



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SUELO Y SU EFECTO
EN LA REGULACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO, EN LA CUENCA DEL RÍO
TACANÁ**

Lucía Fabiola Quiroa Garnica

Asesorado por el Ing. Julio Roberto Luna Aroche

Guatemala, noviembre de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SUELO Y SU EFECTO
EN LA REGULACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO, EN LA CUENCA DEL RÍO
TACANÁ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUCÍA FABIOLA QUIROA GARNICA
ASESORADO POR EL ING. JULIO ROBERTO LUNA AROCHE
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|-------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| VOCAL I | Inga. Glenda Patricia García Soria |
| VOCAL II | Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola |
| VOCAL III | Ing. Miguel Angel Dávila Calderón |
| VOCAL IV | Br. José Milton de León Bran |
| VOCAL V | Br. Isaac Sultán Mejía |
| SECRETARIA | Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| EXAMINADOR | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| EXAMINADOR | Ing. Alejandro Castañón López |
| EXAMINADOR | Ing. Armando Fuentes Roca |
| SECRETARIA | Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SUELO Y SU EFECTO
EN LA REGULACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO, EN LA CUENCA DEL RÍO
TACANÁ,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Civil, el
22 de abril de 2008.



Lucía Fabiola Quiroa Garnica.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



CENTRO DE ESTUDIOS SUPERIORES
DE ENERGÍA Y MINAS
- CESEM -
Tel./fax: 24 76 04 23



Guatemala, 7 de agosto de 2008.

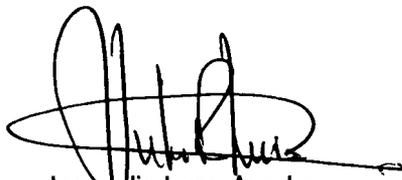
Ingeniero
Pedro Aguilar Polanco
Jefe Departamento de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería – USAC

Ingeniero Aguilar:

Por este medio hago constar que he asesorado el trabajo de graduación de la estudiante Lucía Fabiola Quiroa Garnica, titulado **ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SUELO Y SU EFECTO EN LA REGULACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO TACANÁ.**

Después de haber revisado y corregido dicho trabajo de graduación, considero que el mismo llena los requisitos exigidos por Escuela de Ingeniería Civil, por lo que dejo constancia de aprobación para su autorización.

Sin otro en particular, me suscribo de usted, atentamente.



Ing. Julio Luna Aroche
Ing. Civil - Geólogo
Asesor





Guatemala, 15 de octubre de 2008

FACULTAD DE INGENIERIA

Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
Director de Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero:

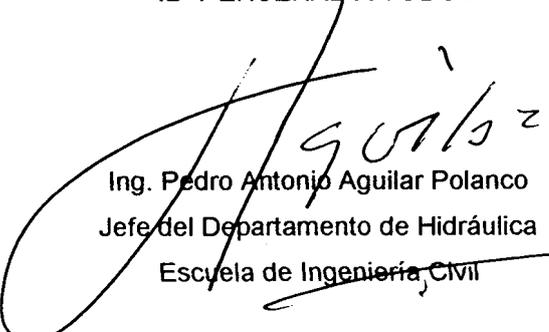
Atentamente y por este medio, envío a usted el trabajo de graduación desarrollado por la estudiante LUCÍA FABIOLA QUIROA GARNICA, con el título "ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SUELO Y SU EFECTO EN LA REGULACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN LA CUENCA DEL RÍO TACANÁ".

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y los requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la APROBACIÓN DEL MISMO, por parte del asesor Ing. Julio Roberto Luna Aroche y habiéndose efectuado todas las observaciones técnicas, el suscrito lo da por APROBADO; solicitándole darle el trámite correspondiente.

Sin otro en particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

cc. Archivo



El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Julio Roberto Luna Aroche y del Jefe del Departamento de Hidráulica, Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco, al trabajo de graduación de la estudiante Lucía Fabiola Quiroa Garnica, titulado ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SUELO Y SU EFECTO EN LA REGULACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO, EN LA CUENCA DEL RÍO TACANÁ da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Ing. Sydney Alexander Samuels Milson



Guatemala, noviembre 2008.

/bbdeb.

Al ingeniero Raúl Antonio Calderón,
dedico este trabajo por su valioso aporte para
el desarrollo de esta investigación.

AGRADECIMIENTOS A:

- DIOS *Por permitirme la vida al dar la suya por mí.*
- MIS PADRES Víctor Quiroa Salazar
Thelma Garnica de Quiroa
Por su amor y apoyo incondicional
- MIS HERMANOS Bertha María
Gabriela
Jhonathan
Por su paciencia y consejos
- MIS SOBRINOS Francesca
Diego
David
Por enseñarme las más grandes lecciones
- MIS AMIGOS Danny
Xavi
Pao
Kari
Por cada experiencia que hemos compartido.
- INGENIERO Julio Luna Aroche,
Por su orientación y asesoría para esta investigación.

Y en especial a la organización Servicios para el Desarrollo – SER-, por su colaboración en el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | V |
| GLOSARIO | VII |
| RESUMEN | XI |
| OBJETIVOS | XIII |
| INTRODUCCIÓN | XV |
| | |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | |
| 1.1. Antecedentes | 1 |
| 1.2. Definición del problema | 2 |
| | |
| 2. METODOLOGÍA | |
| 2.1. Fase inicial de gabinete | 3 |
| 2.1.1. Recopilación de información básica del área | 3 |
| 2.1.2. Definición de unidades cartográficas para el mapeo | 3 |
| 2.1.3. Definición de la escala y tamaño de las unidades de muestreo | 4 |
| 2.2. Fase de campo y análisis | 4 |
| 2.2.1. Ubicación de puntos de muestreo | 4 |
| 2.2.2. Obtención de muestras de campo | 5 |
| 2.2.3. Ensayos de laboratorio | 5 |
| 2.3. Fase de gabinete final | 5 |
| 2.3.1. Procesamiento de información y análisis de resultados | 5 |

| | |
|---|----|
| 2.3.1.1. Generación de información cartográfica de las áreas de regulación hídrica | 9 |
| 3. MARCO TEÓRICO | |
| 3.1. El suelo y su conservación | 11 |
| 3.1.1. Importancia de la conservación del suelo | 11 |
| 3.1.2. Tipos de suelo | 13 |
| 3.1.2.1. Suelos residuales | 13 |
| 3.1.2.2. Suelos transportados | 13 |
| 3.2. Aspectos a considerar en la determinación de un área de regulación hídrica | |
| 3.2.1. Principales características físicas del suelo | 14 |
| 3.2.1.1. Estructura y composición | 14 |
| 3.2.1.2. Densidad aparente | 15 |
| 3.2.1.3. Capacidad de permeabilidad e infiltración | 16 |
| 3.2.1.4. Porosidad | 18 |
| 3.2.1.5. Contenido de humedad | 19 |
| 3.2.2. Caracterización de la cuenca | 19 |
| 3.2.2.1. Tamaño de la cuenca y su relación con cuencas vecinas | 19 |
| 3.2.2.2. Forma de la cuenca | 20 |
| 3.2.2.3. Distribución de la superficie total en función de la altura | 20 |
| 3.2.2.4. Pendiente de la cuenca | 21 |
| 3.2.2.5. Drenaje de la cuenca | 22 |

| | |
|---|----|
| 3.2.3. Otros factores | |
| 3.2.3.1. Uso y cobertura del suelo | 22 |
| 3.2.3.2. Profundidad del nivel freático | 24 |
| 3.2.3.3. Características de las lluvias | 25 |
| 3.3. Ensayos de laboratorio para identificar las principales características físicas del suelo en función de su efecto para la regulación del recurso hídrico | 26 |
| 3.3.1. Límites de Atterberg | 26 |
| 3.3.2. Análisis granulométrico | 27 |
| 3.3.3. Gravedad específica de los sólidos del suelo | 28 |
| 3.3.4. Coeficiente de permeabilidad | 29 |
| 3.3.5. Humedad | 31 |
| 3.3.6. Densidad | 32 |
| 3.3.7. Porosidad | 32 |
| | |
| 4. CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO TACANÁ | |
| 4.1. Marco legal y político | 35 |
| 4.2. Marco referencial | |
| 4.2.1. Ubicación geográfica | 37 |
| 4.2.2. Clima e hidrología | 38 |
| 4.2.3. Fisiografía | 42 |
| 4.2.4. Geología | 40 |
| 4.2.5. Suelos | 42 |

| | |
|---|----|
| 4.2.6. Uso actual y capacidad de uso del suelo | 45 |
| 4.2.7. Intensidad de uso del suelo | 45 |
| 4.2.8. Pendientes | 49 |
| 5. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS | |
| 5.1. Unidades de mapeo | 51 |
| 5.2. Análisis de características físicas del suelo | 55 |
| 5.2.1. Estructura y composición del suelo | 55 |
| 5.2.2. Densidad | 57 |
| 5.2.3. Porosidad | 59 |
| 5.2.4. Humedad | 59 |
| 5.2.5. Coeficiente de permeabilidad | 66 |
| 5.3. Elaboración de mapas de regulación hídrica | 67 |
| CONCLUSIONES | 75 |
| RECOMENDACIONES | 77 |
| BIBLIOGRAFÍA | 79 |
| APÉNDICE | 81 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Mapa de ubicación de la cuenca del río Tacaná | 39 |
| 2 | Mapa fisiográfico | 41 |
| 3 | Mapa geológico | 43 |
| 4 | Serie de suelos de Simmons | 44 |
| 5 | Mapa de uso actual del suelo | 46 |
| 6 | Mapa de capacidad de uso del suelo | 47 |
| 7 | Mapa de intensidad de uso del suelo | 48 |
| 8 | Mapa de porcentajes de pendientes | 50 |
| 9 | Mapa de unidades de muestreo | 53 |
| 10 | Mapa de puntos de muestreo | 54 |
| 11 | Mapa de regulación hídrica, según características físicas de suelo de la cuenca del río Tacaná | 70 |
| 12 | Mapa de regulación hídrica de la cuenca del río Tacaná | 74 |

TABLAS

| | | |
|------|---|----|
| I | Descripción de áreas de muestreo | 52 |
| II | Resumen de ensayos de límites de Atterberg y granulometría | 55 |
| III | Resumen de ensayos de densidad | 58 |
| IV | Resumen de ensayos de gravedad específica | 60 |
| V | Resumen de porcentajes de porosidad de muestras | 61 |
| VI | Resumen de ensayos de humedad | 63 |
| VII | Asignación de valor de velocidad de infiltración | 66 |
| VIII | Análisis de capacidad de regulación, según características físicas del suelo | 68 |
| IX | Análisis de regulación hídrica en base al tipo de suelo, porcentaje de pendientes y uso actual del suelo. | 72 |

GLOSARIO

Acuífero:

Es una unidad geológica saturada, capaz de suministrar agua a pozos y manantiales, los que a su vez sirven de fuentes prácticas de abastecimiento del líquido. Para que un acuífero sea funcional, sus poros o intersticios deben estar llenos de agua y ser lo suficientemente grandes para que permitan que el agua se desplace hacia los pozos o manantiales con un caudal apreciable. (Velasco, 1981, citado por Fuentes 2005).

Ciclo hidrológico:

Los recursos hídricos tienen como referencia al ciclo hidrológico, el cual consiste en la continua circulación de agua sobre nuestro planeta. (Johnson, 1975).

El ciclo hidrológico es un proceso continuo en el que una partícula de agua evaporada de un cuerpo de agua vuelve al mismo después de pasar por las etapas de evaporación, precipitación y escorrentía superficial o subterránea. A lo largo del ciclo existen múltiples cortos circuitos o ciclos menores.

Cuenca hidrográfica:

La cuenca se define como el área natural, en la cual el agua que cae por precipitación se une para formar un curso principal. En forma general se puede definir como el área drenada por un río y sus afluentes.

Escorrentía subsuperficial:

La porción de agua que se infiltra a través de la superficie de la tierra puede moverse lateralmente en las capas superiores del suelo hasta llegar al cauce de la corriente. Se mueve más lentamente que la escorrentía superficial y alcanza las corrientes posteriormente.

Escorrentía superficial:

Comprende el exceso de la precipitación que ocurre después de una lluvia intensa y se mueve libremente por la superficie de la tierra, (Monsalve, 1,999).

Evapotranspiración potencial:

La evapotranspiración potencial se puede definir como la cantidad de agua transpirada en un tiempo determinado por un cultivo verde y de corta altura, el cual cubre por completo la superficie del suelo, posee una altura uniforme y no tiene limitaciones de agua en ningún momento, es decir, representa la cantidad máxima de agua que puede perder un área específica, cubierta completamente de vegetación, cuando el suministro de agua no presenta limitación alguna.

Evapotranspiración real:

Es la suma de las cantidades de vapor de aguas generadas por el suelo y transpiradas por las plantas durante un período determinado y bajo las condiciones meteorológicas y de humedad existentes en el suelo. El factor principal es la humedad del suelo, que puede retener una cantidad de agua conforme a su capacidad de retención específica, misma que es función del tipo de terreno.

Evapotranspiración:

La evapotranspiración es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y por la transpiración de las plantas. (Monsalve, 1999).

Precipitación pluvial:

Es el agua meteórica que cae en la superficie terrestre. La precipitación constituye la entrada primordial del sistema hidrológico y es el factor principal que controla la hidrología de una región. El conocimiento de los comportamientos y patrones de la lluvia en el tiempo y en el espacio es esencial para entender procesos como la variación de la humedad del suelo, recarga de acuíferos y caudal en los ríos. El estudio de la precipitación es entonces de capital importancia para los hidrólogos, pero una investigación detallada de los mecanismos de su formación es dominio de la meteorología.

Recarga hídrica:

Recarga natural es el volumen de agua que entra en un embalse subterráneo durante un periodo de tiempo, a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua.

Zonas de recarga hídrica:

Recarga es el nombre que se le da al proceso que permite que el agua alimente un acuífero. Este proceso ocurre de manera natural cuando la lluvia se filtra hacia un acuífero a través del suelo o roca. El área o zona donde ocurre la recarga se llama zona de recarga. (Benfelt, 2000, citado por INAB 2005).

Zonas de regulación hídrica:

Áreas capaces de absorber e infiltrar el agua procedente de precipitaciones, reducir avenidas y probablemente aumentar el volumen de agua a nivel subterráneo, aumentando de esta manera el manto freático de la cuenca y el caudal del río.

RESUMEN

El crecimiento de la población, el incremento de la actividad económica y la mejor calidad de vida llevan a conflictos y a una creciente competencia por los recursos limitados de agua dulce.

Para sustentar la planificación del manejo de los recursos naturales, específicamente el recurso hídrico, suelo y forestal de la cuenca del río Tacaná en el municipio de San Antonio, San Marcos; se realizó este estudio, cuyos alcances se orientan a la delimitación de áreas de regulación hídrica, según las características físicas del suelo de la cuenca en mención.

La metodología utilizada se inicia con la definición de unidades de muestreo. El trabajo de campo se desarrolló en dos etapas: la obtención de muestras representativas de suelos según las unidades determinadas con anterioridad y el estudio de las características físicas del suelo a través de ensayos en laboratorio.

Por medio de la sumatoria de los valores definidos en las matrices de valoración de las características en estudio, se delimitaron las áreas de regulación hídrica de la cuenca.

La CRT muestra que un 32%, de su área, posee características apropiadas que contribuyen a la regulación del recurso hídrico. Un 12% presenta características inapropiadas para dicho proceso y el 56% restante corresponde a características que regulan el recurso hídrico de forma moderada.

OBJETIVOS

- **General:**

Realizar un estudio geológico que contribuya a la difusión de información a nivel municipal para garantizar la regulación del recurso hídrico en la cuenca del río Tacaná.

- **Específicos:**

1. Realizar un diagnóstico de las características físicas del suelo, en cuanto a los factores que afectan la regulación del recurso hídrico de la cuenca.
2. Conocer el estado actual de los principales recursos naturales que garantizan la regulación del agua, tales como el suelo y el bosque.
3. Delimitar las áreas de mayor recarga hídrica de la CRT, para su planificación en el manejo de sus recursos hídricos y forestales.

INTRODUCCIÓN

Contrario a lo que normalmente se conoce, el agua es un recurso finito. Existe una cantidad fija de ella en el planeta, la cual no puede aumentar ni disminuir. La mayor parte del agua (97.5 %) es salada y de escasa utilidad directa para el humano. La mayor parte del agua es subterránea quedando menos de 0.4 % en los ríos, lagos, depósitos, suelo, pantanos, la atmósfera y los organismos vivos. (Johnson E., 1975, citado por INAB 2004).

Uno de los recursos naturales con que cuenta Guatemala para su desarrollo social, político y económico es el agua. Considerando tal hecho, se ha planteado desarrollar el tema titulado “Estudio de las características físicas del suelo y su efecto en la regulación del recurso hídrico en la cuenca del río Tacaná”, como una investigación para mejorar la regulación y sostenibilidad del recurso hídrico de la cuenca, partiendo del análisis de las características físicas del suelo y considerando variables pertinentes que influyen en la regulación hídrica, tales como vegetación y características de la cuenca.

La cuenca del río Tacaná– CRT –, es una micro cuenca del río El Naranjo con un área superficial de 9.126 km², localizada en el municipio de San Antonio Sacatepéquez, San Marcos.

La cuenca abarca nueve comunidades del municipio, el cual cubre una población estimada de 16,828 habitantes.

En el capítulo uno, se describen las actividades económicas y productivas que han tomado espacio en la cuenca del río Tacaná; así también, aquellas que han generado un impacto directo a la regulación del recurso hídrico de dicha cuenca.

La metodología utilizada para abordar la problemática de la no regulación del recurso hídrico de la CRT, se detalla en el capítulo dos. Dicha metodología radica desde una investigación bibliográfica de estudios previos de tipo hidrológico, geológico y utilización del suelo de la cuenca, hasta el análisis de muestras de suelo obtenidas en campo para la caracterización física de dicho recurso.

La caracterización del suelo como parte fundamental para la regulación del recurso hídrico de una cuenca, tiene un fundamento teórico el cual se plantea en el capítulo tres de esta investigación.

Los capítulos cuatro y cinco concretizan el estudio a través de la descripción del marco contextual de la cuenca y el análisis de los ensayos del laboratorio de suelos para la lógica interpretación de resultados.

Finalmente, la información procesada se presenta en mapas que hacen referencia a sectores catalogados como áreas de conservación del suelo. Para dichas áreas, se plantean recomendaciones específicas con el fin de propiciar la regulación del recurso hídrico de la cuenca del río Tacaná desde el punto de vista geológico.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes

La agricultura es la actividad que ha ganado espacio con respecto al bosque y la que ejerce mayor presión sobre los recursos naturales, principalmente sobre el suelo y el agua, generando alteración de los ecosistemas naturales¹.

