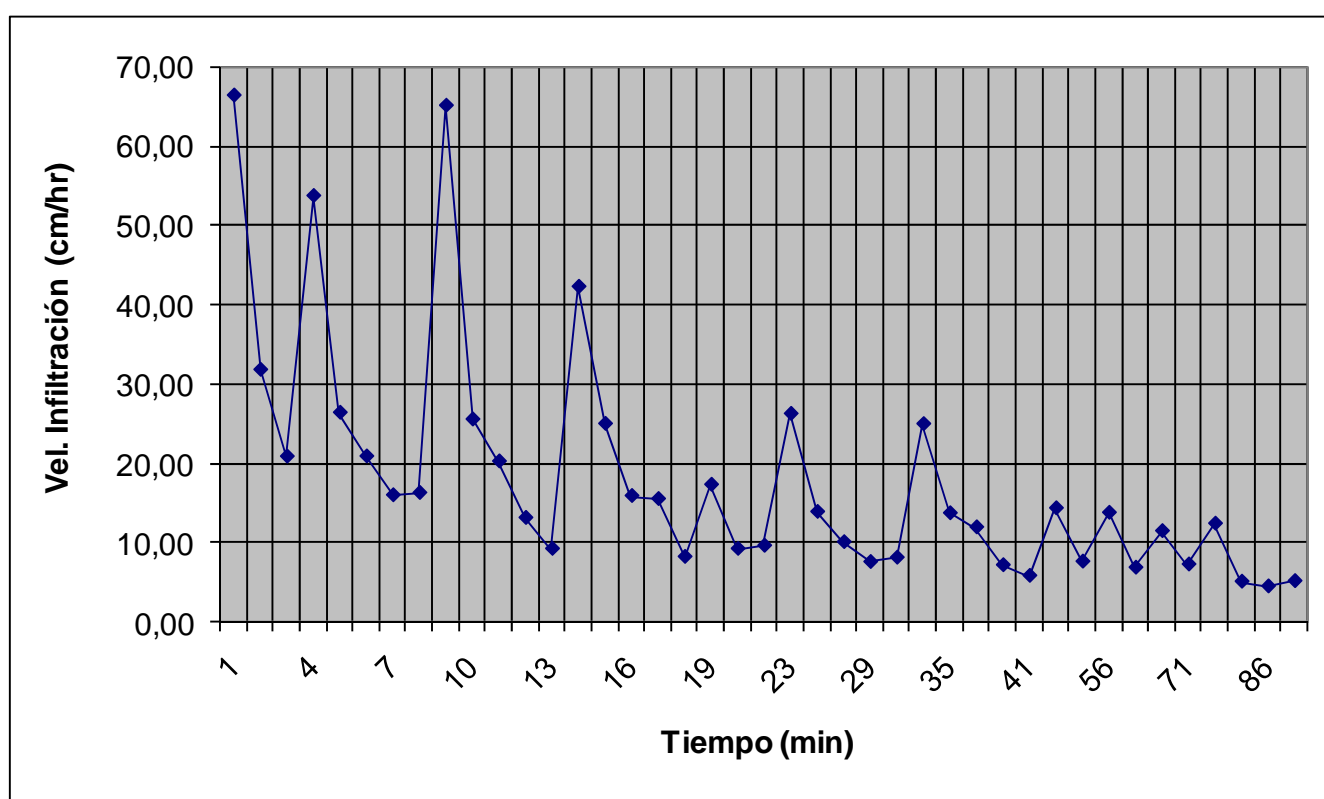


Figura 27A Prueba de infiltración de suelos 6.

Velocidad de infiltración de agua en el suelo, prueba 7. Serie de suelos Áreas Fragasas, ocupación del suelo Bosque y Toba riolítica (Trt).

Para determinar la velocidad de infiltración básica se promediaron por lo menos los últimos 5 datos, los cuales se consideraron estables, obteniendo valores de 6.1524cm/hr o 1476.56 mm/día. La figura 22 muestra la variación de velocidad con respecto al tiempo de prueba.

