

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
CENTRO UNIVERSITARIO DE SAN MARCOS

CARRERA DE INGENIERO AGRÓNOMO CON ORIENTACIÓN EN AGRICULTURA  
SOSTENIBLE

**Recarga hídrica potencial de los acuíferos en la microcuenca Alto Naranjo,  
mediante un balance hídrico de suelos.**



**TESIS**

**PRESENTADA A LAS AUTORIDADES DEL CENTRO UNIVERSITARIO DE SAN MARCOS  
DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

**POR:**

**MARCO VINICIO VELÁSQUEZ ANDRADE**

**200641397**

**ASESORES**

**ASESOR PRINCIPAL:**

**Ing. Msc. Phd. NICK ESTRADA**

**ASESOR ADJUNTO:**

**Ing. Msc. Phd. OSBERTO MALDONADO**

**"ID Y ENSEÑAD A TODOS"**

**SAN MARCOS, MARZO DE 2,022.**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
CENTRO UNIVERSITARIO DE SAN MARCOS

CARRERA DE INGENIERO AGRÓNOMO CON ORIENTACIÓN EN AGRICULTURA  
SOSTENIBLE

**Recarga hídrica potencial de los acuíferos en la microcuenca Alto Naranjo,  
mediante un balance hídrico de suelos.**



**TESIS**

**PRESENTADA A LAS AUTORIDADES DEL CENTRO UNIVERSITARIO DE SAN MARCOS  
DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

**POR:**

**MARCO VINICIO VELÁSQUEZ ANDRADE**

**200641397**

**ASESORES**

**ASESOR PRINCIPAL:**

**Ing. Msc. Phd. NICK ESTRADA**

**ASESOR ADJUNTO:**

**Ing. Msc. Phd. OSBERTO MALDONADO**

**"ID Y ENSEÑAD A TODOS"**

**SAN MARCOS, MARZO DE 2,022.**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
CENTRO UNIVERSITARIO DE SAN MARCOS



**AUTORIDADES CUSAM**

<b>MsC. Juan Carlos López Navarro</b>	<b>DIRECTOR</b>
<b>MsC. Eugenia Elizabet Makepeace Alfaro</b>	<b>COORDINADORA ACADEMICA</b>

**CONSEJO DIRECTIVO**

<b>MsC. Juan Carlos López Navarro</b>	<b>DIRECTOR</b>
<b>Licda. Astrid Fabiola Fuentes Mazariegos</b>	<b>SECRETARIA CONSEJO DIRECTIVO</b>
<b>Ing. Agr. Rony Walter Villacinda Maldonado</b>	<b>REPRESENTANTES DOCENTES</b>
<b>Lic. Omar Isaí Barrios</b>	<b>REPRESENTANTE GRADUADOS</b>
<b>Licda. Bilda Irene Ruíz Galicia</b>	<b>REPRESENTANTE ESTUDIANTIL</b>
<b>Lic. Víctor Leonel de León Castillo</b>	<b>REPRESENTANTE ESTUDIANTIL</b>

## **COORDINACIÓN ACADEMICA**

<b>MsC. Eugenia Elizabet Makepeace Alfaro</b>	<b>COORDINADORA ACADEMICA</b>
<b>Ing. Msc. Phd. Osberto A. Maldonado de León</b>	<b>TECNICO EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA E INGENIERO AGRONOMO CON ORIENTACIÓN EN AGRICULTURA SOSTENIBLE</b>
<b>Lic. Antonio Etihel Ochoa López</b>	<b>COORDINADOR CARRERA DE PEDAGOGÍA Y CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN</b>
<b>Licda. Aminta Esmeralda Guillén Ruíz</b>	<b>COORDINADORA CARRERA DE TRABAJO SOCIAL, TÉCNICO Y LICENCIATURA.</b>
<b>Ing. Víctor Manuel Fuentes López</b>	<b>COORDINADOR CARRERA DE ADMINISTRACIÓN DE EMPRESAS, TÉCNICO Y LICENCIATURA.</b>
<b>Licda. María Daniela Paíz Godínez</b>	<b>COORDINADORA CARRERA DE ABOGADO Y NOTARIO Y LICENCIATURA EN CIENCIAS JURÍDICAS Y SOCIALES</b>
<b>Dra. Jenny Vanessa Orozco Minchez</b>	<b>COORDINADORA CARRERA MÉDICO Y CIRUJANO</b>
<b>Lic. Nelson de Jesús Bautista López</b>	<b>COORDINADOR PEDAGOGÍA EXTENSIÓN SAN MARCOS</b>
<b>Licda. Julia Maritzá Gándara González</b>	<b>COORDINADORA EXTENSIÓN MALACATAN</b>
<b>Licda. Karina Nineth Reyes Maldonado</b>	<b>COORDINADORA EXTENSIÓN TEJUTLA</b>
<b>Lic. Julio Augusto González Roblero</b>	<b>COORDINADOR EXTENSIÓN TACANÁ</b>
<b>Lic. Robert Enrique Orozco Sánchez</b>	<b>COORDINADOR DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN</b>

**Ing. Oscar Ernesto Chávez Ángel**

**COORDINADOR CARRERA  
INGENIERIA CIVIL.**

**Lic. Carlos Edelmar Velásquez González**

**COORDINADOR CARRERA  
CONTADURÍA PÚBLICA Y  
AUDITORÍA.**

**Ing. Miguel Amilcar López López**

**COORDINADOR EXTENSIÓN  
IXCHIGUAN**

**Lic. Danilo Alberto Fuentes Bravo**

**COORDINADOR PROFESORADO  
BILINGÜE INTERCULTURAL**

**Dr. Hugo Rafael López Mazariegos**

**COORDINADOR CARRERAS  
SOCIOLOGÍA, CIENCIAS POLÍTICAS  
Y RELACIONES INTERNACIONALES.**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
CENTRO UNIVERSITARIO DE SAN MARCOS**



**MIEMBROS DEL COMITÉ DE GRADUACIÓN DE LA CARRERA DE INGENIERO  
AGRÓNOMO CON ORIENTACIÓN EN AGRICULTURA SOSTENIBLE**

<b>Ing. Agr. Rodolfo Carredano Romero</b>	<b>PRESIDENTE</b>
<b>Ing. Agr. Fredy Pérez Monzón</b>	<b>SECRETARIO</b>
<b>Ing. Agr. Leonel Alfredo Orozco</b>	<b>VOCAL</b>

**ASESORES**

<b>Ing. Msc. Phd. Nick Kenner Estrada</b>	<b>ASESOR PRINCIPAL</b>
<b>Ing. Msc. Phd. Osberto Maldonado de León.</b>	<b>ASESOR ADJUNTO</b>

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
CENTRO UNIVERSITARIO DE SAN MARCOS**



**TRIBUNAL EXAMINADOR**

<b>DIRECTOR</b>	<b>MsC. Juan Carlos López Navarro</b>
<b>COORDINADORA ACADEMICA</b>	<b>MsC. Eugenia Elizabet Makepeace Alfaro</b>
<b>COORDINADOR CARRERA AGRONOMIA</b>	<b>Ing. Msc. Phd. Osberto Maldonado de León</b>
<b>ASESOR PRINCIPAL</b>	<b>Ing. Msc. Phd. Nick Kenner Estrada Orozco</b>
<b>ASESOR ADJUNTO</b>	<b>Ing. Msc. Phd. Osberto Maldonado de León</b>

San Marcos, 18 de noviembre de 2,021

Para  
Miembros Comisión de Tesis  
Carrera de Ingeniero Agrónomo con  
Orientación En Agricultura Sostenible  
Centro Universitario de San Marcos  
Edificio.

Estimados señores:

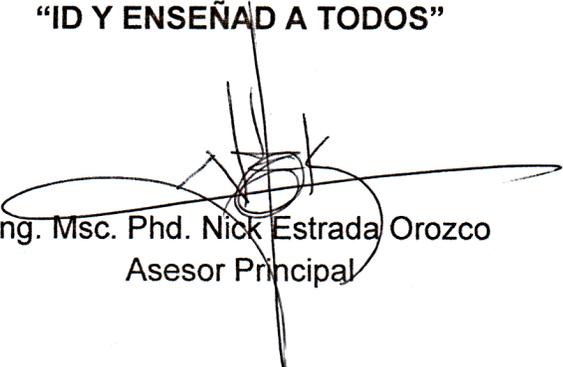
Por este medio me dirijo a ustedes, con la finalidad de indicarles que he procedido a realizar la revisión de mérito basado en lo establecido en el artículo 45 del normativo de tesis de grado, en la carrera de Ingeniero Agrónomo con Orientación En Agricultura Sostenible, del informe final del trabajo de graduación titulado **“RECARGA HÍDRICA POTENCIAL DE LOS ACUIFEROS EN LA MICROCUENCA ALTO NARANJO, MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO DE SUELOS”** presentado por el estudiante **Marco Vinicio Velásquez Andrade**, identificado con el número de carné 200641397.

Por lo anteriormente expuesto y luego de revisar dicho informe de investigación, considero que el mismo cumple con las exigencias teórico-metodológicas, que en materia del conocimiento científico se demanda, por lo que en mi calidad de asesor de dicha investigación, emito **DICTAMEN FAVORABLE**, para que la misma sea objeto de análisis en el examen público profesional.

Sin otro particular y con muestras de mi más alta consideración y estima, suscribo la presente

Deferentemente

**“ID Y ENSEÑAD A TODOS”**



Ing. Msc. Phd. Nick Estrada Orozco  
Asesor Principal

San Marcos, 18 de noviembre de 2021

Señores:

Miembros Comisión de Tesis  
Carrera de Ingeniero Agrónomo con  
Orientación En Agricultura Sostenible  
Centro Universitario de San Marcos  
Edificio.

Estimados señores:

Por este medio me dirijo a ustedes, con la finalidad de indicarles que he procedido a realizar la revisión de mérito basado en lo establecido en el artículo 45 del normativo de tesis de grado, en la carrera de Ingeniero Agrónomo con Orientación En Agricultura Sostenible, del informe final del trabajo de graduación titulado **“RECARGA HÍDRICA POTENCIAL DE LOS ACUIFEROS EN LA MICROCUENCA ALTO NARANJO, MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO DE SUELOS”** presentado por el estudiante **Marco Vinicio Velásquez Andrade**, identificado con el número de carné 200641397.

Por lo anteriormente expuesto y luego de revisar dicho informe de investigación, considero que el mismo cumple con las exigencias teórico-metodológicas, que en materia del conocimiento científico se demanda, por lo que, en mi calidad de asesor de dicha investigación, emito **DICTAMEN FAVORABLE**, para que la misma sea objeto de análisis en el examen público profesional.

Sin otro particular y con muestras de mi más alta consideración y estima, suscribo la presente

Deferentemente

**“ID Y ENSEÑAD A TODOS”**



Ing. Agr. Ph. D. Osberto Maldonado de León  
Asesor adjunto

A DIOS: Por sus infinitas bendiciones, que hoy me permiten culminar otro paso en mi vida.

A MIS PADRES: Gerardo N. Velásquez (+) y Araceli E. Andrade Barrios (+) Quienes desde el cielo comparten esta alegría conmigo. Gracias porque con cariño y amor forjaron a la persona quien soy y me motivaron para alcanzar mis metas.

A MI ESPOSA: Marisela Eunice Ramírez López, con profundo amor y agradecimiento por estar siempre conmigo a pesar de las adversidades, por tus palabras de aliento que me mantuvieron firme y me dieron la fuerza para nunca rendirme. Mi amor, este triunfo también es tuyo.

A MIS HIJOS: Juan David, Luis Gerardo y Cristian Vinicio Velásquez Ramírez, que mi triunfo sea un ejemplo de esfuerzo, sacrificio y superación a seguir.

A MIS HERMANOS: José Gerardo y Carlos Enrique Velásquez Andrade, por su incondicional apoyo para ver coronado el esfuerzo en bien de mi futuro y que este triunfo sea un ejemplo de superación para ustedes.

A MIS TIOS: Luis Humberto Orozco y Olga Leticia Andrade, gracias por su amor y apoyo inquebrantable, su ejemplo de trabajo y constancia, por sus oraciones y consejos.

A MIS PRIMAS: Licda. Angela Leticia, Licda. Aurora del Carmen, Msc. Ana Luisa y Licda. Andrea Carolina Orozco Andrade, por el amor fraternal manifestado durante toda mi vida y por el apoyo demostrado durante toda mi formación académica.

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A MIS ASESORES:**

Ing. Msc. Phd. Nick Kenner Estrada, Ing. Msc. Phd Osberto Maldonado de León, por siempre agradecido por compartir sus abundantes conocimientos con mi persona, los cuales fueron aplicados a la presente investigación, enriqueciendo su contenido.

### **A MIS COMPAÑEROS:**

Por todos los años compartidos dentro de las aulas universitarias, en el proceso de nuestra formación. En especial a Carlos Cordova, Eswin Alexander de León y Mario Adolfo Velásquez, porque la amistad que nos ha unido perdure por siempre

## ÍNDICE

ÍNDICE.....	i
ÍNDICE DE MAPAS.....	v
ÍNDICE DE CUADROS.....	v
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	vi
<b>1 RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>2 ABSTRACT .....</b>	<b>3</b>
<b>3 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>4</b>
<b>4 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>6</b>
<b>5 JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>7</b>
<b>6 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>8</b>
6.1 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	8
6.1.1 CICLO HIDROLÓGICO.....	8
6.1.2 HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA.....	9
6.1.3 GEOLOGÍA .....	10
6.1.4 EL AGUA EN EL SUELO .....	17
6.1.5 RECARGA HÍDRICA.....	31
6.2 MARCO REFERENCIAL .....	35
6.2.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA .....	35
6.2.2 RED HÍDRICA.....	36
6.2.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS COMUNIDADES .....	37
6.2.4 VIAS DE ACCESO.....	40
6.2.5 CLIMA .....	40
6.2.6 REGIMEN DE LLUVIAS.....	40
6.2.7 ZONA DE VIDA DE HOLDRIDGE.....	40
<b>7 OBJETIVOS.....</b>	<b>41</b>

7.1	GENERAL .....	41
7.2	ESPECÍFICOS.....	41
<b>8</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>42</b>
8.1	RECURSOS .....	42
8.1.1	FÍSICOS.....	42
8.1.2	HUMANOS.....	42
8.1.3	INSTITUCIONALES .....	42
8.1.4	FINANCIEROS.....	42
8.2	METODOLOGÍA.....	43
8.2.1	DELIMITAR EL ÁREA DE ESTUDIO .....	43
8.2.2	FRACCIÓN DE LLUVIAS INTERCEPTADA POR FOLLAJE .....	43
8.2.3	DETERMINACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MENSUAL.....	44
8.2.4	DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN DEBIDO A LA TEXTURA .....	45
8.2.5	DETERMINACIÓN DE RANGOS DE PENDIENTE .....	45
8.2.6	DETERMINACIÓN DEL TIPO DE COBERTURA VEGETAL.....	46
8.2.7	CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN .....	47
8.2.8	CÁLCULO DE INFILTRACIÓN PLUVIAL MENSUAL .....	47
8.2.9	ESCORRENTÍA SUPERFICIAL.....	48
8.2.10	EVAPOTRANSPIRACIÓN .....	48
8.2.11	COEFICIENTE DE HUMEDAD.....	49
8.2.12	CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL REAL .....	50
8.2.13	CÁLCULO DE LA HUMEDAD DISPONIBLE .....	51
8.2.14	CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL PROMEDIO .....	51
8.2.15	CÁLCULO DE LA HUMEDAD DEL SUELO AL FINAL DEL MES .....	52
8.2.16	CÁLCULO DE LA HUMEDAD DEL SUELO AL INICIO DEL MES.....	53

8.2.17	CÁLCULO DE LA RECARGA POTENCIAL AL ACUÍFERO .....	53
8.2.18	DETERMINACIÓN DE LAS ÁREAS DE RECARGA HÍDRICA.....	53
8.2.19	DETERMINAR EL VOLUMEN DE RECARGA EN CADA ÁREA DE RECARGA HÍDRICA	54
8.2.20	CATEGORIZACIÓN DE LAS ÁREAS DE RECARGA HÍDRICA .....	54
<b>9</b>	<b>PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>55</b>
9.1	CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES BIOFÍSICAS PARA IDENTIFICAR LAS ÁREAS DE RECARGA HÍDRICA (ARH).....	55
9.1.1	DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA Y EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP).....	55
9.1.2	DETERMINACIÓN DE LA GEOLOGÍA.....	58
9.1.3	DETERMINACIÓN DEL TIPO DE SUELO.....	60
9.1.4	DETERMINACIÓN DEL TIPO DE COBERTURA VEGETAL.....	63
9.1.5	DETERMINACIÓN DE LA PENDIENTE EN PORCENTAJE .....	66
9.1.6	DETERMINACIÓN DE LA INFILTRACIÓN BÁSICA ( $k_{fc}$ ).....	67
9.1.7	DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE LAS RAÍCES EXTRACTORAS DE AGUA.....	69
9.1.8	DETERMINACIÓN DE LA INTERCEPCIÓN DE LLUVIA EN EL FOLLAJE.....	69
9.1.9	DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD INICIAL DEL SUELO EN UN MES DETERMINADO.....	70
9.2	BALANCE HÍDRICO DE SUELOS PARA LAS ARH .....	70
9.2.1	IDENTIFICACIÓN DE LAS ARH.....	70
9.2.2	DETERMINACIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL $R_p$ .....	71
9.2.3	DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE RP PARA CADA ARH .....	72
9.2.4	CATEGORIZACIÓN DE LAS ARH.....	73
<b>10</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>82</b>
<b>11</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>83</b>

<b>12</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>84</b>
<b>13</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>88</b>
13.1	MEDICIÓN DE LA INFILTRACIÓN EN EL SUELO MEDIANTE INFILTRÓMETROS DOBLE ANILLO .....	88
13.2	BALANCES HIDRICOS DE LOS SUELOS .....	91
13.3	PRUEBAS DE INFILTRACIÓN .....	97

## ÍNDICE DE MAPAS

<b>Mapa 1</b> Ubicación Microcuenca Alto Naranjo, dentro de la cuenca del río Naranjo. ....	35
<b>Mapa 2</b> Red hídrica Microcuenca Alto Naranjo. ....	36
<b>Mapa 3</b> Modelo tridimensional de la ubicación de las comunidades en la Microcuenca. ....	38
<b>Mapa 4</b> Ubicación de las comunidades dentro de la Microcuenca. ....	39
<b>Mapa 5</b> Mapa geológico de la microcuenca Alto Naranjo. ....	60
<b>Mapa 6</b> Tipos de suelos en la microcuenca Alto Naranjo. ....	63
<b>Mapa 7</b> Uso del suelo en la microcuenca Alto Naranjo. ....	65
<b>Mapa 8</b> Pendientes predominantes en la microcuenca Alto Naranjo. ....	67
<b>Mapa 9</b> ARH identificadas en la Microcuenca Alto Naranjo. ....	70
<b>Mapa 10</b> Categorización de ARH. ....	75
<b>Mapa 11</b> Volumen de recarga potencial. ....	79

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1</b> Comunidades que integran la Microcuenca Alto Naranjo. ....	37
<b>Cuadro 2</b> Fracción de lluvia interceptada por el follaje. ....	44
<b>Cuadro 3</b> Coeficientes de pendientes. ....	46
<b>Cuadro 4</b> Coeficientes sugeridos para los diferentes tipos de cobertura vegetal del suelo. ....	46
<b>Cuadro 5</b> Promedio de precipitación mensual. ....	55
<b>Cuadro 6</b> Promedio de temperatura mensual en °C. ....	56
<b>Cuadro 7</b> Promedio ETP mensual. ....	56
<b>Cuadro 8</b> Extensión de los tipos de cobertura vegetal del suelo. ....	63
<b>Cuadro 9</b> Coeficiente de pendiente Kp asignada a la microcuenca Alto Naranjo. ....	66
<b>Cuadro 10</b> Velocidad de infiltración del agua según la pendiente, geología y cobertura vegetal. ....	68

<b>Cuadro 11</b> Profundidad de las raíces extractoras de agua según el tipo de cobertura vegetal del suelo. ....	69
<b>Cuadro 12</b> Porcentaje de retención de lluvia en el follaje según el tipo de cobertura vegetal del suelo. ....	69
<b>Cuadro 13</b> Rp en las Áreas de Recarga Hídrica. ....	71
<b>Cuadro 14</b> Volumen de Rp en las ARH. ....	72
<b>Cuadro 15</b> Categorización de las ARH según resultados de Rp. ....	73
<b>Cuadro 16</b> Recarga potencial y extensión de las categorías a las que pertenece cada ARH .....	74

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Promedio de precipitación mensual (mm) .....	55
Ilustración 2 Promedio de temperatura mensual (°C) .....	56
Ilustración 3 Promedio ETP mensual.....	57
Ilustración 4 Representación 3D geología del área de estudio .....	59
Ilustración 5 Representación 3D tipo de suelo en el área de estudio .....	61
Ilustración 6 Representación 3D cobertura vegetal del área de estudio .....	64
Ilustración 7 Representación 3D Porcentaje de pendientes del área de estudio .....	66
Ilustración 8 Tasas de infiltración según estado del suelo. ....	88
Ilustración 9 Infiltrómetro doble anillo .....	89
Ilustración 10 Flujo de agua b. ....	89
Ilustración 11 Flujo de agua a. ....	89
Ilustración 12 Flujo de agua en el suelo generado por el doble anillo .....	89

## 1 RESUMEN

El uso inadecuado del suelo dentro de las Áreas de Recarga Hídrica (ARH), no es compatible con los fines de protección y conservación del recurso hídrico subterráneo. Reconociendo tal hecho, se realizó un estudio que permitió identificar las ARH en la microcuenca Alto Naranjo. Para determinar cuáles son los sitios con mayor potencial de recarga de agua subterránea, se realizó un balance hídrico de suelo. Los datos que se generaron responden a los coeficientes de variables: Edáficas, climáticas, topográficas, por ejemplo textura del suelo ( $kfc$ ), infiltración, precipitaciones, horas luz, temperatura, pendiente ( $kp$ ), tipo de cobertura vegetal ( $kv$ ), algunas derivadas de muestras de suelo, entre otras. Con el uso de cartografía en forma digital, por medio de un Sistema de Información Geográfica (SIG), se generaron mapas digitales que representan la geología, la pendiente, el tipo de cobertura vegetal del suelo en el área de estudio y se identificaron once (11) ARH, para las cuales se determinó: evapotranspiración potencial ( $ETP$ ), humedad inicial ( $Hsi$ ), retención de humedad del suelo (capacidad de campo y punto de marchitez permanente), densidad aparente, infiltración básica del suelo ( $fc$ ), interceptación de la lluvia y profundidad de las raíces extractoras de agua. La información generada para cada ARH se utilizó para el análisis de balance hídrico de suelos. Los resultados muestran que en las 11 ARH se da una recarga potencial del acuífero ( $R_p$ ) de  $14.760,122.62 \text{ m}^3$ , ello debido en gran medida a las características físicas del suelo, las cuales favorecen la retención de humedad y la percolación directa del agua hacia un posible acuífero existente en la zona. No obstante, las ARH con ausencia de cobertura boscosa, presentan una mayor capacidad para almacenar humedad y su aporte se da debido a la percolación del agua, que en gran parte se presenta cuando ocurren las precipitaciones, además que estos usos del suelo se encuentran ubicadas en las zonas de baja pendiente a diferencia de la cobertura boscosa. Por consiguiente, tanto la retención de humedad como la percolación, hacen posible el flujo de agua superficial y subterránea a lo largo de todo el año, aun cuando no ocurren precipitaciones. La infiltración básica fue mayor en las áreas con geología predominante de cenizas volcánicas ( $Q_p$ ) y menor en Tovas Volcánicas ( $T_v$ ). La recarga potencial en las área de recarga hídrica van desde los 201.67 hasta los 326 mm/año. En general, en el área de estudio se recargan más de 14 millones de  $\text{m}^3$  de agua anualmente, las ARH para su representación se clasificaron en categorías baja, media, alta y muy alta. Los valores de  $R_p$  se han obtenido en un momento y espacio dado, y en realidad, es el cambio en

las propiedades físicas del suelo, la erosión, la compactación del suelo y una mayor escorrentía, las que pueden provocar a futuro una disminución de la  $R_p$ , especialmente en aquellas ARH con una cobertura distinta a la boscosa.

## 2 ABSTRACT

Improper use of soil within Water Recharge Areas (WRA), it is not compatible with the purposes of protection and conservation of the underground water resource. Recognizing this fact, the study was carried out that identified the WRA in the Alto Naranjo micro basin. To determine which sites, have the greatest potential for groundwater recharge, a soil water balance was performed. The data responds to the coefficients of variables: edaphic, climatic, topographic, for example soil texture ( $kfc$ ), infiltration, rainfall, daylight hours, temperature, slope ( $kp$ ), type of vegetation cover ( $kv$ ), some derived from soil examples, among others. With the use of mapping digital, by means of a Geographic Information System (GIS), digital maps were generated that represent the geology, the slope, the type of vegetation cover of the soil in the study area and eleven (11) WRA were identified, for which it was determined; Potential Evapotranspiration ( $PET$ ), Initial Humidity ( $Hsi$ ), soil moisture retention (field capacity and permanent wilting point), bulk density, basic soil infiltration ( $fc$ ), rain interception and depth of the water extraction roots. The information generated for each WRA was used for the analysis of soil water balance. The results show that in the 11 WRA there is a potential recharge of the aquifer ( $Rp$ ) of 14.760,122.62 m<sup>3</sup>, due to the physical characteristics of the soil, which favor moisture retention and direct percolation of the water towards a possible existing aquifer in area. However, the WRA the absence of forest cover, have a greater capacity to the store moisture and its contribution is due to the percolation of water, which happens when rainfall occurs, in addition to these land uses are located in the areas low slope unlike forest cover. Therefore, both moisture retention and percolation make the flow of surface and ground water possible throughout the year, even when no precipitation occurs. The basic infiltration was greater in the areas with predominant geology of volcanic ash ( $Qp$ ) and less in Volcanic Tobas ( $Tv$ ). The potential recharge in the water recharge area ranges from 201.67 to 326 mm/year. In general, in the study area more than 14 million m<sup>3</sup> of water are recharged annually, the WRA for their representation were classified into low, medium, high and very high categories. The  $Rp$  values have been obtained at a given time and space, in fact, it is the change in the physical properties of the soil, erosion, soil compaction and a greater runoff, which may cause a decrease in the future.  $Rp$ , especially in those WRA with a coverage other than the forest.

### 3 INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos son cuerpos de agua que existen en el planeta, desde los océanos hasta los ríos, pasando por los lagos, los arroyos y las lagunas. El recurso hídrico permite el sostenimiento de las relaciones ecológicas así como sus funciones, el desarrollo de actividades productivas y la atención de las necesidades sociales como consumo, energía, entre otras (Barrentes & Vega, 2004).

En los últimos años ha crecido la preocupación por el manejo adecuado del recurso hídrico, su persistencia depende de las medidas políticas, legales, administrativas y técnicas que se adopten. La institucionalidad y los civiles, fundamentados en la ciencia y la tecnología, deben velar y controlar la justa protección, conservación y distribución del recurso hídrico. (Calvo, 1996).

Siendo congruente con lo mencionado anteriormente, es objeto de esta investigación la identificación, protección y conservación de aquellas áreas donde es mayormente favorable la infiltración de agua que percola y llega a ser parte de la recarga de los acuíferos.

El uso inadecuado del suelo dentro de las áreas de recarga hídrica, no es compatible con los fines de protección y conservación del recurso hídrico subterráneo. Reconociendo tal hecho, se realizó un estudio que permitió conocer el potencial de recarga hídrica de los acuíferos en la microcuenca Alto Naranjo, para determinar cuáles son los sitios con mayor potencial de recarga de agua subterránea, para lo cual se realizó un balance hídrico de suelos.

Con el uso de la cartografía en forma digital, por medio de un sistema de información geográfica (SIG), se generaron mapas digitales, que representaron la geología, la pendiente y el tipo de cobertura vegetal del suelo en el área de estudio. Los mapas se superpusieron para identificar las áreas de recarga hídrica, que comparten estos valores, para las cuales se determinó la evapotranspiración potencial (ETP), humedad inicial ( $H_{si}$ ), retención de humedad del suelo (capacidad de campo y punto de marchitez permanente), densidad aparente ( $\rho_a$ ), infiltración básica del suelo ( $f_c$ ), interceptación de la lluvia y profundidad de las raíces extractoras

de agua. La información generada en cada área, fue ingresada a la ecuación general del balance hídrico de suelos.

Después de obtener los resultados del balance hídrico de suelos cada una de las áreas de recarga hídrica fueron categorizadas, predominando las áreas con un potencial de recarga baja ocupando una extensión territorial total de 3853.72 hectáreas lo que representa un 38.01% del área total de la microcuenca; las áreas con potencial de recarga muy alta ocupan 1042.06 hectáreas, lo que representa un 33.64% de la extensión territorial del área de estudios, aunque parte de estos polígonos se encuentra en la parte más baja de la microcuenca; las áreas con potencial de recarga alta ocupan 1212.62 hectáreas, lo que representa el 19.83% del territorio total de la microcuenca y las áreas con potencial de recarga media ocupan 72 hectáreas representando un 8.53% de la extensión total del área de estudios.

#### 4 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

La cuenca del río Naranjo se ubica en la región sur occidental de la república de Guatemala, la cuenca tiene como cuencas vecinas a la de los ríos Suchiate (oeste), Samalá y Ocosito (este) y Cuilco (norte). En total se definen 50 microcuencas, entre estas se incluye la microcuenca Alto Naranjo, la cual se ubica en la parte alta de la cuenca del Río Naranjo, con una extensión territorial de 67.71 km<sup>2</sup>, cuenta con una población total aproximada de 135,097 personas.

Ésta densidad poblacional y la necesidad de satisfacer las demandas alimenticias ha provocado el avance de la frontera agrícola y cuando los bosques son talados con fines agrícolas, la vegetación original es sustituida por cultivos que requieren cambios en la superficie del suelo, tales como quema, arado, compactación, entre otros. Estos cambios ocasionan que el suelo disminuya su capacidad de infiltración de agua de lluvia, con lo cual se reducen las corrientes subterráneas y los nacimientos. También provoca que las partículas de suelo sean arrastradas por el agua, causando erosión contaminando los ríos con sedimentos.

Siendo las áreas de recarga hídrica natural, las más susceptibles a estos cambios considerándose “tierras que por sus características específicas, susceptibles a disminuir su potencial de recarga al ser sometidas a un manejo contrario a su capacidad”. Pudiéndose traducir en un bajo porcentaje de infiltración hacia los mantos acuíferos, según Matus Silva, (2007) afirma que “el principal papel del bosque dentro del ciclo hidrológico es en materia de almacenamiento de agua –de lluvia-, básicamente bajo el mismo, se favorece la infiltración del agua de lluvia y el escurrimiento se ve disminuido. A nivel de cuencas hidrográficas, ambas situaciones favorecen la estabilidad de los suelos y la posibilidad de almacenamiento y futuro aprovechamiento de aguas sub-superficiales”.

Por lo antes expuesto se considera que es de suma importancia conocer el potencial de recarga hídrica en la microcuenca Alto Naranjo, mediante un balance hídrico de suelos. En tal virtud se pregunta: **¿Cuál es el potencial de recarga hídrica en la microcuenca Alto Naranjo?**

## 5 JUSTIFICACIÓN

La creciente demanda del recurso hídrico en la población de la microcuenca Alto Naranjo genera una presión importante, esto se acentúa debido a la forma ineficiente en que se aprovecha el recurso, estas ineficiencias suceden principalmente en el uso agrícola y doméstico. Como resultado de ello, aumenta la demanda del recurso hídrico, a la vez que disminuye su disponibilidad por el impacto de la urbanización que a su vez impulsa el proceso de deforestación, reducción de áreas de recarga y contaminación.

Las áreas de recarga hídrica son de vital importancia para el ciclo hidrológico, debido a que en ellas se da la infiltración del agua de la precipitación al suelo y a su vez, el reabastecimiento de las aguas subterráneas a los acuíferos.

Los resultados del presente estudio aportan información clave que permitirá trabajar en la conservación de las áreas de recarga hídrica natural y enfoca los esfuerzos en conocer el nivel de desempeño que tiene el área de estudios en la tarea de infiltrar agua hacia los acuíferos. Para ello se aplicó la metodología desarrollada por Gunther Schosinsky en el año 2006, presentando como ventaja que considera variables que influyen en la recarga de los acuíferos, tales como: precipitación mensual, retención pluvial, capacidad de infiltración de los suelos y sus características, cobertura vegetal, profundidad de raíces, evapotranspiración real, uso del suelo y pendiente del terreno, variables que pueden ser adquiridas a nivel local y otra información cartográfica que ha sido generada a nivel nacional en el año 2010 a un detalle de 1:50000 y 1:250000, información que fue procesada para propósitos de esta investigación en el software QGIS y contribuirá en el futuro con la planificación municipal en cuanto al manejo de los recursos naturales se refiere.

## 6 MARCO TEÓRICO

### 6.1 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

#### 6.1.1 CICLO HIDROLÓGICO

En la tierra el agua existe en un espacio llamado hidrosfera que se extiende desde unos 15 kilómetros arriba en la atmosfera hasta un kilómetro por debajo de la litosfera o corteza terrestre. El agua circula en la hidrosfera a través de un laberinto de caminos que constituyen el ciclo hidrológico, (Chow, Maidment, & Mays, 1994)

El ciclo del agua, se da en forma constante entre la atmosfera y la tierra, pasando por los ecosistemas (vegetación, animales y suelo) y por la corteza terrestre a los océanos para luego regresar a la atmosfera. En resumen, el ciclo hidrológico es el movimiento general del agua que asciende por evaporación y desciende por medio de la precipitación, para después ser parte de la escorrentía superficial o subterránea (Sanchez, 2004). Este ciclo en la naturaleza se debe a flujos positivos y negativos, los positivos o de ingreso de agua al sistema vienen a ser: precipitación, agua almacenada, condensación, escurrimiento superficial, escurrimiento subterráneo, infiltración y agua freática. Los flujos negativos o egresos de agua en el sistema son: escorrentía superficial, escorrentía subterránea, evapotranspiración y percolación (Faustino, 2007).