Aparentemente los principales factores que afectan la disminución de las fuentes de agua es el uso del suelo para actividades agrícolas, la tecnología inapropiada en sus proyectos de captación y distribución del recurso, crecimiento poblacional, el uso desmedido del recurso hídrico, el aprovechamiento irracional y el inadecuado manejo de los bosques, pérdida de la cobertura forestal del área y el deterioro del medio ambiente en general.

En cuanto a la conservación de los recursos naturales, es solamente la reforestación la que toma parte en pocas zonas aledañas a las fuentes de agua, lo cual se vuelve insuficiente para generar las condiciones necesarias para regular el ciclo hidrológico y con ello disponer de cantidad y calidad de agua superficial y subterránea.

¹ Op. Cit. Novib y Fundación Solar. Pág 14.

1.2 Definición del problema

Guatemala, cuenta con suficientes recursos hídricos. Sin embargo, su distribución geográfica y temporal no es uniforme, ni concuerda con las áreas donde se concentra la población y las actividades productivas. Además, la realidad socio-económica y política, provee un complejo escenario para la planificación de los recursos naturales en general.

La extrema pobreza crea una sobre dependencia hacia los recursos naturales, acentuada en el área rural, lo cual genera una severa presión sobre los mismos, desencadenando una explotación irracional de los bosques y creando conflictos principalmente en el manejo del agua entre estos dos actores, usuarios del bosque y usuarios del agua.

El problema responde al tipo de interacción entre la población y los recursos naturales y por ende la reducción de la oferta del recurso hídrico, suelo y cubierta forestal, entre otros.

El recurso hídrico de la -CRT- es vulnerable a la contaminación y reducción e irregularidad de caudales. Por ello, se pretende presentar un diagnóstico del recurso suelo, para atenuar la problemática de la escasez y la no regularidad del agua en la región.

2. METODOLOGÍA

2.1 Fase inicial de gabinete

2.1.1 Recopilación de información básica del área

Se refiere a la colección y consulta de información existente sobre los recursos naturales del área. Investigaciones climáticas, hidrológicas, geológicas e hidrogeológicas previas. Así también información cartográfica del sector y mapas temáticos.

2.1.2 Definición de unidades cartográficas para el mapeo

Para obtener las unidades de mapeo, se tomaron en cuenta las características principales que influyen en el proceso de regulación hídrica:

- Serie de suelos de Simmons
- Fisiografía
- Geología
- Uso actual de la tierra

Los mapas temáticos referentes a estas categorías, se trasladaron a través del Sistema de Información Geográfica (ARC –GIS), dando como resultado áreas homogéneas a considerar para el muestreo y análisis de las características físicas del suelo.

2.1.3 Definición de la escala y tamaño de las unidades de muestreo

La definición de unidades mínimas de mapeo no es un proceso rígido, ya que las unidades resultantes que no tengan representatividad, debido a su área escasa con relación a su área total, pueden ser absorbidas por una unidad cercana de mayor extensión a través del análisis técnico de fotografías aéreas o bien observación en campo.

La definición de la escala de trabajo permite obtener un nivel de detalle que queda reflejado por la unidad mínima de mapeo, es decir, la superficie mínima que puede ser mapeada y cartografiada. En este caso, para cubrir el nivel de detalle, la escala a utilizar es 1:50,000 a la cual le corresponde una unidad mínima de mapeo de 6.25 Ha.

2.2 Fase de campo y análisis

2.2.1 Ubicación de puntos de muestreo

Habiendo obtenido las áreas de muestreo en gabinete, se asignó un punto correspondiente a cada área definida.

Cada punto fue localizado en campo, corroborando que cumpliera con las variables que caracterizan a cada sector.

2.2.2 Obtención de muestras de campo

En cada punto de muestreo se perforó un pozo a cielo abierto de 3m. de profundidad, como máximo.

De estos pozos, se obtuvieron muestras (alteradas e inalteradas) en cada cambio de estrato, o bien, a cada metro.

2.2.3 Ensayos de laboratorio

Cada muestra que en campo se obtuvo, fue sometida a ensayos de laboratorio, con el fin de analizar características físicas del suelo que para este estudio interesan:

- Estructura y composición
- Densidad
- Constante de permeabilidad
- Porosidad
- Contenido de humedad

2.3 Fase de gabinete final

2.3.1 Procesamiento de información y análisis de resultados

Para delimitar las áreas de regulación hídrica para la CRT con base a la información recopilada, se consideró la combinación de las siguientes variables:

VARIABLES PRINCIPALES: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SUELO

- Composición y estructura del suelo
- Densidad aparente y porosidad
- Porosidad
- Contenido de humedad
- Coeficiente de permeabilidad

VARIABLES SECUNDARIAS:

- Topografía
- Cobertura vegetal

Se elaboraron matrices de criterios para integrar cada una de las variables anteriores; asignándole a cada rango un valor en una escala de 1 – 5, dependiendo de su contribución a la regulación hídrica de la cuenca en análisis:

| | | | | |
|--|--------------------------------------|--|---|---|
| Capacidad de regulación hídrica muy baja | Capacidad de regulación hídrica baja | Capacidad de regulación hídrica moderada | Capacidad de regulación hídrica elevada | Capacidad de regulación hídrica muy elevada |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

2.3.1.1 Matrices de criterios

| Composición del suelo | Capacidad de regulación hídrica |
|---------------------------------------|--|
| Arcilla densa arenosa, roca volcánica | 1 |
| Arcilla orgánica arenosa | 2 |
| Arcilla ligera arenosa | 3 |
| Limo orgánico arenoso | 4 |
| Limo arenoso, arena limosa | 5 |
| Grava mal graduada | 5 |

| Porosidad (%) | Capacidad de regulación hídrica |
|----------------------|--|
| 0% - 20% | 1 |
| 21% - 40% | 2 |
| 41% - 60% | 3 |
| 61% - 80% | 4 |
| > 80% | 5 |

| Densidad (%) | Capacidad de regulación hídrica |
|---------------------|--|
| 0.0 – 0.5 | 5 |
| 0.6 – 1.0 | 4 |
| 1.1 – 1.5 | 3 |
| 1.6– 2.0 | 2 |
| > 2.0 | 1 |

| Humedad (%) | Capacidad de regulación hídrica |
|--------------------|--|
| 0% - 20% | 5 |
| 21% - 40% | 5 |
| 41% - 60% | 3 |
| 61% - 80% | 2 |
| > 80% | 1 |

| Coefficiente de permeabilidad (cm/s) | Capacidad de regulación hídrica |
|---|--|
| < 10 e^{-7} | 1 |
| 10 e^{-5} a 10 e^{-7} | 2 |
| 10 e^{-3} a 10 e^{-5} | 3 |
| 10 e^{-1} a 10 e^{-3} | 4 |
| > 10 e^{-1} | 5 |

| Pendiente (%) | Capacidad de regulación hídrica |
|----------------------|--|
| < 4% | 5 |
| 4% - 8% | 4 |
| 8% - 16% | 3 |
| 16% - 32% | 2 |
| > 32% | 1 |

| Tipo de cobertura | Capacidad de regulación hídrica |
|--------------------|---------------------------------|
| Centro Poblado | 1 |
| Cultivos | 2 |
| Bosque conífero | 3 |
| Bosque mixto | 4 |
| Bosque latifoliado | 5 |

2.3.2 Generación de información cartográfica de las áreas de regulación hídrica

Se elaboró un mapa cartográfico denominado “Mapa de capacidad de regulación hídrica en base a características físicas del suelo”.

Por otro lado, para incluir las variables secundarias planteadas, se procedió a traslapar el mapa de porcentaje de pendientes y uso actual de la tierra, generando el “Mapa de capacidad de regulación hídrica para la cuenca del río Tacaná”.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 El suelo y su conservación

El suelo es la capa superior de la corteza terrestre, situada entre el lecho rocoso y la superficie, compuesto por partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos y que constituye la interfaz entre la tierra, el aire y el agua, lo que le confiere capacidad de desempeñar tanto funciones naturales como de uso.

Los procesos físicos, químicos y biológicos que intervienen la formación de los suelos están gobernados por factores del medio ambiente tales como el clima y la vegetación. Ellos actúan en forma combinada y variable, de manera que los suelos resultantes de su acción son complejos organismos sujetos a mudanza continua y que nunca alcanzan su condición estática.

3.1.1 Importancia de la conservación del suelo:

La tierra es un recurso limitado y no renovable y el crecimiento de la población humana determina la existencia de conflictos en torno a su aprovechamiento. Es urgente armonizar los diversos tipos de tierras con el aprovechamiento más racional posible, a fin de optimizar la producción sostenible y satisfacer las necesidades de la sociedad, conservando al mismo tiempo, los ecosistemas frágiles y la herencia genética (FAO 1994).

El suelo de conservación es un eje del equilibrio ambiental. Del suelo de conservación se obtienen recursos alimentarios; es reserva de información genética de especies silvestres y cultivadas; es el espacio donde se recargan los acuíferos, de los que se abastece el 70% de la demanda de agua; en sus bosques se regula la temperatura y la humedad; la existencia misma de los bosques, pastizales, tulares, humedales y demás ecosistemas que conforman este espacio, permiten la captura de carbono a través de la generación de biomasa, la producción de oxígeno, la formación y retención de suelos y son hábitat de numerosas especies de todos los reinos biológicos.

Los cuatro principales procesos de degradación grave del suelo son la desertificación, la erosión, la acidificación y la contaminación.

Se presenta en muchas maneras la erosión de un suelo, pero los efectos siempre son los mismos. La erosión va ligada siempre por la denudación de los suelos en un lado y la sedimentación por el otro.

Otras amenazas importantes son la desaparición bajo edificaciones o infraestructuras (sellado o artificialización), su compactación, las pérdidas de materia orgánica debidas a prácticas incorrectas del uso del suelo, la salinización y el encharcamiento.

3.1.2 Tipos de suelos

3.1.1.1 Suelos residuales

Son suelos que permanecen en el lugar donde la roca madre les dio origen. Estos suelos son formados por la intemperización de la roca primitiva.

3.1.1.2 Suelos transportados

Son aquellos materiales que no permanecen en el lugar que les dio origen y son transportados por diferentes medios como son las corrientes de agua, el viento, los glaciares, etc. y depositados o sedimentados en otro lugar.

Los suelos transportados se agrupan según el medio de transporte:

- **Aluviales:** éstos se forman por la acción de transporte de las corrientes de agua, principalmente las aguas de los ríos. Este transporte puede ser en suspensión o en disolución.
- **Eólico:** son aquellos suelos transportados por el viento, es decir, arrancan de un punto y se depositan en otro, acaban por consolidarse, constituyendo así las rocas de granos de distinto grosor.
- **Glaciares:** éstos depósitos se deben a la acción de arrastre de los glaciares, formando depósitos desordenados de materiales. Estos depósitos se llaman morrenas.

- **Coluviales:** éste tipo de suelos es por la acción de la gravedad. Usualmente se encuentran al pie de las montañas. Estos materiales así depositados son angulosos, con aristas bien definidas, ya que han sufrido poco transporte.
- **De origen volcánico:** éstos se forman comúnmente por una acción combinada. Los volcanes expulsan lava y otros materiales que luego son intemperizados dando un suelo residual, o puede ser erosionado o transportado dando un suelo sedimentario.

3.2 Aspectos a considerar en la determinación de un área de regulación hídrica

3.2.1 Principales características físicas del suelo

3.2.1.1 Estructura y composición

Los suelos están formados por gran cantidad de elementos de composición mineralógica diversa. La estructura del suelo se refiere a la forma en que se unen y ordenan las partículas primarias del suelo (arena, limo y arcilla). Para el estudio que en éste caso ocupa, se deben distinguir tres tipos de estructura: granular, apanalada y floculenta.

- **Estructura granular:** es propia de los suelos integrados en recios granos, aunque presente diferente magnitud, sin ningún otro enlace más que el que les proporciona la gravedad para que cada partícula individual descansa en los puntos de contacto con las partículas vecinas. La estructura granular es típica de las gravas y arenas.
- **Estructura Apanalada:** es típica de los suelos limosos, los cuáles fueron depositados en agua, arreglándose las partículas unas con otras para formar arcos con grandes espacios vacíos, como los dejados por los panales de abejas.
- **Estructura floculenta:** es un arreglo complejo de partículas muy finas de arcilla depositadas en agua. En esta estructura las partículas ultrafinas se agrupan en flóculos antes de sedimentarse.

El agrupamiento de flóculos se debe a la atracción de las partículas de carga eléctrica de signos opuestos. Ya formados los flóculos, éstos se sedimentan y luego de sedimentados se agrupan unos con otros, dejando algunos espacios vacíos.

3.2.1.2 Densidad aparente

La densidad aparente es de vital importancia en el análisis del balance hídrico, normalmente el material sólido que compone un suelo tiene una densidad real del orden de 2.5 gr/cc., pero el volumen que ocupa realmente en el terreno es mucho mayor y surge el concepto de densidad aparente, pues el volumen aumenta

debido a la cantidad de poros del suelo, los cuales están llenos de aire o agua.

3.2.1.3 Capacidad de permeabilidad e infiltración

Se entiende por infiltración al paso del agua de la superficie del suelo al interior. El agua que penetra al suelo puede ser absorbida por los minerales por donde pasa y el agua llega a formar parte integral de ellos.

Otras veces recubre a las partículas que aglomeradas forman los terrenos sedimentarios. Por último, hay agua que forma pequeños hilos que llegan a sumarse formando corrientes subterráneas.

El agua desciende a través del suelo por acción de la gravedad, deteniéndose hasta encontrar estratos impermeables.

La función del suelo principalmente es proporcionar un medio por el cual el agua puede penetrar dentro de él.

Esto se logra con un gran número de poros o conductos capilares. En general la infiltración dentro del suelo y el tamaño de los conductos dependen de:

- a. Tamaño de las partículas que componen el suelo en cuestión.
- b. Los agregados que tengan entre partículas
- c. La colocación o arreglo de las partículas y agregados

La permeabilidad se refiere a la velocidad en que el agua penetra y escurre a través de los poros. Es decir, una característica asociada a la porosidad es la permeabilidad o facilidad que tiene el suelo para dejarse penetrar por los fluidos.

No solo los valores absolutos de porosidad bastan para estimar la permeabilidad del suelo sino algunos otros factores como la geometría del sistema poroso y además:

- Condiciones superficiales:
 - Uso del suelo
 - Cobertura vegetal
 - Rugosidad de la superficie
 - Fisuramiento
 - Grado de impermeabilización

- Condiciones subsuperficiales
 - Tipo de suelo
 - Sistema radicular
 - Profundidad de la napa freática
 - Drenaje subsuperficial
 - Conductividad hidráulica

- Condiciones de flujo
 - Carga hidráulica
 - Temperatura
 - Viscosidad
 - Características químicas del flujo y del suelo

- Otros factores
 - Sequedad
 - Presencia de materia orgánica
 - Contenido de humedad
 - Humedad antecedente
 - Actividad biológica

Los suelos con estructuras estables son en general permeables, mientras que los suelos con estructuras inestables o degradadas, son poco permeables, sobre todo cuando la composición física del suelo, es decir, su granulometría está mal equilibrada.

Los suelos arenosos pueden presentar también, en ciertos casos, una permeabilidad reducida, debido a la colmatación de los poros grandes por partículas de limo y por la ausencia casi total de materia orgánica.

3.2.1.4 Porosidad:

Se refiere a la proporción de espacios vacíos o cavidades ocupados con aire y agua que existen en la masa del suelo. Su importancia reside en el hecho de que por estos espacios o poros circulan los gases y las soluciones a través del perfil.

3.2.1.5 Contenido de humedad:

La humedad depende de las condiciones meteorológicas, particularmente la lluvia. La humedad del suelo limita el gradiente de infiltración y su reducción es debida, en gran parte, a que la humedad al contacto con los coloides dentro del suelo los hincha, reduciendo de ese modo el tamaño del poro y por lo tanto queda reducido el movimiento.

3.2.2 Caracterización de la cuenca

3.2.2.1 Tamaño de la cuenca y su relación con cuencas vecinas

Cada cuenca está separada de las cuencas que le rodean, por una línea divisoria de aguas, al trazar con curvas de nivel este límite se forma la cuenca vertiente topográfica que puede a veces ser diferente de la cuenca vertiente real.

La cuenca vertiente topográfica puede ser menos extensa que la cuenca vertiente real, si la corriente de agua es alimentada por circulaciones subterráneas procedentes de cuencas vecinas (terrenos cársticos, regiones llanas que tienen un fuerte espesor de sedimentos permeables que descansan sobre un lecho rocosos de topografía diferente a la de la superficie).

Puede ocurrir lo contrario, la cuenca topográfica puede ser más extensa que la cuenca real si la orientación de la pendiente de los sedimentos y del lecho rocoso están ubicados en el sentido contrario al caso anterior.

3.2.2.2 Forma de la cuenca

Para una misma superficie y para un mismo aguacero, el hidrograma en la salida de una cuenca de forma muy concentrada, será muy diferente al de una cuenca muy alargada.

Esto ha llevado entonces a tener que definir índices de forma de una cuenca. Según el índice de compacidad de Gravelius, es evidente, que el hecho que los hidrogramas de salida, para cuencas que tengan igual área pero de diferente forma, da la oportunidad al suelo de absorber mayor o menor cantidad de agua durante una tormenta, modificando de ésta manera la curva de capacidad de infiltración.

3.2.2.3 Distribución de la superficie total en función de la altura

La mayor parte de los factores meteorológicos e hidrológicos como los son las precipitaciones, temperaturas, caudales específicos, etc. se presentan en función de la altitud, por lo que es interesante calcular la distribución de la cuenca vertiente.

El resultado de graficar el porcentaje de área por encima de un nivel dado con relación al área total es lo que se conoce como curva hipsométrica. La elevación media o altitud media es la ordenada media de la curva hipsométrica y corresponde a un valor del 50% del drenaje.

3.2.2.4 Pendiente de la cuenca:

La pendiente es importante ya que grandes inclinaciones del terreno evitan que el suelo absorba las cantidades de agua que pueda ser capaz. Se considera que pendientes menores del 2% son despreciables.

La topografía influye debido al tiempo de contacto del agua con la superficie, en condiciones planas el agua cae a la superficie y su movimiento será lento lo que dará un mayor tiempo para que ésta se infiltre, caso contrario en condiciones accidentadas el agua cae y debido a la inclinación del terreno se desplaza a mayor velocidad pasando más rápido a formar parte del agua de escorrentía.