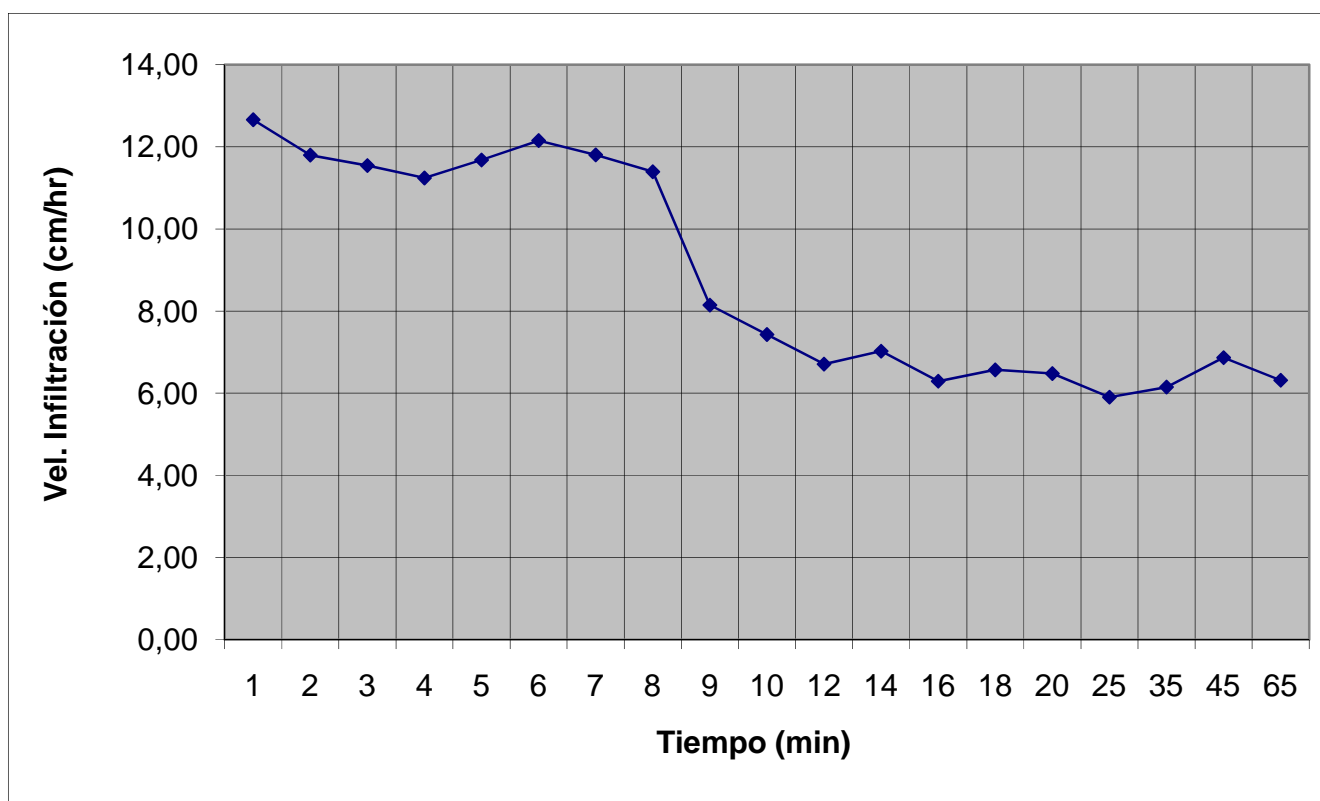


Figura 28A Prueba de infiltración de suelos 7.

Velocidad de infiltración de agua en el suelo, prueba 8. Serie de suelos Áreas Fragasas, ocupación Bosque y Toba riolítica (Trt).

Para determinar la velocidad de infiltración básica se promediaron por lo menos los últimos 5 datos, los cuales se consideraron estables, obteniendo valores de 6.05cm/hr o 1452.02 mm/día. La figura 23 muestra la variación de velocidad con respecto al tiempo de prueba.