La fuente principal de agua que alimenta el ciclo hidrológico de una cuenca es la precipitación, la cantidad de precipitación que se infiltra en el suelo depende de varios factores: la cantidad y la intensidad de la precipitación, la condición física del suelo, la inclinación del terreno y la presencia de vegetación. Así, muchas veces una intensa lluvia no se infiltra en el suelo y crea inundaciones instantáneas. Del agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada casi en su totalidad hacia la atmósfera, igualmente otra parte es extraída del suelo para evaporarse. La evaporación del agua en el suelo y la transpiración ejercida por las plantas, conforman lo que se conoce como evapotranspiración (Aparicio F. 1989). El agua que no se evapotranspira puede seguir absorbiéndose a través del suelo hacia las reservas terrestres llamadas acuíferos. De manera errónea, se visualiza a los acuíferos como unos lagos subterráneos, en realidad es que el agua del suelo terrestre llena los espacios

porosos existentes entre los sedimentos o rocas. El agua que no penetra en el suelo se une y viaja a través de la superficie hasta desembocar en lagos, arroyos y ríos que, a su vez, desembocan en el océano (Anne & Egger).

Según Chow (1994), las cantidades estimadas de agua en las diferentes formas que se presenta sobre la tierra, hacen ver que un 95.5% del agua del planeta se encuentra en los océanos, del resto, el 1.7% se encuentra en los hielos polares, el 1.7% forma parte de las aguas subterráneas y solamente el 0.1% se encuentra en los sistemas de agua superficial y atmosférica. Solamente el 0.006% del agua dulce está en los ríos. El agua biológica, fijada en los tejidos de plantas y animales, representa cerca del 0.003% de toda el agua dulce, equivalente a la mitad del volumen contenido en los ríos. Según Baker, (1994) Debido a la distinta y desproporcional distribución del agua en el planeta, han surgido distintas disciplinas científicas con el fin de conocer, en sus diferentes estados, la composición y el comportamiento del agua, todo con el fin de sugerir y ejecutar medidas tendientes a su protección y conservación

Aunque el agua se encuentra en algún estado de la materia, ya sea sólida, líquida o gaseosa, el ciclo hidrológico es muy irregular y contra ello debe luchar el ser humano. El volumen total de agua en el ciclo hidrológico global permanece esencialmente constante, la distribución de esta agua está cambiando continuamente en continentes, regiones y cuencas locales. La oportunidad de satisfacer las necesidades de agua en un periodo y su escasez en otro, son claro ejemplo de esa irregularidad dependiente del régimen climático que predomina (Villon, 2004).

### **6.1.2 HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA**

La hidrología es la ciencia que trata de las aguas terrestres, de sus maneras de aparecer, de su circulación y distribución en la tierra, de sus propiedades físicas y químicas y sus interacciones con el medio físico y biológico, sin olvidar las reacciones a la acción del hombre (Davie, 2002). Según Chow (1994) la hidrología en una región está determinada por sus patrones de clima, tales como la topografía, la geología y la vegetación. La hidrología se ocupa del estudio del ciclo completo del agua desde el momento en que ésta cae a la tierra hasta que desemboca en el mar o vuelve a la atmósfera. El ciclo del agua se desarrolla en tres medios

distintos: la atmósfera, la superficie del suelo y el subsuelo. Por tanto, la hidrología comprende dos ramas: a) hidrología de superficie y b) hidrología subterránea o hidrogeología.

La hidrogeología o estudio de las aguas subterráneas es parte de la hidrología que estudia el almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas y sus interacciones con el medio físico, biológico y el ser humano. La hidrogeología comenzó apenas hace tres o cuatro decenios, debido a la importancia que el agua subterránea tiene en relación con el abastecimiento de agua a gran parte de la humanidad (Custodio & MR., 2001).

### **6.1.3 GEOLOGÍA**

Las formaciones geológicas suelen mostrar mucha variabilidad en sus características de almacenamiento y propiedades de flujo de las aguas subterráneas contenidas en las rocas. Así como, de la evolución de su composición química e isotópica por interacción con los materiales en los terrenos que atraviesa el agua subterránea. Esto afecta a las posibilidades de utilización del recurso hídrico y a la gestión del territorio. Por ello, en hidrogeología es necesario conocer con detalle las características asociadas a cada tipo de medio. (Escuder Valles, 2009)

Algunos acuíferos muestran características favorables para su explotación, como facilidad de excavación o perforación, niveles piezométricos cercanos a la superficie del terreno, tasa de recarga elevada, alta porosidad eficaz y zonas con conductividad hidráulica alta. Sin embargo, a veces existen una serie de efectos no deseables, como problemas de vulnerabilidad de contaminación, problemas de explotación muy intensa de los recursos a nivel regional y los problemas de asentamientos humanos sobre zonas de recarga.

Los distintos tipos de materiales geológicos deben de estudiarse, iniciando con los minerales, las rocas y sus relaciones estratigráficas y estructurales, para aplicar las características de los materiales en la perforación de pozos y clasificación de los acuíferos en función de su génesis.

#### **6.1.3.1 BALANCE HIDROLÓGICO**

El concepto de balance hídrico es una representación teórica de los intercambios de agua entre las plantas, el suelo y la atmósfera, permitiendo hacer una cuantificación del recurso

hídrico a diferente escala, ya sea una parcela, finca, cuenca o región, considerando las modificaciones del mismo por influencia de las actividades del ser humano en general (Jimenez, 2005). El balance hidrológico ayuda a determinar la disponibilidad de agua en el tiempo y espacio, se utiliza para identificar el conflicto de déficit de agua ante la necesidad que tiene el ser humano de utilizarla (Faustino, 2007).

Según Davie (2002), el propósito de la determinación de un balance hídrico es establecer y analizar las entradas, salidas y cambios de humedad dentro de un área determinada. La recarga del acuífero es una de las salidas de humedad del suelo que se analiza por medio del balance hídrico, el cual involucra para su determinación los componentes básicos del ciclo hidrológico (precipitación, evapotranspiración, escorrentía e infiltración).

Al realizar el balance hidrológico, los factores de análisis determinaran si existe o no la posibilidad de almacenar agua en el suelo y su medio interno. Si la evapotranspiración es equivalente a la precipitación, se deduce que no quedara la posibilidad de escorrentía e infiltración. Si entre evapotranspiración y escorrentía se tiene una dimensión equivalente a la precipitación, no habrá posibilidad de almacenar agua en alguna zona subterránea (Jimenez, 2005). Esto no quiere decir que en dicha zona no exista un acuífero con potencial importante de agua, este podría derivarse de otra fuente externa a la cuenca o ser parte de una reserva muy antigua (Vargas, 1998).

### **6.1.3.2 AGUAS SUBTERRÁNEAS**

Se define el agua subterránea como aquella que se encuentra naturalmente por debajo de la superficie de la tierra, ocupando espacios vacíos de la roca o suelo (Jones, 1997).

La capacidad del suelo o roca para retener agua depende de su porosidad y permeabilidad. Las capas porosas y saturadas con agua, arena, grava o lecho de roca, que pueden rendir una cantidad de agua significativa, se conoce como mantos freáticos o mantos acuíferos. La permeabilidad o conductividad hidráulica en una roca, es su capacidad de permitir un flujo de agua a través de sí (Jones, 1997). La permeabilidad depende de los tipos de vacíos y las propiedades específicas de ellos, por ejemplo, los vacíos pueden ser poros o grietas, conectados entre sí o no (Sanchez, 2004).

Según Astorga y Arias (2003), parte de la precipitación se infiltra en el suelo y llena los poros que hay en éste y en las rocas de la corteza terrestre, abasteciendo así la demanda de humedad del suelo (capacidad de campo), cuando esto ocurre se da la percolación del agua hacia capas más profundas llegando a ser parte de la recarga de los acuíferos (Ward y Trimble 2004). El agua que se mueve lentamente en un acuífero, forma el flujo base que viene a ser el nivel mínimo de agua no vinculado a un evento específico de lluvia. Es por ello que aun sin precipitación podemos encontrar flujos de agua en manantiales, ríos y lagos (Davie, 2002).

A la superficie bajo la tierra en donde todo el suelo y las rocas están llenos de agua se les denomina zona de saturación y al agua que llena esos poros se le conoce como agua freática (Faustino, 2007). El nivel de agua freática es la superficie superior de la zona de saturación, es la línea divisoria entre el suelo, la roca saturada y la roca no saturada, en donde los poros todavía pueden absorber más agua (Bras, 1990).

El nivel que alcanzan las aguas subterráneas se conoce como nivel piezométrico, estos niveles presentan variaciones muy pequeñas en acuíferos no explotados. En general, el nivel piezométrico medio de los acuíferos en un periodo grande de tiempo, es constante, excepto que el ser humano haya cambiado sustancialmente sus condiciones de recarga y descarga (Custodio & Llamas, 2001).

El nivel freático puede encontrarse a diferentes profundidades, dependiendo de las circunstancias geológicas y climáticas, desde sólo unos centímetros, hasta centenas de metros por debajo de la superficie, en la mayoría de los casos la profundidad varía con las circunstancias meteorológicas de las que depende la recarga de los acuíferos (Custodio, y Llamas 2001). El nivel freático no es horizontal, sino que es irregular, con pendiente decreciente desde el nivel fijo superior al nivel fijo inferior. Desde el nivel freático hasta la superficie se encuentra la zona no saturada o zona vadosa donde la circulación del agua es básicamente vertical, representada por la percolación que es la circulación del agua movida por gravedad (Jones, 1997). No obstante, Bras (1990), menciona que la zona no saturada o vadosa, será tal siempre y cuando no se presenten periodos extremos de precipitación. La zona freática puede extenderse a una profundidad considerable, pero a medida que aumenta

la profundidad, el peso de la sobrecarga tiende a cerrar los poros de manera que es poca el agua que se encuentra a profundidades superiores a los tres kilómetros (Linsley, 1998). Para Maidment (1993), en la zona vadosa, la presión atmosférica es mayor que la fuerza o tensión causada por la capilaridad y en la zona saturada, la tensión capilar es mucho mayor que la presión atmosférica.

La composición geológica puede limitar o favorecer la infiltración de agua en el suelo, si el material que conforma el subsuelo es permeable será más favorable la infiltración, pero, si el material es impermeable se induce al escurrimiento superficial del agua, ejemplo de ello es la construcción de carreteras, aceras, urbanizaciones y edificios que cubren el suelo con material impermeable y hacen menos favorable la infiltración del agua precipitada, este hecho lleva a la acumulación de aguas superficiales que se desbordan de las cuencas y de las estructuras ingenieriles para inducir la escorrentía, causando catástrofes de gran impacto socioeconómico debido a las inundaciones (Marsalek, Jimenez, & Malmquist, 2006).

El agua subterránea llena cavidades y circula por galerías, sin embargo, se encuentra ocupando los intersticios (poros y grietas) del suelo, del sustrato rocoso o del sedimento sin consolidar, los cuales la contienen como una esponja. La única excepción significativa la ofrecen las rocas solubles como las calizas y los yesos, susceptibles de sufrir el proceso llamado karstificación, en el que el agua excava simas, cavernas y otras vías de circulación. Dado que el estado y movimiento del agua subterránea está íntimamente ligado con la estructura geológica del terreno, la comprensión de las características geológicas persistentes, es un prerrequisito para el entendimiento de los procesos hidrogeológicos (Baker, 1994).

Si el nivel del agua superficial (ríos, riachuelos, lagos) está por encima del nivel freático, se produce un aporte a las aguas subterráneas y por lo tanto se le llama corrientes influentes, por el contrario, si el nivel de las aguas superficiales está por debajo del nivel freático, se produce un aporte a las aguas superficiales y por lo tanto se le llama corrientes efluentes, es por esto que se tienen las corrientes perennes, a pesar de que no se produzca precipitación.

Casi toda el agua subterránea es agua proveniente de la precipitación. En algunos sitios se encuentra agua de formación presente en la roca durante su formación o deposición y

generalmente de alto contenido salino. En menores cantidades existe también el agua juvenil, formada químicamente dentro del subsuelo y traída a la superficie por rocas intrusivas. Tanto el agua de formación como el agua juvenil, con frecuencia son la fuente de minerales indeseables en el agua subterránea (Linsley, 1998).

Para Reynolds (2002), el agua subterránea representa una fracción importante del agua presente en los continentes, con un volumen mucho más importante que el del agua retenida en lagos o circulante, aunque menor que el de los glaciares. El agua del subsuelo es un recurso importante, pero de difícil gestión, debido a su sensibilidad a la contaminación y a la sobreexplotación.

Dentro del ciclo hidrológico, las aguas subterráneas son fundamentales tanto como fuente de agua potable para la sociedad, como para el mantenimiento de muchos ecosistemas acuáticos. La mayor parte del flujo en corrientes permanentes de agua, proviene del agua subterránea, mientras que una gran parte del flujo en corrientes intermitentes puede infiltrarse bajo la superficie (Linsley, 1998).

La importancia económica que supone el aprovechamiento del agua subterránea en el mundo es enorme, pues el agua subterránea es preferida generalmente al agua superficial por las siguientes razones (Reynolds & Thompson, 1988):

- a) El agua subterránea no posee organismos patógenos y por ello no necesita ser tratada previamente, con el consiguiente menor coste al no pasar por depuradores.
- b) Su temperatura es constante, lo cual es una gran ventaja si se ha de utilizar para intercambios térmicos como termorregulador.
- c) No posee turbidez ni color
- d) La calidad físico-química natural del agua subterránea es mucho más constante que la del agua superficial.
- e) Los volúmenes de agua subterránea almacenada son por lo general mayores que los volúmenes almacenados en superficie, por lo que el abastecimiento a partir de aguas subterráneas no suele verse afectado por las sequías prolongadas.

- f) Por la existencia de suelo o roca arriba del reservorio de aguas subterráneas, el agua ésta más protegida de la contaminación (natural y antrópica) en comparación con las aguas superficiales.
- g) El agua subterránea acumulada durante varios años, constituye el único recurso en muchas regiones donde no es posible asegurar su abastecimiento a partir de la explotación de las aguas superficiales.

### **6.1.3.3 ACUÍFERO**

Una formación geológica que contiene agua y que la transmite de un punto a otro recibe el nombre de acuífero (Linsley, 1998). Según Obando (2005), con la fuerza de gravedad, una parte muy importante de la precipitación que cae sobre la tierra y el agua sobrante de las aguas superficiales, penetra en la capa vegetal, pasa a través de partículas de tierra, arena, grava o por las grietas de las rocas, hasta una zona en la que el suelo está lleno de agua, alimentando así las corrientes subterráneas y formando un acuífero. Bras, (1990) define acuífero como aquellas formaciones rocosas que contienen la cantidad de agua suficiente para ser explotada.

La velocidad con la que el agua puede viajar hacia el interior del suelo, depende del tipo de materiales geológicos que lo conformen. Aquellos materiales que permiten que el agua pase a través de ellos se llaman permeables, pero los suelos de barro o arcilla, crean fricción que efectivamente frena el movimiento del agua (Sanchez, 2005 b.).

Para Davie (2002), el acuífero es una estructura que contiene el agua existente en el interior de la corteza terrestre debido a la existencia de una formación geológica que es capaz de almacenar y transmitir el agua en cantidades significativas. Normalmente los acuíferos se van recargando de forma natural con la precipitación que se infiltra en el suelo. El perfil del suelo está formado por sedimentos no consolidados o débilmente consolidados depositados horizontalmente o simplemente estructurados, en capas mejor o peor definidas. Las capas pueden ser: *a) permeables, b) semipermeables o c)impermeables* (Custodio & Llamas, 2001).

- a) Se dice que una capa es permeable cuando sus propiedades transmisoras de agua son favorables o al menos favorables en comparación con los estratos superiores o inferiores. En una capa de este tipo, la resistencia al flujo vertical es pequeña y puede

ser generalmente despreciada de forma que únicamente deben tenerse en cuenta las pérdidas de energía causadas por el flujo horizontal.

- b) Una capa es semipermeable si sus propiedades transmisoras de agua son relativamente desfavorables. El flujo horizontal a lo largo de una distancia significativa es despreciable, pero el flujo vertical no puede despreciarse ya que la resistencia hidráulica del flujo es pequeña debido al espesor relativamente pequeño de las capas, por consiguiente, el flujo de agua en las capas semipermeables se considera esencialmente vertical.
- c) Una capa es impermeable cuando sus propiedades transmisoras de agua son tan desfavorables que solamente fluyen a través de ella, sea vertical u horizontalmente, cantidades de agua despreciables. Capas completamente impermeables son poco frecuentes cerca de la superficie del suelo, pero son comunes a mayores profundidades donde ha tenido lugar la compactación, cementación y otros procesos de consolidación.

Las capas que contienen agua subterránea se combinan en sistemas de acuíferos. Un sistema de acuífero debe ser relativamente simple y pertenecer a la siguiente clasificación (Faustino, 2007):

- a) *Acuífero libre*: Llamado también acuífero freático o capa freática. Es una formación permeable saturada limitada en su parte inferior por una capa impermeable. El límite superior está formado por la tabla de agua o nivel freático, que se encuentra en equilibrio con la presión atmosférica. El nivel del agua producido por la instalación de un pozo de observación o de un agujero que penetra en dicha formación por lo general no se eleva más arriba del nivel freático. El agua en un acuífero libre se llama agua freática o libre
- b) *Acuífero semilibre*: Es en realidad una formación casi semiconfinada, en la cual la conductividad hidráulica de la capa semipermeable (grano fino) es tan grande que el componente horizontal de flujo de esta capa no puede ser despreciado. Este tipo de acuífero es una forma intermedia entre el tradicional acuífero semiconfinado y el acuífero libre.

- c) *Acuífero confinado o artesiano*: Es una formación permeable completamente saturada de agua y cuyos límites superior e inferior, son capas impermeables. En los acuíferos confinados, la presión del agua es generalmente mayor que la atmosférica, por tal razón, el agua en pozos que penetran en tales acuíferos permanecen por encima del nivel superior de las capas permeables. El agua de un acuífero confinado se denomina agua confinada o agua artesiana.

En el ciclo hidrológico el agua suele entrar al acuífero en las llamadas áreas de recarga, atraviesa muy lentamente el manto freático y acaba saliendo por los sitios de descarga, dando lugar a manantiales y brotes que devuelven el agua a la superficie. No existe agua subterránea a más de 16 km de profundidad porque allí las rocas fluyen debido a la presión, a 6 km es escasa, pues los poros son pequeños y los intersticios no siempre están intercomunicados, razón por la cual no se establece el flujo, a 600m de profundidad, el agua resulta susceptible de recuperarse (Faustino, 2007).

Para Linsley, (1998), las velocidades de flujo de las aguas subterráneas son normalmente muy bajas, por lo tanto, el ritmo de renovación del agua subterránea es también muy lento, por ejemplo, el agua subterránea puede fluir entre 1 y 100 m<sup>3</sup> al año, es por ello que cuando a un acuífero se le extrae en un periodo largo de tiempo más agua de la que se recarga, el nivel freático empieza a disminuir y con el paso del tiempo el acuífero se irá vaciando hasta provocar desabastecimiento. Desde el punto de vista de la hidrología, el fenómeno más importante relacionado con los acuíferos, es la recarga y descarga de los mismos (Faustino, 2007).

#### **6.1.4 EL AGUA EN EL SUELO**

En la parte continental, en algún momento dentro del ciclo hidrológico, el agua tiene contacto con el suelo. Según sean las características del suelo, el agua puede escurrir superficialmente o infiltrarse a través de este (Custodio & Llamas, 2001).

##### **6.1.4.1 AGUA SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL**

Gran parte del agua que cae al suelo durante la primera parte de un aguacero, es depositada en la cobertura vegetal como intercepción y en las depresiones del terreno como almacenamiento superficial (Davie, 2002). Para Starosolszky (1987), la intercepción de la

precipitación es influenciada por la temperatura, humedad y velocidad del aire, y una vez que ésta se da, a medida que continúa la precipitación, la superficie del suelo se cubre de una capa delgada de agua conocida como retención superficial y el flujo comienza a correr hacia los canales superiores.

Aquella parte de la precipitación que no aparece como infiltración o como escorrentía superficial durante la tormenta o inmediatamente después de la misma, constituye la retención superficial. En otras palabras, la retención superficial incluye la intercepción, el almacenamiento superficial y la evaporación que ocurre durante el aguacero, pero no incluye el agua almacenada temporalmente que va en camino hacia los lagos o ríos (Linsley, 1998).

El porcentaje de intercepción de la lluvia debido a los tipos de vegetación, puede llegar a representar una porción considerable de la lluvia anual. La capacidad de almacenamiento por intercepción es por lo general satisfecha en las primeras horas del aguacero, de manera que un alto porcentaje de las lluvias durante un aguacero de corta duración, es interceptada. Después de que la vegetación está saturada, la intercepción cesa, a no ser que una cantidad apreciable de agua pueda evaporarse a partir de una enorme superficie mojada de vegetación. Una vez que el almacenamiento por intercepción se completa, la cantidad de agua que alcanza el suelo es igual a la lluvia, menos la evaporación a partir de la vegetación (Jones, 1997).

Por otro lado, el agua subsuperficial se infiltra y fluye cerca de la superficie del suelo, por encima de la zona freática, a través de la zona no saturada o zona vadosa, donde, gracias a la gravedad, la circulación del agua es básicamente vertical (Maidment, 1993). Debido a la compactación causada por actividades humanas, o por la presencia de capas de arcilla o roca sólida presente de manera natural, al agua subsuperficial no alcanza la zona freática y comienza a correr por debajo de la superficie terrestre hasta alcanzar manantiales y cauces de agua superficial (Ward & Trimble, 2004).

#### **6.1.4.2 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO**

Las plantas por medio de las raíces absorben el agua del suelo. La cantidad de agua contenida en el suelo y su absorción por medio de la planta dependen mucho de algunas características de ese suelo, por lo que resulta necesario conocerlas (Maidment, 1993):

- a) *La porosidad*: El suelo está constituido por partículas sólidas de distinto tamaño que dejan entre sí unos espacios o poros ocupados por aire y agua. Por lo general, el aire ocupa una gran parte del espacio de los poros grandes, mientras que el agua ocupa poros más pequeños. El volumen de estos espacios suele oscilar entre el 40 y el 60% del volumen total del suelo. La porosidad es la relación entre el volumen de espacios y el volumen total del suelo que lo contiene y ésta depende de un gran número de factores, entre ellos la naturaleza fisicoquímica del suelo, granulometría de sus componentes, grado de cementación o compactación y efectos de disolución y meteorización (Benitez, 1972). Para Ward, y Trimble (2004), la retención y el movimiento del agua en el suelo durante un periodo de precipitaciones o sequedad, se da en función de la forma y el tamaño de los espacios porosos existentes.
- b) *La textura*: Es la proporción que tiene el suelo de arena, limo y arcilla. Un suelo franco es aquel que está formado por una mezcla de estos tres elementos en proporciones equilibradas, es decir no predomina una partícula sobre la otra.
- c) *La estructura*: Es la forma como se unen las partículas de arena, limo y arcilla en el suelo. Un suelo con buena estructura contiene abundancia de poros grandes y pequeños, con lo cual el agua, aire y las raíces se mueven libremente, permitiendo que una apreciable cantidad de agua quede retenida en las partículas sólidas.
- d) *La profundidad*: Es la parte del suelo explorada por las raíces que varía cuando existen capas permeables o impermeables. Es el espacio en el perfil del suelo, donde las plantas pueden extraer agua.

#### **6.1.4.3 FASES DEL AGUA EN EL SUELO**

Con respecto a la cantidad de agua almacenada en el suelo, que varía de una forma constante, se pueden distinguir las siguientes fases (Custodio & Llamas, 2001).

- a) *Grado de saturación*: Después de una lluvia fuerte y constante, el agua ocupa todos los poros del suelo, tanto los grandes como los pequeños, se dice entonces que el suelo está saturado.
- b) *Capacidad de campo (CC)*: En un suelo saturado el exceso de agua se elimina por gravedad, es decir, el agua que ocupa una gran parte de los poros grandes cae al subsuelo por su propio peso. A partir del momento de la saturación y al cabo de un tiempo que dura dos o tres días, el suelo ha eliminado por gravedad la mayor parte del agua sobrante, cuando esto ocurre se dice entonces que el suelo se encuentra a CC. Según Bras (1990), la CC equivale al contenido de humedad que persiste a una tensión de 0.33 atmósferas (bares de presión).
- c) *Punto de marchitez permanente (PMP)*: A partir de la capacidad de campo, el agua del suelo se va perdiendo progresivamente por evaporación y por absorción de las plantas, hasta que llega un momento en el que las plantas ya no pueden absorber más agua y se marchitan. El suelo contiene todavía una cierta cantidad de agua que la planta no puede utilizar. Se supone comúnmente que el PMP equivale al contenido de humedad que persiste a una tensión de 15 atmósferas (bares de presión) (Bras, 1990).
- d) *Suelo seco*: A partir del punto de marchitamiento, el suelo pierde agua por evaporación cuando se le deja secar al aire pero todavía queda cierta cantidad de agua que sólo se puede eliminar sometiendo el suelo a un secado de varias horas en una estufa (Reyes, 2006).

A su vez, según la utilización que las plantas den al agua, ésta puede ser (Custodio & Llamas, 2001).

- a) *Agua sobrante*: Es el agua que no puede ser retenida por el suelo y cae por su propio peso hacia las capas más bajas de éste. Esta agua no puede ser utilizada por las plantas porque está situada en una región del suelo fuera del alcance de las raíces.

- b) *Agua disponible*: Es el agua retenida por el suelo y puede ser absorbida por las plantas. El agua disponible es igual a la diferencia entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP).
- c) *El agua que puede ser utilizada por las plantas*: Depende del tipo de planta y del agua disponible que está contenida en el volumen de tierra ocupado por las raíces.

La humedad del suelo se encuentra estrechamente relacionada con las condiciones climatológicas, durante las épocas lluviosas la humedad se acumula en el suelo y en las épocas secas ésta se pierde por evapotranspiración (Wiley, 1959). Las mayores variaciones en las reservas de agua se dan en la capa del suelo de un metro o metro y medio de espesor y puede admitirse que hasta los dos metros es donde se concentra la mayor parte de humedad del subsuelo (UNESCO, 1980).

#### **6.1.4.4 MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO**

El contenido de agua en el suelo cambia continuamente como consecuencia de los movimientos de agua que ocurren en él. Según Custodio y Llamas (1983), las principales causas por las cuales se producen estos movimientos, son las siguientes:

- a) *La gravedad*: Parte del agua que recibe el suelo, penetra y desciende a través de los poros más grandes del suelo sometida fundamentalmente a la acción de la gravedad. El propio peso del agua hace que ésta tienda a caer hacia las capas inferiores del suelo. A esta agua se le conoce como agua gravitacional.
- b) *La capilaridad*: Una vez que el agua infiltra y llega a las capas inferiores del suelo, ésta tiende a desplazarse por espacios muy pequeños (intersticios) que forman los poros del suelo. Estos desplazamientos ocurren desde abajo hacia arriba y en todas las direcciones posibles. El contacto del agua con el aire produce una succión o atracción entre sus moléculas que se llama tensión superficial, esto unido a la tendencia de las moléculas de agua de adherirse a los sólidos, hace que el agua sea retenida por finos canales llenos de aire que hay en el suelo y no pueda ser removida del suelo bajo condiciones climáticas normales (Ward & Trimble, 2004). Por esta razón, el elemento variable más importante de la humedad del suelo es el agua capilar o higroscópica.

Según Maidment (1993), la influencia de las fuerzas capilares tienen mayor efecto en suelos con alto contenido de arcillas, por lo tanto es en este tipo de suelos donde se da mayor retención de humedad.

Para Davies (2002), existe un constante enfrentamiento entre las fuerzas gravitacionales y las fuerzas capilares, donde debido a la capilaridad se da un fenómeno conocido como succión (atracción o adherencia de las partículas de agua al suelo) el cual evita que el agua fluya subterráneamente a gran velocidad y únicamente durante los periodos donde se presentan precipitaciones. Por lo anterior, es posible que sea gracias a las fuerzas capilares que podemos encontrar parte de la descarga de aguas subterráneas en periodos secos o con muy baja precipitación.

Para Duke (1974), si el agua es atraída por tensión o presión de un suelo arenoso, el agua debe remplazar al aire en el espacio poroso. Como resultado, se forman superficies de contacto aire-agua, las cuales forman superficies curvas de agua entre partículas contiguas de suelo. La tensión superficial que actúa sobre esas superficies curvas de contacto equilibra la tensión o presión ejercida por el agua y constituye un mecanismo por el cual el agua es retenida en el suelo. Por otra parte, un suelo arcilloso se contrae progresivamente a medida que el agua se retira, de modo que no puede entrar aire en el espacio poroso y las partículas de suelo se unen más y más. Como estas partículas tienen una carga superficial negativa, se repelen unas a otras y al ser aproximadas, la fuerza de repulsión aumenta. El encogimiento y formación correspondiente de fuerzas repelentes equilibra la tensión o presión aplicada para quitar el agua, algo que constituye otro fenómeno por el cual, el agua queda retenida en el suelo. Otro mecanismo que incrementa la retención de humedad, es la presencia de solutos osmóticamente activos, principalmente sales en la disolución del suelo. Los solutos reducen la presión del vapor de agua del suelo y aminoran su energía libre o potencial hídrico, quedando espacio que puede ser ocupado por el agua.

Para Linsley (1998), la región de humedad del suelo comprende desde los 0 hasta los 10 m de profundidad, en esta zona el agua fluctúa de acuerdo con la tasa de extracción de agua ejercida por las plantas. El autor también describe la zona o franja capilar como aquella que se encuentra por encima del nivel freático, donde impera la tensión capilar que obliga al ascenso

del agua, esta franja varia en espesor, desde unos centímetros hasta algunos metros, dependiendo del tamaño de los poros del suelo.

#### **6.1.4.5 INFILTRACIÓN**

El agua precipitada sobre la superficie de la tierra, queda detenida, discurre por ella, o bien penetra hacia su interior, esta última fracción se dice que se ha infiltrado (Wiley, 1959). La infiltración es el movimiento de agua desde la superficie del suelo hacia abajo, que tiene lugar después de una lluvia o de un riego y es favorecida por la permeabilidad del suelo. Para Aparicio, (1989), la permeabilidad es la capacidad que tiene un suelo para permitir el paso de agua a través suyo, la define como el caudal de agua que se infiltra a través de una sección de suelo, debido a la fuerza gravitacional del agua.

El agua de infiltración se mueve con rapidez en los suelos más permeables, que tiene los poros grandes y continuos y con más lentitud en los suelos menos permeables, en donde se reduce el tamaño, la cantidad y la continuidad de los poros. (Maidment, 1993). La permeabilidad del suelo es activada por medio de canales no capilares, a través de los cuales drena el agua por gravedad, desde la superficie, hasta el nivel del agua subterránea, siguiendo la trayectoria de menor resistencia (Wiley, 1959).

Las aguas subterráneas provienen de la infiltración directa en el terreno de las lluvias o nieves, o indirectas de ríos o lagos. La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en las capas superiores del suelo, mientras que la percolación es el movimiento del agua en las capas del subsuelo. El agua que se infiltra a través de la superficie del suelo y no es retenida como humedad del suelo, se mueve hacia los manantiales y cauces como corriente subsuperficial o penetra a la capa freática y alcanza eventualmente el cauce como agua subterránea, este fenómeno se conoce como percolación (Ward & Trimble, 2004). La percolación directa es el proceso más efectivo en la recarga del agua subterránea donde los suelos son considerablemente permeables o donde la capa freática esta cerca de la superficie del suelo. Según Bras (1990), la recarga directa de las aguas subterráneas es común en lavas basálticas presentes en suelos de origen volcánico o áreas kársticas, pues por su origen, en estas es común la transmisión de agua a través de cavidades, fracturas y partículas de suelo de mayor tamaño.

La velocidad de infiltración depende de una serie de factores, entre los que se destacan los siguientes (Aparicio F., 1989).

- a) *La estructura del suelo:* Los suelos con buena estructura tienen una velocidad de infiltración mayor que los suelos sin estructura o muy compactos. La materia orgánica mejora la estructura del suelo y favorece la infiltración del agua.
- b) *El apelmazamiento del suelo:* El impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo deshace su buena estructura, dando como resultado la ocurrencia de partículas finas que taponan los poros y dificultan la infiltración.
- c) *Las grietas del suelo:* Algunos suelos arcillosos se resquebrajan y forman grietas cuando se secan, lo que facilita la penetración del agua en la fase final. Cuando la tierra se ha humedecido de nuevo desaparecen las grietas y se reduce la velocidad de infiltración.
- d) *La textura:* En los suelos con un contenido alto de arena, la velocidad de infiltración es mucho mayor que en los suelos arcillosos, mientras que en los suelos francos se presentan velocidades intermedias de infiltración.

La velocidad de infiltración es máxima al comienzo de la lluvia y va disminuyendo progresivamente al ser interceptada por intersticios capilares. A medida que los poros capilares se llenan de agua, la tasa de infiltración disminuye (Starosolszky, 1987). Igualmente, la capacidad de infiltración disminuye cuando las arcillas se expansionan y taponan parcialmente los poros, en este momento la fuerza capilar deja de ser importante y da paso al dominio de la fuerza gravitacional del agua. En suelos homogéneos la infiltración disminuye gradualmente hasta que la zona vadosa es saturada. Normalmente el suelo es estratificado y las capas inferiores son menos permeables que las capas superficiales (Wiley, 1959).