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

3.2.2.5 Drenaje de la cuenca

La mayor o menor facilidad que presenta una cuenca hidrográfica para evacuar las aguas provenientes de las precipitaciones y que quedan sobre la superficie del suelo cuando las capas del suelo se han saturado, es lo que se conoce como densidad de drenaje (ramales/km²).

3.2.3 Otros factores

3.2.3.1 Uso y cobertura del suelo

Es lógico pensar que los beneficios de una mejora en el manejo de la tierra, o los costes asociados a los impactos negativos por un uso inadecuado de los recursos hídricos, podrían repercutir no sólo en los usuarios del agua que los causan sino también en la población que vive en la cuenca baja o, en el caso de las aguas subterráneas, los que hacen uso de los recursos contaminados.

El impacto del uso de la tierra sobre la escorrentía superficial media es una función que depende de numerosas variables, siendo las más importantes el régimen hídrico de la cubierta vegetal, en lo referente a la evapotranspiración (ET), la capacidad de infiltración, la capacidad del suelo para retener agua; y la capacidad de la cubierta vegetal para captar humedad.

Un cambio en la cubierta del suelo de especies de menor a mayor ET conducirá a un descenso en el caudal anual. De una revisión de 94 cuencas de recepción experimentales, Bosch y Hewlett (1982) concluyeron que el establecimiento de una cubierta forestal en un terreno con núcleos de vegetación aislados reduce la escorrentía superficial de agua.

Los bosques de coníferas, las especies madereras de hoja caduca, el monte bajo y las praderas tienen (en ese orden) una influencia decreciente en la escorrentía superficial proveniente de superficies fuente donde las cubiertas han sido manipuladas.

Contrariamente, un cambio de una cubierta vegetal de mayor a menor ET incrementará la escorrentía superficial media: una reducción en la cubierta forestal incrementa el aporte de agua (Bosch y Hewlett, 1982; Calder, 1992). El impacto, depende mucho de las prácticas de manejo y de los usos de la tierra alternativos.

Una explotación forestal cuidadosa y selectiva tiene un efecto muy limitado o nulo sobre el caudal. El caudal después del desarrollo de la nueva cubierta vegetal podría ser más alto, el mismo o inferior al valor original, dependiendo del tipo de vegetación (Bruijnzeel, 1990).

Una excepción a esta regla son los bosques «de niebla», que pueden interceptar más humedad (humedad ambiental, precipitación oculta) de la que consumen por la ET (Bosch y Hewlett, 1982), y los bosques muy maduros, que dependiendo de

las especies podrían consumir menos agua que la vegetación que se establece en ellos mismos después de la tala (Calder, 1998).

El caudal disminuye en el tiempo con el establecimiento de la nueva cubierta vegetal, pero las escalas temporales varían bastante. En zonas húmedas y cálidas, el efecto de la tala es más corto que en las zonas menos húmedas, debido al rápido crecimiento de la vegetación (Falkenmark y Chapman, 1989).

El incremento del aporte de agua al cambiar la cubierta vegetal no incrementa necesariamente la disponibilidad de agua en la cuenca baja. El caudal podría disminuir por causa de otros factores, por ejemplo por el consumo de agua por la vegetación ribereña o por las pérdidas en el transporte (infiltración en el cauce) (Brooks et al., 1991).

3.2.3.2 Profundidad del nivel freático:

La profundidad del nivel freático influye en la infiltración si está cerca de la capa superficial debido a que el agua que se infiltra por gravedad satura rápidamente el estrato superior, no dando oportunidad al suelo a que desarrolle su máxima capacidad de infiltración cuando el agua encuentra el nivel freático.

En cambio cuando el nivel freático es profundo, la capacidad de infiltración máxima, logra desarrollarse antes que el agua encuentre el nivel freático.

3.2.3.3 Características de las lluvias:

Para la lluvia ciclónica, generalmente de alta intensidad y corta duración, el suelo está recibiendo volúmenes de agua con mayor rapidez de lo que el suelo puede aceptar. Esto trae como consecuencia una respuesta rápida de la escorrentía, mientras que el suelo no tiene tiempo de responder de manera inmediata al fenómeno de la infiltración, debido a lo rápido que ocurre el fenómeno en comparación de los grandes volúmenes de agua precipitados.

Cuando se trata de lluvias convectivas, debido al proceso de su formación, elevación condensación de las gotas, y posterior precipitación, aunado al hecho que esto ocurre bajo condiciones tranquilas de viento, los volúmenes de agua que producen estas lluvias varían desde muy poco hasta valores medios, lo que trae como consecuencia un valor de capacidad de infiltración aparentemente más alto de lo que en realidad es.

Con relación a la lluvia orográfica, ésta alcanza predominantemente, intensidades altas a valores que pueden considerarse dentro del rango medio. Por lo tanto, ejercen la misma influencia sobre la capacidad de infiltración que las lluvias ciclónicas, aunque de una manera menos acentuada, debido a que las orográficas en ocasiones pueden ser de baja intensidad.

3.3 Ensayos de laboratorio para identificar las principales características físicas del suelo en función de su efecto para la regulación del recurso hídrico

3.3.1 Límites de Atterberg:

1. Límite de cohesión: es el contenido de humedad con el cual las partículas de suelo son capaces de pegarse una a otras.
2. Límite de contracción: es el contenido de humedad por debajo del cual no se produce reducción adicional de volumen o contracción en el suelo.
3. Límite plástico: es el contenido de humedad por debajo del cual se puede considerar el suelo como un material no plástico.
4. Límite líquido: es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico. A este nivel de contenido de humedad el suelo está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso.

Los límites líquido y plástico han sido ampliamente utilizados, principalmente con objetivos de identificación y clasificación de suelos.

3.3.2 Análisis granulométrico

Método mecánico:

Es un ensayo de identificación necesario para clasificar geotécnicamente los materiales, siendo una primera evaluación de la calidad y del presumible comportamiento de cada nivel u horizonte del terreno. La información obtenida del análisis granulométrico puede, en ocasiones, utilizarse para predecir movimientos del agua a través del suelo, aún cuando los ensayos de permeabilidad se utilizan más comúnmente.

El análisis granulométrico es un intento de determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños presentes en una masa de suelos dada. En la práctica solamente agrupa los materiales por rangos de tamaño.

Para lograr esto se obtiene la cantidad de material que pasa a través de un tamiz con una malla dada pero que es retenido en un siguiente tamiz cuya malla tiene diámetros ligeramente menores a la anterior y se relaciona esta cantidad retenida con el total de la muestra pasada a través de los tamices.

Este ensayo tiene por objeto determinar los diferentes tamaños de las partículas de un suelo y obtener la cantidad (%), que pasan por los distintos tamices hasta 0'080mm (100mm, 80mm, 63mm, 50mm, 40mm, 25mm, 20mm, 12,5mm, 10mm,

6,3mm, 5mm, 2mm, 1.25mm, 0.40mm, 0.160mm, 0.160mm y 0.080mm).

La información obtenida del análisis granulométrico se presenta en forma de curva. Para poder compara suelos y visualizar más fácilmente la distribución de los tamaños de granos presentes.

Método del hidrómetro:

El análisis del hidrómetro es un método ampliamente utilizado para obtener un estimado de la distribución granulométrica de suelos, cuyas partículas se encuentran desde el tamiz No. 200 (0.075 mm.) hasta alrededor de 0.001 mm. Los datos se presentan en un gráfico semilogarítmico de porcentaje de material más fino contra diámetro de los granos y puede combinarse con los datos obtenido en el análisis mecánico del material retenido, o sea mayor que el tamiz número 200.

3.3.3 Gravedad específica de los sólidos del suelo:

La gravedad específica de los granos del suelo es siempre bastante mayor que la gravedad específica volumétrica determinada, incluyendo los vacíos de los suelos en el cálculo.

El valor de la gravedad específica es necesario para calcular la relación de vacíos de un suelo, se utiliza también en el análisis de hidrómetro y es útil para predecir el peso unitario del suelo. Ocasionalmente el valor de la gravedad específica puede utilizarse en la clasificación de los minerales del suelo.

La gravedad específica de cualquier sustancia se define como el peso unitario del material en cuestión dividido por el peso unitario del agua destilada a 4° C.

El problema consiste en obtener el volumen de un peso conocido de granos de suelo y dividirlo por el peso del mismo volumen de agua. El volumen de un peso conocido de partículas de suelo puede obtenerse utilizando un recipiente de volumen conocido y el principio de Arquímedes, según el cual un cuerpo sumergido dentro de una masa de agua desplaza un volumen de agua igual al del cuerpo sumergido.

3.3.4 Coeficientes de permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad es una constante de proporcionalidad relacionada con la facilidad de movimiento de un flujo a través de un medio poroso. Existen dos métodos generales de laboratorio para determinar directamente el coeficiente de permeabilidad de un suelo.

Coeficiente de permeabilidad – método de la cabeza constante:

Está destinado a materiales de alta permeabilidad, como son los suelos granulares (arena, grava, o combinación de ellas).

Se somete el suelo a una carga hidráulica constante h , valiéndose de una fuente que suministra el agua de consumo y de un conducto o vertedero que elimina el excedente.

Es conveniente aclarar que el agua que se vaya a utilizar debe "desaerarse" y dejarle circular el tiempo suficiente por espécimen hasta notar, a través del cuerpo principal transparente del equipo, que no hay burbujas de aire. Cuando éstas desaparezcan, es cuando se deberán hacer las mediciones. Con un cronómetro listo, se empieza a verter agua y a un tiempo arbitrario se mide el volumen de agua o descarga en la probeta, manteniendo fijos los niveles de agua. Así se tendrán como datos, el tiempo y el volumen de agua pasante, con los cuales se determina el caudal.

Coeficiente de permeabilidad – método de cabeza variable

Es utilizable en materiales predominantemente finos como son los suelos arcillosos.

En la parte superior tiene un receptáculo, al cual se le ha acoplado un delgado tubo transparente de área transversal "a". Para saturar el espécimen, se vierte agua dejándola pasar a través de una válvula. El agua empieza a ascender hasta cierto nivel del tubo piezométrico, alcanzado el cual se cierra la válvula.

Conviene enfatizar que para que el experimento tenga éxito, la muestra debe estar completamente saturada y el agua desaerada, proceso que requiere a veces mucho tiempo (días, hasta semanas) en materiales arcillosos.

Aun cuando cesa el suministro de agua continúa su salida por el orificio de descarga, lo cual provoca el descenso del nivel en el tubo. El agua sobrante se recoge en una bandeja provista de un derrame. Dado que la descarga de agua es mínima, no es necesario medir el volumen de agua como en el método anterior, sino que se determina el tiempo transcurrido en descender el nivel de agua en el tubo transparente.

3.3.5 Humedad

De la expresión:

$$w\% = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Donde:

W_w = peso total de la muestra

W_s = peso de la fase sólida de la muestra de suelo (peso de los sólidos).

Dada la muestra, se pesa para tener W_w . A continuación se seca al horno y se vuelve a pesar, para tener W_s . Ahora $W_w = W_m - W_s$, con lo cual la humedad queda determinada.

La necesidad del equipo para la prueba se desprende fácilmente de la anterior descripción.

3.3.6 Densidad

Para su determinación directa, deberán valuarse dos magnitudes:

W_m = peso total de la muestra del suelo (peso de la masa)

V_m = volumen total de la muestra del suelo

El W_m puede conocerse pesando la muestra de suelo; el V_m se valorará, labrando la muestra original a una forma geométrica simple, o bien por inmersión de la muestra en agua (el peso del agua desalojado entre el peso específico de ese elemento, da el volumen desplazado, igual al volumen de la muestra).

El equipo necesario para la prueba se deduce de lo arriba expuesto.

3.3.7 Porosidad

En un suelo se distinguen tres fases constituyentes: la sólida, la líquida y la gaseosa. La fase sólida está formada por las partículas minerales del suelo, la líquida por el agua u otros líquidos, la fase gaseosa comprende sobre todo el aire, si bien pueden estar presentes otros gases (vapores sulfurosos, anhídrido carbónico, etc.).

Las fases líquida y gaseosa del suelo suelen comprenderse en el volumen de vacíos, mientras que la fase sólida constituye el volumen de los sólidos.

También denominada *Relación de Vacíos, Oquedad o Índice de poros* a la relación entre el volumen de los vacíos y el de los sólidos

de un suelo:
$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Donde:

e = relación de vacíos

V_v = volumen de los vacíos de la muestra

V_s = volumen de la fase sólida de la muestra (volumen de sólidos)

En la laboratorio puede procederse como sigue:

Dada la muestra natural se determina su volumen V_m ; secada en horno se pesa y se tiene W_s ; ahora, aplicando:

$$e = \frac{W_s}{S_s \delta} \quad \text{y} \quad V_v = V_m - V_s$$

Donde:

S_s = peso específico relativo

δ = peso específico del agua destilada, a 4°C de temperatura y a la presión atmosférica correspondiente al nivel del mar.

Entonces: Si n = porosidad, se tiene que:

$$n = \frac{e}{1 - e}$$

1. CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO TACANÁ

4.1 Marco legal y político

4.1.1 Constitución Política de la República de Guatemala.

Artículo 47: Se prohíbe eliminar el bosque en las partes altas de las cuencas hidrográficas cubiertas de bosque, en especial las que estén ubicadas en zonas de recarga hídrica que abastecen fuentes de agua, las que gozarán de protección especial. En consecuencia, estas áreas sólo serán sujetas a manejo forestal sostenible. En el caso de áreas deforestadas en zonas importantes de recarga hídrica, en tierras estatales, municipales o privadas, deberán establecerse programas especiales de regeneración y rehabilitación.”.

4.1.2 Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente.

Artículo 15: “El Gobierno velará por el mantenimiento de la cantidad de agua para el uso humano y otras cuyo empleo sea indispensable, por lo que emitirá las disposiciones que sean necesarias y los reglamentos correspondientes para: f) promover el uso integral y el manejo racional de cuencas hídricas, manantiales y fuentes de abastecimiento de agua. g) Investigar y controlar cualquier causa o fuente de contaminación hídrica. h) Propiciar en el ámbito nacional e internacional las acciones necesarias para mantener la capacidad reguladora del clima en función de cantidad y calidad del agua.”

4.1.3 Ley de Áreas Protegidas (Decreto 4-89)

“Fuentes de Agua. Como programa prioritario del SIGAP se crea el Subsistema de Conservación de Bosques Pluviales, de tal manera de asegurar un suministro de agua constante y de aceptable calidad para la comunidad guatemalteca. Dentro de él podrá haber reservas naturales privadas.”

4.1.4 Ley Forestal (Decreto 101-96)

Se prohíbe eliminar el bosque en las partes altas de las cuencas hidrográficas cubiertas por bosque, en especial aquellas que estén ubicadas en zonas de recarga hídrica que abastecen fuentes de agua, las que gozarán de protección especial. En el caso de áreas deforestadas en zonas importantes de recarga hídrica, en tierras, estatales, municipales o privadas, deberán establecerse programas especiales de regeneración y rehabilitación.

4.1.5 Estrategias y planes municipales

Competencias municipales no abordadas por la actual administración: en el municipio, la promoción y gestión ambiental de recursos naturales, teóricamente, se tienen designados a dos concejales municipales; sin embargo, operativamente, no se ha realizado nada al respecto.

Los Consejos de Desarrollo constituyen un buen aliado para la formulación y definición de las políticas de desarrollo comunitarias; éstos son un canal intermedio entre la población y el gobierno municipal; por ley, les corresponde conocer los problemas y

necesidades de su comunidad, aportar soluciones y tomar parte en las decisiones del municipio.

Además, desde otro punto de vista y relacionado con el tema de estudio del proyecto GIRH, también le corresponde preservar y promocionar el derecho de identidad cultural, de acuerdo a valores, tradiciones y costumbres, así como, promover y proteger los recursos renovables y no renovables de la jurisdicción, son competencias asignadas al municipio, a partir de las que puede propiciar su desarrollo económico y social, pues cuenta con una potencialidad para sacar de la pobreza a sus habitantes.

4.2 Marco referencial

4.2.1 Ubicación geográfica

La CRT está categorizada como una subcuenca del río Nahualá y una microcuenca del río El Naranjo, está ubicada al suroeste del municipio de San Antonio Sacatepéquez del departamento de San Marcos, el cual ocupa el 92% de la cuenca del río Nahualá.

Ocupa una extensión de 9.126 km², abarcando el cantón Tojchiná, la aldea San Rafael, los caseríos Vista Hermosa, San Isidro Ixcolochil y Candelaria Siquival y la cabecera municipal. Se localiza entre las coordenadas geográficas 14° 55' 59" y 14° 58' 24" latitud Norte; 91° 42' 47" y 91° 44' 38" longitud Oeste. (Ver figura 1).

La máxima altura de la CRT se encuentra a 2780 msnm, en el cantón Tojchiná y la parte más baja es de 1960 msnm.