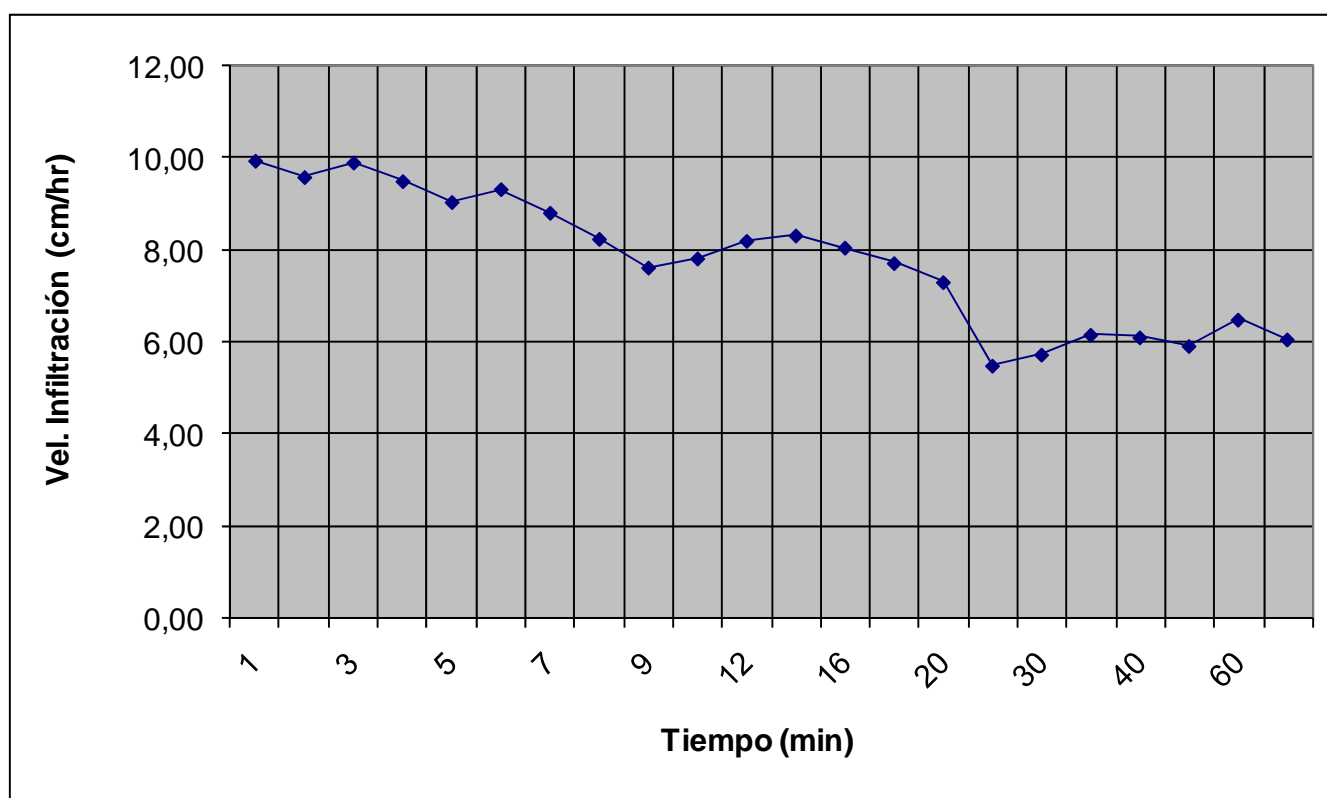


Figura 29A Prueba de infiltración de suelos 8.

Velocidad de infiltración de agua en el suelo, prueba 9. Serie de suelos Áreas Fragasas, ocupación del suelo pastos-cultivos y pómez-aluvión (Qpal).

Para determinar la velocidad de infiltración básica se promediaron todos los datos, los cuales se consideraron estables, ya que en el tiempo de prueba de 40 minutos solo hubo una diferencia de niveles de agua de 1.8 cm, obteniendo valores de 0.61 cm/hr o 146.687 mm/día de velocidad de infiltración. La figura 24 muestra la variación de velocidad con respecto al tiempo de prueba.

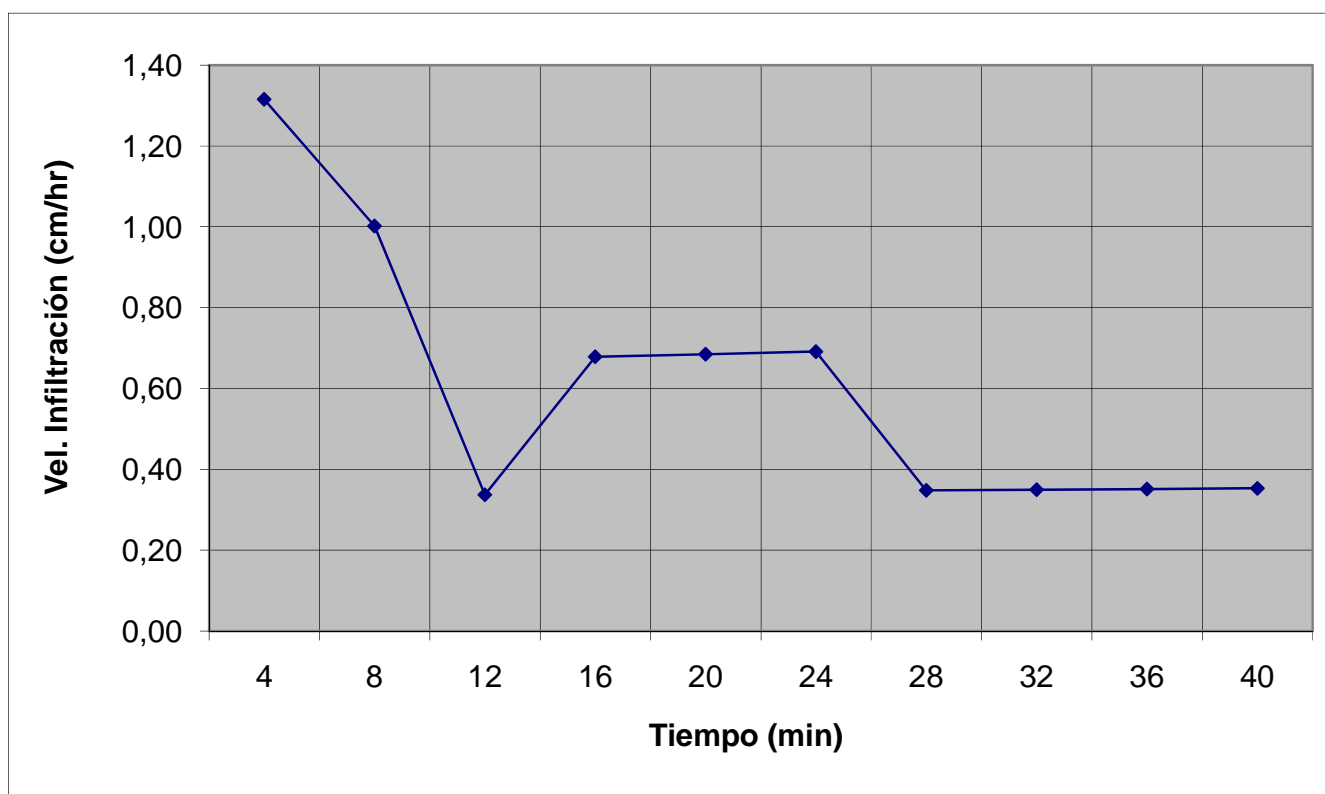


Figura 30A Prueba de infiltración de suelos 9.

Velocidad de infiltración de agua en el suelo, prueba 10. Serie de suelos Guatemala, ocupación del suelo Bosque y pómez-aluvión (Qpal).