La tasa de infiltración básica o también conocida como capacidad de infiltración, es la velocidad con que el agua puede entrar en el suelo en su etapa equilibrada, o sea, cuando el suelo se ha saturado (Davie, 2002). Cuando todo el medio está saturado, el movimiento del agua se

produce solo por la acción de la gravedad y la capacidad de infiltración se vuelve constante. La tasa de infiltración básica es expresada en unidad de volumen/unidad de tiempo (Hernandez & Cabalceta, 1999).

Según Wiley (1959), la capacidad de infiltración depende de una serie de factores, tales como el tipo de suelo, el contenido de humedad, el contenido de materia orgánica, el tipo de cobertura vegetal y la estación climática del año. Para Ward y Trimble (2004), de aquellas características del suelo que afectan la infiltración, la porosidad es posiblemente la más importante. La porosidad se define como el espacio que puede ser ocupado por el aire y el agua en el suelo, por lo tanto, ésta depende del tamaño, agregación y la forma de las partículas del suelo. La porosidad no es igual al volumen de humedad que un suelo puede retener, éste volumen es siempre menor debido a la atracción molecular dada entre las partículas del suelo. La porosidad determina la capacidad de almacenamiento y también afecta la resistencia al flujo, de esta manera la infiltración tiende a aumentar con el aumento de la porosidad. Para Maidment (1993), un alto contenido de materia orgánica, una baja densidad aparente y un contenido bajo en arcillas, tiende a aumentar la capacidad de infiltración debido en gran parte al aumento proporcional de la porosidad. Para Ward y Trimble (2004), las anteriores características se presentan en mayor medida en suelos cubiertos por bosque, por lo que el tipo de cobertura vegetal del suelo, influye grandemente en su capacidad de infiltración.

En cuanto al tipo de cobertura vegetal del suelo, ésta favorece la infiltración en comparación con la de un suelo desnudo, esto debido a que se retarda la caída y el flujo de agua sobre la superficie, dando al agua tiempo adicional para penetrar en el suelo, no obstante, una vegetación densa reduce el agua que llega al suelo, pues parte de esta es interceptada, reduciendo así la fracción de escorrentía y aumentando la de infiltración (Reynolds & Thompson, 1988). Además, los sistemas radicales hacen el suelo más permeable y el follaje protege el suelo de la erosión causada por el impacto de las gotas de agua, reduciendo así la compactación del suelo (Linsley, 1998). La cobertura vegetal del suelo no solo protege el suelo de la compactación causada por la lluvia, sino que también mantiene altos contenidos de materia orgánica y facilita la actividad de insectos y microorganismos en el suelo. Dada su importancia en la infiltración, la cobertura del suelo es más importante que el tipo de suelo existente, pues se han hecho estudios donde resulta que en un mismo suelo, distintos tipos de

cobertura vegetal presentan diversas tasas de infiltración. Debido a la alta transpiración, poco aporte de materia orgánica y baja protección de la compactación causada por la lluvia, los cultivos anuales poco densos y de porte bajo, no son los más idóneos en términos de infiltración (Wiley, 1959).

Otros factores que afectan la capacidad de infiltración de los suelos, son la compactación causada por maquinaria, humanos y animales. Esta compactación puede darse más marcadamente en suelos con alto contenido de arcillas. En ocasiones, debido a la precipitación, partículas muy pequeñas de suelo suelen ser depositadas en los espacios intersticiales, reduciendo la capacidad de infiltración del suelo. En cuanto a la humedad del suelo, es posible que en un suelo seco exista un gran potencial de capilaridad que junto con las fuerzas gravitacionales, hacen posible altas tasas de infiltración al inicio de la época de invierno. Otro factor que afecta negativamente la capacidad de infiltración es la viscosidad del agua provocada por las altas temperaturas, entre más viscosa sea el agua, menor va a ser la tasa de infiltración (Wiley, 1959).

La cantidad de agua que se infiltra en un terreno depende también del tiempo que se dispone para su penetración. En los terrenos arcillosos con poca velocidad de infiltración, una lluvia suave durante mucho tiempo aporta más agua al suelo que una lluvia fuerte que dure poco tiempo. El tiempo de infiltración aumenta cuando de alguna forma se mantiene el agua sobre el terreno permitiendo que ésta se infiltre poco a poco (Schosinsky & Losilla, 2002). Cuando la intensidad de la lluvia es menor que la capacidad de infiltración, la tasa de infiltración será igual a la tasa de precipitación (Wiley, 1959). Para Duke (1974), la infiltración también se ve afectada por el contenido hídrico inicial, el espacio poroso del suelo, el grado de hinchazón de los coloides y el contenido orgánico del suelo. Según este autor, al aumentar el contenido hídrico inicial del suelo, también se reduce la capacidad de infiltración del mismo, pues la hidratación e hinchazón de las partículas de arcilla, reduce el espacio disponible para facilitar la entrada de agua. Sobre aquellos suelos difíciles de mojar o muy compactados, Duke (1974), recomienda la adición de agentes humedecedores.

Según Linsley, (1998), la infiltración de agua permite 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 infiltradas son por lo general muy pequeñas (unos pocos centímetros por día) y raramente son capaces de saturar una profundidad considerable del suelo. 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.

En general, el volumen de infiltración es varias veces mayor que el de escorrentía durante un aguacero, especialmente en cuencas con un grado de urbanización relativamente bajo (Aparicio F. , 1989).

#### **6.1.4.6 CANTIDAD DE AGUA EN EL SUELO SEGÚN LA VEGETACIÓN**

Para conocer la relación que existe entre la cantidad de agua en el suelo y el tipo de vegetación, primeramente se deben conocer los conceptos de evaporación, transpiración y evapotranspiración.

La evaporación es una etapa permanente del ciclo hidrológico que se da en toda superficie o espacio húmedo. Como fenómeno físico, la evaporación es el paso del estado líquido al estado gaseoso, sin embargo, hay otra evaporación que es provocada por la actividad fisiológica de las plantas que se conoce como transpiración. Parte de la precipitación es interceptada por la vegetación y es evaporada inmediatamente, por lo tanto se debe descartar su contribución a la transpiración. Los conceptos de evaporación y transpiración, conforman la evapotranspiración (Starosolszky, 1987).

En el término evaporación se incluye la evaporización de las gotas de lluvia en la superficie de las plantas, así como la evaporación del agua en superficies líquidas libres, mientras que en el término transpiración se incluye, además de la transpiración propiamente dicha, el agua utilizada por las plantas en la formación de la materia seca que la compone (Ward & Trimble, 2004).

Algunos elementos meteorológicos que afectan la evaporación son: radiación solar, temperatura del aire, presión de vapor, viento y presión atmosférica. De estos, la radiación

solar es la más influyente. La evaporación varía con la latitud, época del año, hora del día y condición de nubosidad (Aparicio F. , 1989).

En resumen, los factores que condicionan la evapotranspiración se pueden agrupar de la siguiente forma (Reyes, 2006):

- a) *Condiciones dependientes del suelo:* En suelos con capacidad para retener gran cantidad de agua, la evapotranspiración es más intensa que en los suelos que presentan menormente esa propiedad.
- b) *Naturaleza de la vegetación:* Las plantas que tienen muchas hojas como es el caso del bosque denso, transpiran más cantidad de agua que aquellas otras que tienen menor cantidad de follaje.
- c) *La fase vegetativa en que se encuentra el cultivo:* la evapotranspiración varía a lo largo del ciclo vegetativo. En las plantas poco desarrolladas la mayor parte del agua se pierde por evaporación en el suelo, pero a medida que el cultivo se desarrolla, aumenta la transpiración y disminuye la evaporación, esto debido a que aumenta el volumen de follaje y éste sombrea la superficie del suelo.
- d) *Condiciones meteorológicas:* La insolación fuerte, las temperaturas elevadas, la sequedad del ambiente y el viento, son condiciones meteorológicas que favorecen la evapotranspiración.

Según Custodio y Llamas (1983), la transpiración es el proceso en el cual las plantas son capaces de formar su propia materia a base de las sustancias que toman del aire y del suelo. La planta absorbe por las raíces del agua y las sales minerales y por las hojas toma el anhídrido carbónico del aire. Para que la planta se desarrolle normalmente debe existir equilibrio entre el agua absorbida por las raíces y el agua transpirada por las hojas.

El tipo de planta es un factor importante en el control de la transpiración, cuando la humedad del suelo es limitada. Cuando se secan las capas superiores del suelo, las especies con raíces poco profundas no pueden obtener agua y se marchitan, mientras que en las especies con

raíces profundas continúan transpirando hasta que la humedad del suelo se reduce y se alcanza el punto de marchitez permanente (Bras, 1990). Por lo tanto, la vegetación con raíces profundas como es el caso del bosque, transpira más agua durante periodos secos, en comparación con las plantas de especies con raíces poco profundas (Linsley, 1998).

La disponibilidad de agua está determinada en buena parte por el tamaño de la zona de raíces y el régimen climático. Si los periodos largos sin lluvia durante la temporada de crecimiento son característicos de un área, la cobertura forestal de raíces profundas transpirará libremente la mayor parte del tiempo aun cuando se haya terminado la disponibilidad de agua para plantas con raíces poco profundas. En áreas donde las plantas con raíces poco profundas obtienen una adecuada cantidad de agua la mayor parte del tiempo, la evapotranspiración es afectada en menor grado por la profundidad de la zona de raíces (Linsley, 1998).

Para evitar desequilibrios entre el agua absorbida por las raíces y el agua transpirada por las hojas, las plantas pueden graduar la apertura de los estomas. Las causas que influyen sobre los movimientos de apertura y cierre de los estomas son los siguientes (Sanchez, 2005 a.):

- a) *La intensidad de la luz:* El proceso de la fotosíntesis se realiza con la energía de la luz solar, a mayor intensidad de la luz solar, mayor intensidad de la fotosíntesis, con la cual se produce mayor cantidad de savia elaborada, por lo tanto, hay mayor cantidad de agua sobrante, o sea mayor transpiración.
- b) *El calor y el viento:* A mayor calor y ventosidad se favorece la evaporación y por lo tanto, la salida de agua de la planta en forma de vapor.
- c) *El grado de humedad del aire:* Con una atmósfera seca se favorece el aumento de la transpiración, ya que se favorece la evaporación del agua.
- d) *La cantidad de agua contenida en la planta:* Cuando la planta sufre escasez de agua, bien sea por escaso aprovisionamiento o porque la transpiración es muy grande (días muy cálidos o con mucho viento), los estomas se cierran parcialmente o por completo con el fin de disminuir las pérdidas de agua por transpiración.

Para Ward y Trimble (2004), debido a un mayor contenido de biomasa y a la profundidad que alcanzan sus raíces, el bosque evapotranspira más agua que los cultivos pocos densos y con una reducida profundidad de raíces. Debido a lo anterior, un bosque se caracteriza por presentar mucha transpiración, en comparación con la evaporación del suelo, pues por lo general, éste se encuentra protegido por las copas de los árboles y por el mantillo o capa de humus acumulada en su base.

Según Reynolds y Thompson (1988), cuando un área forestal es reemplazada por pastizales o cultivos, se presenta un aumento en la escorrentía superficial, erosión del suelo y una reducción considerable en las tasas de intercepción y evapotranspiración, provocando la ocurrencia de suelos con menor agua retenida. Para tener una idea más clara de la importancia de los bosques tropicales, Jones (1997) menciona que estos presentan una tasa de evaporación promedio de 60 ton de agua/ha/día, pero igualmente son responsables de almacenar o retener 1350 ton de agua/ha/día. Agrega además que el solo hecho de reforestar un 10% de una hectárea talada, implica reducir la escorrentía en un 2%.

La cantidad de agua que necesita una planta se distribuye de tres maneras: agua incorporada, agua evaporada por la superficie del suelo y agua transpirada. El consumo de agua por evaporación y transpiración se puede considerar prácticamente como el consumo total, dicho consumo de agua recibe el nombre de evapotranspiración, de la que hay que diferenciar (Sanchez, 2005 a.).

- a) Evapotranspiración Potencial (ETP) Es la cantidad de agua consumida durante un determinado periodo de tiempo, en un suelo cubierto de una vegetación homogénea, densa, en plena actividad vegetativa y con un buen suministro de agua. Definida en términos más sencillos, es la pérdida total del agua que ocurriría si en ningún momento existiera deficiencia de agua en el suelo para el uso de la vegetación.
- b) La Evapotranspiración Real (ETR): La evapotranspiración real se refiere a la pérdida de agua de una superficie (vegetal, suelo, órganos, animales) bajo las condiciones ambientales (suelo, clima) y biológicas existentes. Esto significa que pueden existir limitaciones como por ejemplo, estrés hídrico en el suelo o cierre parcial o total de

estomas, que pueden ocasionar que la ETR sea inferior a la que ocurriría si no existieran esas limitaciones. En otras palabras, es la cantidad de agua evaporada en la realidad.

Las cantidades de agua que por evapotranspiración vuelven a la atmósfera, alcanzan cifras realmente notables. Por ejemplo, en un día cálido, es frecuente una evapotranspiración de 3 a 4 mm/día, esto significa que se desplacen hacia la atmósfera de 30 a 40 toneladas de agua/ha/día. (Custodio & Llamas, 2001). En una cuenca o en una zona arbitraria de la cuenca, es casi imposible determinar la evapotranspiración de la vegetación, esto debido a la gran diversidad de vegetación y el grado de desarrollo de las plantas (Linsley, 1998). Conociendo este hecho, Schosinsky (2006) utiliza el método de Blaney y Criddle gracias al acceso de la información requerida para su cálculo, pero aclara que es posible utilizar otros métodos con el fin de asumir una evapotranspiración promedio representativa.

#### **6.1.5 RECARGA HÍDRICA**

Se denomina recarga hídrica al proceso por el que se incorpora a un acuífero agua procedente del exterior del mismo, igualmente se llama recarga al volumen de agua que penetra en el acuífero durante un intervalo de tiempo dado (Vargas, 1998)

Los acuíferos se llenan de agua debido a la precipitación pluvial que se infiltra a través del suelo y las rocas, este es el proceso conocido como recarga natural. Cualquier superficie del suelo que deja pasar el agua hasta que ésta llega a un manto freático se denomina área o superficie de recarga hídrica. El agua subterránea va desde el área de recarga, atraviesa un manto freático y llega a un área de descarga, como parte del ciclo hidrológico. Las áreas de descarga se dan cuando un acuífero alcanza la superficie de la tierra, generando así, manantiales, lagos y corrientes fluviales (Davie, 2002).

En términos generales, se denomina recarga hídrica al proceso por el que se incorpora a un acuífero agua procedente del exterior del contorno que lo limita. Son varias las procedencias de esa recarga, desde la infiltración de la lluvia y las aguas superficiales, hasta la transferencia de agua desde otro acuífero, si el mismo es externo al acuífero de interés (Orozco, Padilla, & Salguero, 2003). Las cuencas hidrológicas o colectoras, también llamadas cuencas de captación, son aquellas áreas de tierra que captan el agua en el subsuelo y la llevan hasta las denominadas masas de agua superficial (Faustino, 2007).

Las condiciones que determinan la velocidad y el caudal de la recarga de aguas subterráneas, son aquellas relacionadas con la precipitación y la facilidad de entrada del agua en el suelo (Benitez, 1972). Los acuíferos recargan en cualquier área que: a) exista suelo o roca permeable en superficie, b) esté en comunicación hidráulica con los acuíferos y c) esté temporalmente en contacto con agua. Todos estos factores definen la recarga y ocurren en diferentes grados relativos en las capas que sobreyacen a los acuíferos (Fetter, 2001).

Los acuíferos se recargan principalmente a través de la precipitación en suelos con alta capacidad de infiltración o rocas superficialmente permeables. Las áreas de recarga de los acuíferos pueden o no estar a grandes distancias de donde son explotados (Faustino, 2007).

La precipitación varía grandemente en cantidad, de unos sitios a otros y es también notablemente variable con el tiempo en cualquier sitio determinado. En general la proporción de precipitación que puede transformarse en aguas subterráneas aumenta con la precipitación, pero solo hasta un cierto límite. Si las precipitaciones tienen lugar en forma de lluvias ligeras y dispersas, pueden todas ellas ser retenidas por la vegetación o ser absorbidas por el suelo. Las lluvias que tienen lugar después de que la falta de humedad del suelo ha sido satisfecha, son precisamente las que tiene utilidad en la recarga de aguas subterráneas (Davie, 2002). Una cantidad dada de precipitación durante la época de crecimiento vegetal, producirá la máxima recarga si la lluvia persiste en intensidad, induciendo a que el agua se infiltre con la misma rapidez que va cayendo. Si por el contrario, el agua cae distribuida en lluvias intermitentes a lo largo de un periodo de tiempo considerable, puede ser más beneficiosa para las plantas, pero de esta agua, muy poca o ninguna cantidad puede atravesar el suelo vegetal para llegar al acuífero. Por otra parte, si la precipitación tiene lugar en forma de aguacero de gran intensidad y de corta duración, solamente una pequeña parte puede infiltrarse en el suelo y todavía otra menor parte puede alcanzar la zona de saturación, pues la mayor parte del agua correrá en forma de escorrentía directa hacia corrientes superficiales (Wiley, 1959).

Existen otras condiciones que afectan la recarga hídrica, una de ellas es el tipo de cobertura vegetal del suelo. Las áreas con bosque son más favorables a la recarga en comparación con los suelos arables, incluso para el mismo tipo de suelo. En los suelos con cobertura boscosa,

el agua no taponan los intersticios de penetración y las raíces muertas constituyen canales que tienden a favorecer la recarga. Otra característica decisiva de la recarga subterránea es la topografía del terreno, en zonas con altas pendientes, la escorrentía es máxima y por lo tanto la infiltración es mínima (Benitez, 1972).

La extensión de la cuenca receptora tiene influencia decisiva en la cantidad de agua que puede infiltrar en ella. La recarga aumenta si la recarga directa de precipitación se da en un espacio mayor. Donde existan corrientes superficiales que infiltren en la parte media-alta de la cuenca, donde por lo general la intensidad de precipitación tiende a ser mayor (Vargas, 1998).

#### **6.1.5.1 METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR ÁREAS DE RECARGA HÍDRICA**

Existen varios métodos que consideran únicamente variables biofísicas superficiales para determinar la recarga potencial de los acuíferos, entre ellos: Balance hídrico de Thornthwaite, Balance Hídrico de un Ecosistema de holdridge, Método para Determinar la Recarga de Agua Subterránea (RAS), Metodología para la Determinación de Áreas de Recarga Hídrica Natural (DARHN) y el Cálculo de Recarga Potencial de Acuíferos mediante un Balance Hídrico de Suelos, definido por el autor Gunther Schosinsky (Blanco Rojas, 2009).

De los anteriores, el método de Thornthwaite se ha aplicado en mayor medida para encontrar soluciones de indole agronómico e hidráulico y aunque puede ser efectivo en determinar la recarga potencial de los acuíferos, Thornthwaite no considera tanta información que podría dar respaldo a resultados más valederos. En este método a partir de los valores de evapotranspiración, es posible realizar todo el balance hídrico (Villon, 2004). En el caso de Holdridge, el método ha sido diseñado para ser aplicado en el bosque tropical, sus resultados son más prácticos y efectivos en la determinación de la salud y crecimiento de la vegetación boscosa (Junker, 2002) Los métodos RAS Y DARHN, aunque son recomendados para regiones tropicales, son el resultado de una combinación de otros métodos, incluyendo el de Schosinsky. (Blanco Rojas, 2009)

El método de Schosinsky, según Harold Blanco Rojas (2009), es el más apto para determinar áreas de recarga hídrica, pues además de ser el más reciente y actualizado (2006), considera más variables biofísicas cuantitativas, algunas de las cuales deben obtenerse mediante trabajo

de campo y análisis de laboratorio. En este método, Schosinsky considera información superficial sobre precipitación, evapotranspiración, infiltración básica ( $f_c$ ), humedad del suelo inicial ( $H_{si}$ ), retención de humedad del suelo (capacidad de campo y punto de marchitez permanente) y densidad aparente. También es necesaria la información referente a la intercepción de lluvia según cobertura vegetal, la profundidad de las raíces y el coeficiente de infiltración ( $C_i$ ), que esta compuesto por los coeficientes de pendiente ( $K_p$ ), cobertura vegetal ( $K_v$ ), y textura del suelo ( $K_{fc}$ ). El  $C_i$  sugerido por Schosinsky esta referido en el Manual de instrucciones de Estados Hidrológicos, realizado por las Naciones Unidas en colaboración con los países Centroamericanos, por lo tanto, este método es recomendado para ejecutarse en cualquiera de los países del istmo. Schosinsky creó una ecuación en una hoja de cálculo electrónica que integra y relaciona la información para determinar la cantidad de lluvia con potencial para recargar los acuíferos.

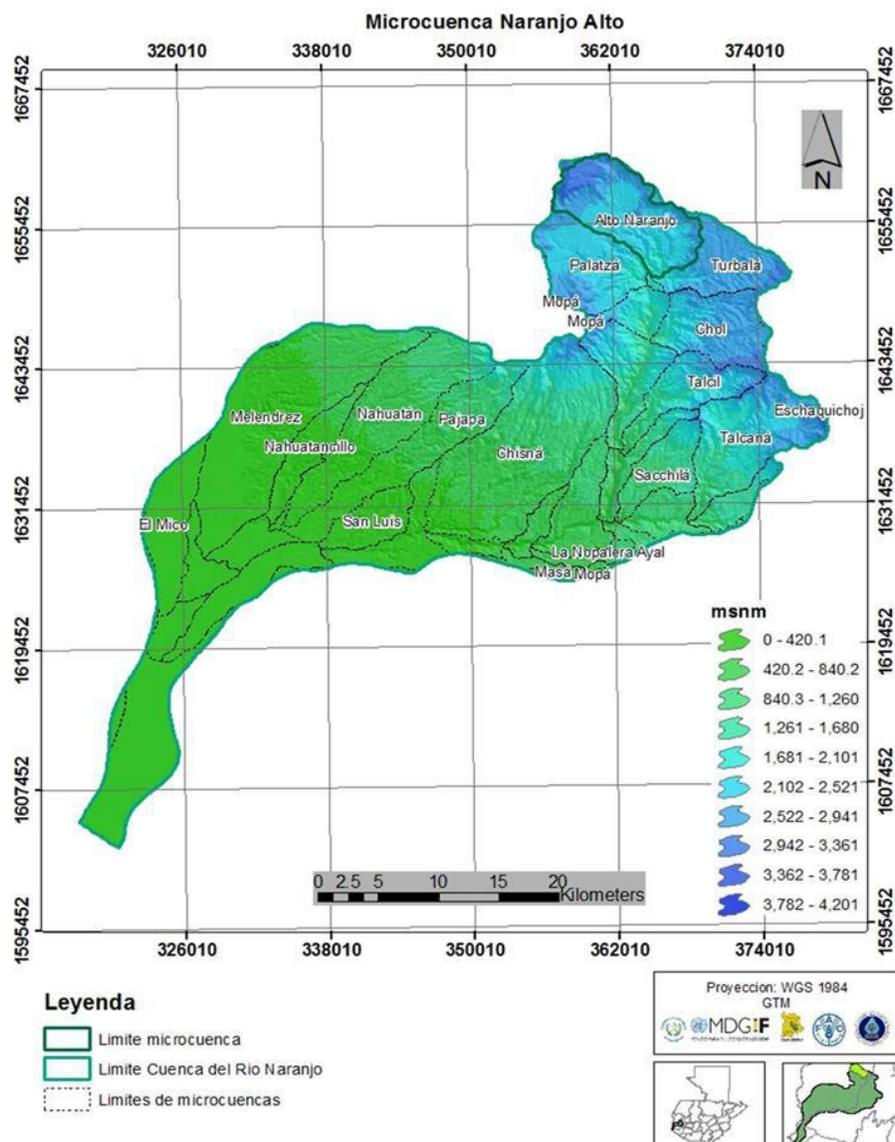
Los resultados del método Schosinsky no se limitan únicamente a la recarga potencial de un acuífero y mediante una serie de ecuaciones se integran todas las variables que pueden afectar el balance hídrico de suelos, dando más amplitud y realidad al análisis, discusión y conclusiones de la investigación. Al igual que en los métodos antes mencionados, en éste se determinan únicamente variables biofísicas con el fin de obtener resultados muy cercanos a la realidad, reducir costos de investigación y hacer posible la réplica sencilla en otras áreas de estudio.

## 6.2 MARCO REFERENCIAL

### 6.2.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La microcuenca Alto Naranjo se ubica dentro de los territorios que comprenden los departamentos de San Marcos y Quetzaltenango en el suroccidente de la república de Guatemala. Abarca parcialmente territorio de tres municipios siendo estos San Antonio Sacatepéquez con el 24% de espacio territorial, San Pedro Sacatepéquez el 70% y San Marcos 6%. Tiene promedios de 2600 msnm a una altura máxima de 3500 msnm y mínima de 1600 msnm.

**Mapa 1** Ubicación Microcuenca Alto Naranjo, dentro de la cuenca del río Naranjo.

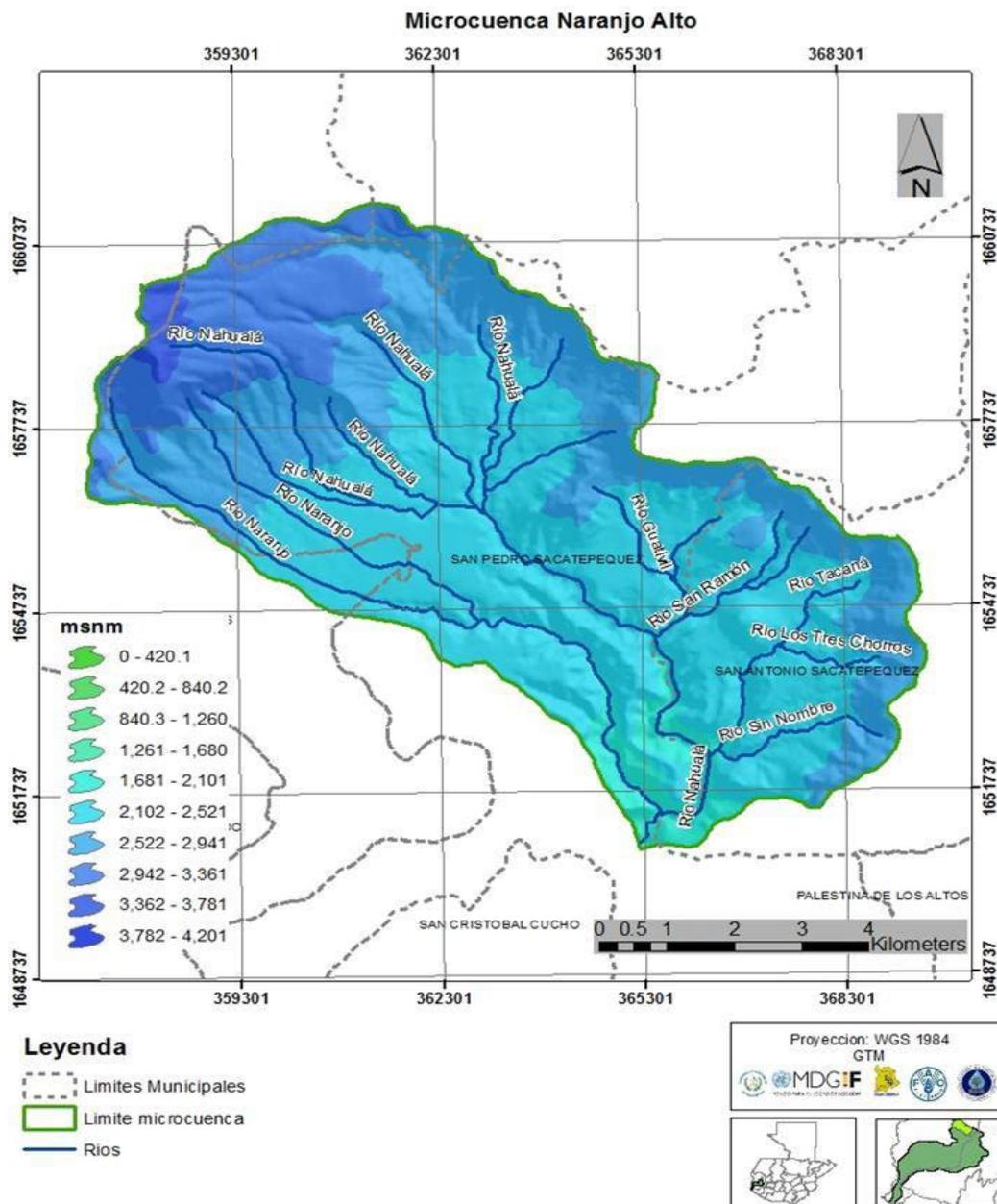


Fuente: caracterización microcuenca Alto Naranjo.

## 6.2.2 RED HÍDRICA

En el área de la Microcuenca se encuentran varios ríos y riachuelos que forman la red hídrica y se unen al río principal. Según las hojas cartográficas del departamento de Cuencas Hidrográficas disponibles, en el municipio de San Antonio se ubican los siguientes ríos: Guativil, San Ramón y Tacaná; San Pedro Sacatepéquez principalmente El Nahualá y Naranjo; en San Marcos el tributario es el río Naranjo.

**Mapa 2** Red hídrica Microcuenca Alto Naranjo.



Fuente: Caracterización Microcuenca Alto Naranjo.

### 6.2.3 CARACTERISTICAS DE LAS COMUNIDADES

En el área de la Microcuenca del río Alto Naranjo comprende a varias comunidades completas pero también incluye viviendas de comunidades cuyo centro poblado se ubica en microcuencas adyacentes o que tienen bosques comunales o municipales.

Los centro poblados de la Cabecera Municipal de San Antonio Sacatepéquez, las aldeas: Santa Rita, San Isidro Ixcolochil, Candelaria Siquival, Caseríos: Siete Tambores, Vista Hermosa, Cantones: San Ramón, Las Escobas, Tojchiná, y en el caso de las Aldeas de San Miguel de los Altos y San Rafael Sacatepéquez, se encuentran ubicadas en el parte aguas de la Cuenca Coatan que vierten sus aguas hacia el Golfo de México y tienen bosques que se hayan dentro de la Microcuenca Alto Naranjo.

**Cuadro 1** Comunidades que integran la Microcuenca Alto Naranjo.

Municipio	No.	Comunidad
San Antonio Sacatepéquez	1	Candelaria Siquival
	2	Las Escobas
	3	San Antonio Sacatepéquez
	4	San Isidro Ixcolochil
	5	San Ramón
	6	Santa Rita
	7	Siete Tambores
	8	Tojchina
	9	Vista Hermosa
San Marcos	10	San Marcos
	11	San Rafael Soche
San Pedro Sacatepéquez	12	Champollap
	13	Cruz Verde
	14	Entre Ríos
	15	Ixca
	16	La Grandeza
	17	La Laguna

18	La Libertad
19	Las Guayabas
20	Llano Grande
21	Los Jazmines
22	Los Molinos
23	Nueva Reforma
24	Ojo de Agua
25	Oratorio
26	Piedra Grande
27	San Andrés Chupil
28	San Francisco Soche
29	San Isidro Chamac
30	San José Caben
31	San Juan del Pozo
32	San Pedro Sacatepéquez
33	Yerba Buena

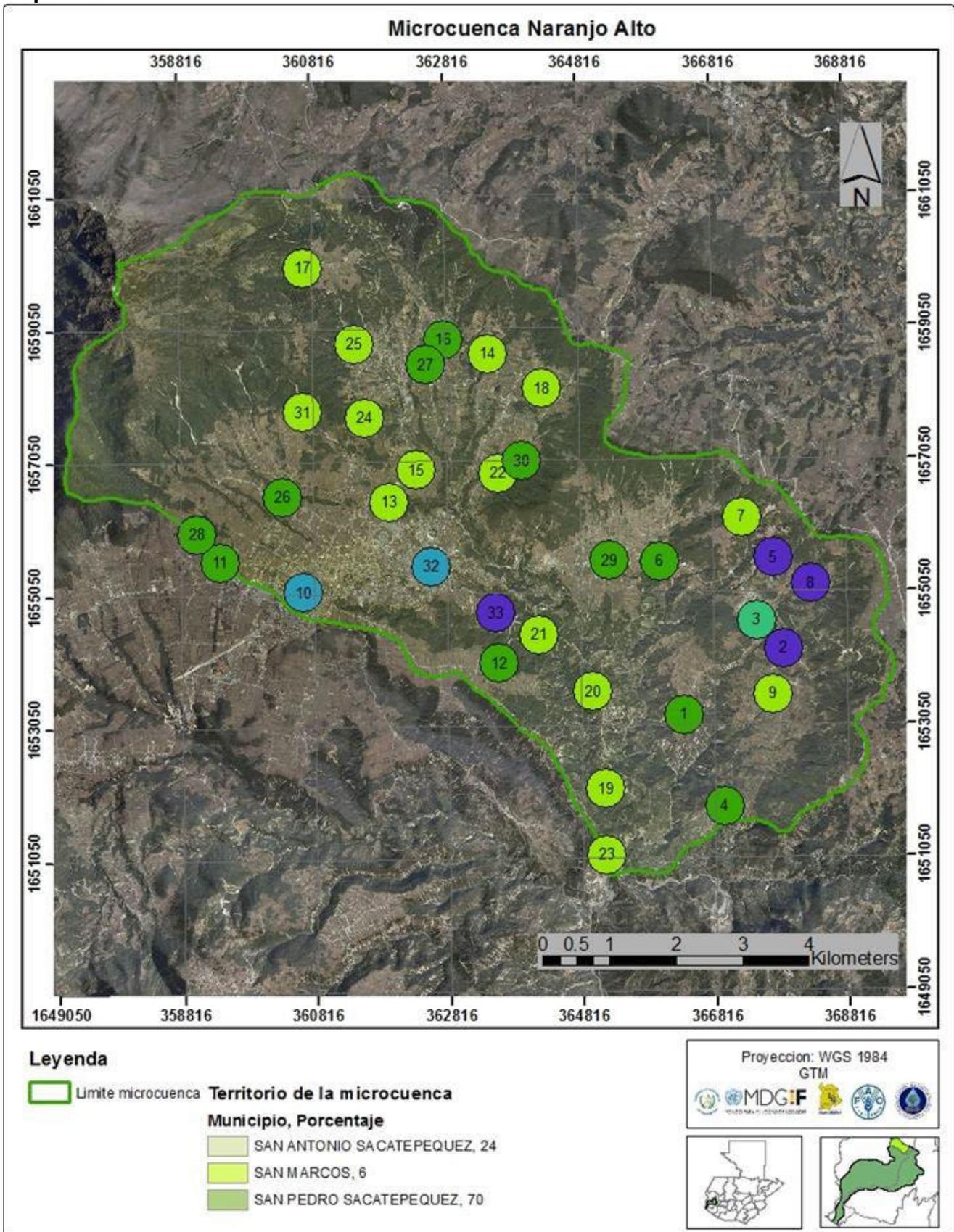
Fuente: Caracterización Microcuenca Alto Naranjo

**Mapa 3** Modelo tridimensional de la ubicación de las comunidades en la Microcuenca.



Fuente: Caracterización Microcuenca Alto Naranjo.