4.2.2. Clima e hidrología

La - CRT -, forma parte en la cuenca alta del río El Naranjo. De acuerdo a la clasificación de Holdridge, la parte alta de la cuenca del río Naranjo, pertenece principalmente a la zona de bosque muy húmedo montano bajo subtropical.²

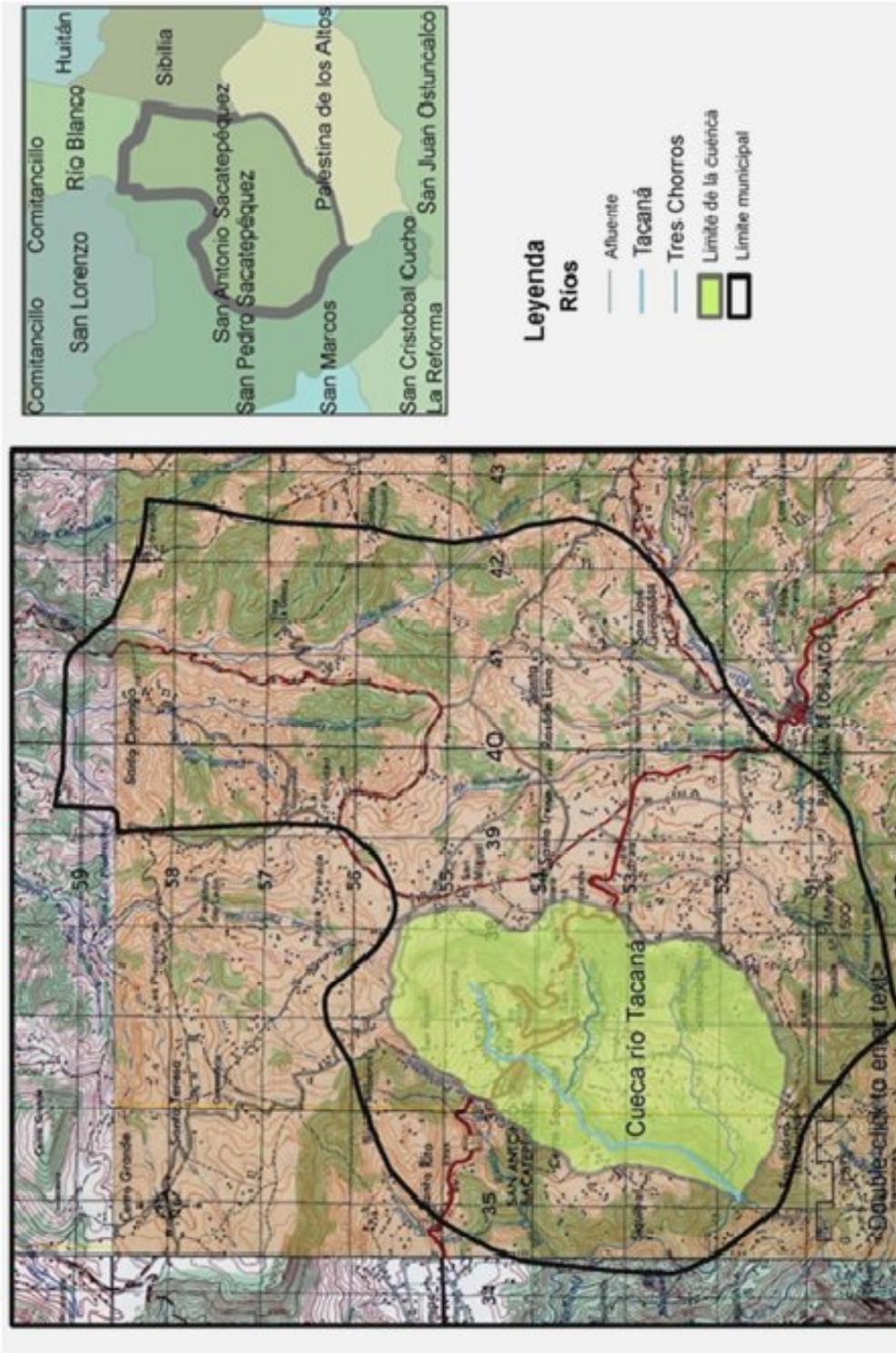
La temperatura máxima anual es de 10.9°C con una variación de un 5% durante el año.

La evapotranspiración potencial (ETP) del área se estima en función de la ETP calculada mediante la fórmula de HARGREAVES, la cual es una de las más aceptadas en Guatemala. Para el caso del río Tacaná se estima una ETP de 1136 mm.

La precipitación media anual de la región es de 1234 mm. El reporte de la estación San Marcos muestra que la variabilidad de lluvias durante la época de mayo a octubre es bastante alta. Lo cual repercute en los bajos caudales durante el año, y poca regulación hídrica en épocas lluviosas.

² Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (2,001). Atlas temático.

Figura 1. Ubicación cuenca río Tacaná



El río Tacaná se forma de las aguas que drenan dos ríos, entre ellos el río Los Tres Chorros. El río Tacaná tiene una longitud aproximada de 5708 m. y muestra una pendiente media del 14.5%.

Cuenta con un caudal medio anual de $0.15\text{m}^3/\text{s}$ ⁽³⁾ y solamente un $0.057\text{ m}^3/\text{s}$ se mantiene durante el 90% de los días del año.

4.2.3 Fisiografía

Según el Instituto Geográfico Nacional, la - CRT- se ubica en el gran paisaje Montañas Volcánicas Altas de Occidente del país, éstas se extienden en un 90% del área de la cuenca. El 10% restante, se refiere a planicies onduladas (ver figura 2).

4.2.4 Geología

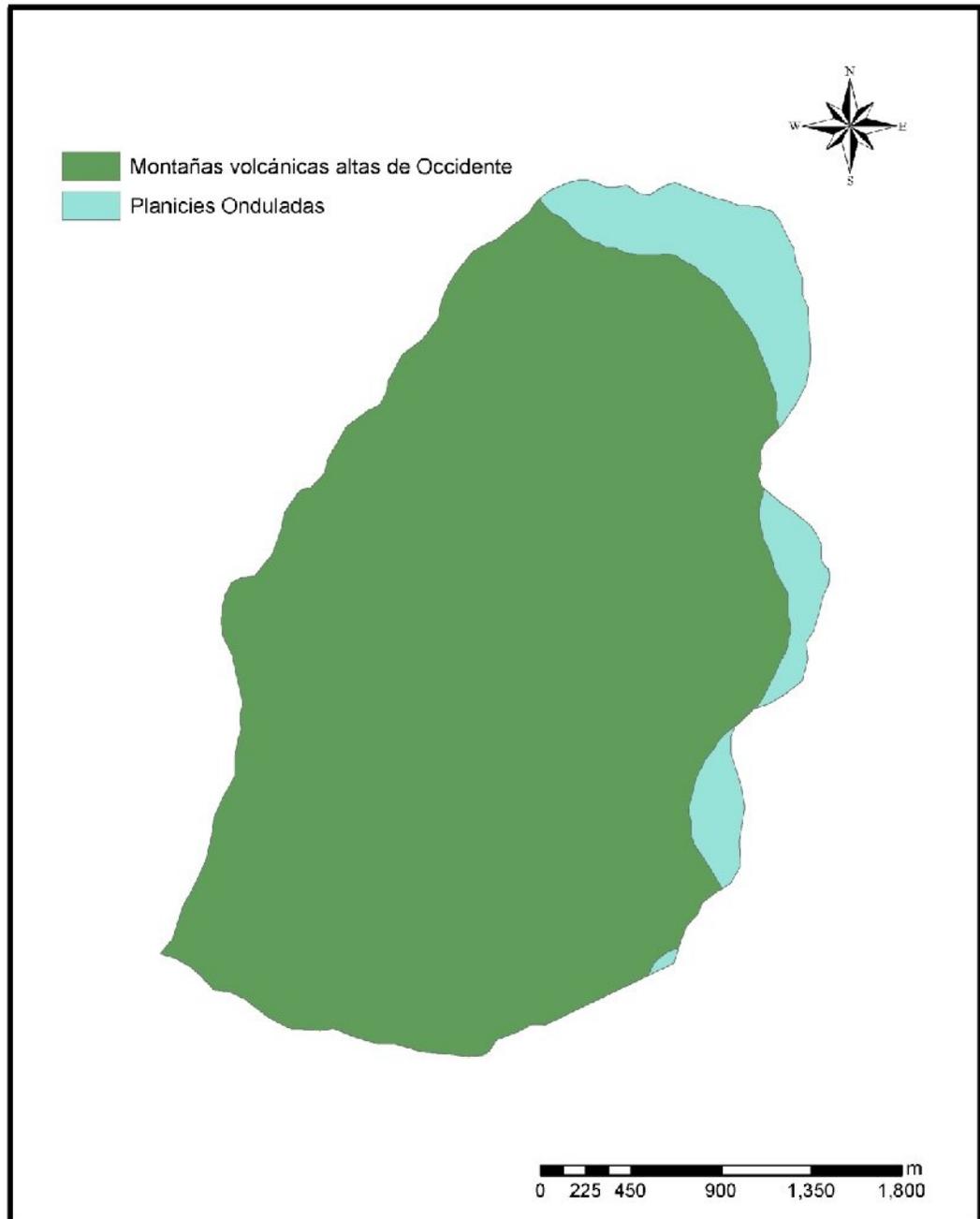
Sus unidades geológicas se distribuyen equitativamente en dos tipos (ver figura 3).

Rocas Volcánicas sin dividir del Terciario (Tv)

Son las rocas ígneas que forman la mayor parte del cinturón volcánico, estando comprendidas las lavas basálticas, andesíticas, riolitas, dacitas, tobas, ignimbritas y lahares. Estas rocas son el producto del vulcanismo mundial que tuvo lugar en el período Terciario Superior (Plioceno), agrupándose todas ellas en una sola unidad. (Herrera 2002). Este tipo de roca se extiende por toda la subcuenca, ocupando el 51.1% de la totalidad de la misma.

³ Fundación Solar (2007). Estudio hidrológico del río Naranjo, del proyecto “Gestión integrada de los recursos hídricos en la parte alta de la cuenca del río Naranjo”

Figura 2. Mapa fisiográfico



Cenizas Volcánicas Cuaternarias (Qp)

Esta clase de materiales ocupa el 48.9% de la totalidad de la CRT. Se refiere a cenizas y pómez de origen volcánico, se encuentran diseminados principalmente en el cinturón volcánico. Esta clase de rellenos piroclásticos llega a alcanzar en algunos lugares del país profundidades de hasta 100 metros de espesor. La edad de estas rocas es del Cuaternario.

4.2.5 Suelos

La – CRT– se encuentra localizada en las series Ostuncalco, Zacualpa y Quetzaltenango.⁴ (Ver figura 4)

Serie Ostuncalco (Os)

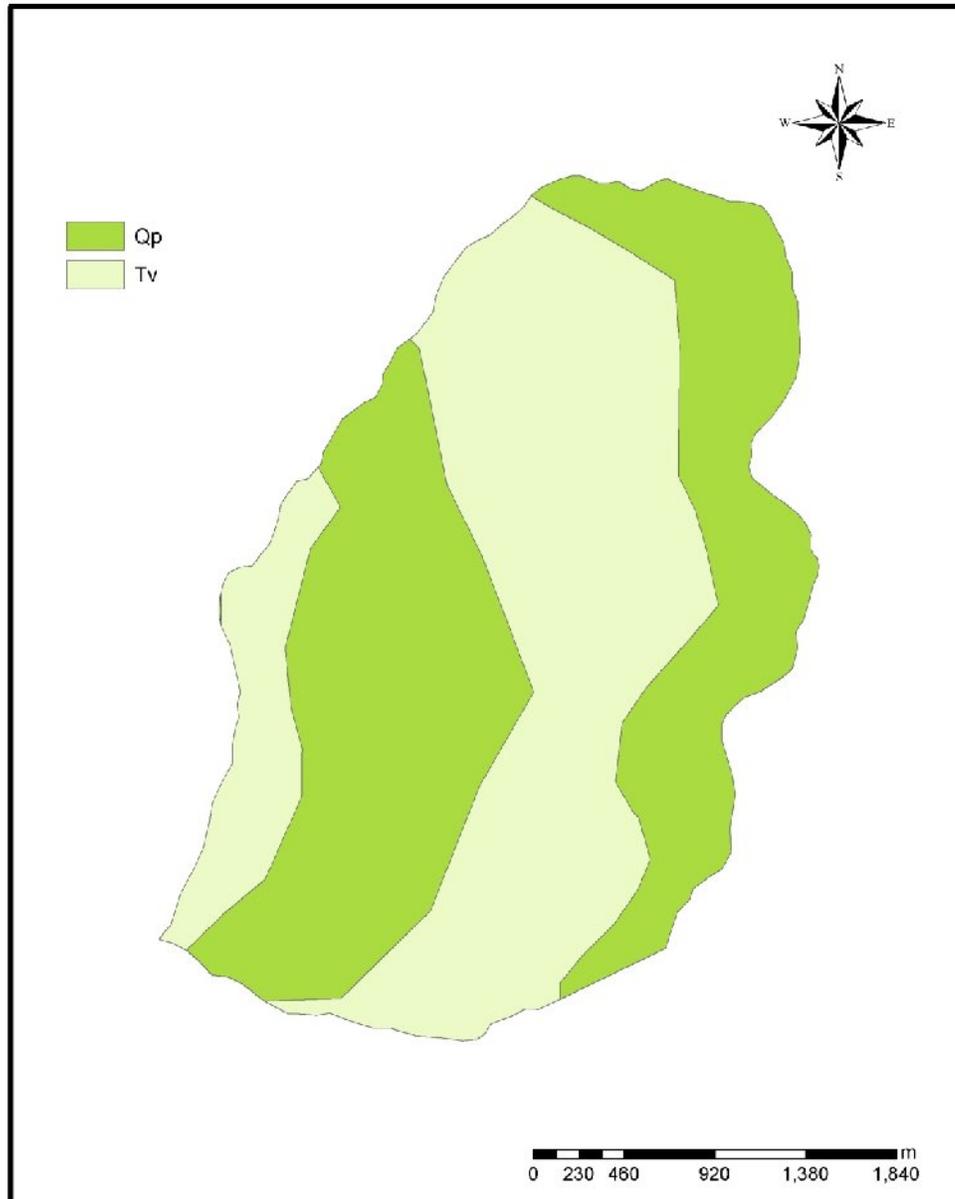
El material madre es ceniza volcánica de color claro, su relieve es fuertemente ondulado a escarpado. El suelo superficial con una textura arena franca: suelta y en el subsuelo ceniza volcánica reciente.

Serie Zacualpa (Zc)

Se caracteriza por la ceniza volcánica de color claro como material madre, su relieve escarpado y el suelo superficial es suelto. Sin embargo en el subsuelo se distingue una textura franco arenosa.

⁴ Simmons, Tarano y Pinto, 1,959

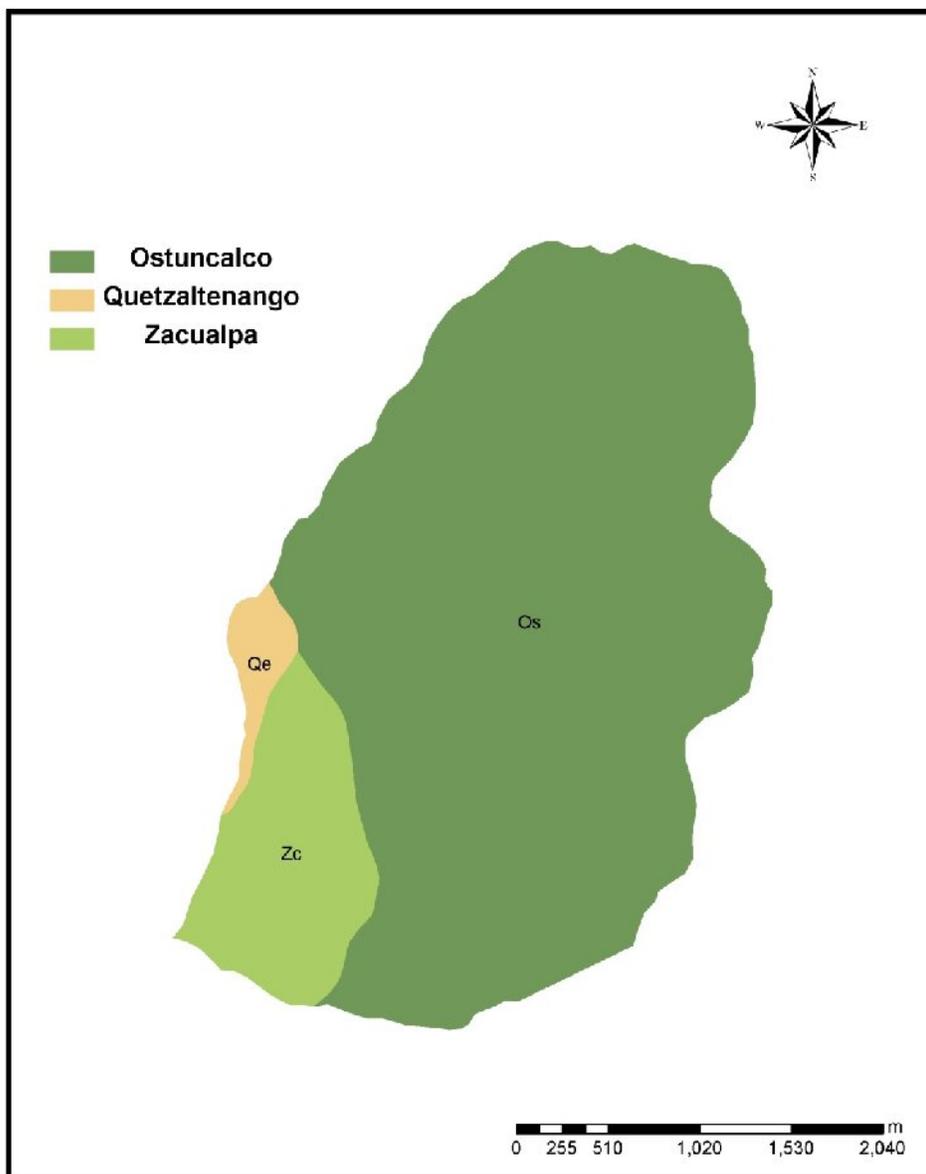
Figura 3. Mapa geológico



Serie Quetzaltenango

El material madre se caracteriza por ser ceniza volcánica de color claro, su relieve es casi plano con una textura tanto en el suelo superficial, como en el subsuelo, franco arenosa fina.

Figura 4. Mapa de serie de suelos de Simmons



4.2.6 Uso actual del suelo y capacidad de uso

Según el Instituto Nacional de Bosques – INAB –, la CRT está dividida en cinco diferentes capacidades de uso.

| Capacidad de uso | Área (Ha) | Porcentaje |
|---|-----------|------------|
| Agroforestería con cultivos anuales | 181.89 | 20% |
| Agroforestería con cultivos permanentes | 33.96 | 4% |
| Áreas protegidas de protección | 31.83 | 3% |
| Tierras forestales de producción | 476.17 | 51% |
| Tierras forestales de protección | 207.26 | 22% |

El 52% del área superficial de la CRT, aún se encuentra cubierta por bosque. El tipo de bosque que predomina es el bosque latifoliado, el cual ocupa un 36% del área, y el otro 15% es de coníferas y mixto. Sin embargo, aún cuando la población solamente ocupa apenas un 20% de la cuenca, el 40% del suelo es ocupado por cultivos de hortalizas y granos básicos.⁵ (Ver figuras 5 y 6).

4.2.7 Intensidad de uso del suelo

Según el mapa publicado por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación; un 49% del suelo de la CRT se clasifica como un suelo en sobre uso. Por otro lado, las actividades por parte de la población relacionadas al uso del suelo permiten que un 48% del suelo se esté utilizando apropiadamente y apenas un 3%, se encuentra sub – utilizado, desde el punto de vista agrícola. Esta información se puede visualizar en la figura 7.