Para determinar la velocidad de infiltración básica se promediaron por lo menos los últimos 5 datos, los cuales se consideraron estables, obteniendo valores de 9.00cm/hr o 2160.00 mm/día. La figura 25 muestra la variación de velocidad con respecto al tiempo de prueba.

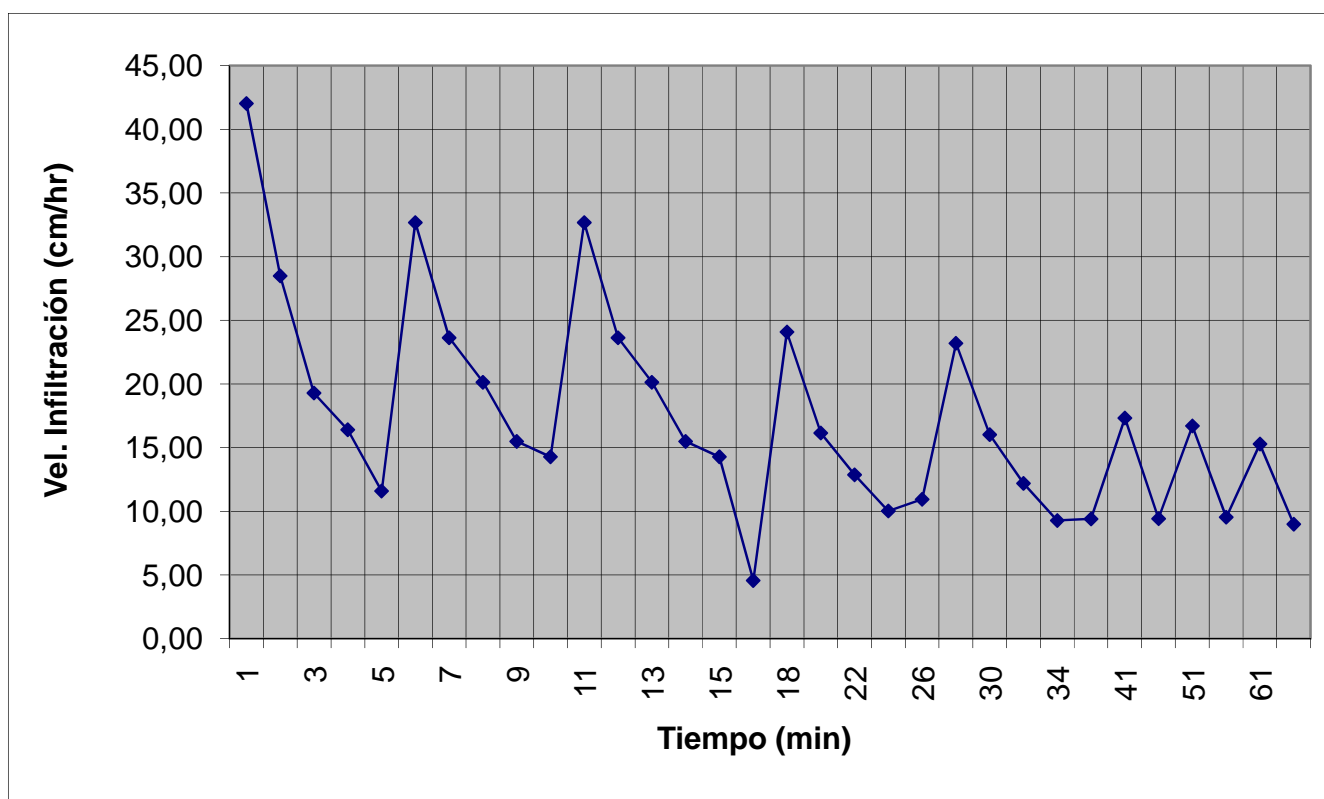


Figura 31A Prueba de infiltración de suelos 10.

Cuadro 13A Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 1, a través del método de variación lineal para la evapotranspiración real.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	Total
P (mm)	36.8	159.9	303.1	186.8	109.4	374.2	42.1	18.6	2.0	0.2	0.5	23.9	1257.50
Pi (mm)	20.09	87.29	165.47	101.98	59.72	204.28	22.98	10.15	1.09	0.11	0.27	13.05	686.48
ESC (mm)	16.71	72.61	137.63	84.82	49.68	169.92	19.12	8.45	0.91	0.09	0.23	10.85	571.02
ETP (mm)	146.77	142.81	126.73	141.32	147.81	125.29	123.81	111.28	110.02	114.82	112.29	144.65	1547.57
HSi (mm)	629.32	641.12	688.16	768.88	773.34	748.60	831.51	770.66	728.13	694.74	671.60	656.99	
HD (mm)	20.09	99.09	224.30	241.54	203.74	323.56	225.18	151.49	99.90	65.53	42.55	40.71	
ETR (mm)	8.29	40.25	84.74	97.51	84.47	121.36	83.84	52.68	34.48	23.26	14.88	16.66	
HSf (mm)	641.12	688.16	768.88	773.34	748.60	831.51	770.66	728.13	694.74	671.60	656.99	653.37	
DCC (mm)	196.93	149.89	69.16	64.70	89.45	6.53	67.39	109.91	143.30	166.45	181.06	184.68	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NR (mm)	335.40	252.45	111.16	108.51	152.79	10.45	107.36	168.51	218.83	258.01	278.47	312.66	2314.59

Capacidad de campo = 34.57 % por peso seco

Punto de Marchites = 25.96 % por peso seco

Prof. Variación de humedad = 200 cm.