**Mapa 4** Ubicación de las comunidades dentro de la Microcuenca.



Fuente: Caracterización Microcuenca Alto Naranjo.

#### **6.2.4 VIAS DE ACCESO**

La principal vía de acceso es la carretera CA-1, que se conoce también como Ruta Interamericana, que comunica con la ciudad capital de Guatemala, Quetzaltenango; M-13 que conduce a la zona costera y frontera con México; ruta 12-S conecta cabecera departamental de San Marcos hacia la parte baja de la Cuenca del Río Naranjo y que atraviesa municipios como San Cristóbal Cucho, El Quetzal y La Reforma; 12-N que comunica con el altiplano marquense.

En el plano local las comunidades que están ubicadas dentro de la microcuenca Alto Naranjo recorren de 1 a 6 kilómetros de distancia a las cabeceras municipales, la mayor parte de comunidades se concentran alrededor de la ruta interamericana o carretera de la zona cálida y el altiplano, a excepción de algunos centros poblados de San Antonio y San Pedro que se localizan en la parte suroriente de la microcuenca que tienen más dificultades de acceso por vehículos.

#### **6.2.5 CLIMA**

La temperatura máxima promedio oscila entre el rango de los 20°C y la temperatura mínima promedio está dentro de los 5°C.

#### **6.2.6 REGIMEN DE LLUVIAS**

Se cuenta con una precipitación que va de los 1200 a 1800 mm anuales. Las lluvias se distribuyen de Mayo a Octubre

#### **6.2.7 ZONA DE VIDA DE HOLDRIDGE**

Las zonas de vida de la Microcuenca de bosque Húmedo Montano Bajo Subtropical que representa el 77% en las zonas baja y media, y Bosque muy Húmedo Montano Subtropical que representa el 33%.

## **7 OBJETIVOS**

### **7.1 GENERAL**

- Determinar el potencial de recarga hídrica de los acuíferos en la microcuenca Alto Naranjo, mediante un balance hídrico de suelos.

### **7.2 ESPECÍFICOS**

- Aplicar la metodología propuesta por Gunther Schosinsky para cuantificar la recarga hídrica potencial de los acuíferos de la microcuenca Alto Naranjo.
  
- Analizar las principales características de las zonas de recarga hídrica, haciendo énfasis en las variables: pendiente, geología, tipo de suelo, cobertura vegetal y velocidad de infiltración del suelo.

## **8 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **8.1 RECURSOS**

#### **8.1.1 FÍSICOS**

- Equipo de oficina
- Sistema de geo posicionamiento
- Vehículo
- Cámara fotográfica
- Doble cilindro Porchet
- Cronometro
- Computadora
- Impresora

#### **8.1.2 HUMANOS**

- Asesores de investigación
- Tesista de la carrera de Ingeniero Agrónomo con O.E.A.S.
- MUNICIPALIDADES, COCODE y Alcaldía auxiliar de las diferentes comunidades.

#### **8.1.3 INSTITUCIONALES**

- Centro Universitario de San Marcos –CUSAM-

#### **8.1.4 FINANCIEROS**

- Tesista de la carrera de Ingeniero Agrónomo con O.E.A.S.

## **8.2 METODOLOGÍA**

Se utilizó el método propuesto por Gunther Schosinsky, considerado el más apto para determinar áreas de recarga hídrica, pues además de ser el más reciente y actualizado (2006), considera más variables biofísicas cuantitativas, algunas de las cuales deben obtenerse mediante trabajo de campo y análisis de laboratorio. Además tiene la ventaja de considerar diferentes variables que influyen en la recarga de los acuíferos, tales como: i) Precipitación mensual; ii) Retención pluvial; iii) Capacidad de infiltración de los suelos y sus características; iv) Cobertura vegetal; v) Evapotranspiración real; vi) Uso del suelo y vii) Pendiente del terreno. Este método posee un error de recarga menor del ochenta por ciento, en los casos que se ha podido comprobar, en forma confiable, los valores de dicha recarga.

Se debe mencionar que en el departamento de San Marcos, fue la primera vez que se aplica este método, por lo tanto, está disponible para ser comparada, validada o refutada por otras investigaciones que en este tema se lleven a cabo en la región.

Para aplicar la metodología de Gunther Schosinsky en esta investigación se propone la siguiente secuencia:

### **8.2.1 DELIMITAR EL ÁREA DE ESTUDIO**

La microcuenca Alto Naranjo fue tomada como base según la delimitación desarrollada en el año 2006 por la Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgos UPGGR del MAGA, en este método se clasifican las cuencas por nivel, clasificándolas como cuenca, intercuenca y cuenca interna.

### **8.2.2 FRACCIÓN DE LLUVIAS INTERCEPTADA POR FOLLAJE**

Se define como coeficiente de follaje (Cfo) al porcentaje de la lluvia mensual que es retenida en el follaje, expresado en tanto por uno. Para el 12% de retención  $Cfo = 0,12$ . Para el 20% de retención  $Cfo = 0,20$ .

Cuadro 2 Fracción de lluvia interceptada por el follaje

Tipo de cobertura vegetal del suelo	Retención de lluvia en el follaje (%)	Retención de lluvia en el follaje (100% =1%)
General (cualquiera que no sea bosque denso)	12	0,12
Bosque denso	20	0,20

Fuente: Schosinsky (2006)

Habrá que considerar que; Si el producto si  $(P)(Cfo)$  es mayor o igual a 5 mm/mes

$$Ret = (P)(Cfo) \quad (1)$$

Dónde:

Ret = Retención de lluvia en el follaje [mm/mes].

P = Precipitación mensual del mes [mm/mes].

Cfo = Coeficiente de retención del follaje [adimensional].

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

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

### 8.2.3 DETERMINACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN MENSUAL

Se determinó primeramente la distribución de las precipitaciones en el área de estudio, debido a que este dato, también es utilizado para el cálculo del coeficiente de infiltración, descrito en el siguiente paso. Para determinar la distribución de las precipitaciones se consideraron los registros de información pluviométrica de la estación meteorológica de la Escuela de Formación Agrícola EFA, siendo esta la más cercana al área de estudios.

Se consideraron los datos con tres años de anterioridad para obtener una media aproximada a la realidad. La precipitación promedio mensual se calculó mediante la ecuación de la media aritmética, que se presenta a continuación (Gomez, 2003).

$$P = (Pm_1 + Pm_2 + \dots)/n \quad (2)$$

Dónde:

$P$  = Precipitación promedio mensual.

$P_1 + P_2 \dots$  = Precipitación promedio mensual.

$n$  = Número de meses.

#### 8.2.4 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN DEBIDO A LA TEXTURA

Uno de los factores que más influyen en la infiltración de la lluvia en el suelo, es el coeficiente debido a la textura del suelo ( $K_{fc}$ ), que está dado tentativamente por la siguiente ecuación (Schosinsky G. , 2006):

$$K_{fc} = 0,267 \ln(fc) - 0,000154fc - 0,723 \quad (3)$$

Dónde:

$K_{fc}$  [adimensional] = Coeficiente de infiltración (fracción que infiltra por textura del suelo).

$fc$  = [mm/día] = Infiltración básica del suelo.

Para aplicar esta ecuación, el rango de  $fc$  ha de encontrarse entre 16 a 1568 mm/día. Para valores de  $fc$  menores a 16 mm/día,  $K_{fc} = 0,0148fc/16$ . Para valores de  $fc$  mayor a 1568 mm/día,  $K_{fc} = 1$ .

El valor de  $fc$  corresponde a la permeabilidad del suelo saturado, en los primeros 30 centímetros de profundidad, por considerar que este espesor que está en contacto directo con el agua de lluvia. Dicho valor se obtuvo en campo con la prueba de doble anillo, la cual fue aplicada en la superficie del suelo. Los puntos fueron obtenidos mediante la transposición de los mapas digitales de geología, cobertura vegetal y pendiente del terreno en el software QGIS. En estos puntos se colectaron muestras de suelos, las cuales fueron enviadas al laboratorio para realizar los análisis de densidad aparente, punto de marchitez permanente y capacidad de campo.

#### 8.2.5 DETERMINACIÓN DE RANGOS DE PENDIENTE

Mediante el uso de QGIS, se elaboró un mapa de elevación digital del área de estudio, para obtener un mapa digital de pendientes en porcentaje. Este mapa permitió agrupar áreas con pendientes iguales (isopendientes).

Según el porcentaje de pendiente predominante en las áreas agrupadas, se les asignaron los coeficientes de pendiente ( $k_p$ ) (Schosinsky G. , 2006).

Cuadro 3 Coeficientes de pendientes

Terreno	Pendiente (%)	Coeficiente (Kp)
Muy Regular	0 – 0.20	0,3
Regular	0.21-1	0,2
Algo regular	1.1 – 2	0.1
Poco regular	2.1 - 7	0,1
Muy irregular	Mayor a 7	0,06

Fuente: Schosinsky (2006).

### 8.2.6 DETERMINACIÓN DEL TIPO DE COBERTURA VEGETAL

Mediante el uso del software QGIS y ortofotos del área de estudio, GIMBOT 2010, se creó un mapa digital que muestra el tipo de cobertura vegetal del suelo. Para cada tipo de cobertura vegetal del suelo, Schosinsky (2006) sugiere los coeficientes que se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 4 Coeficientes sugeridos para los diferentes tipos de cobertura vegetal del suelo

Cobertura vegetal	Coeficiente (Kv)
Cobertura con zacate en una proporción menor a 50%	0,09
Terrenos cultivados	0,1
Cobertura con pastizal	0,18
Bosques	0,2
Cobertura con zacate en una proporción mayor a 75%	0,21

Fuente: Schosinsky (2006).

Del cuadro anterior se debe entender que la cobertura con zacate en una proporción a 50% es aquella área que presenta al menos un 50% de zacate, mientras el restante 50% puede estar cubierto de cultivos, rocas, árboles u otros. Esta misma descripción aplica para la cobertura con zacate en un 75%, donde un 75% lo debe constituir el zacate. La cobertura de terrenos cultivados se refiere a cultivos mensuales, anuales y perennes y el pastizal representa toda aquella área dedicada a la actividad agropecuaria (ganado de leche y carne) con muy baja o nula presencia de árboles. A su vez la cobertura boscosa debe representar parches considerables de bosque primario o secundario.

### 8.2.7 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN

El valor de  $K_{fc}$ , fue derivado para los valores de lluvia mensual, por lo tanto, la fracción que infiltra debido a la textura del suelo nos permitió obtener la infiltración mensual debido a este concepto. Además del coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo, influye la pendiente del terreno y la vegetación. Estos coeficientes, vienen a conformar el coeficiente de infiltración del suelo ( $C_i$ ), basado en la siguiente ecuación

Ecuación para el cálculo del coeficiente de infiltración del suelo.

$$C_i = K_p + K_v + K_{fc} \quad (4)$$

Dónde:

$C_i$  = Coeficiente de infiltración [adimensional].

$K_p$  = Fracción que infiltra por efecto de pendiente [adimensional].

$K_v$  = Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal [adimensional].

$K_{fc}$  = Fracción que infiltra por textura del suelo [adimensional] (ecuación 3).

Si  $K_p + K_v + K_{fc}$  es mayor de 1,  $C_i=1$ .

El coeficiente de infiltración es el factor por el cual hay que multiplicar la **precipitación mensual** para obtener el agua que se infiltra mensualmente hacia el suelo. En una zona dada, entre menor sea la pendiente del terreno y mayor sea su cobertura vegetal, la velocidad de escurrimiento se retrasa, generando una mayor infiltración.

### 8.2.8 CÁLCULO DE INFILTRACIÓN PLUVIAL MENSUAL

Para poder desarrollar este cálculo se deben considerar los siguientes factores: la precipitación mensual, la retención pluvial mensual en el follaje (ecuación 1) y el coeficiente de infiltración (ecuación 4).

El cálculo de la precipitación que infiltra mensualmente ( $P_i$ ) al suelo, esta dado por la siguiente ecuación:

$$P_i = (C_i)(P - Ret) \quad (5)$$

Dónde:

$P_i$  = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en [mm/mes].

$C_i$  = Coeficiente de infiltración [Adimensional] (ecuación 4).

$P$  = Precipitación mensual en [mm/mes] (dato metereológico).

$Ret$  = Retención de lluvia mensual por follaje en [mm/mes] (ecuación 1).

### 8.2.9 ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

La escorrentía superficial generada por la lluvia mensual, corresponde a la precipitación mensual menos la retención de lluvia en el follaje menos la infiltración. La escorrentía mensual se calcula con la siguiente ecuación.

$$ESC = P - Ret - P_i \quad (6)$$

Dónde:

$ESC$  = Escorrentía superficial en mm/mes.

$P$  = Precipitación en mm/mes (dato meteorológico).

$Ret$  = Retención de lluvia mensual por follaje en mm/mes (ecuación 1).

$P_i$  = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en mm/mes (ecuación 5).

### 8.2.10 EVAPOTRANSPIRACIÓN

En una cuenca o en una zona arbitraria de la cuenca, es casi imposible determinar la evapotranspiración de la vegetación, debido a la gran variedad de vegetación y grado de desarrollo de las plantas existentes en una cuenca o en una zona de la misma. Por este motivo, es conveniente asumir una evapotranspiración, que se estime como promedio de la cuenca. Esta evapotranspiración promedio de la cuenca, la asumiremos que es igual a la evapotranspiración potencial (ETP).

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial, existen una serie de ecuaciones, algunas de ellas requieren una serie de datos, que pocas estaciones meteorológicas los tienen. Por este motivo, se utilizó la ecuación de Blaney & Criddle:

$$ETP (mm/mes) = (8,10 + 0,46T) P_s \quad (7)$$

Dónde:

$ETP$  = Evapotranspiración potencial en [mm/mes].

T = Temperatura media mensual en [grados centígrados] (dato meteorológico).

Ps = Porcentaje de horas de luz solar mensual, con respecto al año [%].

### 8.2.11 COEFICIENTE DE HUMEDAD

Cuando ocurre la precipitación, el agua que infiltra se acumula en los poros del suelo, para llevarlo a capacidad de campo, que es la máxima acumulación de agua que puede tener un suelo no saturado. Posteriormente, una vez terminado el aguacero, se lleva a cabo la evapotranspiración, tomando las raíces el agua que se encuentra en los poros del suelo. Si la cantidad de infiltración de la lluvia es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y llenar la necesidad de evapotranspiración, el sobrante del agua que infiltra, percola para recargar al acuífero. A este coeficiente se designa como coeficiente de humedad (Ch):

$$Ch = (HS - PM) / (CC - PM) \quad (8)$$

Dónde:

HS [%] = Humedad del suelo.

PM [%] = Punto de marchitez permanente.

CC [%] = Capacidad de Campo.

Al iniciar un mes cualquiera, el suelo tendrá una humedad inicial (HSi). Si no existiese evapotranspiración, la precipitación que infiltra (Pi) vendría a aumentar la humedad en el suelo, permitiendo una mayor evapotranspiración. Si no consideramos la evapotranspiración, el coeficiente de humedad, al final del mes, sería (C1):

$$C1 = (HSi - PM + Pi) / (CC - PM) \quad (9)$$

Dónde:

C1 = Coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración.

Hsi = Humedad al inicio del mes, humedad de suelo inicial en [mm].

PM = Punto de marchitez en [mm].

Pi = Precipitación que infiltra en [mm/mes].

CC = Capacidad de campo en [mm].

Si consideramos que ocurre la evapotranspiración, una vez ocurrida la infiltración, el coeficiente de humedad, al final del mes sería:

$$C2 = (HSi - PM + Pi - ETR1) / (CC - PM) \quad (10)$$
$$ETR1 = (C1) (ETP)$$

Dónde:

C2 = Coeficiente de humedad al final del mes, después de que ocurra la evapotranspiración.

ETR1 = Evapotranspiración potencial real [mm/mes], considera la humedad correspondiente al coeficiente C1.

ETP = Evapotranspiración potencial [mm/mes].

El valor de C1 corresponde al coeficiente de humedad máximo, ya que considera la humedad del suelo al inicio del mes, más la infiltración de la lluvia, sin ocurrir la evapotranspiración. El valor de C2, corresponde al coeficiente de humedad mínimo, ya que está calculado considerando la humedad del suelo anterior, restándole la evapotranspiración mensual, estimada con el coeficiente de humedad máximo, C1. Por lo tanto, el coeficiente C2 se aproxima al coeficiente de humedad al final del mes.

Como la infiltración y la evapotranspiración ocurre durante el mes, se estima que el coeficiente de humedad del mes corresponde al promedio de C1 y C2; o sea,  $(C1+C2)/2$ .

### **8.2.12 CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL REAL.**

La evapotranspiración en una zona de cultivo se define como la transpiración de la planta, cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo, más la evaporación del suelo. La mayor capacidad de evapotranspiración de un cultivo es cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo. Sin embargo, cuando la humedad del suelo es menor que la capacidad de campo, las hojas de las plantas van cerrando los estomas, con el propósito de transpirar menos y así economizar el agua. Cuando la humedad del suelo llega al punto de marchitez permanente, la planta no transpira y muere (Heras, 1972). En este estudio, asumimos que la evapotranspiración potencial real va a ser proporcional a la humedad del suelo, comparada con la diferencia de humedad entre la capacidad de campo y el punto de marchitez.

La evapotranspiración potencial real ocurrida en un mes, está dada por:

$$ETPR (mm/mes) = ((C1 + C2)/2) ETP \quad (11)$$

Dónde:

ETPR= Evapotranspiración real tentativa promedio, en una zona, ocurrida durante el mes [mm/mes].

C1 = Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración.

C2 = Coeficiente de humedad mínimo considerando evapotranspiración calculada con C1.

ETP = Evapotranspiración potencial [mm/mes].

Ninguno de los coeficientes de humedad, C1 y C2, pueden ser superiores a 1, ni menores a 0. En caso que C1 o C2, sea mayor de 1, se tomará igual a 1. Si C1 o C2 son negativos se tomarán con valor de 0.

### 8.2.13 CÁLCULO DE LA HUMEDAD DISPONIBLE

Definimos como humedad disponible (HD), aquella humedad que pueden tomar las raíces de las plantas, para poder evapotranspirar. La humedad disponible está dada por la siguiente ecuación:

$$HD (mm/mes) = HSi + Pi - PM \quad (12)$$

Dónde:

HD = Humedad disponible [mm/mes].

Hsi = Humedad de suelo inicial (al inicio del mes) [mm].

Pi = Precipitación que infiltra [mm/mes].

PM = Punto de marchitez [mm].

### 8.2.14 CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL PROMEDIO

Si la humedad disponible es menor que la ETPR de la ecuación (11), la planta no podrá evapotranspirar dicha cantidad, sino que evapotranspirará únicamente la humedad disponible, debido a que no hay suficiente humedad para evapotranspirar la cantidad de agua indicada en la ecuación (11). Sin embargo, si la humedad disponible (HD) es mayor que la cantidad de

agua indicada en la ecuación (11), la planta evapotranspirará la cantidad expresada en dicha ecuación. Por lo tanto la evapotranspiración real será:

Ecuación para el cálculo de evapotranspiración real (ETR) (13)

Si  $((C1+C2)/2)$  ETP es menor o igual a HD,

$ETR \text{ (mm/mes)} = ((C1+C2)/2) \text{ ETP}$ .

Si  $((C1+C2)/2)$  ETP es mayor que HD,

$ETR \text{ (mm/mes)} = HD$

Dónde:

ETR = Evapotranspiración real promedio de la zona, ocurrida durante el mes [mm/mes].

C1 = Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración [adimensional].

C2 = Coeficiente de humedad mínimo considerando evapotranspiración calculada con C1, [adimensional].

ETP = Evapotranspiración potencial [mm/mes].

HD = Humedad disponible [mm/mes].

### 8.2.15 CÁLCULO DE LA HUMEDAD DEL SUELO AL FINAL DEL MES

Para poder realizar el cálculo de la recarga del acuífero, se requiere conocer la humedad del suelo al final del mes, humedad del suelo final (HSf), la cual no puede ser mayor que la capacidad de campo y se obtiene con la siguiente ecuación:

Ecuación para el cálculo de HSf (14)

Si  $(HD + PM - ETR)$  es menor que la capacidad de campo,  $HSf = HD + PM - ETR$ .

Si  $(HD + PM - ETR)$  es mayor o igual que la capacidad de campo,  $HSf = CC$  La HSf en ningún momento puede ser mayor a la CC.

Dónde:

HSf = Humedad del suelo final (final de mes) [mm].

HD = Humedad disponible [mm/mes].

PM = Punto de marchitez [mm].

ETR= Evapotranspiración real [mm/mes].

CC = Capacidad de campo [mm].

### 8.2.16 CÁLCULO DE LA HUMEDAD DEL SUELO AL INICIO DEL MES

Además del cálculo de la ecuación para la humedad del suelo al final del mes, es necesaria la humedad de suelo al inicio del mes, o sea, humedad inicial (HSi). La humedad inicial de un mes dado es la siguiente:

HSi = Es igual a la humedad de suelo final del mes anterior  
(HSf de ecuación 14) (15)

HSi = Humedad del suelo inicial (inicio de mes) [mm].

HSf = Humedad del suelo final (final de mes) [mm].

### 8.2.17 CÁLCULO DE LA RECARGA POTENCIAL AL ACUÍFERO

La recarga al acuífero se lleva a cabo, si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante, una vez satisfecha la capacidad de campo y la evapotranspiración, es la que recarga al acuífero, la que se calcula con la siguiente ecuación.

$$R_p = P_i + H_{Si} - H_{Sf} - ETR \quad (16)$$

Dónde:

R<sub>p</sub> = Recarga potencial mensual en mm/mes.

P<sub>i</sub> = Precipitación que infiltra en mm/mes.

H<sub>Sf</sub> = Humedad del suelo al final del mes en mm.

ETR = Evapotranspiración real en mm/mes.

### 8.2.18 DETERMINACIÓN DE LAS ÁREAS DE RECARGA HÍDRICA

Mediante el uso de SIG, se creó un mapa digital con las Áreas de Recarga Hídrica (ARH), que comparten las mismas variables de geología, pendiente y cobertura vegetal. En cada una de

las ARH, se realizó un balance hídrico de suelos con la finalidad de estimar la cantidad de agua que drena del suelo hacia un posible acuífero que se encuentre ubicado debajo de este.

### **8.2.19 DETERMINAR EL VOLUMEN DE RECARGA EN CADA ÁREA DE RECARGA HÍDRICA**

Este paso se determinó mediante la siguiente ecuación (Schosinsky G. , 2006).

$$V = (Rp)(A) \quad (17)$$

Donde:

V= Volumen de recarga en m<sup>3</sup>/año.

Rp = Recarga potencial al acuífero en m/año.

A = Área donde se genera la recarga potencial en m<sup>2</sup>.

### **8.2.20 CATEGORIZACIÓN DE LAS ÁREAS DE RECARGA HÍDRICA**

Según los resultados de Recarga Potencial (Rp) obtenidos en el balance hidrico de suelos, las ARH fueron agrupadas y categorizadas. Mediante el uso de QGIS, se creó un mapa digital con las ARH identificadas.

## 9 PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 9.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES BIOFÍSICAS PARA IDENTIFICAR LAS ÁREAS DE RECARGA HÍDRICA (ARH)

#### 9.1.1 DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN, TEMPERATURA Y EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP).

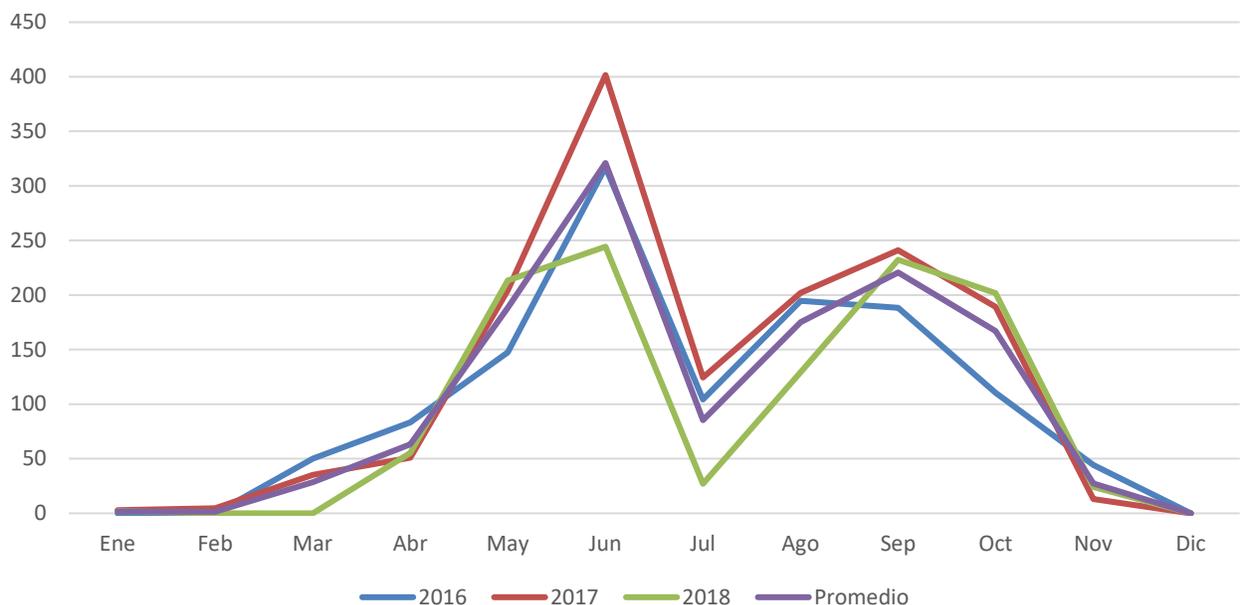
Para determinar la distribución de la Precipitación, Temperatura y Evapotranspiración Potencial (ETP), se consideró únicamente la información de la estación meteorológica de la Escuela de Formación Agrícola EFA, debido a que es la única estación que se encuentra más próxima al área de estudio. La información promedio mensual y anual de estas variables se presenta en los cuadros 5, 6 y 7 respectivamente. Registros que corresponden a tres años con anterioridad.

Cuadro 5 Promedio de precipitación mensual

Año	Promedio de precipitación mensual (mm)												Promedio anual (mm)
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
2016	0.0	0.0	50.0	83.4	147.4	317.1	104.4	194.7	188.2	110.5	44.2	0.0	1239.9
2017	2.8	4.6	35.2	51.0	204.2	401.6	124.5	201.9	241.1	189.1	13.2	0.0	1469.2
2018	2.0	0.0	0.0	55.5	213.5	244.3	27.1	129.3	232.4	201.8	24.3	0.0	1130.2
<b>Promedio</b>	1.6	1.53	28.4	63.3	188.37	321	85.33	175.3	220.57	167.13	27.23	0.0	1279.77

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología Meteorología e Hidrología. INSIVUMEH

Ilustración 1 Promedio de precipitación mensual (mm)

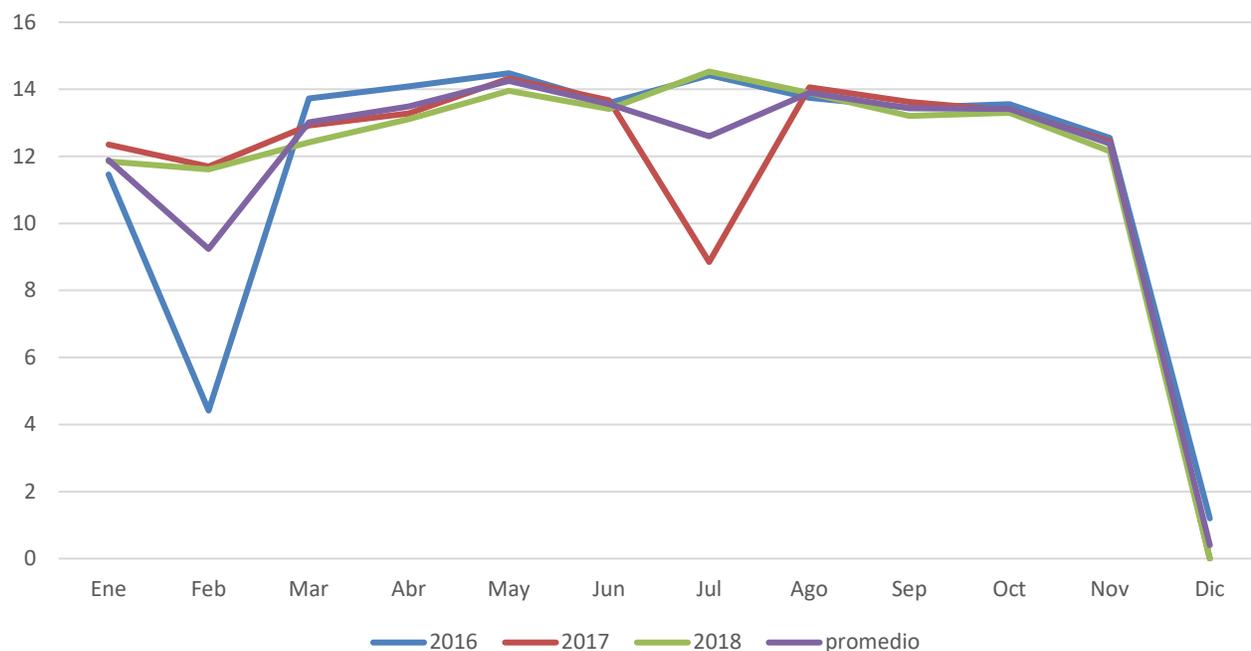


Cuadro 6 Promedio de temperatura mensual en °C

Año	Promedio de Temperatura mensual (°C)												Promedio anual (°C)
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
2016	11.46	4.42	13.73	14.09	14.48	13.59	14.42	13.75	13.45	13.56	12.55	1.20	11.73
2017	12.35	11.70	12.92	13.28	14.32	13.67	8.85	14.06	13.62	13.37	12.45	0	11.72
2018	11.85	11.61	12.42	13.11	13.96	13.41	14.53	13.89	13.21	13.30	12.15	0	13.42
promedio	11.89	9.24	13.02	13.49	14.25	13.56	12.6	13.93	13.43	13.41	12.38	0.4	12.29

Fuente: Instituto Nacional de sismología, vulcanología Meteorología e hidrología. INSIVUMEH

Ilustración 2 Promedio de temperatura mensual (°C)

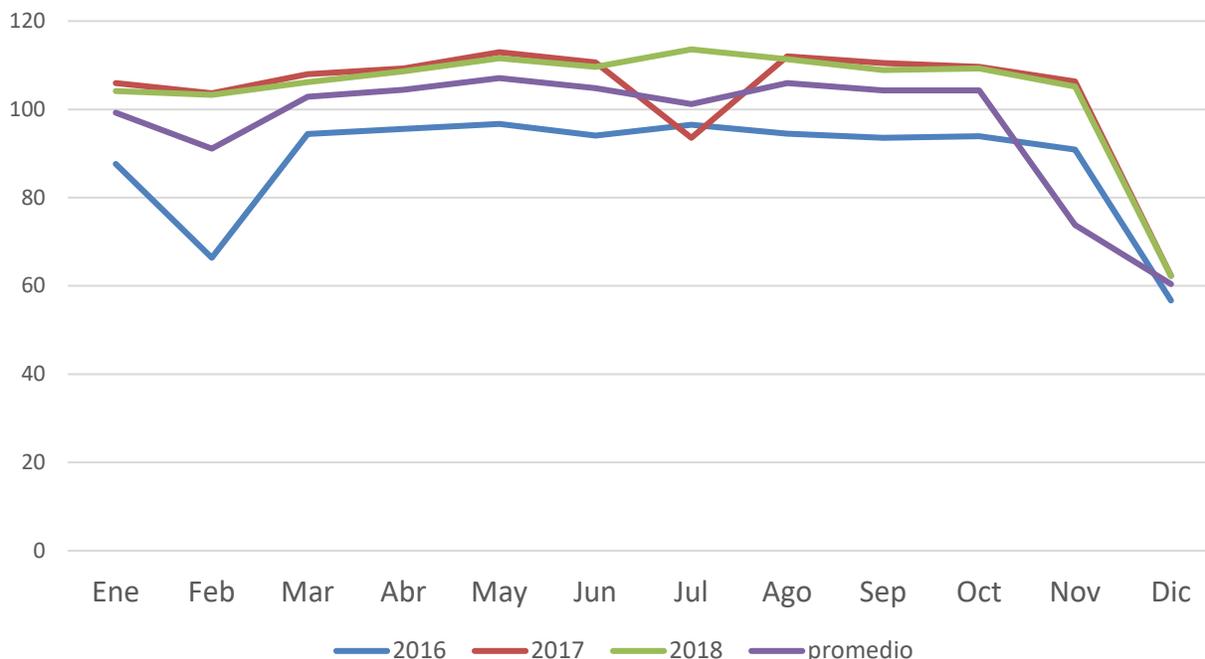


Cuadro 7 Promedio ETP mensual

Año	Promedio ETP mensual												Promedio ETP anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
2016	87.62	66.40	94.40	95.54	96.70	94.04	96.52	94.50	93.59	93.94	90.88	56.69	88.40
2017	105.96	103.68	107.99	109.28	112.95	110.66	93.59	112.03	110.48	109.60	106.33	62.29	103.74
2018	104.14	103.27	106.14	108.59	111.60	109.64	113.59	111.35	108.92	109.26	105.17	62.24	104.49
promedio	99.24	91.12	102.84	104.47	107.08	104.78	101.23	105.96	104.33	104.27	73.79	60.41	98.88

Fuente: Instituto Nacional de sismología, vulcanología Meteorología e hidrología. INSIVUMEH

Ilustración 3 Promedio ETP mensual



El Cuadro No. 5 muestra que los meses comprendidos entre mayo y octubre son los meses en los que la precipitación pluvial presenta promedios más elevados, con valores que van desde los 167.13 a los 321 mm promedio mensual, por lo tanto en estos meses ocurre una mayor infiltración, la cual aporta a las aguas subterráneas, así mismo en el mes de diciembre se muestran valores de 0, esto debido a que no se cuenta con información pluviométrica por parte de la estación meteorológica, en algunos casos, extendiéndose este fenómeno hasta los primeros días del mes de enero, existiendo algunos datos de precipitación pluvial, pero por la época, estos valores son mínimos. De igual forma en este mismo cuadro se manifiesta que en los meses de febrero, marzo, abril y noviembre, se presentan precipitaciones con promedios menores. Observando los promedios anuales, se evidencia un incremento de la precipitación pluvial en el año 2017, esto derivado a que en el mes de junio se contabilizó el paso o acercamiento de 6 ondas del este, de estas 2 favorecieron la formación de tormentas tropicales Calvin y Cindy, se continuaron presentando temperaturas altas, favoreciendo la presencia de lluvias convectivas incluso con caída de granizo. En el mes de agosto se formaron 2 sistemas ciclónicos en el océano atlántico: tormenta Franklin y la tormenta Harvey, ambas no afectaron directamente a Guatemala, pero indirectamente favorecieron a que se presentaran lluvias y actividad eléctrica en el país, mientras que en el mes de septiembre se contabilizó el paso de 5 ondas del este, las cuales en mayor o menor medida influyeron en el incremento gradual de la inestabilidad principalmente hacia la segunda quincena. Dichas ondas también favorecieron

a la presencia de bajas presiones cerca del país, principalmente sobre el océano pacífico, donde provocaron a su vez la activación y acercamiento de la zona de convergencia intertropical sobre la región sur influyendo en la persistencia de lluvias copiosas con acumulados que sobrepasaron el registro estadístico. Mientras que los años 2016 y 2018 la fluctuación de sus promedios no varía demasiado.