⁵ Ortofoto IGN-MAGA del año 2,006

Figura 5. Mapa de uso actual del suelo

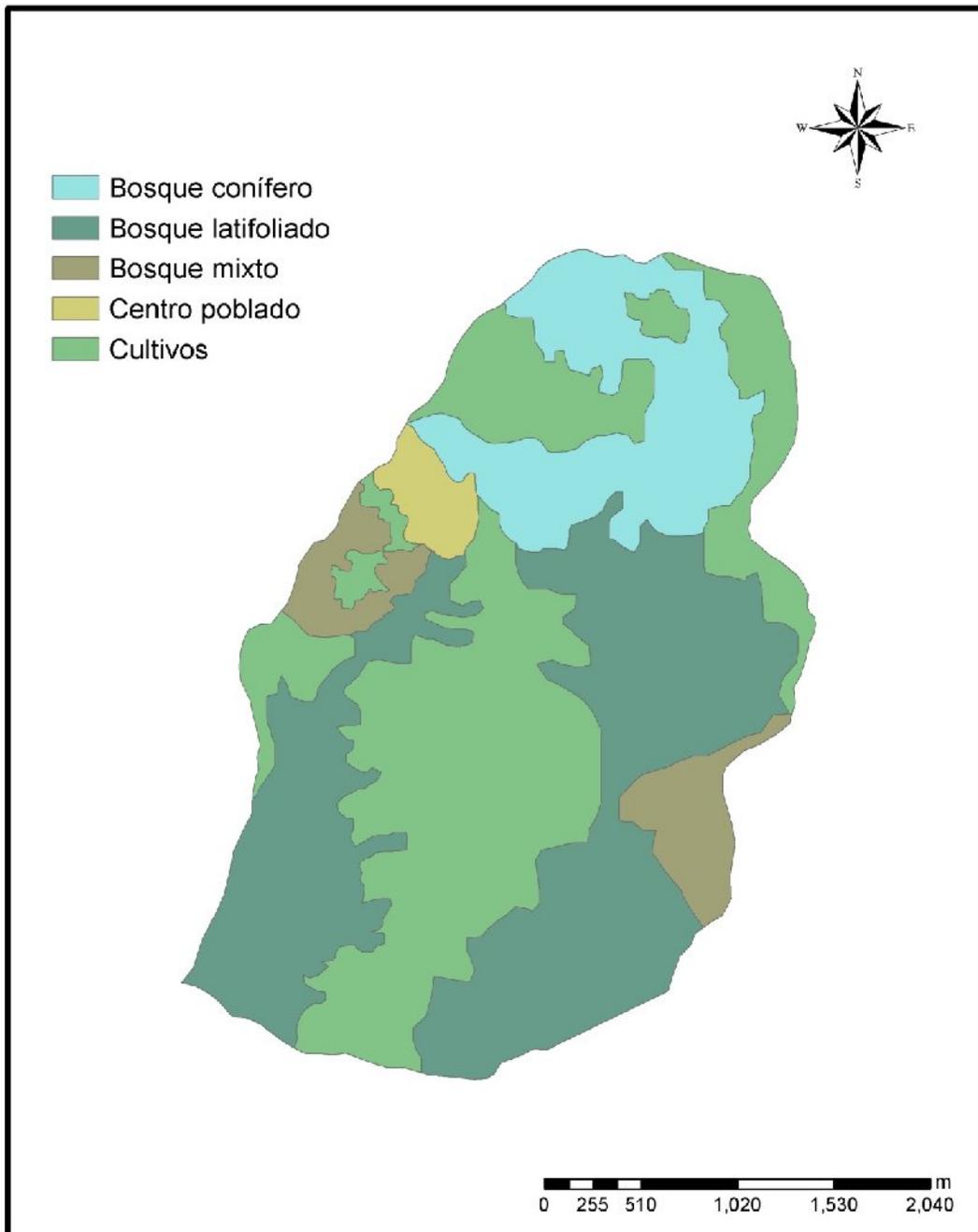


Figura 6. Mapa de capacidad de uso del suelo

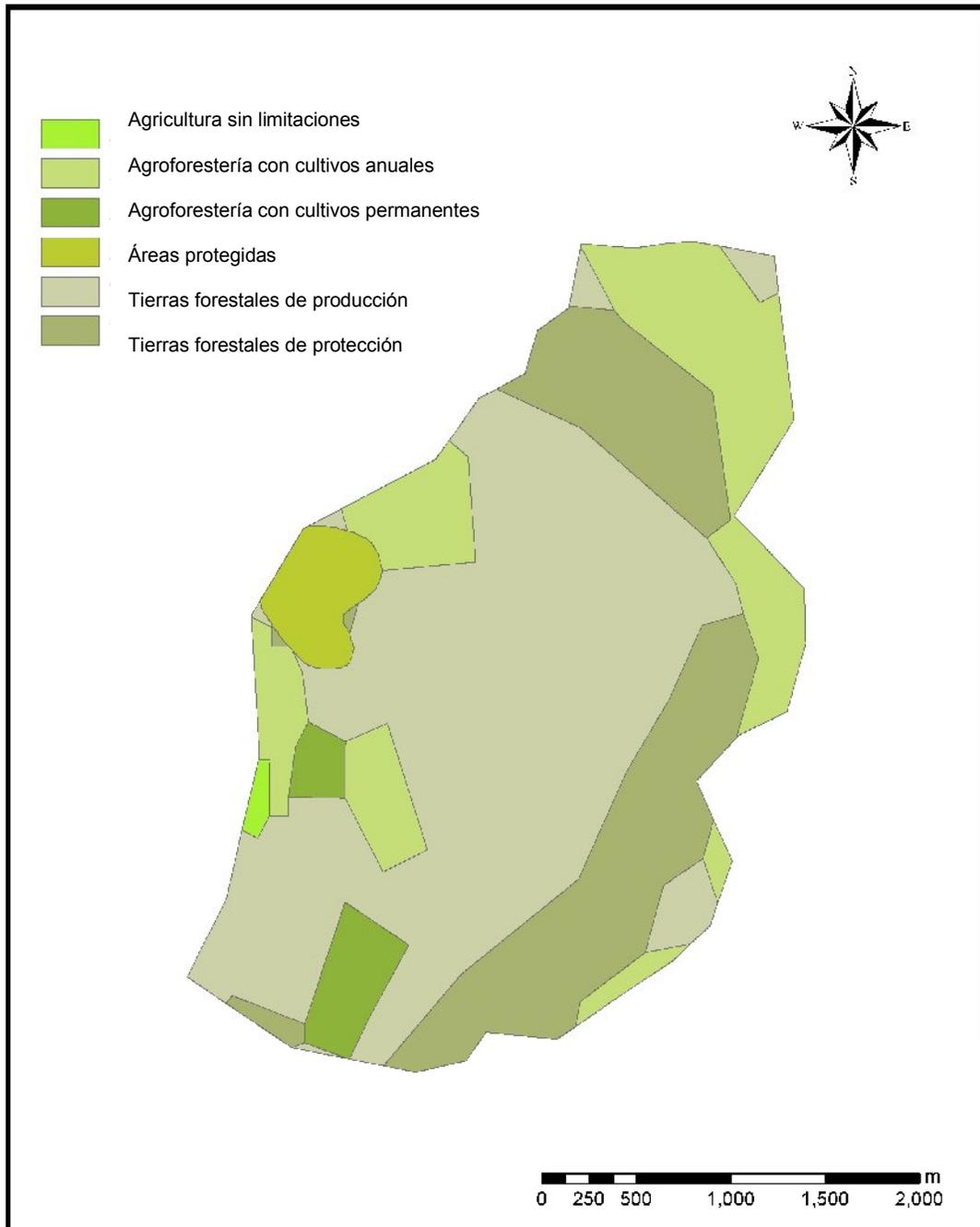


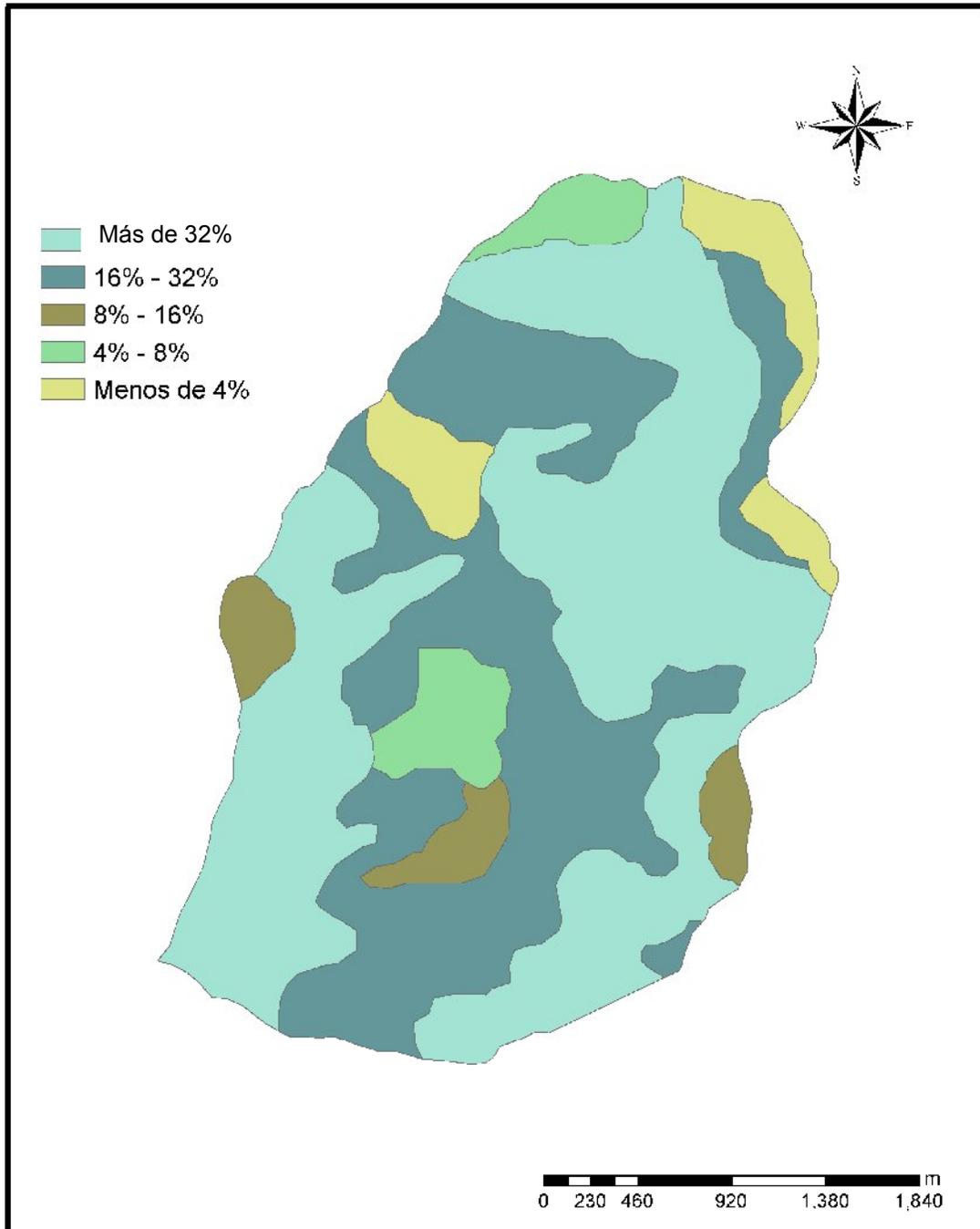
Figura 7. Mapa de intensidad de uso



4.2.8 Pendientes

El análisis de pendientes se realizó de acuerdo a la utilización de las metodologías desarrolladas por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica (USDA). La mayor parte de la CRT presenta pendientes escarpadas mayores al 32%, las cuales coinciden con las partes boscosas de la región. Las regiones donde las pendientes varían de un 16% a un 32% son comúnmente áreas de cultivo. Por último, cabe mencionar que las áreas poco escarpadas que varían del 15% a menos del 4% cubren apenas el 16% del área de la cuenca (ver figura 8).

Figura 8. Mapa de porcentajes de pendientes



5. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Unidades de mapeo

De acuerdo al análisis para las unidades de mapeo, con base a Geología, Serie de Suelos Simmons, Fisiografía y Uso actual del suelo, se obtuvieron 12 áreas de muestreo con características distintas entre ellas. La figura 9 muestra la distribución de cada una de las áreas en mención y su descripción se identifica en la tabla I.

Los puntos de muestreo, se observan en la figura 10, éstos se refieren a los sectores seleccionados de manera que cumplieran las categorías del área al cual representaban, en función de perforar los pozos a cielo abierto (3 metros de profundidad).

En los puntos de muestreo números 9 y 11, no fueron perforados los pozos respectivos, ya que se encontró roca en el primer estrato.

Tabla I. Descripción de áreas de muestreo

| Área de muestreo | Clasificación de suelos de Simmons | Fisiografía | Geología | Uso actual del suelo |
|------------------|------------------------------------|--|----------|----------------------|
| 0 | - | - | - | Centro poblado |
| 1 | Ostuncalco | Montañas volcánicas altas de Occidente | Qp | Bosque conífero |
| 2 | Ostuncalco | Montañas volcánicas altas de Occidente | Qp | Cultivos |
| 3 | Ostuncalco | Montañas volcánicas altas de Occidente | Qp | Bosque mixto |
| 4 | Ostuncalco | Montañas volcánicas altas de Occidente | Tv | Bosque latifoliado |
| 5 | Ostuncalco | Montañas volcánicas altas de Occidente | Tv | Cultivos |
| 6 | Ostuncalco | Planicies onduladas | Qp | Cultivos |
| 7 | Quetzaltenango | Montañas volcánicas altas de Occidente | Tv | Bosque latifoliado |
| 8 | Quetzaltenango | Montañas volcánicas altas de Occidente | Tv | Cultivos |
| 9 | Zacualpa | Montañas volcánicas altas de Occidente | Qp | Bosque latifoliado |
| 10 | Zacualpa | Montañas volcánicas altas de Occidente | Qp | Cultivos |
| 11 | Zacualpa | Montañas volcánicas altas de Occidente | Tv | Bosque latifoliado |
| 12 | Ostuncalco | Montañas volcánicas altas de Occidente | Qp | Bosque latifoliado |

Figura 9. Mapa de unidades de muestreo

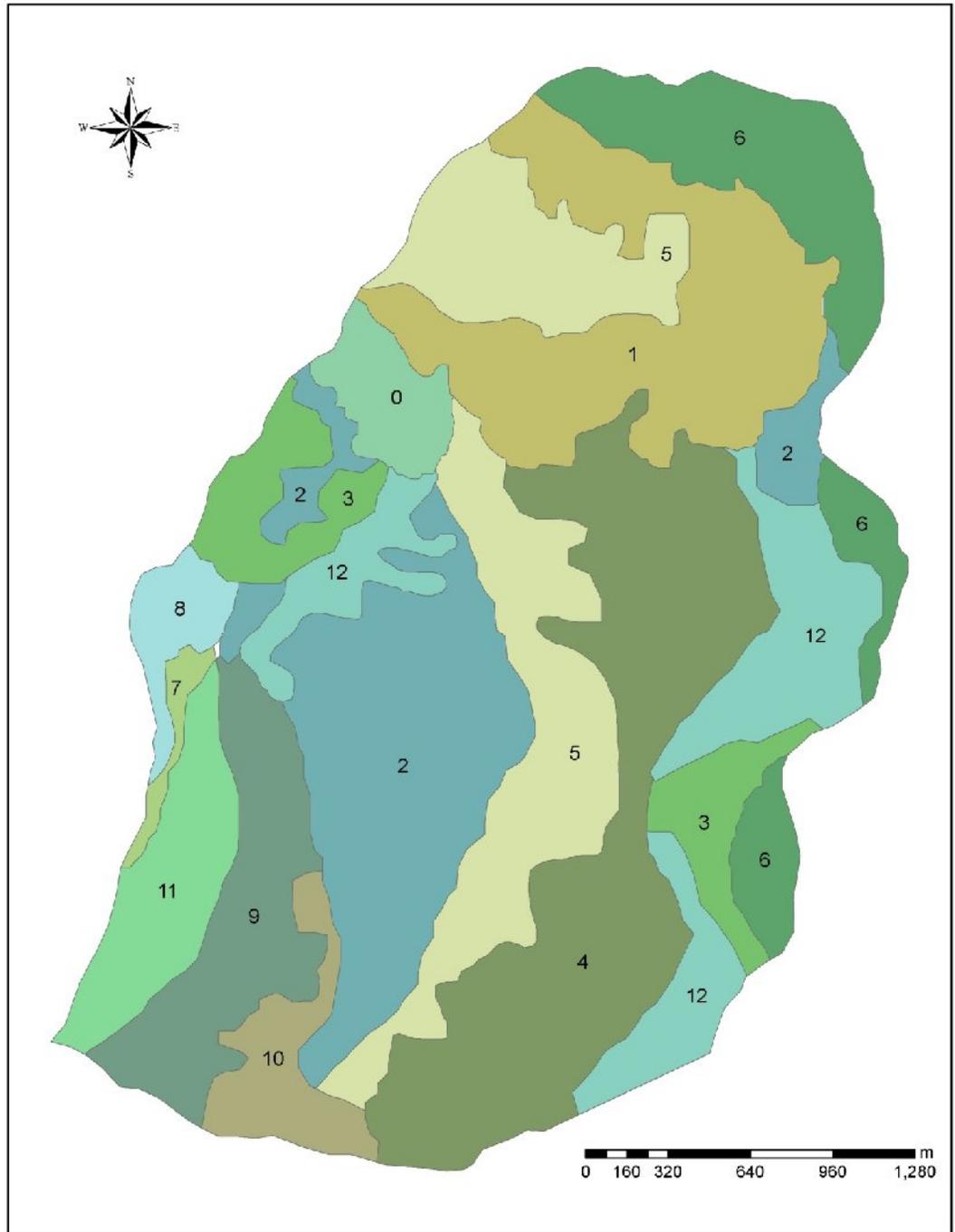
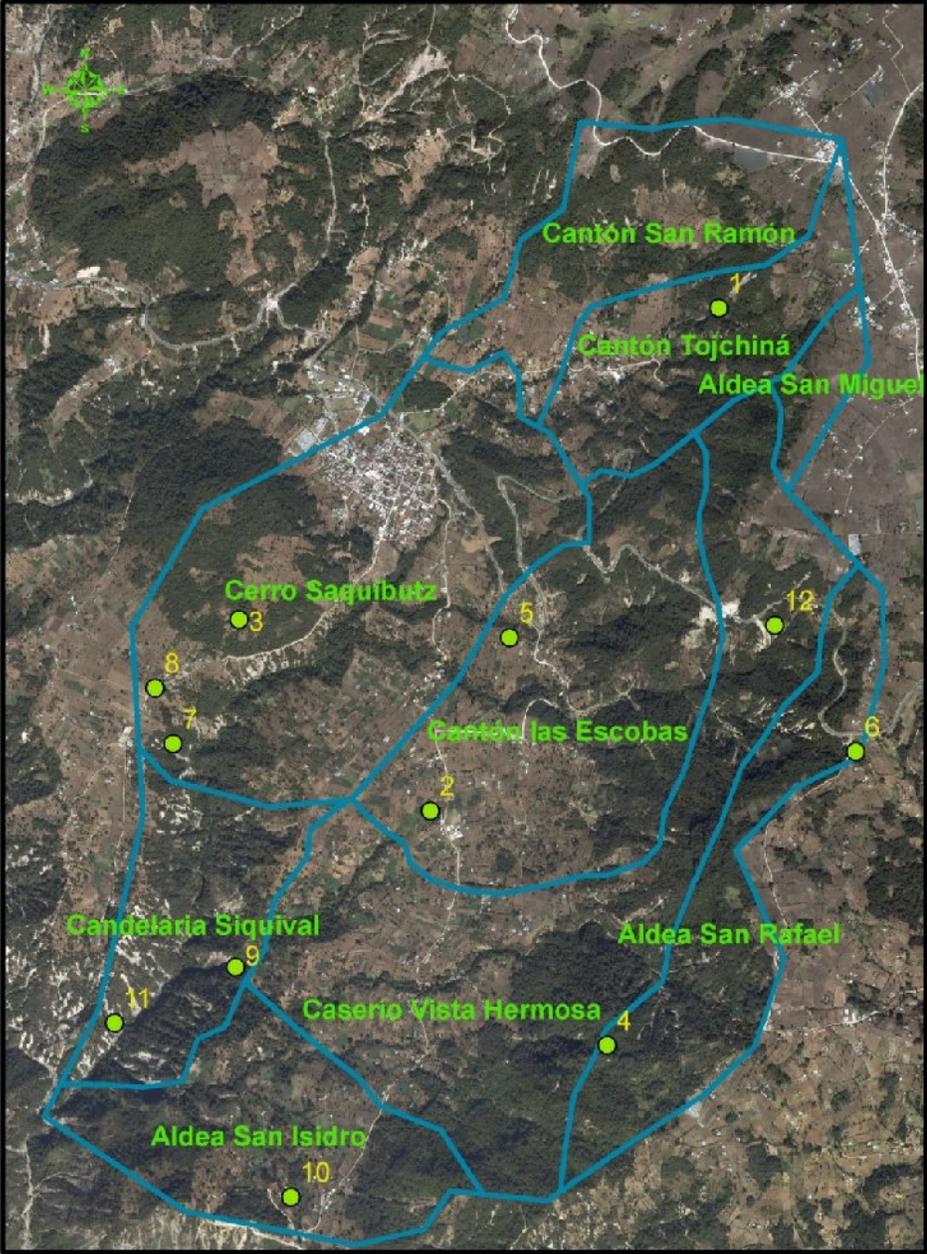