Humedad inicial = 62.932 cm.

Densidad del suelo = 1.2121 g/cm³

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.

Cuadro 14A Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 2, a través del método de variación lineal para la evapotranspiración real.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	Total
P (mm)	36.8	159.9	303.1	186.8	109.4	374.2	42.1	18.6	2.0	0.2	0.5	23.9	1257.50
Pi (mm)	27.17	118.04	223.76	137.90	80.76	276.24	31.08	13.73	1.48	0.15	0.37	17.64	928.32
ESC (mm)	9.63	41.86	79.34	48.90	28.64	97.96	11.02	4.87	0.52	0.05	0.13	6.26	329.18
ETP (mm)	146.77	142.81	126.73	141.32	147.81	125.29	123.81	111.28	110.02	114.82	112.29	144.65	1547.57
HSi (mm)	365.11	379.62	436.80	533.31	531.45	496.64	533.31	479.90	442.46	412.77	393.52	382.37	
HD (mm)	27.17	132.55	295.44	306.10	247.10	407.77	199.28	128.52	78.82	47.80	28.78	34.90	
ETR (mm)	12.66	60.86	126.73	139.76	115.58	125.29	84.49	51.17	31.17	19.39	11.52	16.14	
HSf (mm)	379.62	436.80	533.31	531.45	496.64	533.31	479.90	442.46	412.77	393.52	382.37	383.88	
DCC (mm)	153.69	96.51	0.00	1.86	36.68	0.00	53.41	90.85	120.54	139.79	150.94	149.43	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.51	0.00	0.00	114.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	114.79
NR (mm)	287.80	178.46	0.00	3.42	68.90	0.00	92.73	150.96	199.39	235.21	251.71	277.94	1746.53

Capacidad de campo = 26.00 % por peso seco

Punto de Marchites = 17.8 % por peso seco

Prof. Variación de humedad = 200 cm.

Humedad inicial = 36.511 cm.

Densidad del suelo = 1.0256 g/cm³

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.

Cuadro 15 A Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 3, a través del método de variación lineal para la evapotranspiración real.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	Total
P (mm)	36.8	159.9	303.1	186.8	109.4	374.2	42.1	18.6	2.0	0.2	0.5	23.9	1257.50
Pi (mm)	28.69	124.6	236.31	145.638	85.2936	291.745	32.823	14.50	1.559	0.1559	0.3898	18.633	980.41
ESC (mm)	8.11	35.23	66.79	41.16	24.11	82.46	9.28	4.10	0.44	0.04	0.11	5.27	277.09
ETP (mm)	146.77	142.81	126.73	141.32	147.81	125.29	123.81	111.28	110.02	114.82	112.29	144.65	1547.57
HSi (mm)	456.13	473.63	543.81	664.96	675.61	641.61	685.93	626.80	580.89	541.55	513.19	494.72	
HD (mm)	28.69	142.17	324.00	354.47	304.78	477.23	262.63	185.18	126.32	85.58	57.46	57.23	
ETR (mm)	11.18	54.49	115.17	134.98	119.30	125.29	91.95	60.41	40.90	28.51	18.86	22.11	
HSf (mm)	473.63	543.81	664.96	675.61	641.61	685.93	626.80	580.89	541.55	513.19	494.72	491.25	
DCC (mm)	212.30	142.12	20.97	10.32	44.32	0.00	59.13	105.04	144.38	172.74	191.21	194.68	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	122.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	122.14
NR (mm)	347.88	230.44	32.54	16.66	72.83	0.00	90.99	155.90	213.50	259.04	284.64	317.22	2021.63

Capacidad de campo = 33.46 % por peso seco

Punto de Marchites = 22.25 % por peso seco

Prof. Variación de humedad = 200 cm.

Humedad inicial = 45.613 cm.

Densidad del suelo = 1.025 g/cm³

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.

Cuadro 16A Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 4, a través del método de variación lineal para la evapotranspiración real.

CONCEPTO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	Total
P (mm)	36.8	159.9	303.1	186.8	109.4	374.2	42.1	18.6	2.0	0.2	0.5	23.9	1257.50
Pi (mm)	26.36	114.53	217.11	133.80	78.36	268.03	30.16	13.32	1.43	0.14	0.36	17.12	900.73
ESC (mm)	10.44	45.37	85.99	53.00	31.04	106.17	11.94	5.28	0.57	0.06	0.14	6.78	356.77
ETP (mm)	146.77	142.81	126.73	141.32	147.81	125.29	123.81	111.28	110.02	114.82	112.29	144.65	1547.57
HSi (mm)	461.34	478.04	545.29	662.06	676.13	646.53	714.87	651.95	603.07	561.18	530.16	509.28	
HD (mm)	26.36	131.23	301.05	334.52	293.15	453.22	283.68	203.93	143.16	99.98	69.17	65.06	
ETR (mm)	9.66	47.28	100.33	119.73	107.96	125.29	93.08	62.20	43.32	31.16	21.23	23.63	
HSf (mm)	478.04	545.29	662.06	676.13	646.53	714.87	651.95	603.07	561.18	530.16	509.28	502.77	
DCC (mm)	236.83	169.58	52.81	38.74	68.34	0.00	62.92	111.81	153.69	184.72	205.59	212.10	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	74.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	74.41
NR (mm)	373.94	265.11	79.21	60.33	108.18	0.00	93.65	160.88	220.39	268.37	296.65	333.12	2259.82

Capacidad de campo = 37.53 % por peso seco

Punto de Marchites = 24.22 % por peso seco

Prof. Variación de humedad = 200 cm.