En cuanto a la temperatura, en el Cuadro No. 6 se presentan valores promedios mensuales que no fluctúan demasiado durante todo el año, teniendo en general un promedio de 12.29°C por los tres años de estudio.

En el Cuadro No. 7 se evidencia cierta estabilidad en los datos, con valores que oscilan entre 73.79 a 107.08 mm siendo congruente con los valores de temperatura promedio mensual que se muestran en el cuadro No. 6.

De la igual manera se evidencia que durante los meses de febrero, marzo y abril, la evapotranspiración es mayor que la precipitación por lo que, en estos meses no ocurre ningún tipo de aporte a las aguas subterráneas. Durante los meses de mayo a octubre la evapotranspiración disminuye y la precipitación pluvial aumenta, por lo que es en estos meses donde se produce una recarga hídrica importante.

En los meses de junio, agosto y septiembre se presentan los valores más altos para la precipitación promedio mensual, siendo estos meses donde existen mayores probabilidades de que el agua infiltre, percole y recargue un posible acuífero en la zona.

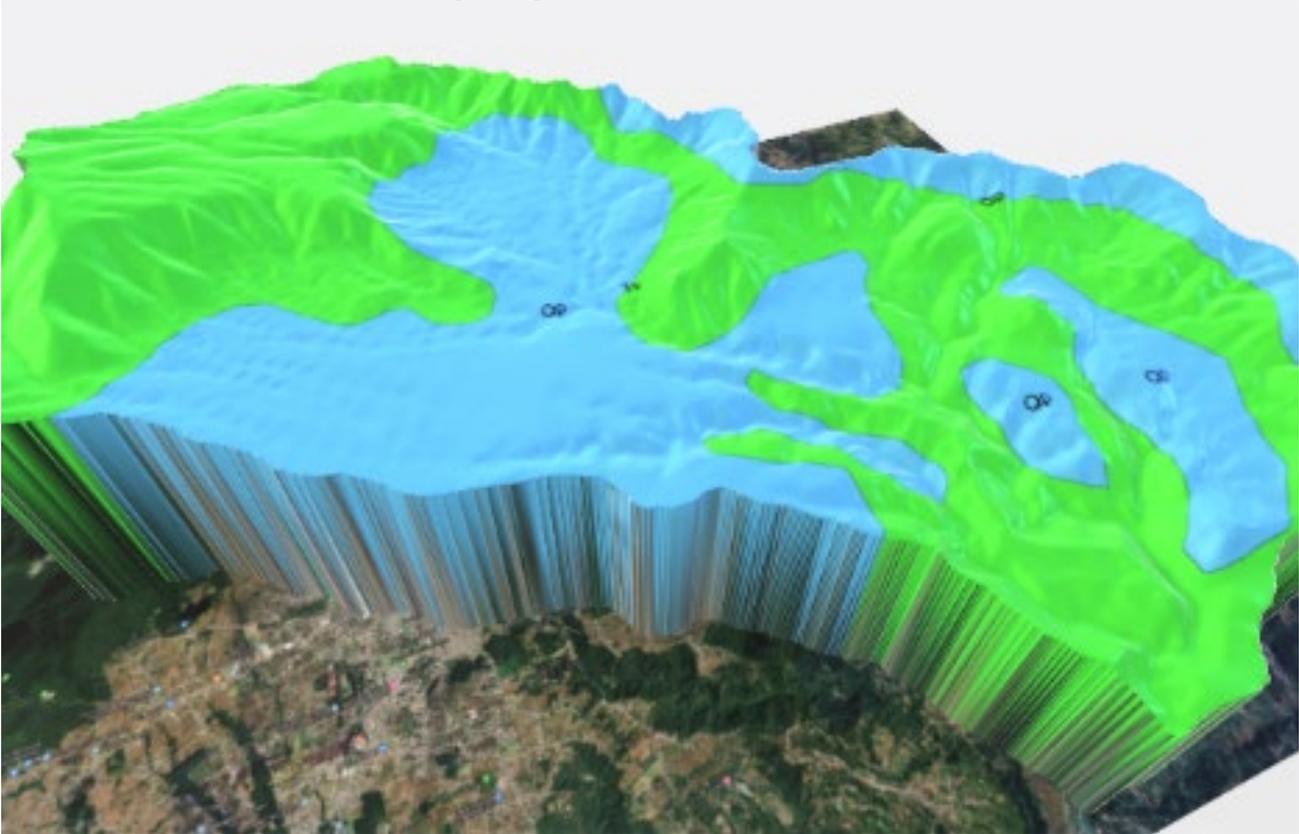
### **9.1.2 DETERMINACIÓN DE LA GEOLOGÍA**

Con la ayuda de mapas digitales del área de estudio se realizó una clasificación de la geología predominante. Identificando dentro del territorio de la microcuenca Alto Naranjo, dos tipos de geología.

Rocas Volcánicas sin Dividir (Tv): Estas rocas (tobas, lahares y otras), pertenecen al Cinturón Volcánico y se pueden encontrar en los departamentos de San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Sololá, Quiché, Chimaltenango, Sacatepéquez, Guatemala, Santa Rosa, Jalapa

y Chiquimula y en una pequeña franja al sur de Huehuetenango. Se formaron durante el periodo Terciario.

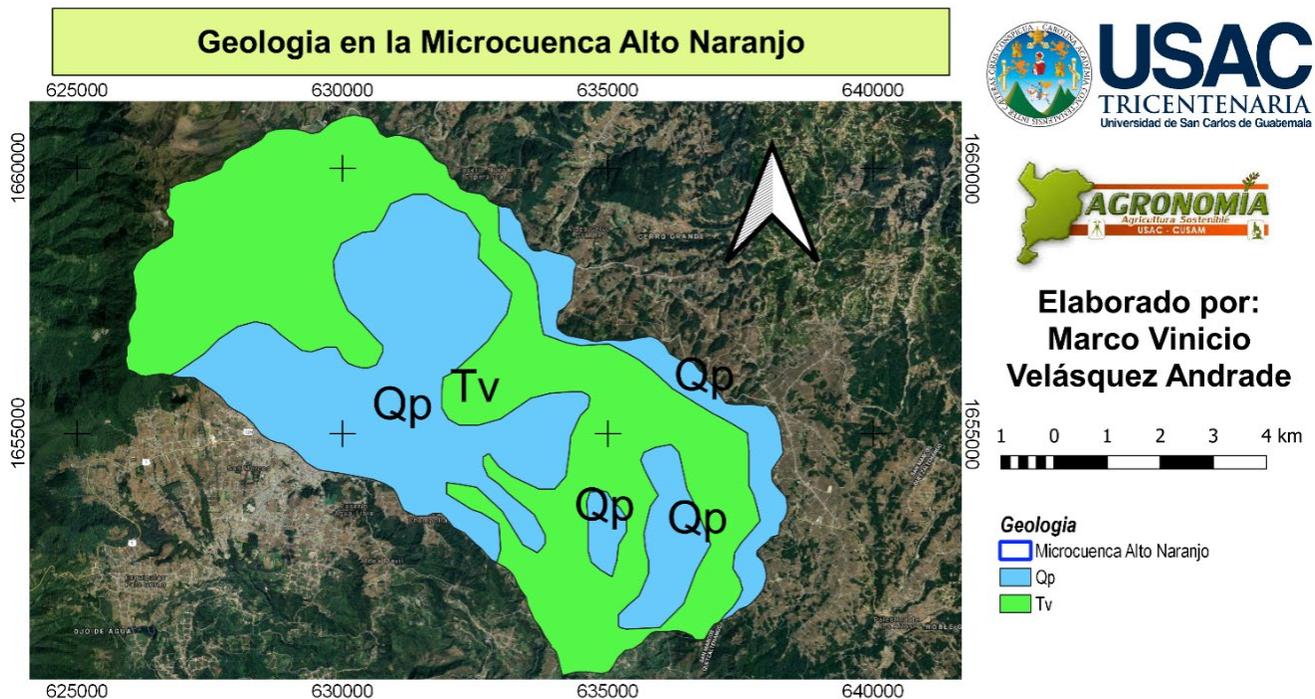
Ilustración 4 Representación 3D geología del área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Cenizas Volcanicas (Qp): Esta clase de cenizas y pómez de origen volcánico se encuentran diseminados principalmente en el Cinturón Volcánico. Estando las cabeceras departamentales de San Marcos, Quetzaltenango, Sololá, Quiché, Huehuetenango, Totonicapán, Chimaltenango, Salamá, Santa Rosa, Jutiapa y Guatemala, asentadas sobre esta clase de rellenos pomáceos. Existiendo además en el norte de Sacatepéquez, en el centro de El Progreso y al sur de Izabal. Son rocas muy recientes del Cuaternario.

Mapa 5 Mapa geológico de la microcuenca Alto Naranjo.



### 9.1.3 DETERMINACIÓN DEL TIPO DE SUELO

En el área de estudio se encontraron cuatro tipos de suelo: Ostuncalco, Quetzaltenango, Totonicapan y Zacualpa. Según el MAGA en su memoria técnica denominada primera aproximación al mapa de clasificación taxonómica de los suelos en la república de Guatemala a escala 1:250,000. Los primeros tres tipos de suelo encontrados en el área de estudios pertenecen al orden *Andisol* (*and*) mientras que el último tipo de suelo pertenece al orden *Entisol* (*ent*).

Los suelos pertenecientes al orden andisol presentan las siguientes características: suelos desarrollados sobre ceniza volcánica que tienen baja densidad aparente (menor de 0.9 g/cc) y con altos contenidos de alófono. Generalmente son suelos con alto potencial de fertilidad y adecuadas características físicas para su manejo. En condiciones de fuerte pendiente tienden a erosionarse con facilidad. Una característica de los andisoles es su alta retención de fosfatos (arriba del 85%), la cual es una limitante para el manejo, por lo que se debe considerar en los planes de fertilidad cuando se someten a actividades de producción agrícola.

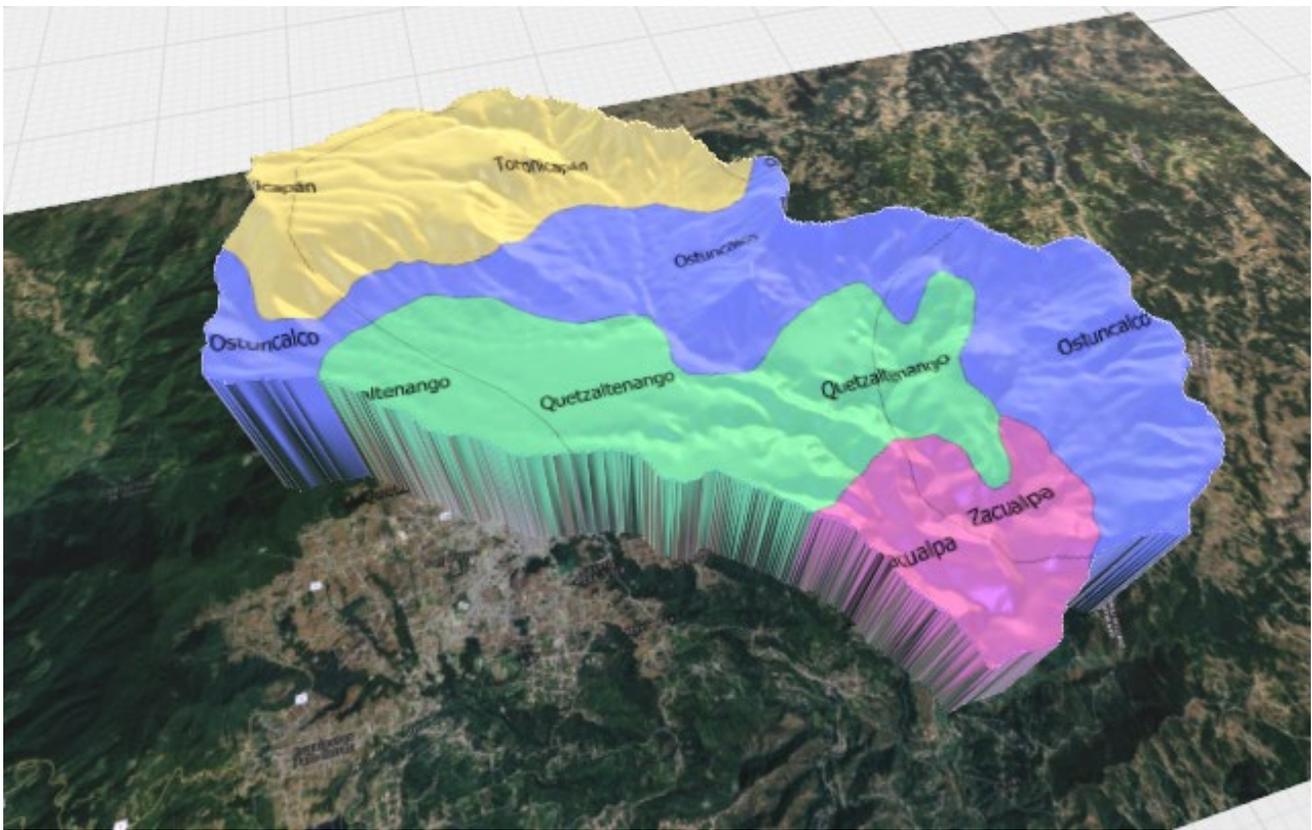


Ilustración 5 Representación 3D tipo de suelo en el área de estudio  
Fuente: Elaboración propia

Los suelos pertenecientes al orden entisol presentan las siguientes características: Suelos con poca o ninguna evidencia de desarrollo de su perfil y, por consiguiente, de los horizontes genéticos. El poco desarrollo es debido a condiciones extremas, tales como, el relieve (el cual incide en la erosión o, en su defecto, en la deposición superficial de materiales minerales y orgánicos) y, por otro lado, las condiciones como el exceso de agua. De acuerdo al relieve, estos suelos están presentes en áreas muy accidentadas (Cimas de montañas y volcanes) o en partes planas.

El tipo de suelo Ostuncalco pertenece al orden andisol y al suborden 1 udands y suborden 2 vitrans *Dd-Dv* cuyas características del suborden 1 son andisoles que no están secos en su interior, por más de 90 días en el año. Tienen un adecuado contenido de humedad la mayor parte del año. Suelos con alto potencial para la agricultura, pero deben considerarse las limitantes que presentan en términos generales los andisoles y en este caso debe agregarse el riesgo de erosión hídrica, como consecuencia de la alta pluviosidad en los lugares dónde están presentes estos suelos. Y las características del suborden 2 son suelos con alto

contenido de vidrio volcánico, lo que hace que tengan texturas gruesas (arenosas) y una baja retención de agua. Por ser suelos bastante arenosos, demandan mayor cantidad de agua para actividades productivas agrícolas, sin embargo, por sus características físicas, son fácilmente labrables. Una limitante lo constituyen las pendientes fuertes en las cuales se les encuentra en muchos casos.

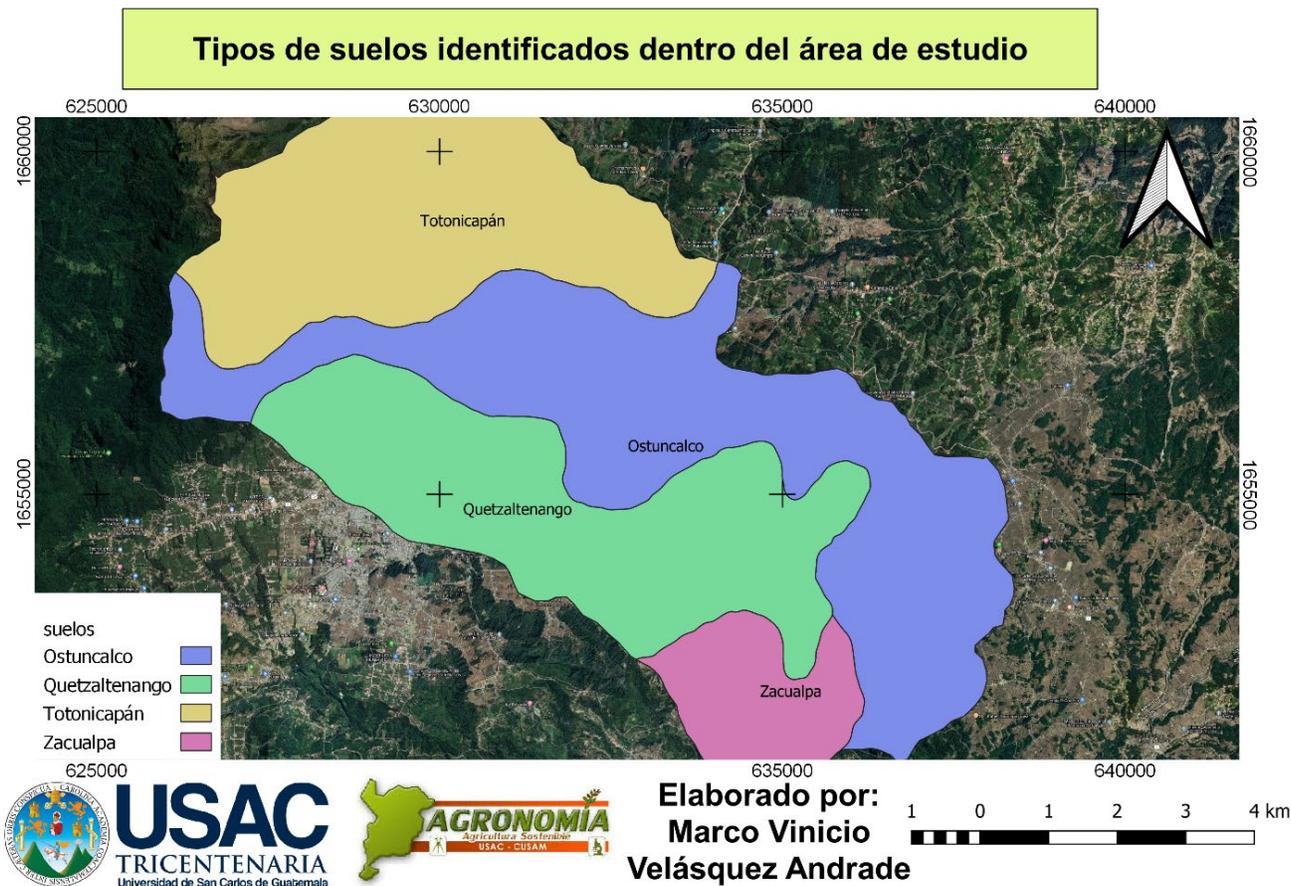
El suelo Quetzaltenango pertenece al orden andisol y al suborden 1 ustands *Ds* cuyas características son andisoles que están secos entre 90 y 180 días del año en su interior. Presentan deficiencia de humedad. Su principal problema, además de las limitantes mencionadas a nivel del orden, es la falta de humedad la mayor parte del año, esta es una limitante para las actividades agrícolas.

El suelo Totonicapan pertenece al orden andisol y al suborden 1 udands *Dd* cuyas características son andisoles que no están secos en su interior, por más de 90 días en el año. Tienen un adecuado contenido de humedad la mayor parte del año. Suelos con alto potencial para la agricultura, pero deben considerarse las limitantes que presentan en términos generales los andisoles y en este caso debe agregarse el riesgo de erosión hídrica, como consecuencia de la alta pluviosidad en los lugares dónde están presentes estos suelos.

El tipo de suelo Zacualpa pertenece al orden entisol al suborden 1 orthents y al suborden 2 vitrans *Eo-Dv* las características del suborden 1 son suelos de profundidad variable, la mayoría son poco o muy poco profundos. Generalmente están ubicados en áreas de fuerte pendiente, existen también en áreas de pendiente moderada a suave en dónde se han originado a partir de deposiciones o coluviamientos gruesos y recientes. Una gran cantidad de Orthents en Guatemala no son apropiados para actividades agrícolas, sobre todo cuando están en superficies inclinadas. Entre sus limitaciones están: la poca profundidad efectiva, en muchos casos la pedregosidad interna y los afloramientos rocosos. Si han perdido su cubierta natural, sus mejores usos serán para producción forestal o sistemas agroforestales. Las características del suborden 2 son suelos con alto contenido de vidrio volcánico, lo que hace que tengan texturas gruesas (arenosas) y una baja retención de agua. Por ser suelos bastante arenosos, demandan mayor cantidad de agua para actividades productivas agrícolas, sin

embargo, por sus características físicas, son fácilmente labrables. Una limitante lo constituyen las pendientes fuertes en las cuales se les encuentra en muchos casos.

Mapa 6 Tipos de suelos en la microcuenca Alto Naranjo



#### 9.1.4 DETERMINACIÓN DEL TIPO DE COBERTURA VEGETAL

Tal y como se indicó en el numeral 8.2.6 determinación tipo de cobertura vegetal, a cada una de las coberturas identificadas se le asignó un coeficiente. La extensión de cada cobertura vegetal se presenta en el siguiente cuadro

Cuadro 8 Extensión de los tipos de cobertura vegetal del suelo.

Cobertura vegetal del suelo	Extensión			Kv
	Ha	Km <sup>2</sup>	%	
Cobertura con zacate en una proporción menor a 50%	105.53	1.05	1.70	0,09
Terrenos cultivados	2176.29	21.77	35.23	0,1

Cobertura con pastizal	8.16	0.08	0.13	0,18
Bosques	3295.6	32.95	53.32	0,2
Cobertura con zacate en una proporción mayor a 75%	594.82	5.95	9.63	0,21
<b>Extensión del área de estudios</b>	<b>6180.4</b>	<b>61.8</b>	<b>100</b>	

Fuente: Schosinsky (2006).

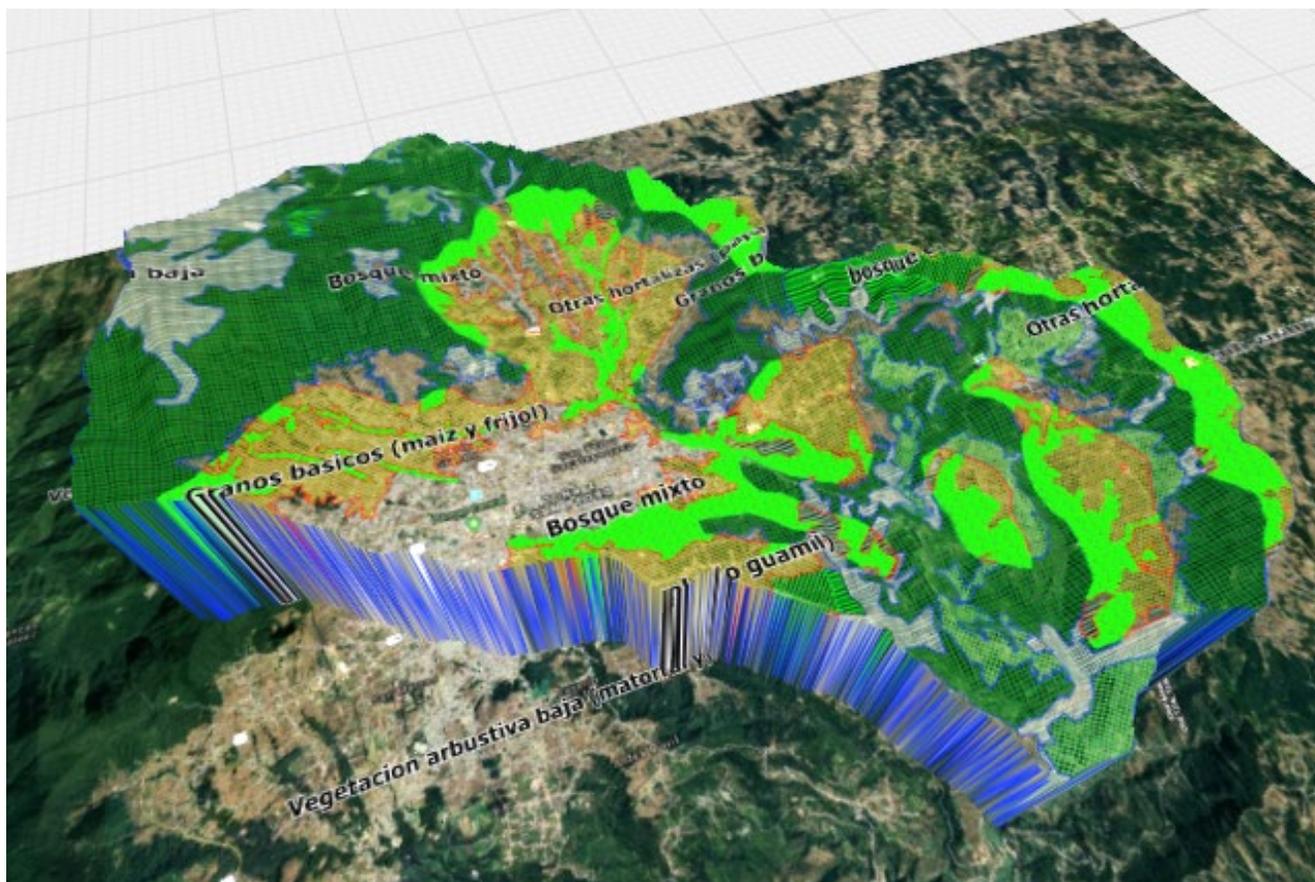


Ilustración 6 Representación 3D cobertura vegetal del área de estudio  
Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro No. 8 se evidencia que un 53.32% del área de estudio es bosque, lo que, para fines de la presente investigación favorece grandemente la infiltración y protección de los suelos de la microcuenca. Un 35.23% pertenece a terrenos cultivados, evidenciando el avance de la frontera agrícola al no contar con suficientes terrenos con las condiciones y características idóneas para cultivos. Se ha discriminado 5.94 Km<sup>2</sup> lo que representa un 9.61% identificado como tejido urbano continuo, área en la cual, por el incremento de las zonas urbanísticas, impermeabilización de calles con obras grises que encausan la precipitación pluvial en cunetas, las cuales redireccionan esta precipitación en cauces de ríos impidiendo el proceso de infiltración en esta área.



### 9.1.5 DETERMINACIÓN DE LA PENDIENTE EN PORCENTAJE

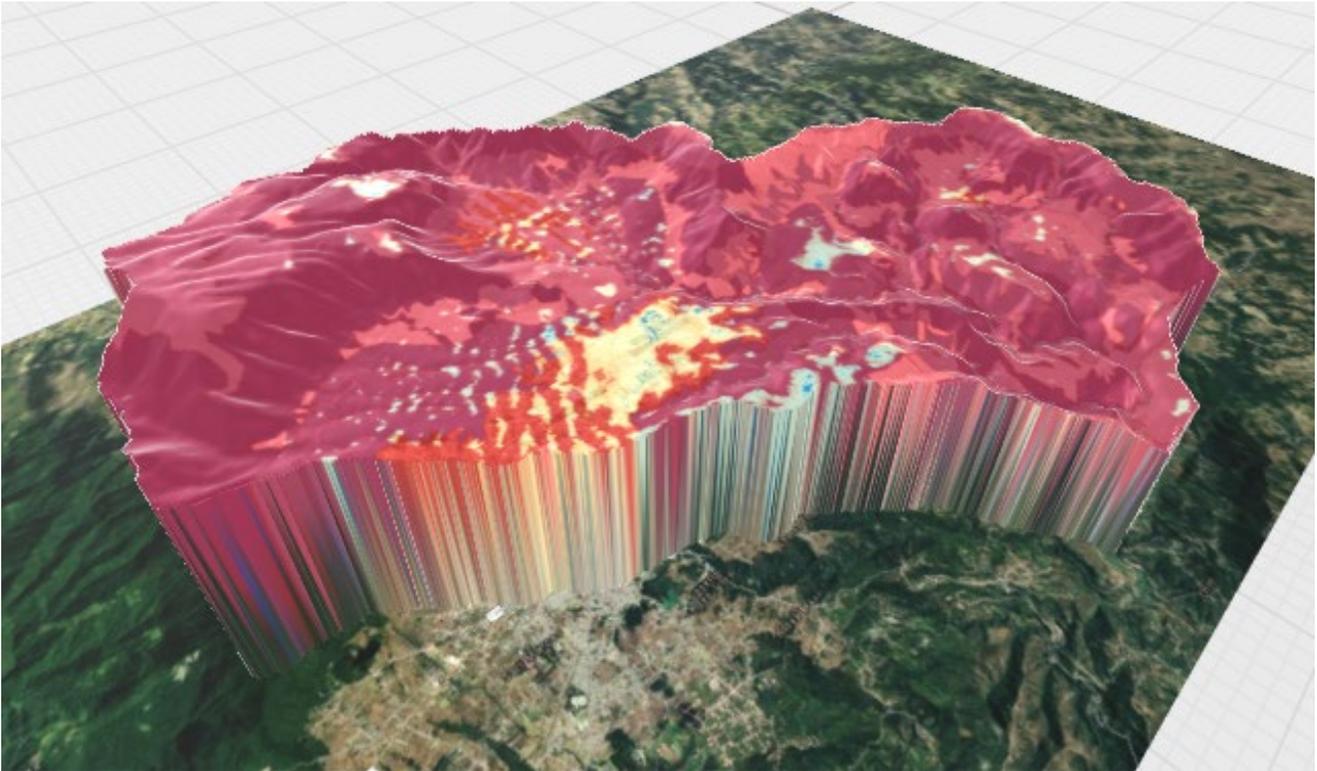


Ilustración 7 Representación 3D Porcentaje de pendientes del área de estudio  
Fuente: Elaboración propia.