Figura 10. Ubicación de puntos de muestreo



5.2 Análisis de características físicas del suelo

5.2.1 Estructura y composición del suelo

Se realizó el ensayo de límites de Atterberg y granulometría por el método mecánico para encontrar el tipo de suelo de cada punto de muestreo, en base a la UCSS⁶. El total de muestras analizadas fueron 36, de las cuales el tipo de suelo que predominó fue arcillas y limos en un 36%, respectivamente, solamente un 8% de material gravoso; y en un 20% de los puntos de muestreo se encontró roca expuesta. Lo cual es normal en suelos de origen volcánico. En la tabla II se muestra la descripción.

Tabla II. Resumen de ensayo de límites de Atterberg y granulometría

| Punto de muestreo | Profundidad de la muestra | Granulometría | | | Límites de Atterberg | | | Composición del suelo |
|-------------------|---------------------------|---------------|---------|---------|----------------------|-----------------|-----------------|------------------------|
| | | % finos | % arena | % grava | Límite líquido | Límite plástico | Índice plástico | |
| 1 | a | 24.58 | 11.66 | 63.76 | 35.71 | 26.14 | 9.57 | grava mal graduada |
| | b | 24.58 | 11.66 | 63.76 | 35.71 | 26.14 | 9.57 | grava mal graduada |
| | c | 24.58 | 11.66 | 63.76 | 35.71 | 26.14 | 9.57 | grava mal graduada |
| 2 | a | 51.59 | 43.59 | 4.82 | 49.94 | 32.05 | 17.89 | arcilla ligera arenosa |
| | b | 51.59 | 43.59 | 4.82 | 49.94 | 32.05 | 17.89 | arcilla ligera arenosa |
| | c | 51.59 | 43.59 | 4.82 | 49.94 | 32.05 | 17.89 | arcilla ligera arenosa |
| 3 | a | 55.51 | 44.01 | 0.48 | 27.14 | 23.61 | 3.53 | limo orgánico arenoso |
| | b | 55.51 | 44.01 | 0.48 | 27.14 | 23.61 | 3.53 | limo orgánico arenoso |

⁶ Sistema de clasificación unificada de suelos (por su siglas en inglés)

| | | | | | | | | |
|----|---|-------|-------|------|----------------------|-------|-------|--------------------------|
| | c | 55.51 | 44.01 | 0.48 | 27.14 | 23.61 | 3.53 | roca volcánica |
| 4 | a | 50.8 | 43.97 | 5.23 | 58.85 | 45.70 | 13.15 | arcilla orgánica arenosa |
| | b | 60.7 | 37.01 | 2.29 | 61.47 | 44.55 | 16.92 | arcilla densa arenosa |
| | c | 60.7 | 37.01 | 2.29 | 61.47 | 44.55 | 16.92 | arcilla densa arenosa |
| 5 | a | 39.73 | 60.06 | 0.21 | 66.15 | 54.58 | 11.57 | arcilla orgánica arenosa |
| | b | 67.74 | 31.19 | 1.07 | 63.80 | 54.10 | 9.70 | limo orgánico arenoso |
| | c | 67.74 | 31.19 | 1.07 | 63.80 | 54.10 | 9.70 | limo orgánico arenoso |
| 6 | a | 39.73 | 60.06 | 0.21 | 66.15 | 54.58 | 11.57 | arcilla orgánica arenosa |
| | b | 39.73 | 60.06 | 0.21 | 66.15 | 54.58 | 11.57 | arcilla orgánica arenosa |
| | c | 39.73 | 60.06 | 0.21 | 66.15 | 54.58 | 11.57 | arcilla orgánica arenosa |
| 7 | a | 56.41 | 43.06 | 0.53 | 38.87 | 35.37 | 3.50 | limo arenoso |
| | b | 56.41 | 43.06 | 0.53 | 38.87 | 35.37 | 3.50 | limo arenoso |
| | c | 56.41 | 43.06 | 0.53 | 38.87 | 35.37 | 3.50 | limo arenoso |
| 8 | a | 41.57 | 57.76 | 0.66 | Material no plástico | | N/A | limo arenoso |
| | b | 64.44 | 34.91 | 0.65 | 41.56 | 30.71 | 10.85 | limo orgánico arenoso |
| | c | 64.44 | 34.91 | 0.65 | 41.56 | 30.71 | 10.85 | limo orgánico arenoso |
| 9 | a | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | roca volcánica |
| | b | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | roca volcánica |
| | c | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | roca volcánica |
| 10 | a | 37.27 | 57.1 | 5.63 | 67.85 | 50.29 | 17.56 | arcilla orgánica arenosa |

| | | | | | | | | |
|----|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------|
| | b | 52.16 | 46.34 | 1.50 | 50.1 | 30.4 | 19.70 | arcilla ligera arenosa |
| | c | 52.16 | 46.34 | 1.50 | 50.1 | 30.4 | 19.70 | arcilla ligera arenosa |
| 11 | a | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | roca volcánica |
| | b | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | roca volcánica |
| | c | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | roca volcánica |
| 12 | a | 56.84 | 29.75 | 13.41 | 37.09 | 26.69 | 10.40 | limo arenoso |
| | b | 56.84 | 29.75 | 13.41 | 37.09 | 26.69 | 10.40 | limo arenoso |
| | c | 56.84 | 29.75 | 13.41 | 37.09 | 26.69 | 10.40 | limo arenoso |

N/A = No aplica, el ensayo no se puede realizar

a = 1 metro de profundidad

b = 2 metros de profundidad

c = 3 metros de profundidad

5.2.2 Densidad

De cada pozo a cielo abierto se extrajo una muestra inalterada del suelo para evaluar la densidad en cada estrato o a cada metro de profundidad. Las densidades del suelo se encuentran entre rangos considerablemente normales. La tabla III muestra los datos y valores necesarios para determinar la densidad de cada muestra. Donde:

PMSP = Peso de la muestra sin parafina

PMCP = Peso de la muestra con parafina

PA = Peso al aire

Tabla III. Resumen ensayo de densidad

| Punto de muestreo | Código de Muestra | PMSP (gr) | PMCP (gr) | PA (gr) | Peso de parafina (gr) | Vol. muestra (cm3) | Vol. Parafina (cm3) | Vol. Neto (cm3) | Densidad (g/cm3) |
|-------------------|-------------------|-----------|-----------|---------|-----------------------|--------------------|---------------------|-----------------|------------------|
| 1 | a | 45.20 | 51.50 | 12.3 | 6.30 | 32.90 | 7.000 | 25.900 | 1.75 |
| 1 | b | 76.34 | 79.40 | 34.6 | 3.06 | 41.74 | 3.400 | 38.340 | 1.99 |
| 1 | c | 132.00 | 145.70 | 58.5 | 13.70 | 73.50 | 15.222 | 58.278 | 2.27 |
| 2 | a | 318.55 | 339.20 | 131.9 | 20.65 | 186.65 | 22.944 | 163.706 | 1.95 |
| 2 | a | 86.45 | 100.00 | 32.5 | 13.55 | 53.95 | 15.056 | 38.894 | 2.22 |
| 2 | b | - | - | - | - | | - | - | - |
| 2 | c | - | - | - | - | | - | - | - |
| 3 | a | 163.20 | 183.70 | 45.0 | 20.50 | 118.20 | 22.778 | 95.422 | 1.71 |
| 3 | b | 233.86 | 256.10 | 97.8 | 22.24 | 136.06 | 24.711 | 111.349 | 2.10 |
| 3 | c | Roca | | | | | | | |
| 4 | a | 127.00 | 143.00 | 23.7 | 16.00 | 103.30 | 17.778 | 85.522 | 1.48 |
| 4 | b | 249.00 | 273.10 | 59.6 | 24.10 | 189.40 | 26.778 | 162.622 | 1.53 |
| 4 | c | 98.60 | 112.40 | 27.0 | 13.80 | 71.60 | 15.333 | 56.267 | 1.75 |
| 5 | a | 128.50 | 134.20 | 38.0 | 5.70 | 90.50 | 6.333 | 84.167 | 1.53 |
| 5 | b | 309.50 | 327.00 | 133.2 | 17.50 | 176.30 | 19.444 | 156.856 | 1.97 |
| 5 | b | 175.20 | 187.90 | 75.5 | 12.70 | 99.70 | 14.111 | 85.589 | 2.05 |
| 5 | c | 98.75 | 120.00 | 32.2 | 21.25 | 66.55 | 23.611 | 42.939 | 2.30 |
| 6 | a | 49.00 | 49.90 | 12.4 | 0.90 | 36.60 | 1.000 | 35.600 | 1.38 |
| 6 | b | 292.60 | 329.00 | 58.0 | 36.40 | 234.60 | 40.444 | 194.156 | 1.51 |
| 6 | b | 63.00 | 76.50 | 13.0 | 13.50 | 50.00 | 15.000 | 35.000 | 1.80 |
| 6 | c | 227.50 | 238.40 | 95.0 | 10.90 | 132.50 | 12.111 | 120.389 | 1.89 |
| 7 | a | 92.4 | 102.7 | 26.9 | 10.30 | 65.50 | 11.444 | 54.056 | 1.71 |
| 7 | b | 83.5 | 92.5 | 33.2 | 9.00 | 50.30 | 10.000 | 40.300 | 2.07 |
| 7 | c | 112.5 | 122 | 52.4 | 9.50 | 60.10 | 10.556 | 49.544 | 2.27 |
| 8 | a | 84.60 | 92.67 | 26.9 | 8.07 | 57.70 | 8.967 | 48.733 | 1.74 |
| 8 | b | 92.10 | 108.90 | 28.8 | 16.80 | 63.30 | 18.667 | 44.633 | 2.06 |

| | | | | | | | | | |
|----|---|--------|-------|-------|-------|--------|--------|-------------|------|
| 8 | c | 89.8 | 97.80 | 40.70 | 8.00 | 49.10 | 8.889 | 40.211 | 2.23 |
| 9 | a | Roca | | | | | | | |
| 10 | a | 125.5 | 132.6 | 38.4 | 7.10 | 87.10 | 7.889 | 79.211 | 1.58 |
| 10 | b | 173.3 | 181.8 | 56.9 | 8.50 | 116.40 | 9.444 | 106.95 6 | 1.62 |
| 10 | c | 93.2 | 104 | 33.5 | 10.80 | 59.70 | 12.000 | 47.700 | 1.95 |
| 11 | a | Roca | | | | | | | |
| 12 | a | 55.70 | 63.4 | 20.90 | 7.70 | 34.80 | 8.556 | 26.244 | 2.12 |
| 12 | a | 147.90 | 163.5 | 53.50 | 15.60 | 94.40 | 17.333 | 77.067 | 1.92 |
| 12 | b | 223.60 | 267.3 | 78.00 | 43.70 | 145.60 | 48.56 | 97.04 | 2.30 |
| 12 | c | 179.50 | 198.7 | 89.90 | 19.20 | 89.60 | 21.33 | 68.27 | 2.32 |

a = 1 metro de profundidad,

b = 2 metros de profundidad

c = 3 metros de profundidad

5.2.3 Porosidad

La porosidad se obtuvo en base a la relación de la gravedad específica y a la densidad. Los suelos muestran muy poca porosidad, lo cual indica que aunque la composición del suelo permita al agua penetrar, no necesariamente ésta escurre a estratos inferiores.

La tabla IV muestra las gravedades específicas de las muestras y los valores de porosidad se describen en la tabla V, la cual integra los valores de densidad y gravedad específica.

5.2.4 Humedad

La humedad es una variable relativa a la época, en este caso, las muestras fueron obtenidas cerca del período de estiaje, por lo tanto los suelos no se encontraron en su máxima capacidad de saturación. Sino más bien una humedad baja relativa a la capacidad máxima de retención de humedad. En la tabla VI se describe la humedad del suelo insitu de cada estrato.

Tabla IV: Resumen ensayo de gravedad específica

| Punto de muestreo | Código de muestra | Peso matraz | Matraz + suelo | Suelo seco | Matraz + agua + suelo | Matraz + agua | Gravedad específica | Promedio |
|-------------------|-------------------|-------------|----------------|------------|-----------------------|---------------|---------------------|----------|
| 1 | a-c | 170.70 | 230.70 | 60.00 | 703.60 | 668.10 | 2.45 | 2.46 |
| 1 | a-c | 186.50 | 246.50 | 60.00 | 719.30 | 683.60 | 2.47 | |
| 2 | a | 170.70 | 230.70 | 60.00 | 701.10 | 668.10 | 2.22 | 2.24 |
| 2 | a | 186.50 | 246.50 | 60.00 | 717.10 | 683.60 | 2.26 | |
| 2 | b-c | - | - | - | - | - | - | |
| 3 | a-b | 170.70 | 220.90 | 50.20 | 698.10 | 669.30 | 2.35 | 2.38 |
| 3 | a-b | 186.50 | 235.90 | 49.40 | 713.60 | 684.70 | 2.41 | |
| 4 | a | 170.70 | 230.70 | 60.00 | 699.80 | 668.10 | 2.12 | 2.11 |
| 4 | a | 186.50 | 246.50 | 60.00 | 715.00 | 683.60 | 2.10 | |
| 4 | b-c | 170.70 | 230.70 | 60.00 | 699.90 | 668.10 | 2.13 | 2.15 |
| 4 | b-c | 186.50 | 246.50 | 60.00 | 716.00 | 683.60 | 2.17 | |
| 5 | a | 170.70 | 230.70 | 60.00 | 697.80 | 668.10 | 1.98 | 2.01 |
| 5 | a | 186.50 | 246.50 | 60.00 | 714.20 | 683.60 | 2.04 | |
| 5 | b-c | 170.70 | 230.70 | 60.00 | 695.60 | 668.10 | 1.85 | 1.84 |
| 5 | b-c | 186.50 | 246.50 | 60.00 | 710.80 | 683.60 | 1.83 | |
| 6 | a-c | 170.70 | 230.70 | 60.00 | 697.80 | 668.10 | 1.98 | 2.01 |
| 6 | a-c | 186.50 | 246.50 | 60.00 | 714.20 | 683.60 | 2.04 | |
| 7 | a-c | 174.80 | 228.70 | 53.90 | 704.80 | 673.80 | 2.35 | 2.38 |
| 7 | a-c | 186.10 | 239.60 | 53.50 | 715.90 | 684.70 | 2.40 | |
| 8 | a | 180.15 | 230.70 | 50.55 | 705.30 | 678.40 | 2.14 | 2.17 |
| 8 | a | 159.10 | 210.30 | 51.20 | 686.20 | 658.20 | 2.21 | |
| 8 | b-c | 174.80 | 228.70 | 53.90 | 704.80 | 673.80 | 2.35 | 2.38 |
| 8 | b-c | 186.10 | 239.60 | 53.50 | 715.90 | 684.70 | 2.40 | |
| 9 | a-c | Roca | | | | | | |
| 10 | a | 170.70 | 230.70 | 60.00 | 697.80 | 668.10 | 1.98 | 2.01 |
| 10 | a | 186.50 | 246.50 | 60.00 | 714.20 | 683.60 | 2.04 | |
| 10 | b-c | 170.70 | 230.70 | 60.00 | 699.80 | 668.10 | 2.12 | 2.08 |
| 10 | b-c | 186.50 | 246.50 | 60.00 | 714.20 | 683.60 | 2.04 | |
| 11 | a-c | Roca | | | | | | |
| 12 | a-c | 170.70 | 230.70 | 60.00 | 703.60 | 668.10 | 2.45 | 2.46 |
| 12 | a-c | 186.50 | 246.50 | 60.00 | 719.30 | 683.60 | 2.47 | |