Humedad inicial = 4.6134 cm.

Densidad del suelo = 0.9524 g/cm³

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.

Cuadro 17A Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 5, a través del método de variación lineal para la evapotranspiración real.

CONCEPTO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	Total
P (mm)	36.8	159.9	303.1	186.8	109.4	374.2	42.1	18.6	2.0	0.2	0.5	23.9	1257.50
Pi (mm)	28.72	124.78	236.54	145.78	85.37	292.02	32.85	14.52	1.56	0.16	0.39	18.65	981.34
ESC (mm)	8.08	35.12	66.56	41.02	24.03	82.18	9.25	4.08	0.44	0.04	0.11	5.25	276.16
ETP (mm)	146.77	142.81	126.73	141.32	147.81	125.29	123.81	111.28	110.02	114.82	112.29	144.65	1547.57
HSi (mm)	84.80	90.55	111.51	121.55	121.55	109.12	121.55	100.73	92.36	87.09	85.40	85.05	
HD (mm)	28.72	130.53	263.25	182.52	122.12	316.33	69.60	30.44	9.12	2.44	0.98	18.89	
ETR (mm)	22.97	103.82	126.73	141.32	97.80	125.29	53.67	22.89	6.83	1.85	0.74	15.07	
HSf (mm)	90.55	111.51	121.55	121.55	109.12	121.55	100.73	92.36	87.09	85.40	85.05	88.63	
DCC (mm)	30.99	10.03	0.00	0.00	12.43	0.00	20.81	29.18	34.46	36.15	36.50	32.91	
Rp (mm)	0.00	0.00	99.77	4.45	0.00	154.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	258.53
NR (mm)	154.79	49.02	0.00	0.00	62.43	0.00	90.96	117.57	137.64	149.12	148.05	162.49	1072.07

Capacidad de campo = 32.85 % por peso seco

Punto de Marchites = 22.92 % por peso seco

Prof. Variación de humedad = 40 cm.

Humedad inicial = 8.4804 cm.

Densidad del suelo = 0.925 g/cm³

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.

Cuadro 18A Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 6, a través del método de variación lineal para la evapotranspiración real.

Concepto	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	Total
P (mm)	36.8	159.9	303.1	186.8	109.4	374.2	42.1	18.6	2.0	0.2	0.5	23.9	1257.50
Pi (mm)	29.41	127.78	242.22	149.28	87.43	299.04	33.64	14.86	1.60	0.16	0.40	19.10	1004.92
ESC (mm)	7.39	32.12	60.88	37.52	21.97	75.16	8.46	3.74	0.40	0.04	0.10	4.80	252.58
ETP (mm)	146.77	142.81	126.73	141.32	147.81	125.29	123.81	111.28	110.02	114.82	112.29	144.65	1547.57
HSi (mm)	91.23	98.24	124.04	137.19	137.19	122.86	137.19	112.78	101.87	94.83	92.30	91.65	
HD (mm)	29.41	134.80	275.04	195.24	133.39	330.68	79.60	36.41	12.24	3.77	1.48	19.53	
ETR (mm)	22.40	101.98	126.73	141.32	101.75	125.29	58.05	25.77	8.64	2.69	1.05	14.82	
HSf (mm)	98.24	124.04	137.19	137.19	122.86	137.19	112.78	101.87	94.83	92.30	91.65	95.93	
DCC (mm)	38.95	13.14	0.00	0.00	14.32	0.00	24.41	35.32	42.35	44.88	45.53	41.25	
Rp (mm)	0.00	0.00	102.35	7.96	0.00	159.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	269.73
NR (mm)	163.32	53.97	0.00	0.00	60.38	0.00	90.17	120.82	143.73	157.01	156.77	171.08	1117.26

Capacidad de campo = 33.46 % por peso seco

Punto de Marchites = 22.25 % por peso seco

Prof. Variación de humedad = 40 cm.

Humedad inicial = 9.123 cm.

Densidad del suelo = 1.025 g/cm³

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.

Cuadro 19A Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 7, a través del método de variación lineal para la evapotranspiración real.