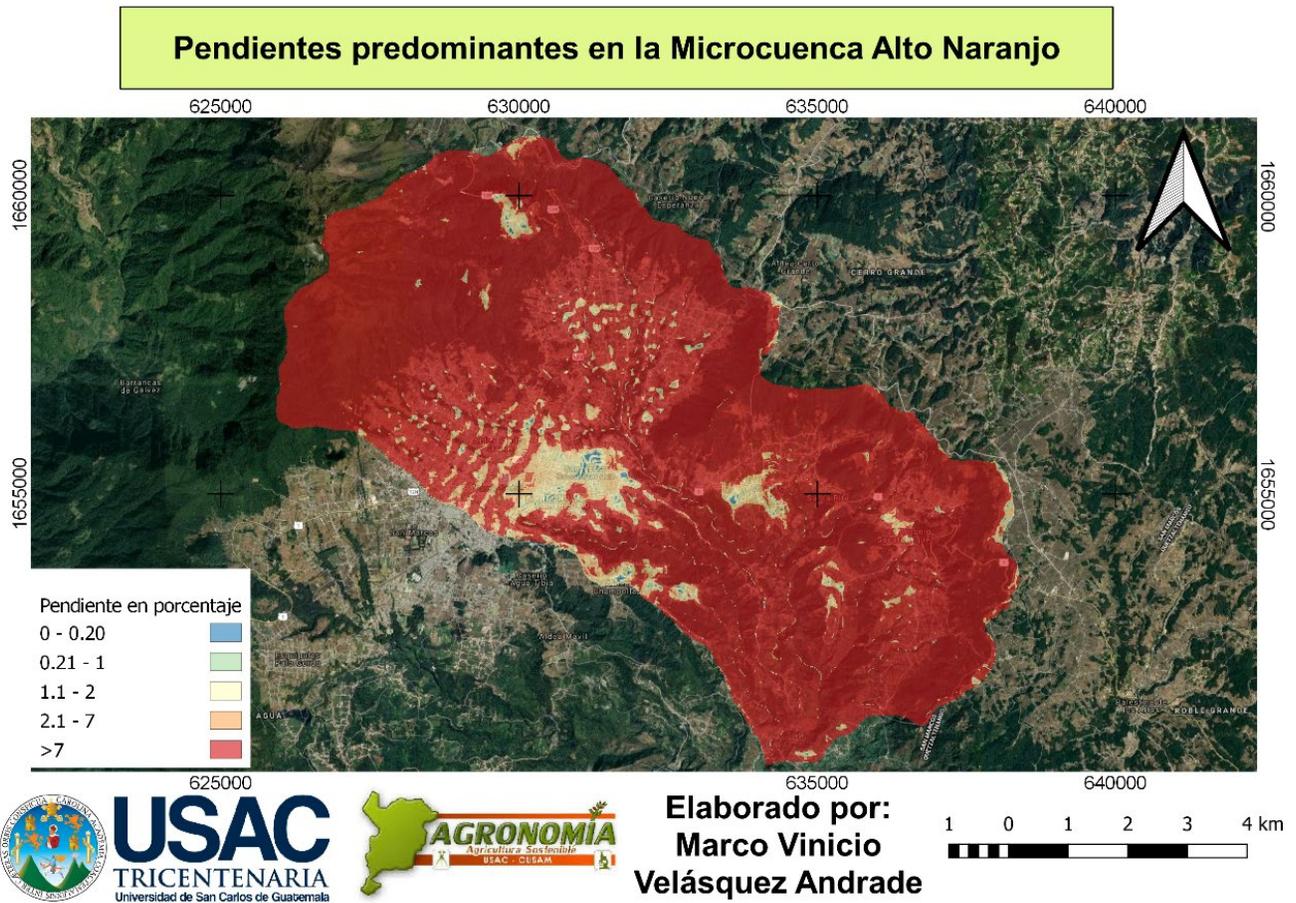
Como se observa en el mapa 8, dentro del área de estudios existen áreas muy poco significativas con pendientes menores a 7%, por lo tanto se adjudicó el coeficiente de pendientes indicado en el numeral 8.2.5. Quedando de la siguiente manera.

Cuadro 9 Coeficiente de pendiente Kp asignada a la microcuenca Alto Naranjo

<b>Terreno</b>	<b>Pendiente (%)</b>	<b>Coeficiente Kp</b>
Muy irregular	Mayor a 7	0.06

Fuente: Schosinsky (2006).

## Mapa 8 Pendientes predominantes en la microcuenca Alto Naranjo



### 9.1.6 DETERMINACIÓN DE LA INFILTRACIÓN BÁSICA (kfc)

En total se identificaron 11 áreas que comparten las variables de geología, pendiente y cobertura vegetal de las cuales se discriminó las zonas de tejido urbano continuo ya que no presentan condiciones para realizar la recarga hídrica, por lo que se realizaron 11 pruebas de infiltración. Los resultados de las pruebas de infiltración se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 10 Velocidad de infiltración del agua según la pendiente, geología y cobertura vegetal.

No. De prueba	Tipo de cobertura	Tipo de geología	Velocidad infiltración (cm/min)	Velocidad infiltración (cm/hora)	Velocidad infiltración (mm/d)
1	Bosque Mixto	Tv	2.04107	122.46461	29391.50
2	Granos básicos (maíz y frijol)	Tv	2.37136	142.282	34147.68
3	Vegetación arbustiva baja	Tv	2.60197	156.11864	37468.47
4	Bosque de coníferas	Tv	2.40489	144.29375	34630.5
5	Otras hortalizas	Tv	3.15448	189.26923	45424.61
6	Pasto natural	Tv	3.26718	196.03125	47047.5
7	Bosque de coníferas	Qp	2.90071	174.04262	41770.22
8	Bosque Mixto	Qp	3.85641	231.38461	55532.30
9	Granos básicos	Qp	3.09051	185.43076	44503.38
10	Vegetación arbustiva baja	Qp	3.30350	198.21052	47570.52
11	Otras hortalizas	Qp	3.70637	222.38235	53371.76

### 9.1.7 DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE LAS RAÍCES EXTRACTORAS DE AGUA.

La profundidad de las raíces estimada para cada tipo de cobertura del suelo se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 11 Profundidad de las raíces extractoras de agua según el tipo de cobertura vegetal del suelo.

Tipo de cobertura vegetal del suelo	Profundidad de las raíces (m)	Profundidad de las raíces en (mm)
<b>Cobertura con zacate en una proporción menor a 50%</b>	0.25	250
<b>Terrenos cultivados</b>	1.50	1500
<b>Cobertura con pastizal</b>	1	1000
<b>Bosques</b>	3	3000
<b>Cobertura con zacate en una proporción mayor a 75%</b>	1.50	1500

Fuente: Schosinsky (2006)

### 9.1.8 DETERMINACIÓN DE LA INTERCEPCIÓN DE LLUVIA EN EL FOLLAJE

Para poder asignar los valores haremos uso del cuadro No. 2. Por lo que en el siguiente cuadro se muestran los valores asignados para cada una de las coberturas vegetales encontradas en la microcuenca.

Cuadro 12 Porcentaje de retención de lluvia en el follaje según el tipo de cobertura vegetal del suelo.

Tipo de Cobertura Vegetal del suelo	Retención de lluvia (%)	Coefficiente de retención de lluvia en el follaje
<b>Cobertura con zacate en una proporción menor a 50%</b>	12	0.12
<b>Terrenos cultivados</b>	12	0.12
<b>Cobertura con pastizal</b>	12	0.12
<b>Bosques</b>	20	0.20
<b>Cobertura con zacate en una proporción mayor a 75%</b>	12	0.12

Fuente: Schosinsky (2006)

### 9.1.9 DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD INICIAL DEL SUELO EN UN MES DETERMINADO.

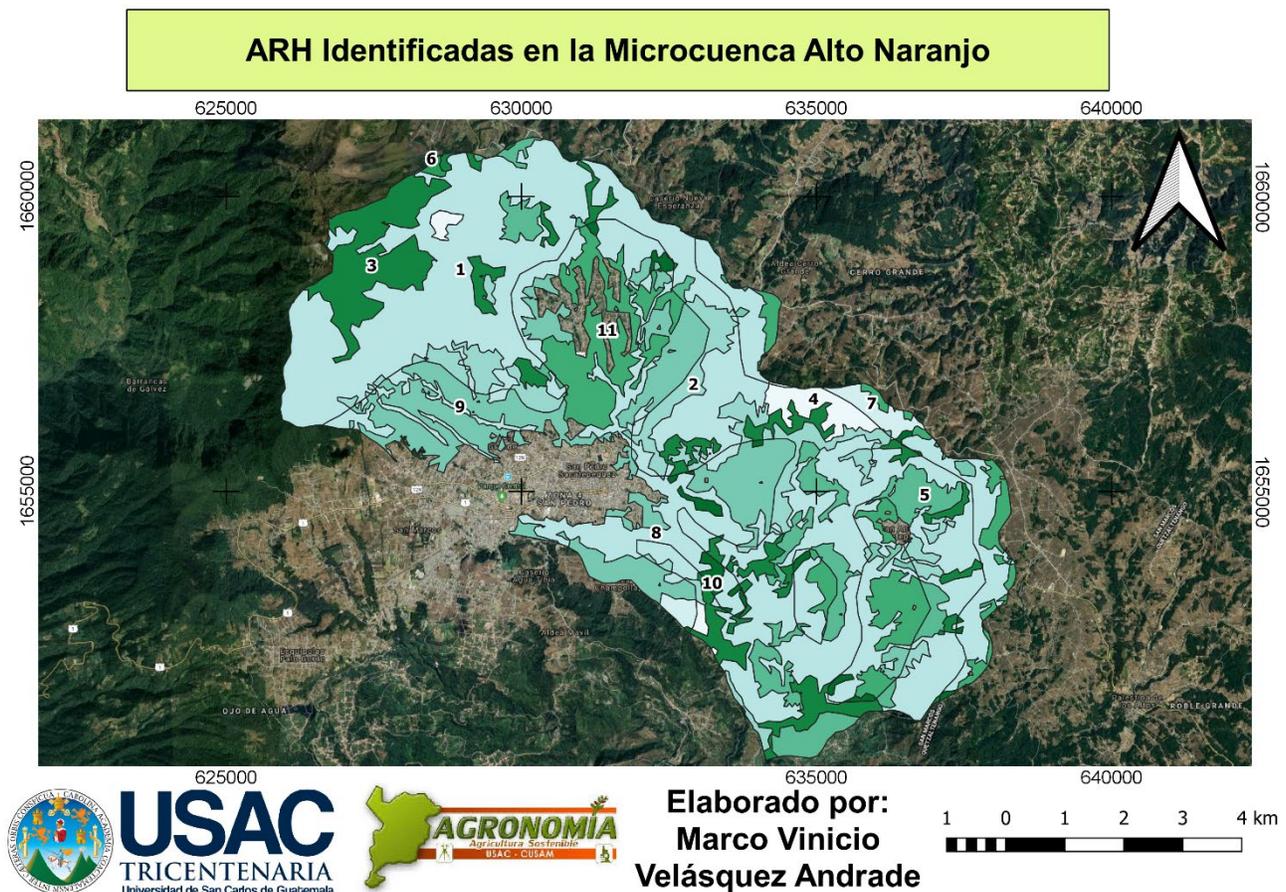
En Guatemala, la época lluviosa se presenta durante el lapso de mayo a octubre, por lo que octubre es el último mes de la época lluviosa, por lo tanto, la humedad del suelo al final de este mes, es igual a la capacidad de campo (CC), entonces, la humedad del suelo al iniciar el mes de noviembre, es también igual a la CC. (Schosinsky G. , 2006).

## 9.2 BALANCE HÍDRICO DE SUELOS PARA LAS ARH

### 9.2.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS ARH

Se creó un mapa digital con las Áreas de Recarga Hídrica (ARH) que compartieron las variables de geología, pendiente y cobertura vegetal del suelo. En el siguiente mapa se muestran las 11 ARH identificadas.

Mapa 9 ARH identificadas en la Microcuenca Alto Naranjo



### 9.2.2 DETERMINACIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL $R_p$

De las 11 ARH identificadas, se aplicó la ecuación del balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky (2006)

En el siguiente cuadro se muestra un resumen de los resultados obtenidos en el balance hídrico de suelos aplicado a cada *ARH*. La información que es objeto de interés

Cuadro 13  $R_p$  en las Áreas de Recarga Hídrica.

ARH	Tipo de Cobertura Vegetal	Geología	$R_p$ (mm/año)
1	Bosque Mixto	Tv	201.67
2	Granos básicos (maíz y frijol)	Tv	290.88
3	Vegetación arbustiva baja	Tv	301.52
4	Bosque de coníferas	Tv	207.17
5	Otras hortalizas	Tv	318.70
6	Pasto natural	Tv	326.96
7	Bosque de coníferas	Qp	240.17
8	Bosque Mixto	Qp	220.83
9	Granos básicos	Qp	267.55
10	Vegetación arbustiva baja	Qp	229.22
11	Otras hortalizas	Qp	211.50

Como se muestra en el cuadro No. 13, existe poca relación entre los valores de  $R_p$  y los tipos de cobertura vegetal del suelo, pues valores similares de  $R_p$  pueden ocurrir en distintos tipos de cobertura. Este fenómeno dado en cada ARH, es posiblemente generado por 1) el grado de compactación que se presenta en las primeras capas del suelo, 2) la profundidad de las raíces extractoras de agua, 3) la evapotranspiración real (ETR) y 4) la pendiente.

En el cuadro No. 13 también se presentan valores de  $R_p$  que van desde los 201.67 hasta los 326 mm/año, es difícil afirmar que estos valores sean altos o bajos, pues estos datos no se pueden comparar con otros estudios existentes, ya que ésta es la primer investigación que se realiza en la zona.

### 9.2.3 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE RP PARA CADA ARH

El volumen de Rp según la extensión total que comprenden las 11 ARH, se muestra en el cuadro No. 14

Cuadro 14 Volumen de Rp en las ARH

ARH	Tipo de Cobertura Vegetal	Rp (m/año)	Área (m <sup>2</sup> )	Volumen Rp (m <sup>3</sup> /año)
1	Bosque Mixto	0.20167	21647386.0	4,365,729.0
2	Granos básicos (maíz y frijol)	0.29088	4058092.0	1,180,415.89
3	Vegetación arbustiva baja	0.30152	6285274.0	1,895,124.23
4	Bosque de coníferas	0.20717	1101750.0	228,253.08
5	Otras hortalizas	0.31870	4053693.0	1,291,910.99
6	Pasto natural	0.32696	81627.0	26,688.69
7	Bosque de coníferas	0.24017	720001.0	172,922.01
8	Bosque Mixto	0.22083	9486790.0	2,095,014.79
9	Granos básicos	0.26755	8068126.0	2,158,610.17
10	Vegetación arbustiva baja	0.22922	718242.0	164,631.94
11	Otras hortalizas	0.21150	5583038.0	1,180,821.83
<b>Total de la Recarga potencial</b>				<b>14,760,122.62</b>

En el cuadro No. 14 muestra que en el territorio que comprende el área de estudios, aproximadamente quince (15) millones m<sup>3</sup> de agua precipitan y podrían llegar a ser parte del agua subterránea cada año, aunque no es posible comparar estos datos con otros resultados obtenidos, ya sea con esta u otras metodologías, si es claro que en el territorio de la microcuenca se presentan variables biofísicas con características que favorecen la recarga de un posible acuífero existente en la zona.

## 9.2.4 CATEGORIZACIÓN DE LAS ARH

En el cuadro No. 15 se muestra la categorización de las Áreas de Recarga Hídrica (ARH), según los resultados de Recarga Hídrica Potencial del Acuífero (Rp) obtenidos en el balance hídrico de suelos

Cuadro 15 Categorización de las ARH según resultados de Rp

ARH	Tipo de Cobertura Vegetal	Volumen Rp (m <sup>3</sup> /año)	Área (Ha)	Volumen Rp (m <sup>3</sup> /ha/año)	Categoría
1	Bosque Mixto	4,365,729.0	2164.74	2016.75	Baja
2	Granos básicos (maíz y frijol)	1,180,415.89	405.81	2908.79	Alta
3	Vegetación arbustiva baja	1,895,124.23	628.53	3015.17	Muy alta
4	Bosque de coníferas	228,253.08	110.18	2071.64	Baja
5	Otras hortalizas	1,291,910.99	405.37	3186.99	Muy alta
6	Pasto natural	26,688.69	8.16	3270.67	Muy alta
7	Bosque de coníferas	172,922.01	72	2401.69	Media
8	Bosque Mixto	2,095,014.79	948.68	2208.35	Baja
9	Granos básicos	2,158,610.17	806.81	2675.49	Alta
10	Vegetación arbustiva baja	164,631.94	71.82	2292.29	Baja
11	Otras hortalizas	1,180,821.83	558.30	2115.03	Baja

En el cuadro No. 15 se observa como las ARH con distinta categoría se encuentran distribuidas en las diferentes coberturas vegetales que se encuentran en la microcuenca, además, predominan las ARH con potencial de recarga baja, mientras que, se encuentran en menor proporción las áreas consideradas con un volumen de recarga media, alta y tres áreas presentan un potencial de recarga hídrica muy alta. También se nota que en las ARH cubiertas por bosque, contrario a lo que se espera, son las que presentan un volumen de recarga potencial bajo.

Cuadro 16 Recarga potencial y extensión de las categorías a las que pertenece cada ARH

Categoría	Recarga hídrica potencial (Rp)		Extensión	
	m <sup>3</sup> /año	%	Hectáreas	%
<b>Muy Alta</b>	3213723.91	21.77	1042.06	33.64
<b>Alta</b>	3339026.06	22.62	1212.62	19.83
<b>Media</b>	172922.01	1.17	72	8.53
<b>Baja</b>	8034450.63	54.43	3853.72	38.01
<b>Total</b>	14760122.61	100	6180.41	100

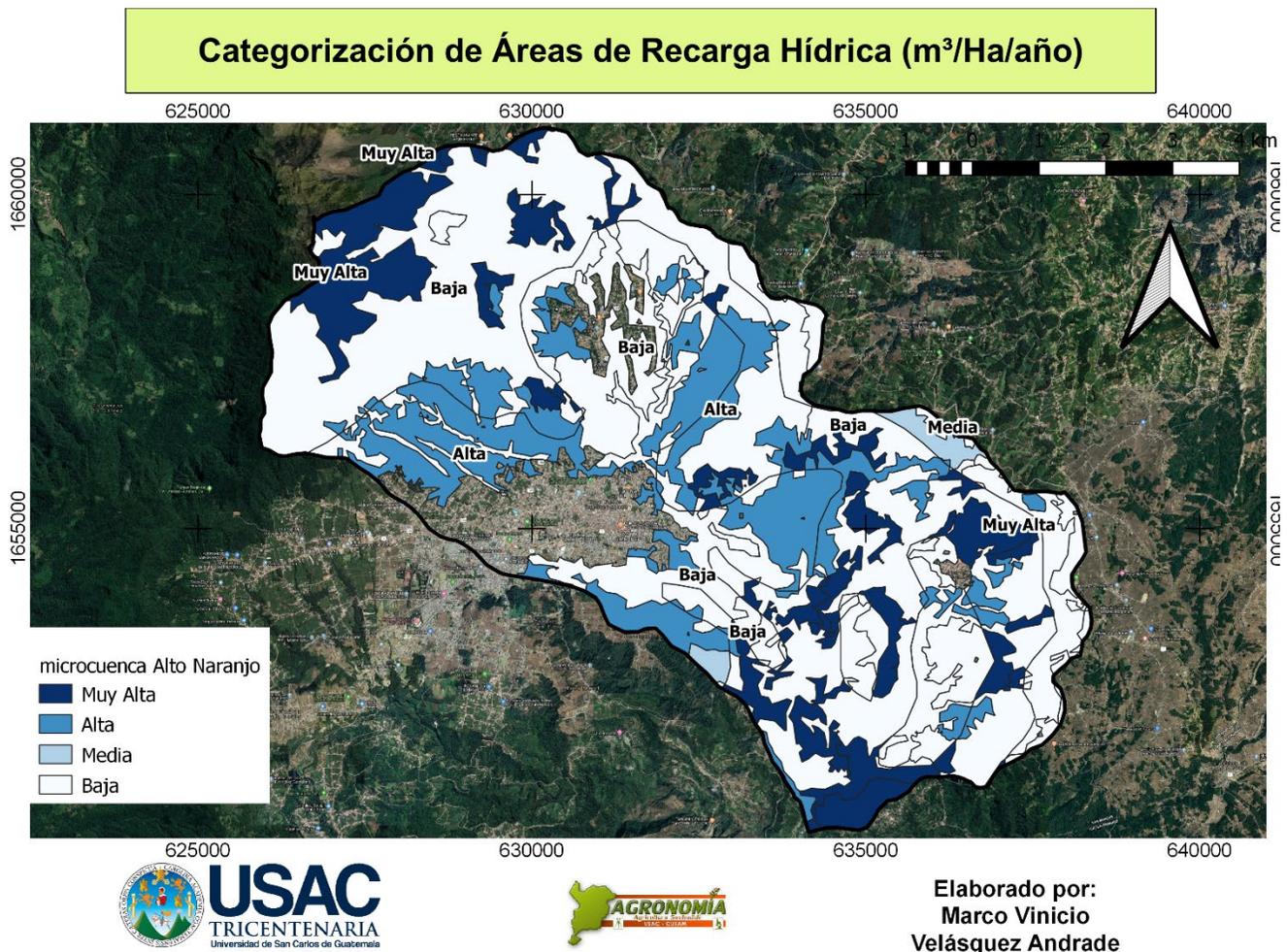
Según el cuadro No. 16 el 38.01% del área de estudio cuenta con áreas de recarga potencial baja siendo el bosque, el que aporta un menor caudal de recarga, mientras que las áreas con una vegetación diferente al bosque poseen una muy alta capacidad de recargar los acuíferos.

Si retomamos lo expresado por Matus Silva (2007), indicado en el marco teórico conceptual, el principal papel del bosque dentro del ciclo hidrológico es en materia de almacenamiento de agua –de lluvia-, básicamente bajo el mismo, se favorece la infiltración del agua de lluvia y el escurrimiento se ve disminuido. De igual forma Benitez (1972) indica que existen otras condiciones que afectan la recarga hídrica, una de ellas es el tipo de cobertura vegetal del suelo. Las áreas con bosque son más favorables a la recarga en comparación con los suelos arables, incluso para el mismo tipo de suelo. En los suelos con cobertura boscosa, el agua no taponan los intersticios de penetración y las raíces muertas constituyen canales que tienden a favorecer la recarga.

Contrario a lo que se indica por los autores, arriba mencionados, en el presente estudio, el bosque obtuvo los valores más bajos en cuanto a la recarga potencial se refiere, considerando que una de las razones de estos valores se deba a la ubicación geográfica de los bosques, quienes se encuentran en pendientes mayores a 7% ya que según Benitez (1972), expresa, Otra característica decisiva de la recarga subterránea es la topografía del terreno, en zonas con altas pendientes, la escorrentía es máxima y por lo tanto la infiltración es mínima. De

igual forma durante las visitas de campo realizadas por el investigador se pudo constatar que la densidad poblacional del bosque ha mermado considerablemente debido a la tala y extracción ilegal de leña, lo que significa una disminución en la retención de agua de lluvia por el follaje, un aumento de la escorrentía superficial y aunado a la pendiente predominante en el área geográfica donde se ubican los bosques, genera una disminución del tiempo de contacto entre el agua de lluvia que corre por la superficie y el suelo, disminuyendo de esta forma la capacidad de recarga hacia un posible acuífero en la zona.

Mapa 10 Categorización de ARH



Como se puede observar en el cuadro No. 5, el área de estudio recibe un promedio de 1200 mm anuales de precipitación, valor que puede ser importante en términos de recarga, pues si no hay precipitaciones, la recarga es nula, a no ser que esta se dé debido a la infiltración de las aguas superficiales presentes en los ríos, lagos y lagunas, o a partir del agua proveniente

de otro sistema acuífero. No obstante, los resultados del cuadro No. 6 demuestran que la temperatura promedio anual es de 12.29°C y el tipo de cobertura vegetal, inducen la evapotranspiración potencial (ETP), provocando que no toda el agua que se precipita se retenga en el suelo o percole para ser parte de la recarga de agua subterránea.

Según los resultados del cuadro No. 7 en los meses que la ETP es mayor a la precipitación, la recarga potencial del acuífero (Rp), se ve reducida y es posible que esta se dé solo a partir del agua retenida en el suelo durante los meses que no ocurre este fenómeno. Este suceso, hace que en estos meses, el caudal de los manantiales que abastecen de agua potable a la población de la microcuenca merme considerablemente.

Las pendientes y precipitaciones altas que predominan sobre el área de estudio, como se evidencian en los cuadros 9 y 6 respectivamente, así como un suelo de origen volcánico que favorece la infiltración del agua en el suelo, llevan a suponer que el agua que tiene contacto en las ARH, puede tanto infiltrarse y ser retenida, percolar para recargar un posible acuífero profundo o correr subsuperficialmente para desembocar en manantiales estacionales o cauces de ríos. En general, la velocidad del agua subsuperficial es muy baja y con un periodo largo de verano esta agua es la que en primera instancia se ve afectada por la evapotranspiración. Es muy posible que los riachuelos y manantiales temporales o periódicos que se presentan dentro del área de estudio sean parte de la descarga del agua subsuperficial en la zona. El hecho de contar con caudales en cauces y manantiales en época de verano, aun cuando no existen precipitaciones, es evidencia que el área de estudio se encuentra sobre una importante captación de agua subterránea o acuífero. (Faustino 2007).

Según Alvarado et al. (2001), la retención de humedad depende de la textura, minerología y la estructura del suelo. Este autor menciona que los suelos volcánicos viejos pueden estar conformados hasta por un 70% de porosidad total, del cual un 38% corresponde a macroporos con un tamaño mayor a 30  $\mu\text{m}$  (micrómetros) y un 62% se refiere a microporos con diámetros menores a 30  $\mu\text{m}$ . Por ser un suelo relativamente joven, es posible que el área de estudio no presente una porosidad total tan alta, pero se debe rescatar la posible presencia de un buen porcentaje de microporos, los cuales debido a las fuerzas capilares, provocan una mayor succión o atracción de agua y por lo tanto, generan una mayor posibilidad de retener humedad

(Davies 2002). Para Bras (1990) la columna de agua en suelos con un mayor porcentaje de arcillas puede llegar a contener 10 veces más agua retenida que un suelo arenoso y Maidment (1993) menciona que es mayor la capacidad de retención en suelos con un contenido de arcilla mayor a 10%, algo que caracteriza a los tipos de suelo presentes en el área de estudio. No obstante, no es despreciable la presencia de limo y arena, con valores entre 30% y 50% respectivamente, los cuales favorecen la percolación y recarga directa de un posible acuífero profundo en la zona (Ward y Trimble 2004). También se debe tener presente lo mencionado por Duke (1974), quien afirma que, tanto en suelos arenosos como arcillosos, es posible que se dé un equilibrio de la tensión o presión ejercida sobre el agua, facilitando la retención de humedad. Por lo anterior, es posible mencionar que tanto la capacidad de retención como la de percolación, son las responsables de mantener los flujos de agua subterránea durante todo el año, siendo en términos de  $R_p$ , la percolación el fenómeno más importante ocurrido durante las precipitaciones y la retención de humedad dada cuando las precipitaciones no se presentan o son escasas.

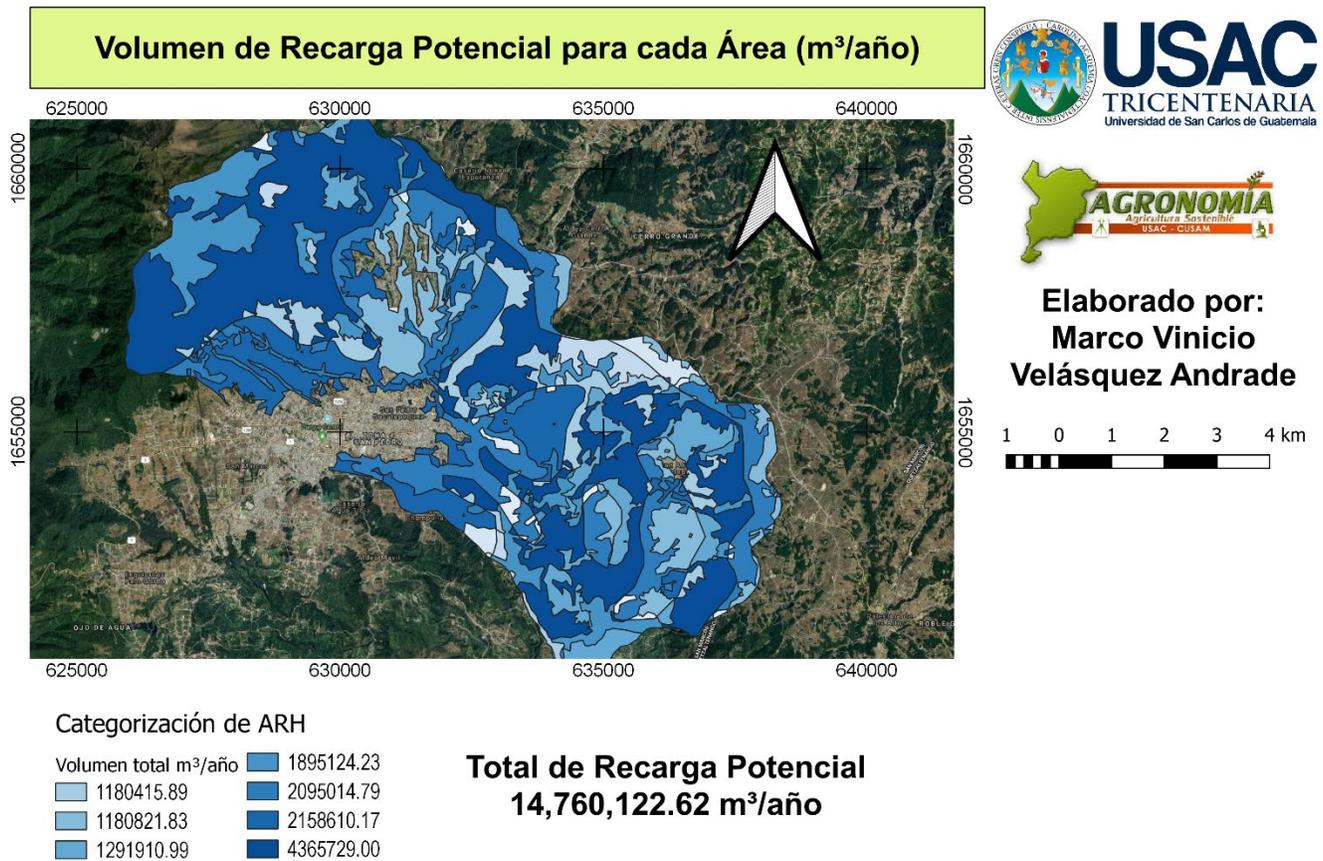
Según la descripción geológica, dentro del área de estudio se encuentra un suelo relativamente joven, de origen ígneo o volcánico afectado por procesos erosivos, tectónicos y el vulcanismo. En un suelo no consolidado de orden Andisol (Wiley 1959), el alto contenido de arenas debido a su origen ígneo (Alvarado et al. 2001), permite mayor espacio poroso que a su vez favorece la percolación de agua hacia capas más profundas del suelo, contribuyendo así con la recarga de aguas subterráneas. Este fenómeno ocurre en los suelos identificados y es el que a pesar de las pendientes superiores a 7% que se presentan, pareciera contribuir con el hecho de que aproximadamente 15 millones de  $m^3$  de agua recarguen anualmente en las 11 ARH identificadas.

Los suelos identificados presentan capacidad para retener humedad debido a que cuentan con altos valores de capacidad de campo (CC) y bajos valores de densidad aparente, dicho en otras palabras, los pequeños espacios porosos del suelo, hacen posible que un mayor volumen de agua se retenga en el suelo, favoreciendo así la recarga de aguas subterráneas. Ahora bien, por su efecto “sombra-esponja”, el bosque tiene mayor capacidad de regular la humedad y la temperatura del suelo, al provocar que éstas se den en proporciones más bajas que las que imperan en la atmósfera (Reynolds y Thompson 1988). Así también el bosque retarda la

infiltración y almacena a largo plazo una mayor cantidad de humedad, por lo tanto, este tipo de cobertura, contribuye con la descarga de agua subterránea, aun en periodos donde no se dan precipitaciones.

Con las pruebas de  $f_c$  se obtiene una aproximación teórica de la capacidad de infiltración del suelo o su permeabilidad. El hecho de que los valores de  $f_c$  sean mayores en suelos cubiertos por bosque, intermedios en el suelo cubiertos con zacate 50% y zacate 75% y menores en suelos cubiertos por pastizal y caña, reflejan la importancia de conservar el recurso boscoso de una manera intercalada en aquellas ARH donde éste no existe así mismo es importante considerar la recuperación de la densidad de la masa boscosa, para asegurar una mayor retención de agua en el follaje, una disminución de la escorrentía superficial y un aumento del tiempo de contacto entre el agua de lluvia y el suelo. La compactación, desintegración y erosión de las partículas del suelo, aunado a las altas pendientes que predominan en áreas cubiertas por zacate, pastizal y caña, ponen en riesgo lo mencionado por Ward y Trimble (2004), quienes afirman que la textura franco-arcillosa, el alto contenido de materia orgánica y la baja densidad aparente, induce a una alta capacidad de infiltración, haciendo a estos suelos de origen volcánico altamente permeables. Para Reynolds y Thompson (1988), la capa de humus que se forma en la base del suelo de un bosque, protege a éste de la compactación causada por la lluvia, regula la humedad y el flujo pausado del agua, además, aporta materia orgánica al suelo y funciona como filtro al no permitir el paso de pequeñas partículas que pueden rellenar el espacio poroso. Estas atribuciones contribuyen a la justificación del porque en el bosque los valores de  $f_c$  reflejan una mayor capacidad de infiltración.

## Mapa 11 Volumen de recarga potencial



Los resultados de precipitación que infiltra ( $P_i$ ) y de  $R_p$  obtenidos en el balance hídrico de los suelos, muestran cómo influye la evapotranspiración real ( $ETR$ ) en la estimación del volumen de agua que potencialmente puede llegar a ser parte del agua subterránea. La disponibilidad de agua para  $R_p$  está determinada en buena parte por el tamaño de la zona de raíces y el régimen climático. En Los periodos largos sin lluvia, la cobertura forestal de raíces profundas transpira libremente la mayor parte del tiempo aun cuando se haya terminado la disponibilidad de agua para plantas con raíces poco profundas. Esa condición se demuestra cuando los valores de  $ETR$  son mayores en bosques, zacate 50% y zacate 75%. En áreas donde las plantas con raíces poco profundas como el pastizal y la caña reciben una adecuada cantidad de agua la mayor parte del tiempo, la evapotranspiración es afectada en menor grado por la profundidad de la zona de raíces (Linsley et al. 1988). Según Sánchez (2005 a.), el proceso de la fotosíntesis es otro factor que influye en la evapotranspiración, a mayor intensidad de luz solar, mayor intensidad de la fotosíntesis, con la cual se produce mayor cantidad de savia elaborada, quedando mayor cantidad de agua sobrante que induce una mayor transpiración.