Tabla V. Resumen de porcentajes de porosidad de muestras

| Punto de muestreo | Código de muestra | Gravedad específica | Densidad masa | Peso de la masa | Volumen total | Peso del sólido | Volumen del sólido | Volumen de vacíos | Relación de vacíos | Porosidad % |
|-------------------|-------------------|---------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------|
| 1 | a | 2.46 | 1.75 | 45.20 | 25.90 | 40.97 | 16.66 | 9.24 | 0.55 | 35.68 |
| 1 | b | 2.46 | 1.99 | 76.34 | 38.36 | 68.61 | 27.90 | 10.46 | 0.37 | 27.26 |
| 1 | c | 2.46 | 2.27 | 132.00 | 58.15 | 117.57 | 47.81 | 10.34 | 0.22 | 17.78 |
| 2 | a | 2.24 | 1.95 | 318.55 | 163.69 | 256.69 | 114.59 | 49.10 | 0.43 | 30.00 |
| 2 | b-c | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3 | a | 2.38 | 1.71 | 163.20 | 95.44 | 128.09 | 53.82 | 41.62 | 0.77 | 43.61 |
| 3 | b | 2.38 | 2.10 | 233.86 | 111.36 | 179.37 | 75.36 | 36.00 | 0.48 | 32.32 |
| 3 | c | | | | | | | | | |
| Roca | | | | | | | | | | |
| 4 | a | 2.11 | 1.48 | 127.00 | 85.81 | 78.99 | 37.45 | 48.36 | 1.29 | 56.35 |
| 4 | b | 2.15 | 1.53 | 249.00 | 162.64 | 148.08 | 68.88 | 93.76 | 1.36 | 57.65 |
| 4 | c | 2.15 | 1.75 | 98.60 | 56.34 | 56.51 | 26.28 | 30.06 | 1.14 | 53.35 |
| 5 | a | 2.01 | 1.53 | 128.50 | 83.99 | 100.56 | 50.03 | 33.96 | 0.68 | 40.43 |
| 5 | b | 1.84 | 1.97 | 309.50 | 157.11 | 174.92 | 95.06 | 62.04 | 0.65 | 39.49 |
| 5 | b | 1.84 | 2.05 | 175.20 | 85.46 | 99.02 | 53.81 | 31.65 | 0.59 | 37.03 |
| 5 | c | 1.84 | 2.30 | 98.75 | 42.93 | 53.87 | 29.32 | 13.62 | 0.46 | 31.72 |
| 6 | a | 2.01 | 1.38 | 49.00 | 35.61 | 30.17 | 15.01 | 20.60 | 1.37 | 57.85 |
| 6 | b | 2.01 | 1.51 | 292.60 | 194.16 | 175.84 | 87.48 | 106.67 | 1.22 | 54.94 |
| 6 | b | 2.01 | 1.80 | 63.00 | 35.00 | 37.86 | 18.84 | 16.16 | 0.86 | 46.18 |
| 6 | c | 2.01 | 1.89 | 227.50 | 120.37 | 131.29 | 65.32 | 55.05 | 0.84 | 45.74 |
| 7 | a | 2.38 | 1.71 | 92.4 | 54.04 | 68.85 | 28.93 | 25.11 | 0.87 | 46.46 |
| 7 | B | 2.38 | 2.07 | 83.5 | 40.34 | 61.41 | 25.80 | 14.54 | 0.56 | 36.03 |
| 7 | C | 2.38 | 2.27 | 112.5 | 49.56 | 79.73 | 33.50 | 16.06 | 0.48 | 32.40 |

| | | | | | | | | | | |
|------|-----|------|------|--------|--------|--------|-------|-------|------|-------|
| 8 | A | 2.17 | 1.74 | 84.60 | 48.62 | 62.13 | 28.63 | 19.99 | 0.70 | 41.11 |
| 8 | B | 2.38 | 2.06 | 92.10 | 44.71 | 67.64 | 28.42 | 16.29 | 0.57 | 36.43 |
| 8 | C | 2.38 | 2.23 | 89.80 | 40.27 | 65.95 | 27.71 | 12.56 | 0.45 | 31.19 |
| 9 | avg | | | | | | | | | |
| Roca | | | | | | | | | | |
| 10 | A | 2.01 | 1.58 | 125.5 | 79.43 | 92.17 | 45.86 | 33.57 | 0.73 | 42.27 |
| 10 | B | 2.08 | 1.62 | 173.3 | 106.98 | 127.28 | 61.19 | 45.78 | 0.75 | 42.80 |
| 10 | C | 2.08 | 1.95 | 93.2 | 47.79 | 68.45 | 32.91 | 14.89 | 0.45 | 31.15 |
| 11 | avg | | | | | | | | | |
| Roca | | | | | | | | | | |
| 12 | A | 2.46 | 2.12 | 55.70 | 26.27 | 52.42 | 21.31 | 4.97 | 0.23 | 18.50 |
| 12 | A | 2.46 | 1.92 | 147.90 | 77.03 | 139.19 | 66.58 | 20.46 | 0.36 | 26.55 |
| 12 | B | 2.46 | 2.30 | 223.60 | 97.22 | 209.15 | 85.02 | 12.20 | 0.14 | 12.55 |
| 12 | C | 2.46 | 2.32 | 179.50 | 77.37 | 167.02 | 67.90 | 9.48 | 0.14 | 12.25 |

Tabla VI. Resumen de ensayo de humedad

| Punto de muestreo | Código de muestra | Código de tara | PT | PMH | Peso neto húmedo | PMS | Peso neto seco | % de humedad | Promedios de humedad |
|-------------------|-------------------|----------------|------|------|------------------|-------|----------------|--------------|----------------------|
| 1 | A | S-8 | 21.5 | 52.3 | 30.8 | 49.6 | 28.1 | 9.61 | 10.33 |
| 1 | A | S-7 | 21.6 | 45.7 | 24.10 | 43.30 | 21.70 | 11.06 | |
| 1 | B | S-12 | 22.2 | 66.1 | 41.28 | 63.12 | 32.10 | 10.22 | 11.26 |
| 1 | B | S-23 | 20.3 | 54.3 | 34.00 | 50.20 | 33.30 | 12.31 | |
| 1 | C | T-32 | 24.5 | 37.5 | 13.04 | 35.12 | 18.90 | 12.80 | 12.27 |
| 1 | C | C-16 | 24.5 | 63.7 | 39.20 | 57.50 | 52.80 | 11.74 | |
| 2 | A | A-32 | 24.6 | 76.9 | 52.30 | 66.90 | 42.30 | 25.64 | 24.10 |
| 2 | A | A-23 | 24.6 | 74.8 | 50.20 | 64.90 | 40.30 | 24.57 | |
| 2 | B | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | B | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | C | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2 | C | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3 | A | S-45 | 20.6 | 58.3 | 37.70 | 50.10 | 29.50 | 27.80 | 27.41 |
| 3 | A | S-65 | 24.3 | 65.2 | 40.90 | 56.50 | 32.20 | 27.02 | |
| 3 | B | S-32 | 20.6 | 59.2 | 38.60 | 50.30 | 29.70 | 29.97 | 30.38 |
| 3 | B | A-63 | 20.0 | 34.8 | 14.78 | 31.30 | 11.30 | 30.80 | |
| 3 | C | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3 | C | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 4 | a | C-12 | 24.8 | 51.6 | 26.80 | 41.40 | 16.60 | 61.45 | 60.78 |
| 4 | a | A-49 | 24.3 | 52.8 | 28.50 | 42.10 | 17.80 | 60.11 | |
| 4 | b | C-3 | 24.7 | 64.2 | 39.50 | 48.20 | 23.50 | 68.09 | 68.15 |
| 4 | b | A-60 | 24.6 | 60.6 | 36.00 | 46.00 | 21.40 | 68.22 | |
| 4 | c | A-56 | 24.4 | 54.5 | 30.10 | 41.70 | 17.30 | 73.99 | 74.48 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|-------|------|------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 4 | C | A-81 | 24.4 | 42.6 | 18.20 | 34.80 | 10.40 | 75.00 | |
| 5 | a | A | 18.8 | 49.2 | 30.40 | 42.80 | 24.00 | 26.67 | 27.79 |
| 5 | a | C-16 | 24.5 | 66.4 | 41.90 | 57.00 | 32.50 | 28.92 | |
| 5 | b | S-221 | 21.0 | 52.9 | 31.90 | 39.00 | 18.00 | 77.22 | 76.94 |
| 5 | b | S-4 | 21.8 | 43.0 | 21.20 | 33.80 | 12.00 | 76.67 | |
| 5 | c | E-28 | 22.7 | 46.7 | 24.00 | 36.12 | 13.42 | 78.84 | 83.83 |
| 5 | c | D-12 | 23.4 | 57.2 | 33.80 | 41.30 | 17.90 | 88.83 | |
| 6 | a | A-63 | 20.0 | 37.4 | 17.40 | 30.60 | 10.60 | 64.15 | 62.43 |
| 6 | a | A-10 | 20.5 | 47.5 | 27.00 | 37.30 | 16.80 | 60.71 | |
| 6 | b | S-3 | 21.9 | 42.5 | 20.60 | 32.00 | 10.10 | 103.96 | 66.40 |
| 6 | b | 10 | 21.7 | 41.8 | 20.10 | 37.30 | 15.60 | 28.85 | |
| 6 | c | A-10 | 20.5 | 38.6 | 18.10 | 31.00 | 10.50 | 72.38 | 73.28 |
| 6 | c | S-3 | 21.9 | 45.5 | 23.60 | 35.45 | 13.55 | 74.17 | |
| 7 | a | S-65 | 24.3 | 42.1 | 17.83 | 37.80 | 13.50 | 32.07 | 34.20 |
| 7 | a | C-16 | 24.5 | 62.4 | 37.90 | 52.30 | 27.80 | 36.33 | |
| 7 | b | S-221 | 21.0 | 34.0 | 12.98 | 30.60 | 9.60 | 35.21 | 35.97 |
| 7 | b | A-56 | 24.4 | 44.5 | 20.10 | 39.10 | 14.70 | 36.73 | |
| 7 | c | E-28 | 22.7 | 51.2 | 28.45 | 42.90 | 20.20 | 40.84 | 41.29 |
| 7 | c | R-12 | 22.2 | 46.6 | 24.45 | 39.40 | 17.25 | 41.74 | |
| 8 | a | B-23 | 20.3 | 47.1 | 26.80 | 41.90 | 21.60 | 24.07 | 24.54 |
| 8 | a | T-32 | 24.5 | 47.0 | 22.50 | 42.50 | 18.00 | 25.00 | |
| 8 | b | C-16 | 24.5 | 48.3 | 23.80 | 42.60 | 18.10 | 31.49 | 28.57 |
| 8 | b | S-8 | 21.5 | 55.8 | 34.30 | 48.80 | 27.30 | 25.64 | |
| 8 | c | S-7 | 21.6 | 51.3 | 29.70 | 44.80 | 23.20 | 28.02 | 30.15 |
| 8 | c | R-12 | 22.2 | 53.7 | 31.55 | 46.00 | 23.85 | 32.29 | |

| 9 | | Roca | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|---|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | a | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | a | S-65 | 24.3 | 54.7 | 30.40 | 47.90 | 23.60 | 28.81 | 30.47 | | | | | | | | | | | | |
| 10 | a | C-16 | 24.5 | 46.3 | 21.80 | 41.00 | 16.50 | 32.12 | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | b | S-221 | 21.0 | 64.7 | 43.70 | 54.10 | 33.10 | 32.02 | 33.88 | | | | | | | | | | | | |
| 10 | b | A-56 | 24.4 | 58.2 | 33.80 | 49.30 | 24.90 | 35.74 | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | c | E-28 | 22.7 | 49.1 | 26.42 | 41.60 | 18.90 | 39.79 | 36.98 | | | | | | | | | | | | |
| 10 | c | T-32 | 24.5 | 61.8 | 37.30 | 52.30 | 27.80 | 34.17 | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | a | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Roca | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | a | A-56 | 24.4 | 65.5 | 41.10 | 62.90 | 38.50 | 6.75 | 6.26 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | a | A-81 | 24.4 | 50.1 | 25.70 | 48.70 | 24.30 | 5.76 | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | b | C-16 | 24.5 | 48.8 | 24.30 | 47.10 | 22.60 | 7.52 | 6.91 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | b | S-221 | 21.0 | 46.3 | 25.30 | 44.80 | 23.80 | 6.30 | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | c | A-56 | 24.4 | 50.0 | 25.60 | 48.00 | 23.60 | 8.47 | 7.47 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | c | S-8 | 21.5 | 56.1 | 34.6 | 54.00 | 32.5 | 6.46 | | | | | | | | | | | | | |

5.2.5 Coeficiente de permeabilidad

Para determinar los coeficientes de permeabilidad de cada tipo de suelo se han realizado diversidad de estudios los cuales han permitido concretar valores promedios de velocidad de permeabilidad para cada tipo de suelo.

Para este caso, los coeficientes fueron asignados según dichos estudios de acuerdo a la estructura o composición que cada tipo de suelo presentó. (Ver la tabla VII).

Tabla VII. Asignación de valor de velocidad de infiltración

| Pt. Muestreo | Profundidad de la muestra | Coeficiente de permeabilidad (cm/seg) |
|--------------|---------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 1a | $> 10 e^{-1}$ |
| | 1b | $> 10 e^{-1}$ |
| | 1c | $> 10 e^{-1}$ |
| 2 | 2a | $10 e^{-3}$ a $10 e^{-5}$ |
| | 2b | $10 e^{-3}$ a $10 e^{-5}$ |
| | 2c | $10 e^{-3}$ a $10 e^{-5}$ |
| 3 | 3a | $10 e^{-3}$ a $10 e^{-5}$ |
| | 3b | $10 e^{-3}$ a $10 e^{-5}$ |
| | 3c | - |
| 4 | 4a | $10 e^{-5}$ a $10 e^{-7}$ |
| | 4b | $< 10 e^{-7}$ |
| | 4c | $< 10 e^{-7}$ |
| 5 | 5a | $10 e^{-5}$ a $10 e^{-7}$ |
| | 5b | $10 e^{-3}$ a $10 e^{-5}$ |
| | 5c | $10 e^{-3}$ a $10 e^{-5}$ |
| 6 | 6a | $10 e^{-5}$ a $10 e^{-7}$ |
| | 6b | $10 e^{-5}$ a $10 e^{-7}$ |
| | 6c | $10 e^{-5}$ a $10 e^{-7}$ |
| 7 | 7a | $10 e^{-3}$ a $10 e^{-5}$ |

| | | |
|----|-----|-------------------|
| | 7b | 10 e -3 a 10 e -5 |
| | 7c | 10 e -3 a 10 e -5 |
| 8 | 8a | > 10 e -1 |
| | 8b | 10 e -3 a 10 e -5 |
| | 8c | 10 e -3 a 10 e -5 |
| 9 | 9a | 10 e -1 a 10 e -3 |
| | 9b | - |
| | 9c | - |
| 10 | 10a | 10 e -5 a 10 e -7 |
| | 10b | 10 e -3 a 10 e -5 |
| | 10c | 10 e -3 a 10 e -5 |
| 11 | 11a | - |
| | 11b | - |
| | 11c | > 10 e -1 |
| 12 | 12a | 10 e -1 a 10 e -3 |
| | 12b | 10 e -1 a 10 e -3 |
| | 12c | 10 e -1 a 10 e -3 |

5.3 Elaboración de mapa de regulación hídrica:

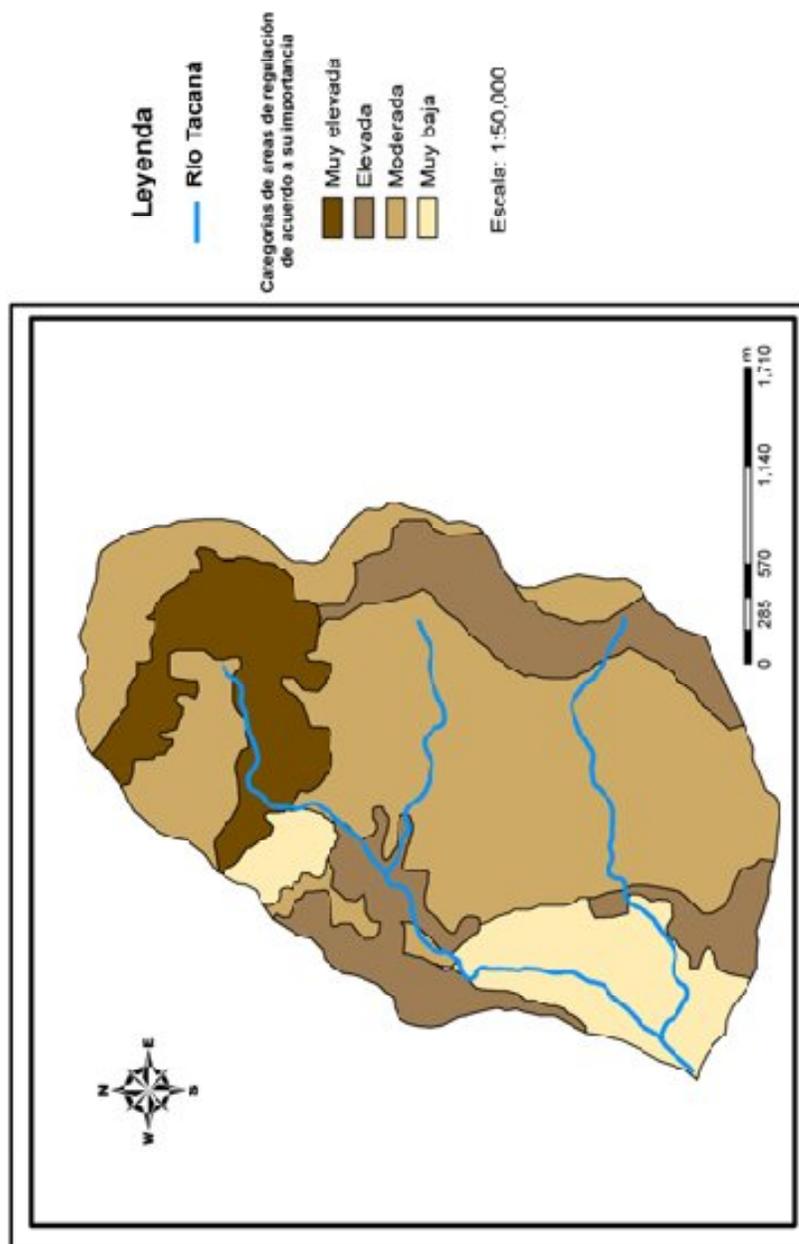
La tabla XIII, muestra la asignación de valores según su capacidad de regulación hídrica para cada área de muestreo descrita. Con base a las matrices de criterios de la sección 2.3.1. Dando lugar al primer resultado, “Mapa final de regulación hídrica en base al análisis de las características físicas del suelo”. Se realizaron agrupamientos de áreas con recargas similares mediante una codificación de colores. Mostrando así el efecto del suelo tanto para la recarga del acuífero como para la regulación de escorrentías posibles (ver figura 11).