	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	Total
P (mm)	36.8	159.9	303.1	186.8	109.4	374.2	42.1	18.6	2.0	0.2	0.5	23.9	1257.50
Pi (mm)	27.85	120.99	229.35	141.35	82.78	283.15	31.86	14.07	1.51	0.15	0.38	18.08	951.52
ESC (mm)	8.95	38.91	73.75	45.45	26.62	91.05	10.24	4.53	0.49	0.05	0.12	5.82	305.98
ETP (mm)	146.77	142.81	126.73	141.32	147.81	125.29	123.81	111.28	110.02	114.82	112.29	144.65	1547.57
HSi (mm)	33.64	70.87	95.68	106.66	106.66	94.61	106.66	87.02	79.54	74.90	73.48	73.22	
HD (mm)	-11.54	118.84	252.01	174.99	116.42	304.73	65.50	28.07	8.03	2.03	0.84	18.28	
ETR (mm)	-9.39	96.18	126.73	141.32	94.84	125.29	51.50	21.55	6.15	1.57	0.65	14.83	
HSf (mm)	70.87	95.68	106.66	106.66	94.61	106.66	87.02	79.54	74.90	73.48	73.22	76.47	
DCC (mm)	35.79	10.98	0.00	0.00	12.06	0.00	19.65	27.12	31.76	33.18	33.45	30.19	
Rp (mm)	0.00	0.00	91.64	0.02	0.00	145.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	237.47
NR (mm)	191.94	57.61	0.00	0.00	65.02	0.00	91.95	116.85	135.63	146.42	145.09	160.01	1110.53

Capacidad de campo = 26.00 % por peso seco

Punto de Marchites = 17.8 % por peso seco

Prof. Variación de humedad = 200 cm.

Humedad inicial = 3.364 cm.

Densidad del suelo = 1.0256 g/cm³

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.

Cuadro 20A Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 8, a través del método de variación lineal para la evapotranspiración real.

CONCEPTO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	Total
P (mm)	36.8	159.9	303.1	186.8	109.4	374.2	42.1	18.6	2.0	0.2	0.5	23.9	1257.50
Pi (mm)	29.36	127.58	241.83	149.04	87.29	298.56	33.59	14.84	1.60	0.16	0.40	19.07	1003.32
ESC (mm)	7.44	32.32	61.27	37.76	22.11	75.64	8.51	3.76	0.40	0.04	0.10	4.83	254.18
ETP (mm)	146.77	142.81	126.73	141.32	147.81	125.29	123.81	111.28	110.02	114.82	112.29	144.65	1547.57
HSi (mm)	384.30	398.33	452.91	518.53	518.53	489.72	518.53	471.59	440.14	415.87	401.40	393.83	
HD (mm)	29.36	141.61	310.44	283.27	221.51	403.99	167.82	102.14	57.44	31.73	17.50	28.60	
ETR (mm)	15.34	73.00	126.73	141.32	116.09	125.29	80.52	46.29	25.87	14.63	7.97	14.83	
HSf (mm)	398.33	452.91	518.53	518.53	489.72	518.53	471.59	440.14	415.87	401.40	393.83	398.06	
DCC (mm)	120.20	65.62	0.00	0.00	28.80	0.00	46.93	78.38	102.66	117.13	124.70	120.46	
Rp (mm)	0.00	0.00	49.49	7.72	0.00	144.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	201.68
NR (mm)	251.63	135.43	0.00	0.00	60.52	0.00	90.22	143.37	186.80	217.32	229.02	250.27	1564.57

Capacidad de campo = 29.63% por peso seco

Punto de Marchites = 21.96 % por peso seco

Prof. Variación de humedad = 200 cm.

Humedad inicial = 38.43 cm.

Densidad del suelo = 0.875 gr/cm³

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.

Cuadro 21A Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 9, a través del método de variación lineal para la evapotranspiración real.

CONCEPTO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	Total
P (mm)	36.8	159.9	303.1	186.8	109.4	374.2	42.1	18.6	2.0	0.2	0.5	23.9	1257.50
Pi (mm)	29.00	125.99	238.82	147.19	86.20	294.85	33.17	14.66	1.58	0.16	0.39	18.83	990.83
ESC (mm)	7.80	33.91	64.28	39.61	23.20	79.35	8.93	3.94	0.42	0.04	0.11	5.07	266.67
ETP (mm)	146.77	142.81	126.73	141.32	147.81	125.29	123.81	111.28	110.02	114.82	112.29	144.65	1547.57
HSi (mm)	235.80	249.37	302.05	364.86	364.86	336.14	364.86	318.60	288.13	264.90	251.28	244.29	
HD (mm)	29.00	139.56	305.07	276.25	215.26	395.19	162.23	97.46	53.91	29.26	15.88	27.32	
ETR (mm)	15.43	73.31	126.73	141.32	114.92	125.29	79.43	45.12	24.81	13.78	7.39	14.44	
HSf (mm)	249.37	302.05	364.86	364.86	336.14	364.86	318.60	288.13	264.90	251.28	244.29	248.68	
DCC (mm)	115.49	62.81	0.00	0.00	28.72	0.00	46.26	76.73	99.96	113.58	120.57	116.18	
Rp (mm)	0.00	0.00	49.28	5.86	0.00	140.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	195.99
NR (mm)	246.83	132.31	0.00	0.00	61.61	0.00	90.64	142.88	185.17	214.62	225.47	246.38	1545.90

Capacidad de campo = 20.27% por peso seco

Punto de Marchites = 13.10 % por peso seco

Prof. Variación de humedad = 200 cm.

Humedad inicial = 23.580 cm.

Densidad del suelo = 0.900/cm³

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.

Cuadro 22A Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 10, a través del método de variación lineal para la evapotranspiración real.