Además, la savia o glucosa se requiere en mayores cantidades en tipos de cobertura con mayor masa vegetal, este es el caso del bosque, zacate 50% y zacate 75%. Todas las variables anteriores justifican por qué en el área de estudio, un 50% de  $P_i$ , sea  $ETR$ .

Aunque los valores de la  $fc$  fluctúen, los resultados de  $R_p$  en todas las ARH tienden a ser moderadamente uniformes como se evidencia en el cuadro No. 13. Esto muy posiblemente ocurre debido a que la  $ETR$  también es mayor en bosque y menor en caña, zacate y pastizal, ejerciendo cierto balance en la  $R_p$  (Ward y Trimble 2004). Ahora bien, los valores de  $R_p$  se han obtenido en un momento y espacio dado y en realidad, es el cambio en las propiedades físicas del suelo, la erosión, la compactación del suelo y una mayor escorrentía, las que pueden provocar a futuro una disminución de la  $R_p$ , especialmente en aquellos suelos con una cobertura distinta a la boscosa. Según Wiley (1959), dada su importancia en la infiltración, la cobertura del suelo es más importante que el tipo de suelo existente, pues se han hecho estudios donde en un mismo suelo, distintos tipos de cobertura vegetal presentan diversas tasas de infiltración. Es por ello que, tanto el tipo de cobertura vegetal, como el manejo que se le dé, es un aspecto primordial en términos de favorecer la  $R_p$  a largo plazo.

Tanto el pastizal, el zacate y la caña son plantas perennes, pero su aprovechamiento se da mensual o anualmente, este hecho genera una mayor remoción y compactación del suelo, causada por la maquinaria y el ganado. Este efecto a través de los años puede provocar una disminución de la capacidad del suelo para infiltrar y retener agua, generando un aumento en los índices de escorrentía promovida por las altas pendientes que ocurren en toda el área de estudio. Aunque los resultados de  $R_p$  en las ARH que comparten estos tipos de cobertura actualmente son favorables, pueden no ser así cuando las lluvias merman y mucho menos cuando a través de los años se le siga dando un uso inadecuado a las mismas. Se conoce por ejemplo que la conversión de bosque a pastizal, provoca un decrecimiento en el régimen de precipitación en alrededor de 200 mm/año, algo poco alentador si se sabe que en su mayoría la recarga de aguas subterráneas proviene directamente de las precipitaciones (Reynolds y Thompson 1988).

Aunque en el bosque se da una mayor  $ETR$  durante todo el año y especialmente en época de verano (Ward y Trimble 2004), la capacidad de regulación y almacenamiento de humedad y la

alta capacidad de infiltración que se presentan los suelos cubiertos por bosque, provoca la percolación de casi un 65% del total del volumen de recarga hídrica. Paralelo a este aporte importante del bosque, Jones (1997) afirma que cuando un área forestal es reemplazada por pastizales o cultivos, es muy probable que en ese lugar se presente un aumento en la escorrentía superficial y una reducción considerable en las tasas de intercepción, evapotranspiración y capacidad de infiltración. Es importante considerar lo mencionado por Reynolds y Thompson (1988), quienes mencionan que un cambio de cobertura del suelo a bosque, implica un incremento en la descarga de aguas subterráneas de al menos 450 mm/año, igualmente, existen evidencias de que la cobertura forestal densa, implica un aumento de 5% en el régimen de precipitación anual.

Según Matus Silva (2007), la implementación de acciones de manejo con el fin de aumentar el volumen de descarga subterránea, es posible a corto plazo. Este autor es testigo de resultados obtenidos en fincas agrícolas donde acciones como la construcción de zanjas de infiltración, la siembra de barreras vivas, la rotación del cultivo y la siembra en curvas a nivel, en un periodo de cinco años, permitió aumentar el caudal de un manantial 5 veces en época de estiaje y 20 veces en época de invierno. Igualmente, Jones (1997), menciona que el solo hecho de reforestar un 10% de una hectárea de pastizal implica reducir la escorrentía en un 2%. Sin duda estos resultados pueden brindar gran beneficio y podrían mitigar las constantes reducciones de caudal tanto en ríos como en manantiales de la zona.

## 10 CONCLUSIONES

1. La metodología propuesta por Gunter Schosinsky propone que, mediante una serie de ecuaciones, se integran variables que se obtienen directamente en campo, como textura del suelo ( $kfc$ ), pendiente ( $kp$ ) y tipo de cobertura vegetal ( $kv$ ), así mismo considera datos meteorológicos como precipitación pluvial, temperatura promedio mensual, porcentaje de horas luz solar mensual, también considera datos obtenidos directamente desde el análisis de suelos en laboratorio, tales como densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchites, textura, datos que son utilizados para realizar el balance hídrico de suelos, las mismas pueden obtenerse a nivel de San Marcos y otras que han generado los ministerios como MAGA e IGN, entre otros entes, permitiendo aplicar esta metodología a nivel regional. Como puede observarse en esta investigación, a partir de las variables mencionadas se identificaron 11 zonas potenciales de recarga hídrica las cuales presentan diferencias unitarias de su potencial hídrico.
2. Dentro del territorio de la microcuenca Alto Naranjo existen áreas muy poco significativas con pendientes menores a 7% con respecto al territorio total del área de estudios, se presentan dos tipos de geología, rocas volcánicas sin dividir ( $Tv$ ) y cenizas volcánicas ( $Qp$ ) en donde a partir de 11 pruebas de infiltración aplicando el método de doble cilindro de Porchet la mayor recarga potencial se da en las cenizas volcánicas, la recarga potencial varía entre un rango de 201.67 y 326.96 mm/año, por lo que en total se recargan 14,760,122.62 m<sup>3</sup>/año. A pesar de que se considera positivo tener una recarga hídrica con el anterior volumen, no se tienen referencias locales para comparar los resultados de esta investigación.
3. Conociendo el potencial de recarga hídrica en las áreas identificadas en la microcuenca, en el corto plazo deben de realizarse acciones tales como: en el área boscosa las acciones de manejo deben abocarse a la protección, conservación y repoblación forestal; en el área de cultivos: se deben implementar sistemas de conservación de agua y suelos para mantener y aumentar los valores de recarga a un mediano y largo plazo.

## 11 RECOMENDACIONES

1. Para futuras aplicaciones de la metodología propuesta por Gunter Schosinsky se recomienda hacer uso de la tecnología para la identificación de cobertura vegetal mediante el procesamiento de imágenes satelitales (teledetección) o haciendo uso de imágenes proporcionadas por diferentes satélites, generando de esta manera información actualizada del área de estudios.
2. Para la obtención del coeficiente de infiltración del suelo, en áreas muy grandes, se recomienda realizar más de una prueba de infiltración, para obtener un promedio del área, generando un resultado más apegado con la realidad del terreno.
3. A las autoridades municipales, actores locales y organizaciones gubernamentales y no gubernamentales con injerencia dentro del área de estudios y con enfoque en el recurso hídrico, se recomienda replicar o utilizar la información de la presente investigación como punto de partida para ejecutar acciones que busquen la protección y uso adecuado de las áreas consideradas con un potencial de recarga hídrica alto y muy alto, con el fin de mantener y aumentar el caudal de los acuíferos presentes en la zona.
4. A las autoridades universitarias, como de la carrera de Ingeniero Agrónomo, se recomienda, promover más estudios de esta naturaleza, lo que permitiría hacer comparaciones temporales y espaciales en la región y además van dirigidos a la generación de información relevante para uso adecuado del recurso hídrico, recurso que últimamente, derivado de su escases está generando múltiples problemas a la población en general.

## 12 BIBLIOGRAFÍA

- Anne, E., & Egger, M.** (s.f.). El ciclo hidrológico: El ciclo hidrológico en el suelo terrestre.
- Aparicio, F.** (1989). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: LIMUSA.
- Astorga, A., & Arias, M.** (2003). Mapa de Geoaptitud hidrogeológica de Costa Rica: Implicaciones respecto a la gestión ambiental del desarrollo. *Revista geológica de América Central*, 29(95-101), 29: 95-101.
- Avalos Cambranes, O.** (2008). Determinación de las áreas principales de Recarga Hídrica Natural de la Subcuenca del Río Belejeyá del Municipio de Granados, Baja Verapaz. Guatemala.
- Baker, R.** (1994). *Soil and water science: key to understanding our global environment*. Wisconsin, USA: SSSA.
- Barrentes, G., & Vega, M.** (2004). *Estrategia para la implementación del Servicio Ambiental Hídrico en el Parque Nacional del Agua Juan Castro Blanco (PNAJCB), área de conservación Arenal-Huetar Norte*. San Carlos, Costa Rica: Instituto de Políticas para la Sostenibilidad (IPS).
- Benitez, A.** (1972). *Captación de aguas subterráneas*. Madrid, España: 2da ed. Dossat.
- Blanco Rojas, H.** (2009). *Identificación y manejo de las áreas de recarga hídrica en la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San rafaelito San Carlos, Costa Rica*. San José, Costa Rica: Programa de Maestría en Manejo de Recursos Naturales.
- Bras, R.** (1990). *Hydrology. An introduction to hydrologic science*. Massachusetts, USA.
- Cabrera, C.** (1998). *Estimación del volumen y calidad del agua subterránea y establecimiento de políticas de explotación de las aguas subterráneas para las aldeas de San José Pacul y Pachali del municipio de Santiago Sacatepéquez, Guatemala*. Guatemala.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L.** (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.
- Custodio, E., & Llamas, M. R.** (2001). *Hidrología Subterránea* (Vols. V. 1-2). Barcelona, España: Ediciones Omega.
- Davie, T.** (2002). *Fundamentals of hydrology. Toutledge fundamentals of physical geography*. New York. USA.
- Dourojeanni, A.** (1994). *Políticas Públicas para el Desarrollo Sustentable: La Gestión Integrada de Cuencas*. Santiago de Chile, CEPAL.
- Duke, J.** (1974). *Relaciones hídricas de suelo y planta*. D.F. México: EDUTEX.

- Escuder Valles, R.** (2009). *Hidrogeología, conceptos básicos de hidrología Subterránea*. Barcelona, España: Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS).
- Faustino, J.** (2007). *Identificación, evaluación y manejo de áreas de recarga hídrica*. Cartago, Costa Rica: CATIE.
- Fetter, w.** (2001). *Applied Hydrogeology: Properties of acuifers*. University of Wisconsin.
- Global Water Partnership.** (2010). *Experiencias de agua potable y saneamiento con enfoque de Gestión Integrada de Recursos hídricos (GIRH) en Guatemala*. Tegucigalpa, Honduras: IDEAS Litográficas.
- Gomez, M.** (2003). *Elementos de estadística descriptiva* (3. ed.). San José, Costa Rica: EUNED.
- Hernandez, C., & Cabalceta, G.** (1999). *Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola*. San José, Costa Rica: ACCS-UCR.
- Herrera Ibañez, I.** (1995). *Manual de hidrología*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía.
- IGN.** (1975). *Estudio morfométrico de la cuenca del río Naranjo hasta su desembocadura*.
- INAB.** (2002). *Proyecto conservación de ecosistemas forestales estratégicos: Determinación de áreas de recarga hídrica; manual capacitación técnica*. Guatemala.
- INAB-FAUSAC.** (2003). *Proyecto de investigación forestal, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala: Metodología para la determinación de áreas de recarga hídrica natural; manual capacitación técnica*. 106. Guatemala.
- Jimenez, F.** (2005). *Metodologías de la investigación en sistemas agroforestales: Medición de los componentes del balance hídrico en saf*. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Johnson, E.** (1975). *El Agua Subterránea y los pozos*. Minnesota, US.
- Johnson, E.** (1975). *El Agua Subterránea y los pozos*. Minnesota, US.
- Jones, J.** (1997). *Global Hydrology. Processes, resources and enviromental management*. London, England: Longman.
- Junker, M.** (2002). *Método RAS para determinar la recarga de agua subterránea*. Forgaes, El Salvador.
- Linsley, A.** (1998). *Hidrología para ingenieros*. (2 ed.). México: McGraw-Hill.
- Maidment, D.** (1993). *Handbook of hidrology. Infiltration and soil water movement*. McGraw-Hill.

- MANCUERNA-**, (2012). *Gestión Integrada del Recurso Hídrico*. (R. Makepeace, Recopilador) San Marcos.
- Marsalek, J., Jimenez, E., & Malmquist, A.** (2006). *Technical Documents in hydrology: Urban water cycle processes and interactions*. Paris, Francia: UNESCO.
- Matus Silva, O. D.** (2007). *Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas, aplicada a la subcuenca del río Juacapa, Matagalpa, Nicaragua*. Turrialba, CR.
- Mejía, M.** (2005). *Análisis de la calidad del agua para consumo humano y percepción local de las tecnologías apropiadas para su desinfección a escala domiciliaria, en la microcuenca El Limón, San Jerónimo, Honduras*. Turrialba, Costa Rica: Tesis Mag. Sc.
- Monsalve, G.** (1999). *Hidrología en la ingeniería*. México: Alfaomega Grupo Editor.
- Motta Franco, E.** (2001). *Modelo matemático del acuífero de la parte alta de la cuenca del río Guacalate, Chimaltenango y Sacatepéquez, Guatemala*. 125. Costa Rica.
- Obando, F.** (2005). *Situación del recurso hídrico subterráneo de la subcuenca del río Aguas Calientes, Nicaragua*. Turrialba, Costa Rica, CATIE: Tesis Mag. Sc.
- Orozco, E., Padilla, T., & Salguero, M.** (2003). *Manual Técnico: Metodología para la determinación de áreas de recarga hídrica natural (ARHN)*.
- PAFG**, (Proyecto de Acción Forestal para Guatemala, GT). (1998). *La conceptualización e identificación de zonas de recarga hídrica prioritarias a nivel nacional*. Guatemala.
- Reyes, K.** (2006). *Análisis del estado de las fuentes de agua para consumo humano y funcionamiento de los acueductos rurales en la cuenca del río la Soledad, Honduras*. Turrialba, Costa Rica: Tesis Mag. Sc. CATIE.
- Reynolds, E., & Thompson, F.** (1988). *Forest, climate and hydrology: regional impacts*. Tokyo, Japan: UNU.
- Reynolds, J., & Fraile, J.** (2002). *Presente y futuro de las aguas subterráneas en el Valle Central*. San José, Costa Rica: UNED.
- Sanchez, J.** (2004). *El ciclo hidrológico*. España: Universidad de Salamanca.
- Sanchez, J.** (2005 a.). *La evapotranspiración*. España: Universidad de Salamanca.
- Sanchez, J.** (2005 b.). *Conceptos fundamentales de hidrogeología. Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico*. España: Universidad de Salamanca.
- Sandoval Illescas, J.** (1989). *Principios de riego y drenaje*. 345. Guatemala: USAC, Facultad de Agronomía.

- Schosinsky, G.** (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*(34-35), 13-30.
- Schosinsky, G., & Losilla.** (2002). Modelo Analítico para determinar la Infiltración con base en la lluvia mensual. *revista geológica de América Central*, 23, 43-55.
- Starosolszky, O.** (1987). *Applied surface hidrology. water Resources Publications.* USA.
- UNESCO.** (1980). *Balance hídrico mundial y recursos hidráulicos de la tierra.*
- Vargas, A.** (1998). Balance hídrico en la cuenca del río Reventazón. *Revista Geológica de América Central*, 21(37-46).
- Visión, W.** (2004). *Manual del Manejo de cuencas.* El Salvador.
- Ward, A., & Trimble, S.** (2004). *Environmental hydrology* (2a. ed. ed.). Washington, USA.
- Wiley, J.** (1959). *Hidrology. Infiltration and soil moisture.* 2a. ed. New York, USA.

## 13 ANEXOS

### 13.1 MEDICIÓN DE LA INFILTRACIÓN EN EL SUELO MEDIANTE INFILTRÓMETROS DOBLE ANILLO

El método consiste en saturar una porción de suelo limitada por dos anillos concéntricos, a continuación medir la variación del nivel del agua en el cilindro interior. Aunque es muy posible que al inicio de la experiencia el suelo esté seco o parcialmente húmedo y por lo tanto en condiciones de no saturación, los valores inicialmente muy elevados irán descendiendo con gran rapidez como consecuencia de la presión ejercida por la columna de agua, mayor cuanto más alta sea ésta.

El tiempo que transcurra hasta alcanzarse las condiciones finales de saturación dependerá de la humedad previa, la textura y la estructura del suelo, el espesor del horizonte por el que discurre el agua, y la altura del agua en el anillo interior.

Lógicamente el tiempo de saturación será menor cuanto:

- mayor sea la humedad previa del suelo
- ..... sea el tamaño individual de las partículas de suelo (textura)
- ..... sea la cantidad y estabilidad de los agregados del suelo (estructura)
- ..... sea el espesor del horizonte del suelo por el que circula el agua
- ..... sea la altura de la lámina de agua en el anillo interior

La tasa o velocidad de infiltración es la velocidad con la que el agua penetra en el suelo a través de su superficie. Normalmente la expresamos en mm/h y su valor máximo coincide con la conductividad hidráulica del suelo saturado (Ilustración 8).

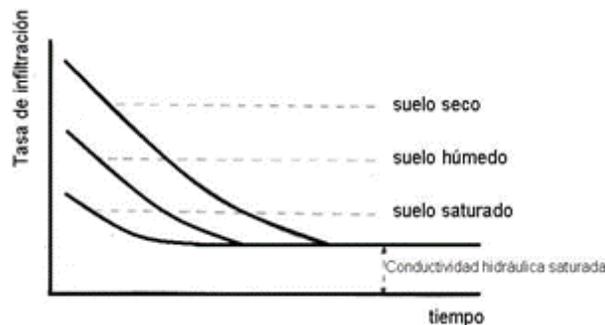


Ilustración 8 Tasas de infiltración según estado del suelo.

El método original desarrollado por Munz parte de la idea de que colocados los dos anillos y obtenida la situación de saturación (Ilustración 9), la diferencia de nivel del agua (H) en los anillos interior y exterior provoca un flujo de agua que será de entrada hacia el anillo interior (Ilustración 10) si la altura es mayor en el tubo exterior, o de salida si es inferior (Ilustración 11).



Ilustración 9 Infiltrómetro doble anillo

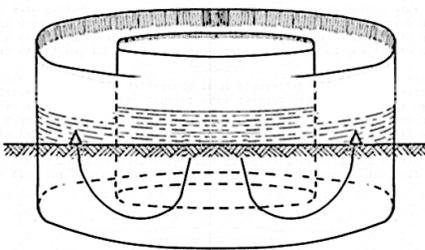


Ilustración 11 Flujo de agua a.

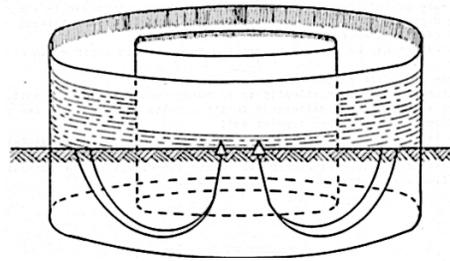


Ilustración 10 Flujo de agua b.

En cualquier caso, además de la componente del flujo de agua  $QH$  debido a la diferencia de nivel  $H$  entre los dos anillos, el agua abandona ambos cilindros por la superficie del suelo en el que están instalados como consecuencia de su porosidad. Por tanto, el flujo neto que abandona (o penetra en su caso) el anillo interior es en realidad el resultado de dos componentes: el componente debido a la diferencia de nivel de agua en los anillos, el "leakage"; y el componente debido a la capacidad de absorción del suelo, la infiltración. El problema radica precisamente en poder aislar para cada condición de  $H$  el componente del flujo "leakage" del componente de infiltración a partir del valor del flujo neto del tubo interior (valor objeto de la medición). Para ello se adopta la hipótesis de que el componente debido a la absorción es constante durante la realización de la experiencia y no resulta afectada por los cambios del nivel del agua en el cilindro interior (Ilustración 12)

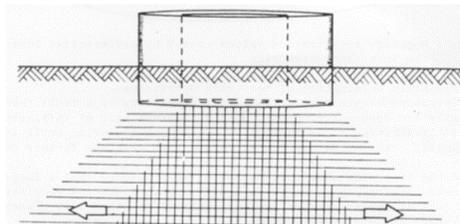


Ilustración 12 Flujo de agua en el suelo generado por el doble anillo

La hipótesis efectivamente es válida si las medidas se realizan en un corto espacio de tiempo y si  $H$  se mantiene relativamente pequeño. De otra parte, si  $H=0$  entonces el flujo en el tubo interior se debe únicamente a la absorción del suelo, siendo éste precisamente el propósito de la técnica propuesta en esta sección.

El anillo exterior también tiene como función el evitar la infiltración horizontal del agua por debajo del cilindro interior, de tal forma que las medidas se correspondan con seguridad al flujo vertical.

## 13.2 BALANCES HIDRICOS DE LOS SUELOS

Simbología													UM1	
fc: Capacidad de Infiltración.												P: Precipitación Media Mensual.		
I: Infiltración.												Pi: Precipitación que infiltra.		
CC: Capacidad de Campo.												ESC: Escorrentía Superficial		
PM: Punto de Marchitez.												ETP: Evapotranspiración Potencial.		
PR: Profundidad de Raíces.												ETR: Evapotranspiración Real.		
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.												HSi: Humedad de Suelo Inicial.		
DS: Densidad de Suelo.												HD: Humedad Disponible		
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR												HSf: Humedad de Suelo Final.		
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR												DCC: Déficit de Capacidad de Campo.		
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)												Rp: Recarga Potencial		
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)												NR: Necesidad de Riego.		
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración												Ret: Retención de lluvia		
													por peso	
fc [mm/d]	29391.00													
Kp [0.01%]	0.06													
Kv [0.01%]	0.20													
Kfc [0.01%]	1													
I [0.01%]	1													
DS (g/cm <sup>3</sup> ):	0.9100											CC	28.67	782.69
PR (mm)	3,000											PM	21.95	599.24
HSi (mm)	782.69											(CC-PM)	6.72	183.46
Nº de mes con que inicia HSi:1,2,3...12?	11													
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0.20													
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	
P (mm)	1.60	1.53	28.40	63.30	188.37	321.00	85.33	175.30	220.57	167.13	27.23	0.00	1279.76	
Ret [mm]	1.60	1.53	5.68	12.66	37.67	64.20	17.07	35.06	44.11	33.43	5.45	0.00	258.46	
Pi (mm)	0.00	0.00	22.72	50.64	150.70	256.80	68.26	140.24	176.46	133.70	21.78	0.00	1021.30	
ESC (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	
ETP (mm)	99.24	91.12	102.84	104.47	107.08	104.78	101.23	105.96	104.33	104.27	73.79	60.41	1159.52	
HSi (mm)	702.11	661.51	638.26	636.07	651.08	720.38	782.69	758.82	782.69	782.69	782.69	741.14		
C1	0.56	0.34	0.34	0.48	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.77		
C2	0.26	0.17	0.15	0.21	0.52	1.00	0.82	1.00	1.00	1.00	0.72	0.52		
HD (mm)	102.87	62.28	61.75	87.47	202.54	377.94	251.72	299.83	359.91	317.16	205.24	141.91		
ETR (mm)	40.60	23.25	24.91	35.63	81.40	104.78	92.13	105.96	104.33	104.27	63.33	39.04	819.63	
HSf (mm)	661.51	638.26	636.07	651.08	720.38	782.69	758.82	782.69	782.69	782.69	741.14	702.11		
DCC (mm)	121.18	144.43	146.62	131.61	62.31	0.00	23.87	0.00	0.00	0.00	41.55	80.58		
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	89.71	0.00	10.41	72.13	29.43	0.00	0.00	201.67	

Simbología													UM2	
fc: Capacidad de Infiltración.												P: Precipitación Media Mensual.		
I: Infiltración.												Pi: Precipitación que infiltra.		
CC: Capacidad de Campo.												ESC: Escorrentía Superficial		
PM: Punto de Marchitez.												ETP: Evapotranspiración Potencial.		
PR: Profundidad de Raíces.												ETR: Evapotranspiración Real.		
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.												HSi: Humedad de Suelo Inicial.		
DS: Densidad de Suelo.												HD: Humedad Disponible		
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR												HSf: Humedad de Suelo Final.		
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR												DCC: Déficit de Capacidad de Campo.		
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)												Rp: Recarga Potencial		
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)												Ret: Retención de lluvia		
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración														
													por peso	
fc [mm/d]	34147.50													
Kp [0.01%]	0.06													
Kv [0.01%]	0.10													
Kfc [0.01%]	1													
I [0.01%]	1													
DS (g/cm <sup>3</sup> ):	0.8800											CC	18.72	247.10
PR (mm)	1,500											PM	4.89	64.55
HSi (mm)	247.10											(CC-PM)	13.83	182.56
Nº de mes con que inicia HSi:1,2,3...12?	11													
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0.12													
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	
P (mm)	1.60	1.53	28.40	63.30	188.37	321.00	85.33	175.30	220.57	167.13	27.23	0.00	1279.76	
Ret [mm]	1.60	1.53	5.00	7.60	22.60	38.52	10.24	21.04	26.47	20.06	5.00	0.00	159.65	
Pi (mm)	0.00	0.00	23.40	55.70	165.77	282.48	75.09	154.26	194.10	147.07	22.23	0.00	1120.11	
ESC (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	
ETP (mm)	99.24	91.12	102.84	104.47	107.08	104.78	101.23	105.96	104.33	104.27	73.79	60.41	1159.52	
HSi (mm)	166.91	126.39	103.23	101.51	119.36	198.30	247.10	228.21	247.10	247.10	247.10	205.96		
C1	0.56	0.34	0.34	0.51	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.77		
C2	0.26	0.17	0.15	0.22	0.62	1.00	0.86	1.00	1.00	1.00	0.72	0.52		
HD (mm)	102.36	61.84	62.08	92.66	220.57	416.23	257.65	317.93	376.66	329.63	204.79	141.42		
ETR (mm)	40.52	23.16	25.12	37.85	86.83	104.78	93.98	105.96	104.33	104.27	63.37	39.05	829.23	
HSf (mm)	126.39	103.23	101.51	119.36	198.30	247.10	228.21	247.10	247.10	247.10	205.96	166.91		
DCC (mm)	120.71	143.88	145.60	127.75	48.81	0.00	18.89	0.00	0.00	0.00	41.14	80.19		
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	128.89	0.00	29.41	89.77	42.80	0.00	0.00	290.88	



Simbología										UM5		
fc: Capacidad de Infiltración.										P: Precipitación Media Mensual.		
l: Infiltración.										Pi: Precipitación que infiltra.		
CC: Capacidad de Campo.										ESC: Escorrentía Superficial		
PM: Punto de Marchitez.										ETP: Evapotranspiración Potencial.		
PR: Profundidad de Raíces.										ETR: Evapotranspiración Real.		
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.										HSi: Humedad de Suelo Inicial.		
DS: Densidad de Suelo.										HD: Humedad Disponible		
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR										HSF: Humedad de Suelo Final.		
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR										DCC: Déficit de Capacidad de Campo.		
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)										Rp: Recarga Potencial		
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)										Ret: Retención de Lluvia		
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración												
fc [mm/d]												
Kp [0.01%]												
Kv [0.01%]										por peso		
Kfc [0.01%]										(%)	(mm)	
l [0.01%]										CC	18.00	275.40
DS (g/cm <sup>3</sup> ):										PM	8.95	136.94
PR (mm)										(CC-PM)	9.05	138.47
HSi (mm)												
Nº de mes con que inicia HSi; 1,2,3...12?												
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12												

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	1.60	1.53	28.40	63.30	188.37	321.00	85.33	175.30	220.57	167.13	27.23	0.00	1279.76
Ret [mm]	1.60	1.53	5.00	7.60	22.60	38.52	10.24	21.04	26.47	20.06	5.00	0.00	159.65
Pi (mm)	0.00	0.00	23.40	55.70	165.77	282.48	75.09	154.26	194.10	147.07	22.23	0.00	1120.11
ESC (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
ETP (mm)	99.24	91.12	102.84	104.47	107.08	104.78	101.23	105.96	104.33	104.27	73.79	60.41	1159.52
HSi (mm)	203.25	172.75	156.94	160.07	178.73	252.10	275.40	258.82	275.40	275.40	275.40	237.58	
C1	0.48	0.26	0.31	0.57	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.73	
C2	0.14	0.09	0.08	0.14	0.73	1.00	0.81	1.00	1.00	1.00	1.00	0.63	0.41
HD (mm)	66.31	35.82	43.40	78.84	207.56	397.65	213.56	276.14	332.57	285.54	160.70	100.64	
ETR (mm)	30.50	15.81	20.26	37.04	92.39	104.78	91.67	105.96	104.33	104.27	60.05	34.33	801.41
HSF (mm)	172.75	156.94	160.07	178.73	252.10	275.40	258.82	275.40	275.40	275.40	237.58	203.25	
DCC (mm)	102.65	118.46	115.33	96.67	23.30	0.00	16.58	0.00	0.00	0.00	37.82	72.15	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	154.40	0.00	31.72	89.77	42.80	0.00	0.00	318.70

Simbología										UM6		
fc: Capacidad de Infiltración.										P: Precipitación Media Mensual.		
l: Infiltración.										Pi: Precipitación que infiltra.		
CC: Capacidad de Campo.										ESC: Escorrentía Superficial		
PM: Punto de Marchitez.										ETP: Evapotranspiración Potencial.		
PR: Profundidad de Raíces.										ETR: Evapotranspiración Real.		
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.										HSi: Humedad de Suelo Inicial.		
DS: Densidad de Suelo.										HD: Humedad Disponible		
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR										HSF: Humedad de Suelo Final.		
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR										DCC: Déficit de Capacidad de Campo.		
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)										Rp: Recarga Potencial		
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)										Ret: Retención de Lluvia		
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración												
fc [mm/d]												
Kp [0.01%]												
Kv [0.01%]										por peso		
Kfc [0.01%]										(%)	(mm)	
l [0.01%]										CC	26.84	273.77
DS (g/cm <sup>3</sup> ):										PM	14.52	148.10
PR (mm)										(CC-PM)	12.32	125.66
HSi (mm)												
Nº de mes con que inicia HSi; 1,2,3...12?												
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12												

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	1.60	1.53	28.40	63.30	188.37	321.00	85.33	175.30	220.57	167.13	27.23	0.00	1279.76
Ret [mm]	1.60	1.53	5.00	7.60	22.60	38.52	10.24	21.04	26.47	20.06	5.00	0.00	159.65
Pi (mm)	0.00	0.00	23.40	55.70	165.77	282.48	75.09	154.26	194.10	147.07	22.23	0.00	1120.11
ESC (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
ETP (mm)	99.24	91.12	102.84	104.47	107.08	104.78	101.23	105.96	104.33	104.27	73.79	60.41	1159.52
HSi (mm)	204.76	177.68	164.01	168.41	187.19	257.76	273.77	258.16	273.77	273.77	273.77	237.35	
C1	0.45	0.24	0.31	0.60	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.71	
C2	0.09	0.06	0.06	0.10	0.78	1.00	0.79	1.00	1.00	1.00	1.00	0.59	0.37
HD (mm)	56.65	29.58	39.31	76.01	204.85	392.13	200.75	264.32	319.77	272.74	147.89	89.24	
ETR (mm)	27.07	13.67	19.01	36.92	95.20	104.78	90.70	105.96	104.33	104.27	58.65	32.59	793.15
HSF (mm)	177.68	164.01	168.41	187.19	257.76	273.77	258.16	273.77	273.77	273.77	237.35	204.76	
DCC (mm)	96.09	109.76	105.36	86.58	16.01	0.00	15.61	0.00	0.00	0.00	36.42	69.01	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	161.69	0.00	32.69	89.77	42.80	0.00	0.00	326.96



Simbología										UM9		
fc: Capacidad de Infiltración.										P: Precipitación Media Mensual.		
l: Infiltración.										Pi: Precipitación que infiltra.		
CC: Capacidad de Campo.										ESC: Escorrentía Superficial		
PM: Punto de Marchitez.										ETP: Evapotranspiración Potencial.		
PR: Profundidad de Raíces.										ETR: Evapotranspiración Real.		
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.										HSi: Humedad de Suelo Inicial.		
DS: Densidad de Suelo.										HD: Humedad Disponible		
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR										HSF: Humedad de Suelo Final.		
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR										DCC: Déficit de Capacidad de Campo.		
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)										Rp: Recarga Potencial		
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)										Ret: Retención de Lluvia		
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración												
fc [mm/d]												
Kp [0.01%]												
Kv [0.01%]												
Kfc [0.01%]										por peso		
l [0.01%]										(%)	(mm)	
DS (g/cm³):										CC	22.74	334.28
PR (mm)										PM	7.62	112.01
HSi (mm)										(CC-PM)	15.12	222.26
Nº de mes con que inicia HSi; 1,2,3...12?												
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12												

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	1.60	1.53	28.40	63.30	188.37	321.00	85.33	175.30	220.57	167.13	27.23	0.00	1279.76
Ret [mm]	1.60	1.53	5.00	7.60	22.60	38.52	10.24	21.04	26.47	20.06	5.00	0.00	159.65
Pi (mm)	0.00	0.00	23.40	55.70	165.77	282.48	75.09	154.26	194.10	147.07	22.23	0.00	1120.11
ESC (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
ETP (mm)	99.24	91.12	102.84	104.47	107.08	104.78	101.23	105.96	104.33	104.27	73.79	60.41	1159.52
HSi (mm)	249.18	201.61	172.41	166.00	182.27	263.43	334.28	314.09	334.28	334.28	334.28	291.28	
C1	0.62	0.40	0.38	0.49	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.81
C2	0.34	0.24	0.20	0.26	0.58	1.00	0.88	1.00	1.00	1.00	1.00	0.77	0.59
HD (mm)	137.16	89.59	83.79	109.69	236.02	433.90	297.35	356.34	416.37	369.34	244.49	179.26	
ETR (mm)	47.57	29.20	29.80	39.44	84.60	104.78	95.28	105.96	104.33	104.27	65.23	42.10	852.56
HSF (mm)	201.61	172.41	166.00	182.27	263.43	334.28	314.09	334.28	334.28	334.28	291.28	249.18	
DCC (mm)	132.67	161.87	168.27	152.01	70.85	0.00	20.19	0.00	0.00	0.00	43.00	85.10	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	106.85	0.00	28.12	89.77	42.80	0.00	0.00	267.55