CONCEPTO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	Total
P (mm)	36.8	159.9	303.1	186.8	109.4	374.2	42.1	18.6	2.0	0.2	0.5	23.9	1257.50
Pi (mm)	29.00	125.99	238.82	147.19	86.20	294.85	33.17	14.66	1.58	0.16	0.39	18.83	990.83
ESC (mm)	7.80	33.91	64.28	39.61	23.20	79.35	8.93	3.94	0.42	0.04	0.11	5.07	266.67
ETP (mm)	146.77	142.81	126.73	141.32	147.81	125.29	123.81	111.28	110.02	114.82	112.29	144.65	1547.57
HSi (mm)	438.30	457.39	534.69	669.76	690.76	660.70	721.03	658.00	606.47	560.50	525.32	500.86	
HD (mm)	29.00	145.08	335.21	378.65	338.66	517.24	315.90	234.35	169.74	122.35	87.41	81.39	
ETR (mm)	9.91	48.69	103.75	126.19	116.26	125.29	96.21	66.19	47.55	35.34	24.85	27.55	
HSf (mm)	457.39	534.69	669.76	690.76	660.70	721.03	658.00	606.47	560.50	525.32	500.86	492.15	
DCC (mm)	263.64	186.34	51.27	30.27	60.34	0.00	63.03	114.56	160.54	195.71	220.17	228.88	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	109.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	109.23
NR (mm)	400.50	280.46	74.25	45.40	91.88	0.00	90.64	159.65	223.00	275.19	307.61	345.98	2294.57

Capacidad de campo = 34.25 % por peso seco

Punto de Marchites = 20.82 % por peso seco

Prof. Variación de humedad = 200 cm.

Humedad inicial = 43.830 cm.

Densidad del suelo = 1.0526g/cm³

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.

Cuadro 23A Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 11, a través del método de variación lineal para la evapotranspiración real.

CONCEPTO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	Total
P (mm)	36.8	159.9	303.1	186.8	109.4	374.2	42.1	18.6	2.0	0.2	0.5	23.9	1257.50
Pi (mm)	19.42	84.37	159.93	98.57	57.73	197.45	22.21	9.81	1.06	0.11	0.26	12.61	663.53
ESC (mm)	17.38	75.53	143.17	88.23	51.67	176.75	19.89	8.79	0.94	0.09	0.24	11.29	593.97
ETP (mm)	146.77	142.81	126.73	141.32	147.81	125.29	123.81	111.28	110.02	114.82	112.29	144.65	1547.57
HSi (mm)	98.14	101.70	114.66	131.18	123.08	113.24	131.18	109.78	103.05	99.51	98.47	98.27	
HD (mm)	19.42	87.94	176.46	131.61	82.67	212.56	55.26	21.46	5.97	1.48	0.60	12.75	
ETR (mm)	15.85	71.41	126.73	106.67	67.56	125.29	43.62	16.54	4.59	1.15	0.46	10.38	
HSf (mm)	101.70	114.66	131.18	123.08	113.24	131.18	109.78	103.05	99.51	98.47	98.27	100.51	
DCC (mm)	29.48	16.52	0.00	8.10	17.94	0.00	21.40	28.13	31.67	32.72	32.91	30.68	
Rp (mm)	0.00	0.00	16.68	0.00	0.00	54.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	70.90
NR (mm)	160.40	87.92	0.00	42.76	98.18	0.00	101.59	122.87	137.09	146.38	144.74	164.95	1206.88

Capacidad de campo = 36.44% por peso seco

Punto de Marchites = 27.26 % por peso seco

Prof. Variación de humedad = 40 cm.

Humedad inicial = 9.814 cm.

Densidad del suelo = 0.900 gr/cm³

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.

Cuadro 24A Balance de humedad de suelo y calculo de recarga de la unidad de zona de recarga 12, a través del método de variación lineal para la evapotranspiración real.

CONCEPTO	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	Total
P (mm)	36.8	159.9	303.1	186.8	109.4	374.2	42.1	18.6	2.0	0.2	0.5	23.9	1257.50
Pi (mm)	29.27	127.20	241.11	148.60	87.03	297.67	33.49	14.80	1.59	0.16	0.40	19.01	1000.32
ESC (mm)	7.53	32.70	61.99	38.20	22.37	76.53	8.61	3.80	0.41	0.04	0.10	4.89	257.18
ETP (mm)	146.77	142.81	126.73	141.32	147.81	125.29	123.81	111.28	110.02	114.82	112.29	144.65	1547.57
HSi (mm)	312.00	331.38	409.94	547.33	569.41	539.50	599.55	536.41	484.47	437.89	402.08	377.07	
HD (mm)	29.27	146.58	339.05	383.93	344.44	525.17	321.04	239.21	174.06	126.05	90.48	84.08	
ETR (mm)	9.89	48.64	103.72	126.51	116.94	125.29	96.63	66.74	48.17	35.97	25.41	28.14	
HSf (mm)	331.38	409.94	547.33	569.41	539.50	599.55	536.41	484.47	437.89	402.08	377.07	367.94	
DCC (mm)	268.17	189.61	52.22	30.14	60.05	0.00	63.14	115.08	161.66	197.47	222.48	231.61	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	112.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	112.33
NR (mm)	405.05	283.78	75.24	44.95	90.92	0.00	90.32	159.62	223.51	276.31	309.36	348.12	2307.16

Capacidad de campo = 26.98% por peso seco

Punto de Marchites = 14.04 % por peso seco

Prof. Variación de humedad = 200 cm.

Humedad inicial = 31.20 cm.

Densidad del suelo = 1.1111 gr/cm³

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.