Simbología										UM10		
fc: Capacidad de Infiltración.										P: Precipitación Media Mensual.		
l: Infiltración.										Pi: Precipitación que infiltra.		
CC: Capacidad de Campo.										ESC: Escorrentía Superficial		
PM: Punto de Marchitez.										ETP: Evapotranspiración Potencial.		
PR: Profundidad de Raíces.										ETR: Evapotranspiración Real.		
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.										HSi: Humedad de Suelo Inicial.		
DS: Densidad de Suelo.										HD: Humedad Disponible		
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR										HSF: Humedad de Suelo Final.		
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR										DCC: Déficit de Capacidad de Campo.		
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)										Rp: Recarga Potencial		
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)										Ret: Retención de Lluvia		
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración												
fc [mm/d]												
Kp [0.01%]												
Kv [0.01%]												
Kfc [0.01%]										por peso		
l [0.01%]										(%)	(mm)	
DS (g/cm³):										CC	24.69	499.97
PR (mm)										PM	9.67	195.82
HSi (mm)										(CC-PM)	15.02	304.16
Nº de mes con que inicia HSi; 1,2,3...12?												
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12												

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	1.60	1.53	28.40	63.30	188.37	321.00	85.33	175.30	220.57	167.13	27.23	0.00	1279.76
Ret [mm]	1.60	1.53	5.00	7.60	22.60	38.52	10.24	21.04	26.47	20.06	5.00	0.00	159.65
Pi (mm)	0.00	0.00	23.40	55.70	165.77	282.48	75.09	154.26	194.10	147.07	22.23	0.00	1120.11
ESC (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
ETP (mm)	99.24	91.12	102.84	104.47	107.08	104.78	101.23	105.96	104.33	104.27	73.79	60.41	1159.52
HSi (mm)	408.36	350.33	310.97	295.44	306.96	392.40	499.97	478.18	499.97	499.97	499.97	454.67	
C1	0.70	0.51	0.46	0.51	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.85
C2	0.47	0.36	0.30	0.34	0.59	1.00	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	0.83	0.68
HD (mm)	212.54	154.51	138.55	155.33	276.91	479.06	379.25	436.63	498.26	451.23	326.39	258.85	
ETR (mm)	58.04	39.35	38.93	44.19	80.33	104.78	96.88	105.96	104.33	104.27	67.54	46.31	890.89
HSF (mm)	350.33	310.97	295.44	306.96	392.40	499.97	478.18	499.97	499.97	499.97	454.67	408.36	
DCC (mm)	149.65	189.00	204.53	193.01	107.58	0.00	21.79	0.00	0.00	0.00	45.31	91.61	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	70.12	0.00	26.51	89.77	42.80	0.00	0.00	229.22

Simbología UM11

fc: Capacidad de Infiltración.  
 I: Infiltración.  
 CC: Capacidad de Campo.  
 PM: Punto de Marchitez.  
 PR: Profundidad de Raíces.  
 (CC-PM): Rango de Agua Disponible.  
 DS: Densidad de Suelo.  
 C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR  
 C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR  
 Kp: Factor por pendiente ( ver léame)  
 Kv: Factor por vegetación ( ver léame)  
 Kf: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

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  
 Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	53371.76
Kp [0.01%]	0.60
Kv [0.01%]	0.10
Kfc [0.01%]	1
I [0.01%]	1
DS (g/cm <sup>3</sup> ):	1.8750
PR (mm)	1,500
HSi (mm)	795.66
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	11
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.12	0.12

por peso	
	(%) (mm)
CC	28.29 795.66
PM	15.84 445.50
(CC-PM)	12.45 350.16

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	1.60	1.53	28.40	63.30	188.37	321.00	85.33	175.30	220.57	167.13	27.23	0.00	1279.76
Ret [mm]	1.60	1.53	5.00	7.60	22.60	38.52	10.24	21.04	26.47	20.06	5.00	0.00	159.65
Pi (mm)	0.00	0.00	23.40	55.70	165.77	282.48	75.09	154.26	194.10	147.07	22.23	0.00	1120.11
ESC (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
ETP (mm)	99.24	91.12	102.84	104.47	107.08	104.78	101.23	105.96	104.33	104.27	73.79	60.41	1159.52
HSi (mm)	701.60	639.30	595.43	575.40	583.99	670.94	795.66	773.30	795.66	795.66	795.66	749.53	
C1	0.73	0.55	0.50	0.53	0.87	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.87	
C2	0.52	0.41	0.35	0.37	0.60	1.00	0.93	1.00	1.00	1.00	0.85	0.72	
HD (mm)	256.10	193.80	173.33	185.61	304.26	507.92	425.25	482.06	544.26	497.23	372.39	304.03	
ETR (mm)	62.30	43.87	43.43	47.12	78.82	104.78	97.45	105.96	104.33	104.27	68.36	47.93	908.61
HSf (mm)	639.30	595.43	575.40	583.99	670.94	795.66	773.30	795.66	795.66	795.66	749.53	701.60	
DCC (mm)	156.35	200.22	220.26	211.67	124.72	0.00	22.36	0.00	0.00	0.00	46.13	94.05	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	52.98	0.00	25.94	89.77	42.80	0.00	0.00	211.50

### 13.3 PRUEBAS DE INFILTRACIÓN

No.	1		bosque mixto				infiltración cm/h
No.	(A) Hora	(B) Minuto	(C) Tiempo	(D) Lectura	(E) Diferencia	(F) Infiltración	
1	08:00	0	0	20	0	0	0
2		1	1	8	12	720	720
3		0	1	20	0	0	0
4		1	2	9.5	10.5	630	630
5		0	2	20	0	630	0
6		1	3	11.2	8.8	528	528
7		0	3	20	0	528	0
8		1	4	12.5	7.5	450	450
9		1	5	5.8	6.7	402	402
10		0	5	20	0	402	0
11		1	6	14	6	360	360
12		1	7	8.7	5.3	318	318
13		0	7	20	5.3	318	0
14		1	8	15	5	300	300
15		1	9	10.2	4.8	288	288
16		1	10	5.3	4.9	294	294
17		0	10	20	4.7	282	0
18		1	11	15.8	4.2	252	252
19		1	12	12	3.8	228	228
20		1	13	8.8	3.2	192	192
21		1	14	6	2.8	168	168
22		0	14	20	2.8	168	0
23		2	16	14.4	5.6	168	168
24		2	18	8.8	5.6	168	168
25		0	18	20	5.6	168	0
26		2	20	14.8	5.2	156	156
27		2	22	9.8	5	150	150
28		2	24	5	4.8	144	144
29		0	24	20	4.8	144	0
30		2	26	15.5	4.5	135	135
31		2	28	11.3	4.2	126	126
32		2	30	7.3	4	120	120
33		0	30	20	4	120	0
34		2	32	16.2	3.8	114	114
35		2	34	12.5	3.7	111	111
36		2	36	9	3.5	105	105
37		2	38	5.8	3.2	96	96
38		0	38	20	3.2	96	0
39		3	41	15.3	4.7	94	94
40		3	44	10.8	4.5	90	90
41		3	47	6.5	4.3	86	86
42		0	47	20	4.3	86	0
43		3	50	16	4	80	80
44		3	53	12.7	3.3	66	66
45		3	56	9.5	3.2	64	64
46		3	59	6.5	3	60	60
47		0	59	20	3	60	0
48		5	64	14.6	5.4	64.8	64.8
49		5	69	9.4	5.2	62.4	62.4
50		5	74	4.3	5.1	61.2	61.2
51		0	74	20	5.1	61.2	0
52		5	79	15.2	4.8	57.6	57.6
53		5	84	10.6	4.6	55.2	55.2
54		5	89	6.3	4.3	51.6	51.6
55		0	89	20	4.3	51.6	0
56		5	94	16	4	48	48
57		5	99	12.3	3.7	44.4	44.4
58		5	104	8.8	3.5	42	42
59		5	109	5.5	3.3	39.6	39.6
60		0	109	20	3.3	39.6	0
61		5	114	17	3	36	36
62		5	119	14.3	2.7	32.4	32.4
63		5	124	11.8	2.5	30	30
64		5	129	9.5	2.3	27.6	27.6
65		5	134	7.5	2	24	24
66		5	139	5.8	1.7	20.4	20.4

No.	2					
Tipo de cobertura vegetal:			Granos básicos (maíz y frijol)			
No.	(A) Hora	(B) Minutos entre Lecturas	(C) Tiempo Acumul ado en Minutos	(D) Lectura en Centíme tros	(E) Difere ncia entre Lectura s (cm)	(F) Infiltració n (cm/hora)
1	08:00	0	0	20	0	0
2		1	1	9	11	660
3		0	1	20	0	660
4		1	2	9.5	10.5	630
5		0	2	20	0	630
6		1	3	10.3	9.7	582
7		0	3	20	0	582
8		1	4	11	9	540
9		0	4	20	0	540
10		1	5	11.8	8.2	492
11		0	5	20	0	492
12		1	6	12.4	7.6	456
13		0	6	20	0	456
14		1	7	13	7	420
15		1	8	6.4	6.6	396
16		0	8	20	0	396
17		1	9	14	6	360
18		1	10	8.2	5.8	348
19		0	10	20	0	348
20		1	11	14.8	5.2	312
21		1	12	10.2	4.6	276
22		1	13	6.3	3.9	234
23		0	13	20	0	234
24		1	14	16.5	3.5	210
25		1	15	14	2.5	150
26		1	16	12	2	120
27		1	17	10.5	1.5	90
28		1	18	9.3	1.2	72
29		2	20	7	2.3	69
30		0	20	20	0	69
31		2	22	18.2	1.8	54
32		2	24	16.8	1.4	42
33		2	26	16	0.8	24
34		3	29	13.8	2.2	44
35		3	32	12	1.8	36
36		3	35	10.5	1.5	30
37		3	38	9.2	1.3	26
38		3	41	8.3	0.9	18
39		0	41	20	0	18
40		5	46	15.8	4.2	50.4
41		5	51	12	3.8	45.6
42		5	56	8.8	3.2	38.4
43		5	61	6.3	2.5	30
44		0	61	20	0	30
45		5	66	17.8	2.2	26.4
46		5	71	16	1.8	21.6
47		5	76	14.3	1.7	20.4
48		5	81	12.8	1.5	18
49		5	86	11.5	1.3	15.6
50		5	91	10.3	1.2	14.4

No.	3
Tipo de cobertura vegetal:	Vegetación arbustiva baja

No.	(A) Hora	(B) Minutos entre Lecturas	(C) Tiempo Acumulado o en Minutos	Lectura en Centímetros	(E) Diferencia entre Lecturas (cm)	(F) Infiltración (cm/hora)
1	08:00	0	0	20	0	0
2		1	1	9.3	10.7	642
3		0	1	20	0	642
4		1	2	9.8	10.2	612
5		0	2	20	0	612
6		1	3	10.3	9.7	582
7		0	3	20	0	582
8		1	4	10.8	9.2	552
9		0	4	20	0	552
10		1	5	11.3	8.7	522
11		0	5	20	0	522
12		1	6	12	8	480
13		0	6	20	0	480
14		1	7	12.6	7.4	444
15		1	8	5.5	7.1	426
16		0	8	20	0	426
17		1	9	13.2	6.8	408
18		1	10	7	6.2	372
19		0	10	20	0	372
20		1	11	14.2	5.8	348
21		1	12	8.8	5.4	324
22		0	12	20	0	324
23		1	13	15	5	300
24		1	14	10.3	4.7	282
25		1	15	6	4.3	258
26		0	15	20	0	258
27		1	16	16.2	3.8	228
28		1	17	12.8	3.4	204
29		1	18	9.5	3.3	198
30		1	19	6.6	2.9	174
31		0	19	20	0	174
32		2	21	14.5	5.5	165
33		2	23	9.6	4.9	147
34		2	25	5	4.6	138
35		0	25	20	0	138
36		2	27	16	4	120
37		2	29	12.3	3.7	111
38		2	31	8.8	3.5	105
39		2	33	5.6	3.2	96
40		0	33	20	0	96
41		2	35	17.2	2.8	84
42		2	37	14.6	2.6	78
43		2	39	12.2	2.4	72
44		2	41	10	2.2	66
45		2	43	8.3	1.7	51
46		2	45	6.8	1.5	45
47		2	47	5.5	1.3	39
48		0	47	20	0	39
49		3	50	16.3	3.7	74
50		3	53	12.8	3.5	70
51		3	56	9.6	3.2	64
52		3	59	6.6	3	60
53		0	59	20	0	60
54		3	62	17.3	2.7	54
55		3	65	14.8	2.5	50
56		3	68	12.5	2.3	46
57		3	71	10.5	2	40
58		3	74	8.8	1.7	34
59		3	77	7.5	1.3	26
60		3	80	6.5	1	20

No.	4
Tipo de cobertura vegetal:	
Bosque de coníferas	

No.	(A) Hora	(B) Minutos entre Lecturas	(C) Tiempo Acumulado en Minutos	(D) Lectura en Centímetros	(E) Diferencia entre Lecturas (cm)	(F) Infiltración (cm/hora)
1	08:00	0	0	20	0	0
2		1	1	9.3	10.7	642
3		0	1	20	0	642
4		1	2	10.2	9.8	588
5		0	2	20	0	588
6		1	3	11	9	540
7		0	3	20	0	540
8		1	4	11.6	8.4	504
9		0	4	20	0	504
10		1	5	12	8	480
11		0	5	20	0	480
12		1	6	12.6	7.4	444
13		1	7	5.5	7.1	426
14		0	7	20	0	426
15		1	8	13.4	6.6	396
16		1	9	7.3	6.1	366
17		0	9	20	0	366
18		1	10	14.2	5.8	348
19		1	11	8.8	5.4	324
20		0	11	20	0	324
21		1	12	14.8	5.2	312
22		1	13	10	4.8	288
23		1	14	5.5	4.5	270
24		0	14	20	0	270
25		1	15	15.8	4.2	252
26		1	16	12	3.8	228
27		1	17	8.5	3.5	210
28		1	18	5.2	3.3	198
29		0	18	20	0	198
30		1	19	17	3	180
31		1	20	14.2	2.8	168
32		1	21	11.8	2.4	144
33		1	22	9.8	2	120
34		1	23	8	1.8	108
35		1	24	6.5	1.5	90
36		0	24	20	0	90
37		2	26	17.2	2.8	84
38		2	28	14.5	2.7	81
39		2	30	12	2.5	75
40		2	32	9.8	2.2	66
41		2	34	7.8	2	60
42		2	36	6	1.8	54
43		0	36	20	0	54
44		3	39	14.8	5.2	104
45		3	42	9.8	5	100
46		0	42	20	0	100
47		3	45	15.3	4.7	94
48		3	48	10.8	4.5	90
49		3	51	6.5	4.3	86
50		0	51	20	0	86
51		3	54	16	4	80
52		3	57	12.3	3.7	74
53		3	60	8.8	3.5	70
54		3	63	5.5	3.3	66
55		0	63	20	0	66
56		4	67	15.8	4.2	63
57		4	71	11.8	4	60
58		4	75	8	3.8	57
59		0	75	20	0	57
60		5	80	15.8	4.2	50.4
61		5	85	11.3	4.5	54
62		5	90	7	4.3	51.6
63		0	90	20	0	51.6
64		5	95	16.2	3.8	45.6
65		5	100	12.6	3.6	43.2

No.	5
Tipo de cobertura vegetal:	Otras hortalizas

No.	(A) Hora	(B) Minutos entre Lecturas	(C) Tiempo Acumulado en Minutos	(D) Lectura en Centímetros	(E) Diferencia entre Lecturas (cm)	(F) Infiltración (cm/hora)
1	08:00	0	0	20	0	0
2		1	1	7.3	12.7	762
3		0	1	20	0	762
4		1	2	7.5	12.5	750
5		0	2	20	0	750
6		1	3	7.8	12.2	732
7		0	3	20	0	732
8		1	4	8.3	11.7	702
9		0	4	20	0	702
10		1	5	8.6	11.4	684
11		0	5	20	0	684
12		1	6	9	11	660
13		0	6	20	0	660
14		1	7	9.5	10.5	630
15		0	7	20	0	630
16		1	8	10.2	9.8	588
17		0	8	20	0	588
18		1	9	10.6	9.4	564
19		0	9	20	0	564
20		1	10	11.2	8.8	528
21		0	10	20	0	528
22		1	11	11.5	8.5	510
23		0	11	20	0	510
24		1	12	12.2	7.8	468
25		0	12	20	0	468
26		1	13	12.6	7.4	444
27		1	14	5.5	7.1	426
28		0	14	20	0	426
29		1	15	13	7	420
30		1	16	6.3	6.7	402
31		0	16	20	0	402
32		1	17	13.6	6.4	384
33		1	18	7.5	6.1	366
34		0	18	20	0	366
35		1	19	14.2	5.8	348
36		1	20	8.8	5.4	324
37		0	20	20	0	324
38		1	21	15	5	300
39		1	22	10.3	4.7	282
40		1	23	5.8	4.5	270
41		0	23	20	0	270
42		1	24	15.8	4.2	252
43		1	25	11.8	4	240
44		1	26	8	3.8	228
45		1	27	4.5	3.5	210
46		0	27	20	0	210
47		1	28	16.8	3.2	192
48		1	29	13.8	3	180
49		1	30	11	2.8	168
50		1	31	8.5	2.5	150
51		1	32	6.2	2.3	138
52		0	32	20	0	138
53		2	34	15.5	4.5	135
54		2	36	11.2	4.3	129
55		2	38	7	4.2	126
56		0	38	20	0	126
57		2	40	16.3	3.7	111
58		2	42	12.8	3.5	105
59		2	44	9.5	3.3	99
60		2	46	6.6	2.9	87
61		0	46	20	0	87
62		2	48	17.2	2.8	84
63		2	50	14.6	2.6	78
64		2	52	12.3	2.3	69
65		2	54	10.2	2.1	63
66		2	56	8.5	1.7	51
67		2	58	7	1.5	45
68		0	58	20	0	45
69		4	62	17.2	2.8	42
70		4	66	14.6	2.6	39
71		4	70	12.3	2.3	34.5
72		4	74	10.2	2.1	31.5
73		4	78	8.3	1.9	28.5
74		4	82	6.6	1.7	25.5
75		4	86	5	1.6	24
76		0	86	20	0	24
77		5	91	18.3	1.7	20.4
78		5	96	16.8	1.5	18
79		5	101	15.5	1.3	15.6

No.	6
Tipo de cobertura vegetal:	
pasto natural	

No.	(A) Hora	(B) Minutos entre Lecturas	(C) Tiempo Acumulado en Minutos	(D) Lectura en Centímetros	(E) Diferencia entre Lecturas (cm)	(F) Infiltración (cm/hora)
1	08:00	0	0	20	0	0
2		1	1	7.5	12.5	750
3		0	1	20	0	750
4		1	2	8.3	11.7	702
5		0	2	20	0	702
6		1	3	8.6	11.4	684
7		0	3	20	0	684
8		1	4	9	11	660
9		0	4	20	0	660
10		1	5	9.5	10.5	630
11		0	5	20	0	630
12		1	6	9.8	10.2	612
13		0	6	20	0	612
14		1	7	10.2	9.8	588
15		0	7	20	0	588
16		1	8	10.6	9.4	564
17		0	8	20	0	564
18		1	9	11	9	540
19		0	9	20	0	540
20		1	10	11.5	8.5	510
21		0	10	20	0	510
22		1	11	11.8	8.2	492
23		0	11	20	0	492
24		1	12	12.2	7.8	468
25		0	12	20	0	468
26		1	13	12.5	7.5	450
27		0	13	20	0	450
28		1	14	13	7	420
29		1	15	6.2	6.8	408
30		0	15	20	0	408
31		1	16	13.5	6.5	390
32		1	17	7.3	6.2	372
33		0	17	20	0	372
34		1	18	14.2	5.8	348
35		1	19	8.8	5.4	324
36		0	19	20	0	324
37		1	20	15	5	300
38		1	21	10.6	4.4	264
39		1	22	6.5	4.1	246
40		0	22	20	0	246
41		1	23	16.4	3.6	216
42		1	24	13.2	3.2	192
43		1	25	10.4	2.8	168
44		1	26	8	2.4	144
45		1	27	6	2	120
46		0	27	20	0	120
47		2	29	16.2	3.8	114
48		2	31	12.8	3.4	102
49		2	33	9.8	3	90
50		2	35	7	2.8	84
51		2	37	4.5	2.5	75
52		0	37	20	0	75
53		3	40	16.5	3.5	70
54		3	43	13.4	3.1	62
55		3	46	10.5	2.9	58
56		3	49	7.8	2.7	54
57		3	52	5.3	2.5	50
58		0	52	20	0	50
59		4	56	17	3	45
60		4	60	14.3	2.7	40.5
61		4	64	11.8	2.5	37.5
62		4	68	9.6	2.2	33
63		4	72	7.8	1.8	27
64		4	76	6.3	1.5	22.5
65		4	80	5	1.3	19.5

No.	7
Tipo de cobertura vegetal:	
bosques de coniferas	

No.	(A) Hora	(B) Minutos entre Lecturas	(C) Tiempo Acumulado en Minutos	(D) Lectura en Centímetros	(E) Diferencia entre Lecturas (cm)	(F) Infiltración (cm/hora)
1	08:00	0	0	20	0	0
2		1	1	8.5	11.5	690
3		0	1	20	0	690
4		1	2	9.2	10.8	648
5		0	2	20	0	648
6		1	3	9.5	10.5	630
7		0	3	20	0	630
8		1	4	10	10	600
9		0	4	20	0	600
10		1	5	10.6	9.4	564
11		0	5	20	0	564
12		1	6	11	9	540
13		0	6	20	0	540
14		1	7	11.4	8.6	516
15		0	7	20	0	516
16		1	8	11.8	8.2	492
17		0	8	20	0	492
18		1	9	12.2	7.8	468
19		0	9	20	0	468
20		1	10	12.6	7.4	444
21		0	10	20	0	444
22		1	11	13	7	420
23		0	11	20	0	420
24		1	12	13.4	6.6	396
25		1	13	7.2	6.2	372
26		0	13	20	0	372
27		1	14	14.3	5.7	342
28		1	15	9.8	4.5	270
29		0	15	20	0	270
30		1	16	15.8	4.2	252
31		1	17	12	3.8	228
32		1	18	8.5	3.5	210
33		1	19	5.5	4	240
34		0	19	20	0	240
35		2	21	12.3	7.7	231
36		2	23	5	7.3	219
37		0	23	20	0	219
38		2	25	13	7	210
39		2	27	6.5	6.5	195
40		0	27	20	0	195
41		2	29	13.8	6.2	186
42		2	31	8	5.8	174
43		0	31	20	0	174
44		2	33	14.6	5.4	162
45		2	35	9.7	4.9	147
46		0	35	20	0	147
47		2	37	15.6	3	90
48		2	39	13	2.6	78
49		2	41	10.8	2.2	66
50		2	43	9	1.8	54
51		2	45	7.5	1.5	45
52		0	45	20	0	45
53		3	48	16.2	3.8	76
54		3	51	13	3.2	64
55		3	54	10.2	2.8	56
56		3	57	7.8	2.4	48
57		3	60	5.8	2	40
58		0	60	20	0	40
59		5	65	16.3	3.7	44.4
60		5	70	12.8	3.3	39.6
61		5	75	9.8	3	36
62		5	80	7	2.8	33.6

No.	8		Bosque mixto			
Tipo de cobertura vegetal:			Bosque mixto			
No.	(A) Hora	(B) Minutos entre Lecturas	(C) Tiempo Acumulado en Minutos	(D) Lectura en Centímetros	(E) Diferencia entre Lecturas (cm)	(F) Infiltración (cm/hora)
1	08:00	0	0	20	0	0
2		1	1	5.8	14.2	852
3		0	1	20	0	852
4		1	2	6.3	13.7	822
5		0	2	20	0	822
6		1	3	6.8	13.2	792
7		0	3	20	0	792
8		1	4	7.3	12.7	762
9		0	4	20	0	762
10		1	5	7.8	12.2	732
11		0	5	20	0	732
12		1	6	8.3	11.7	702
13		0	6	20	0	702
14		1	7	8.8	11.2	672
15		0	7	20	0	672
16		1	8	9.3	10.7	642
17		0	8	20	0	642
18		1	9	9.6	10.4	624
19		0	9	20	0	624
20		1	10	10	10	600
21		0	10	20	0	600
22		1	11	10.3	9.7	582
23		0	11	20	0	582
24		1	12	10.8	9.2	552
25		0	12	20	0	552
26		1	13	11.4	8.6	516
27		0	13	20	0	516
28		1	14	11.7	8.3	498
29		0	14	20	0	498
30		1	15	12.2	7.8	468
31		0	15	20	0	468
32		1	16	12.6	7.4	444
33		1	17	5.5	7.1	426
34		0	17	20	0	426
35		1	18	13.3	6.7	402
36		1	19	7	6.3	378
37		0	19	20	0	378
38		1	20	14	6	360
39		1	21	8.4	5.6	336
40		0	21	20	0	336
41		1	22	14.8	5.2	312
42		1	23	10	4.8	288
43		0	23	20	0	288
44		1	24	15.5	4.5	270
45		1	25	11.3	4.2	252
46		1	26	7.5	3.8	228
47		0	26	20	0	228
48		1	27	16.5	3.5	210
49		1	28	13.2	3.3	198
50		1	29	10.2	3	180
51		1	30	7.6	2.6	156
52		1	31	5.3	2.3	138
53		0	31	20	0	138
54		2	33	16.2	3.8	114
55		2	35	13	3.2	96
56		2	37	10.2	2.8	84
57		2	39	7.8	2.4	72
58		2	41	5.8	2	60
59		0	41	20	0	60
60		3	44	17.4	2.6	52
61		3	47	15.2	2.2	44
62		3	50	13.4	1.8	36
63		3	53	12	1.4	28
64		3	56	10.8	1.2	24
65		3	59	9.8	1	20
66		3	62	9	0.8	16

No.	9
Tipo de cobertura vegetal:	Granos basicos

No.	(A) Hora	(B) Minutos entre Lecturas	(C) Tiempo Acumulado en Minutos	(D) Lectura en Centímetros	(E) Diferencia entre Lecturas (cm)	(F) Infiltración (cm/hora)
1	08:00	0	0	20	0	0
2		1	1	5.8	14.2	852
3		0	1	20	0	825
4		1	2	6.4	13.6	816
5		0	2	20	0	816
6		1	3	7	13	780
7		0	3	20	0	0
8		1	4	7.5	12.5	750
9		0	4	20	0	750
10		1	5	8	12	720
11		0	5	20	0	720
12		1	6	8.6	11.4	684
13		0	6	20	0	684
14		1	7	9.2	10.8	648
15		0	7	20	0	648
16		1	8	9.8	10.2	612
17		0	8	20	0	612
18		1	9	10.2	9.8	588
19		0	9	20	0	588
20		1	10	10.7	9.3	558
21		0	10	20	0	558
22		1	11	11.3	8.7	522
23		0	11	20	0	522
24		1	12	12	8	480
25		0	12	20	0	480
26		1	13	12.6	7.4	444
27		0	13	20	0	444
28		1	14	13.3	6.7	402
29		0	14	20	0	144
30		1	15	14	6	360
31		1	16	8.6	5.4	324
32		0	16	20	0	324
33		1	17	15.2	4.8	288
34		1	18	10.8	4.4	264
35		1	19	6.9	3.9	234
36		0	19	20	0	234
37		1	20	16.5	3.5	210
38		1	21	13.3	3.2	192
39		1	22	10.5	2.8	168
40		1	23	8	2.5	150
41		1	24	5.8	2.2	132
42		0	24	20	0	86
43		2	26	15.8	4.2	126
44		2	28	12	3.8	114
45		2	30	8.5	3.5	105
46		2	32	5.2	3.3	99
47		0	32	20	0	60
48		2	34	16.8	3.2	96
49		2	36	14	2.8	84
50		2	38	11.5	2.5	75
51		2	40	9.3	2.2	66
52		2	42	7.3	2	60
53		2	44	5.5	1.8	54
54		0	44	20	0	54
55		3	47	17.6	2.4	48
56		3	50	15.5	2.1	42
57		3	53	13.7	1.8	36
58		3	56	12.2	1.5	30
59		3	59	11	1.2	24
60		3	60	10	1	20
61		3	63	9.3	0.7	14
62		3	66	8.8	0.5	10
63		3	69	8.3	0.5	10
64		3	72	7.8	0.5	10
65		3	75	7.4	0.4	8
66		3	78	7	0.4	8

No.	10					
Tipo de cobertura vegetal:		vegetación arbustiva baja				
No.	(A) Hora	(B) Minutos entre Lecturas	(C) Tiempo Acumulado en Minutos	(D) Lectura en Centímetros	(E) Diferencia entre Lecturas (cm)	(F) Infiltración (cm/hora)
1	08:00	0	0	20	0	0
2		1	1	6.3	13.7	822
3		0	1	20	0	0
4		1	2	7	13	780
5		0	2	20	0	0
6		1	3	7.5	12.5	750
7		0	3	20	0	0
8		1	4	8.2	11.8	708
9		0	4	20	0	0
10		1	5	8.6	11.4	684
11		0	5	20	0	0
12		1	6	9.2	10.8	648
13		0	6	20	0	0
14		1	7	9.7	10.3	618
15		0	7	20	0	0
16		1	8	10	10	600
17		0	8	20	0	0
18		1	9	10.6	9.4	564
19		0	9	20	0	0
20		1	10	11.2	8.8	528
21		0	10	20	0	0
22		1	11	11.6	8.4	504
23		0	11	20	0	0
24		1	12	12.2	7.8	468
25		0	12	20	0	0
26		1	13	13	7	420
27		1	14	6.5	6.5	390
28		0	14	20	0	0
29		1	15	14	6	360
30		1	16	8.6	5.4	324
31		0	16	20	0	0
32		1	17	15	5	300
33		1	18	10.4	4.6	276
34		1	19	6.6	3.8	228
35		0	19	20	0	0
36		1	20	16.8	3.2	192
37		1	21	14	2.8	168
38		1	22	11.6	2.4	144
39		1	23	9.5	2.1	126
40		1	24	7.8	1.7	102
41		1	25	6.4	1.4	84
42		1	26	5.2	1.2	72
43		0	26	20	0	0
44		2	28	17.8	2.2	66
45		2	30	15.8	2	60
46		2	32	14	1.8	54
47		2	34	12.5	1.5	45
48		2	36	11.2	1.3	39
49		2	38	10.2	1	30
50		2	40	9.4	0.8	24
51		2	42	8.7	0.7	21
52		2	44	8.1	0.6	18
53		2	46	7.6	0.5	15
54		2	48	7.2	0.4	12
55		2	50	6.8	0.4	12
56		2	52	6.3	0.5	15
57		2	54	5.8	0.5	15
58		2	56	5.4	0.4	12

No.	11
Tipo de cobertura vegetal:	otras hortalizas

No.	(A) Hora	(B) Minutos entre Lecturas	(C) Tiempo Acumulado en Minutos	(D) Lectura en Centímetros	(E) Diferencia entre Lecturas (cm)	(F) Infiltración (cm/hora)
1	08:00	0	0	20	0	0
2		1	1	5.8	14.2	852
3		0	1	20	0	0
4		1	2	6.3	13.7	822
5		0	2	20	0	0
6		1	3	6.8	13.2	792
7		0	3	20	0	0
8		1	4	7.3	12.7	762
9		0	4	20	0	0
10		1	5	7.8	12.2	732
11		0	5	20	0	0
12		1	6	8.3	11.7	702
13		0	6	20	0	0
14		1	7	8.8	11.2	672
15		0	7	20	0	0
16		1	8	9.3	10.7	642
17		0	8	20	0	0
18		1	9	9.6	10.4	624
19		0	9	20	0	0
20		1	10	10	10	600
21		0	10	20	0	0
22		1	11	10.4	9.6	576
23		0	11	20	0	0
24		1	12	10.8	9.2	552
25		0	12	20	0	0
26		1	13	11.2	8.8	528
27		0	13	20	0	0
28		1	14	11.8	8.2	492
29		0	14	20	0	0
30		1	15	12.3	7.7	462
31		0	15	20	0	0
32		1	16	12.8	7.2	432
33		1	17	6	6.8	408
34		0	17	20	0	0
35		1	18	12.5	7.5	450
36		1	19	5.4	7.1	426
37		0	19	20	0	0
38		1	20	13.4	6.6	396
39		1	21	7.3	6.1	366
40		0	21	20	0	0
41		1	22	14.4	5.6	336
42		1	23	9.2	5.2	312
43		0	23	20	0	0
44		1	24	15.2	4.8	288
45		1	25	11	4.2	252
46		1	26	7.2	3.8	228
47		0	26	20	0	0
48		1	27	16.5	3.5	210
49		1	28	13.4	3.1	186
50		1	29	10.6	2.8	168
51		1	30	8.2	2.4	144
52		1	31	6.2	2	120
53		0	31	20	0	0
54		2	33	16.2	3.8	114
55		2	35	13	3.2	96
56		2	37	10.4	2.6	78
57		2	39	8.4	2	60
58		2	41	7	1.4	42
59		2	43	6.2	0.8	24
60		0	43	20	0	0
61		3	46	18.2	1.8	36
62		3	49	16.8	1.4	28
63		3	52	15.7	1.1	22
64		3	55	14.8	0.9	18
65		3	58	13.8	1	20
66		3	61	13	0.8	16
67		3	64	12.3	0.7	14
68		3	67	11.7	0.6	12
69		3	70	11.2	0.5	10