Tabla VIII. Análisis de capacidad de regulación de regulación, según características físicas del suelo

| Muestra | Composición del suelo | Densidad (g/cm ³) | Valor de K para permeabilidad (cm/hgg) | Porosidad % | Contenido de humedad % | Código de capacidad de regulación | Capacidad de Regulación |
|---------|-----------------------|-------------------------------|--|-------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 1a | 5 | 2 | 3 | 2 | 5 | 10 | Muy elevada |
| 1b | 5 | 2 | 3 | 2 | 5 | 19 | |
| 1c | 5 | 1 | 3 | 1 | 5 | 17 | |
| 2a | 3 | 1 | 3 | 2 | 4 | 13 | Moderada |
| 2b | 3 | 1 | 3 | - | - | 7 | |
| 7r | 3 | 1 | 3 | - | - | 7 | |
| 3a | 4 | 2 | 3 | 3 | 4 | 16 | Elevada |
| 3b | 4 | 1 | 3 | 2 | 4 | 14 | |
| 3c | 1 | 1 | - | - | - | 2 | Moderada |
| 4a | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 12 | |
| 4b | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 9 | Moderada |
| 4c | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 9 | |
| 5a | 2 | 2 | 2 | 3 | 4 | 13 | Moderada |
| 5b | 4 | 1 | 3 | 2 | 2 | 12 | |
| 5c | 4 | 1 | 3 | 2 | 1 | 11 | Moderada |
| 6a | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 12 | |
| 6b | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 11 | Moderada |
| 6c | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 11 | |
| 7a | 5 | 2 | 3 | 3 | 4 | 17 | Elevada |
| 7b | 5 | 1 | 3 | 2 | 4 | 15 | |
| 7r | 5 | 1 | 3 | 2 | 3 | 14 | |
| 8a | 5 | 2 | 3 | 3 | 4 | 19 | Elevada |

| | | | | | | | |
|-----|---|---|---|---|---|----|----------|
| 8b | 4 | 1 | 3 | 2 | 4 | 14 | |
| 8c | 4 | 1 | 3 | 2 | 4 | 14 | |
| 9a | 1 | 1 | 4 | - | - | | Muy Baja |
| 9b | 1 | 1 | - | - | - | | |
| 9c | 1 | 1 | - | - | - | | |
| 10a | 2 | 2 | 2 | 3 | 4 | 13 | |
| 10b | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 15 | Elevada |
| 10c | 3 | 2 | 3 | 2 | 4 | 14 | |
| 11a | 1 | 1 | - | - | - | | Muy Baja |
| 11b | 1 | 1 | - | - | - | | |
| 11c | 1 | 1 | 5 | - | - | | |
| 12a | 5 | 1 | 4 | 2 | 5 | 17 | |
| 12b | 5 | 1 | 4 | 1 | 5 | 16 | Elevada |
| 12c | 5 | 1 | 4 | 1 | 5 | 16 | |

Figura 11. Mapa de regulación hídrica, según características físicas del suelo de la cuenca del río Tacaná



El segundo resultado consiste en la delimitación de áreas de regulación hídrica incluyendo las características físicas del suelo, el uso actual del suelo y porcentajes de pendientes, dando como producto final el mapa nombrado “*Mapa de regulación hídrica de la cuenca del río Tacaná*”. Para este caso, se obtuvieron tres categorías respecto a la capacidad de regulación hídrica, según la asignación de valores que se muestra en tabla IX (ver figura 12).

Capacidad elevada: son aquellas áreas que al integrar las características físicas del suelo, condiciones topográficas y uso actual del suelo, regulan el recurso hídrico de la cuenca. Son capaces de absorber e infiltrar el agua procedente de precipitaciones, reducir avenidas y probablemente aumentar el volumen de agua a nivel subterráneo, aumentando de esta manera el manto freático de la cuenca y el caudal del río.

Capacidad moderada: aunque muchas de las variables coinciden para regular el proceso hidrológico, algunas otras manifiestan los menores niveles de capacidad para regular dicho proceso. Lo que permite interpretar que existe una mediana capacidad de reducir avenidas y poco influye en el aumento del manto freático de la cuenca y el caudal del río.

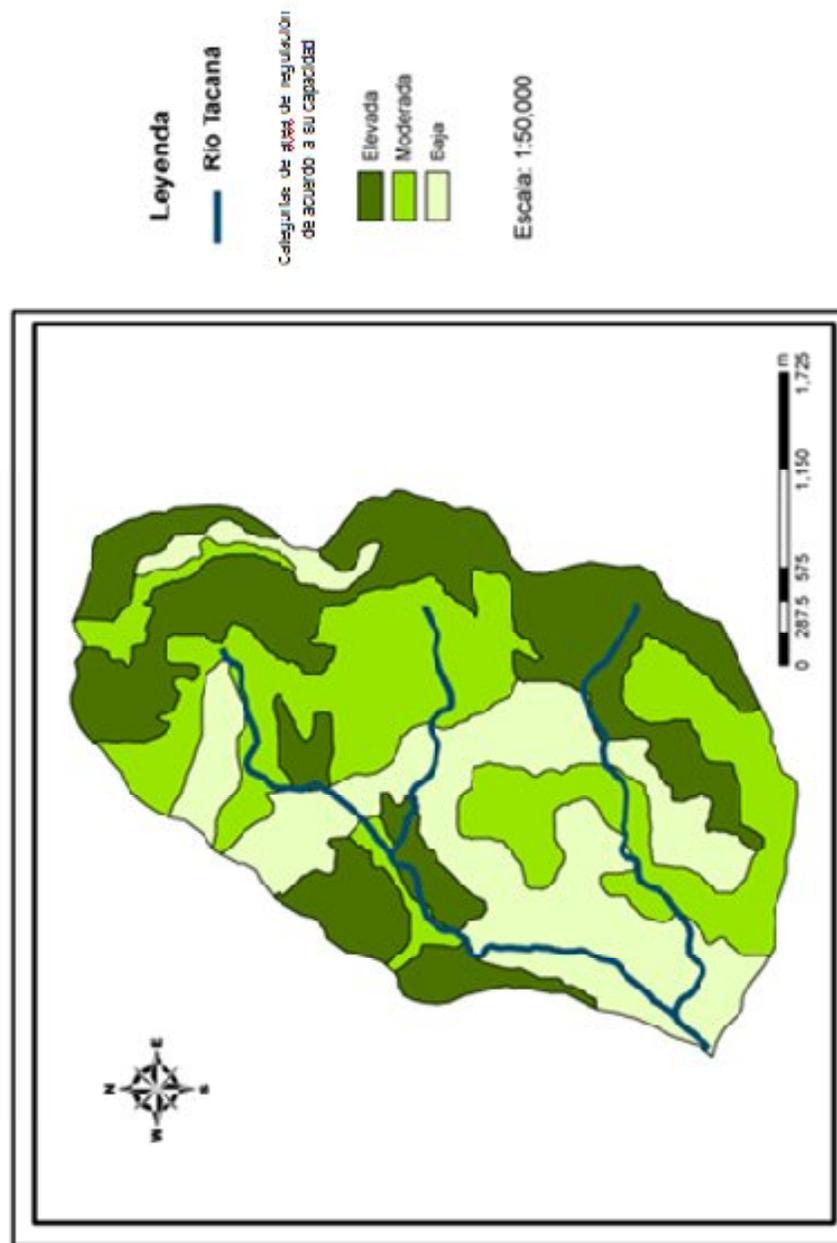
Capacidad baja: éstas son tierras donde la mayor parte de las variables consideradas influyen a una poca alimentación hídrica del río y alta escorrentía superficial.

Tabla IX

| Porcentaje de Pendiente | Uso actual | Capacidad de regulación en base al tipo de suelo | Valor %Pendiente | Valor uso actual | Nuevo código de capacidad de regulación | Capacidad de regulación |
|-------------------------|--------------------|--|------------------|------------------|---|-------------------------|
| 16% - 32% | Bosque conífero | Moderada | 2 | 3 | 3 | Moderada |
| 16% - 32% | Bosque conífero | Muy baja | 2 | 3 | 3 | Moderada |
| 16% - 32% | Bosque conífero | Muy elevada | 2 | 3 | 3 | Moderada |
| 16% - 32% | Bosque latifoliado | Elevada | 2 | 5 | 4 | Elevada |
| 16% - 32% | Bosque latifoliado | Moderada | 2 | 5 | 4 | Elevada |
| 16% - 32% | Bosque latifoliado | Muy baja | 2 | 5 | 4 | Elevada |
| 16% - 32% | Bosque latifoliado | Muy elevada | 2 | 5 | 4 | Elevada |
| 16% - 32% | Bosque mixto | Elevada | 2 | 4 | 3 | Moderada |
| 16% - 32% | Bosque mixto | Moderada | 2 | 4 | 3 | Moderada |
| 16% - 32% | Centro poblado | Moderada | 2 | 1 | 2 | Baja |
| 16% - 32% | Centro poblado | Muy baja | 2 | 1 | 2 | Baja |
| 16% - 32% | Centro poblado | Muy elevada | 2 | 1 | 2 | Baja |
| 16% - 32% | Cultivos | Elevada | 2 | 2 | 2 | Baja |
| 16% - 32% | Cultivos | Moderada | 2 | 2 | 2 | Baja |
| 16% - 32% | Cultivos | Muy baja | 2 | 2 | 2 | Baja |
| 16% - 32% | Cultivos | Muy elevada | 2 | 2 | 2 | Baja |
| 4% - 8% | Bosque conífero | Moderada | 4 | 3 | 4 | Elevada |
| 4% - 8% | Bosque conífero | Muy elevada | 4 | 3 | 4 | Elevada |
| 4% - 8% | Bosque latifoliado | Moderada | 4 | 5 | 5 | Muy elevada |
| 4% - 8% | Cultivos | Moderada | 4 | 2 | 3 | Moderada |
| 4% - 8% | Cultivos | Muy elevada | 4 | 2 | 3 | Moderada |
| 8% - 16% | Bosque latifoliado | Elevada | 3 | 5 | 4 | Elevada |
| 8% - 16% | Bosque latifoliado | Muy baja | 3 | 5 | 4 | Elevada |
| 8% - 16% | Bosque mixto | Elevada | 3 | 4 | 4 | Elevada |
| 8% - 16% | Bosque mixto | Moderada | 3 | 4 | 4 | Elevada |
| 8% - 16% | Cultivos | Elevada | 3 | 2 | 3 | Moderada |

| | | | | | | | |
|-------------|--------------------|-------------|---|---|---|---|-------------|
| 8% - 16% | Cultivos | Moderada | 3 | 2 | 3 | 3 | Moderada |
| 8% - 16% | Cultivos | Muy baja | 3 | 2 | 3 | 3 | Moderada |
| Más de 32% | Bosque conífero | Elevada | 1 | 3 | 2 | 2 | Baja |
| Más de 32% | Bosque conífero | Moderada | 1 | 3 | 2 | 2 | Baja |
| Más de 32% | Bosque conífero | Muy elevada | 1 | 3 | 2 | 2 | Baja |
| Más de 32% | Bosque latifoliado | Elevada | 1 | 5 | 3 | 3 | Moderada |
| Más de 32% | Bosque latifoliado | Moderada | 1 | 5 | 3 | 3 | Moderada |
| Más de 32% | Bosque latifoliado | Muy baja | 1 | 5 | 3 | 3 | Moderada |
| Más de 32% | Bosque latifoliado | Muy elevada | 1 | 5 | 3 | 3 | Moderada |
| Más de 32% | Bosque mixto | Elevada | 1 | 4 | 3 | 3 | Moderada |
| Más de 32% | Bosque mixto | Moderada | 1 | 4 | 3 | 3 | Moderada |
| Más de 32% | Cultivos | Elevada | 1 | 2 | 2 | 2 | Baja |
| Más de 32% | Cultivos | Moderada | 1 | 2 | 2 | 2 | Baja |
| Más de 32% | Cultivos | Muy baja | 1 | 2 | 2 | 2 | Baja |
| Más de 32% | Cultivos | Muy elevada | 1 | 2 | 2 | 2 | Baja |
| Menos de 4% | Bosque conífero | Moderada | 5 | 3 | 4 | 4 | Elevada |
| Menos de 4% | Bosque conífero | Muy elevada | 5 | 3 | 4 | 4 | Elevada |
| Menos de 4% | Bosque latifoliado | Elevada | 5 | 5 | 5 | 5 | Muy elevada |
| Menos de 4% | Bosque latifoliado | Moderada | 5 | 5 | 5 | 5 | Muy elevada |
| Menos de 4% | Bosque latifoliado | Muy baja | 5 | 5 | 5 | 5 | Muy elevada |
| Menos de 4% | Bosque mixto | Elevada | 5 | 4 | 5 | 5 | Muy elevada |
| Menos de 4% | Bosque mixto | Moderada | 5 | 4 | 5 | 5 | Muy elevada |
| Menos de 4% | Bosque mixto | Muy baja | 5 | 4 | 5 | 5 | Muy elevada |
| Menos de 4% | Centro poblado | Elevada | 5 | 1 | 3 | 3 | Moderada |
| Menos de 4% | Centro poblado | Moderada | 5 | 1 | 3 | 3 | Moderada |
| Menos de 4% | Centro poblado | Muy baja | 5 | 1 | 3 | 3 | Moderada |
| Menos de 4% | Cultivos | Elevada | 5 | 2 | 4 | 4 | Elevada |
| Menos de 4% | Cultivos | Moderada | 5 | 2 | 4 | 4 | Elevada |
| Menos de 4% | Cultivos | Muy baja | b | 2 | 4 | 4 | Elevada |

Figura 12. Mapa de regulación hídrica de la cuenca del río Tacaná



CONCLUSIONES

1. Los factores naturales más importantes que influyen tanto en la disponibilidad como en la calidad de los recursos hídricos son: la estructura y composición del suelo, la topografía y el clima. Sin embargo, las prácticas de uso de la tierra tienen impactos importantes.
2. El impacto del uso de la tierra sobre la esorrentía superficial media es una función que depende de numerosas variables, siendo las más importantes el régimen hídrico de la cubierta vegetal en lo referente a la evapotranspiración (ET), la capacidad de infiltración, la capacidad del suelo para retener agua y la capacidad de la cubierta vegetal para captar humedad.
3. Una reducción en la cubierta forestal podría no disminuir el aporte de agua. El impacto depende mucho de las prácticas de manejo y de los usos de la tierra alternativos. Una explotación forestal cuidadosa y selectiva tiene un efecto muy limitado o nulo sobre el caudal subterráneo. El caudal después del desarrollo de la nueva cubierta vegetal podría ser más alto, el mismo o inferior al valor original, dependiendo del tipo de vegetación (Bruijnzeel, 1990). Una excepción a esta regla son los bosques «de niebla», que pueden interceptar más humedad (humedad ambiental, precipitación oculta) de la que consumen por la ET (Bosch y Hewlett, 1982), y los bosques muy

maduros, que dependiendo de las especies podrían consumir menos agua que la vegetación que se establece en ellos mismos después de la tala (Calder, 1998).

4. Los bosques son testigos de la erosión del suelo. Su protección se debe fundamentalmente a la vegetación de monte bajo, a los restos vegetales y al efecto estabilizador de la red de raíces. En fuertes pendientes, el efecto estabilizador neto de los árboles es generalmente positivo. La cubierta vegetal puede prevenir la aparición de deslizamientos de tierras.
5. En la CRT el 72% de los suelos analizados presenta estructuras floculentas y apanaladas, solamente un 8% de material muestra estructuras granulares y un 20% de los puntos de muestreo se encontró roca expuesta. Los suelos que presentan estructura granular (gravas, arenas), permiten una mayor infiltración y permeabilidad de las precipitaciones. De manera contraria, una estructura floculenta (arcillas), no permite que el líquido escurra a través de sus poros.
6. Según las características físicas del suelo la CRT muestra que un 32% de la cuenca posee características apropiadas que contribuyen a la regulación del recurso hídrico. Un 12% presenta características inapropiadas para dicho proceso y el 56% restante corresponde a características que regulan el recurso hídrico de forma moderada. Al incluir las variables de uso del suelo y topografía (% de pendientes del suelo), los porcentajes de las áreas que presentan capacidad inapropiada para regular el recurso hídrico, aumenta a un 31%, las

que presentan capacidad moderada y elevada disminuyen a un 34%, respectivamente. Estas variaciones se deben principalmente al uso inapropiado del suelo, así como a un gran porcentaje de sectores con cambios de pendientes bruscas.

7. La mayor parte de los suelos, a nivel sub – superficial, de la cuenca se identificaron como limos y arcillas o una mezcla de ambos tipos; por lo tanto, se considera que este tipo de suelos es capaz de mantener la humedad permitiendo beneficios para la agricultura, pero éstos poco contribuyen a aumentar el caudal del río de la cuenca o a disminuir la escorrentía superficial para precipitaciones de larga duración.

RECOMEDACIONES

1. Debido a que más del 50% de la CRT presenta una capacidad de regulación hídrica de moderada a baja, se recomienda:
 - a. Evaluar las actividades productivas para las cuales está clasificado el suelo y de tal manera elevar y/o mantener la de regulación hídrica.
 - b. Buscar el mejoramiento de las unidades productivas agrícolas, mantenimiento y recuperación de las áreas forestales productivas y protectivas, mejora de las infraestructuras que agregan valor a la producción y diversificar los ingresos a partir de actuales usos de la tierra.
 - c. Identificar el tipo de vegetación que permita un balance entre su contribución la erosión del suelo y su evapotranspiración.
2. Para regular la disponibilidad del recurso hídrico es necesario el tratamiento de aguas servidas y sólidos, de tal forma que el recurso puede ser utilizado, en otras tareas productivas o de aprovechamiento humano y agroindustrial. Así también, se sugiere educar (formal y no formalmente) a la población, sobre el uso adecuado y racional del agua.

3. Parte del estudio de la regulación del recurso hídrico es el identificar sitios de alta vulnerabilidad. Para lo cual se recomienda la participación comunitaria en función de calificar sectores de riesgo e iniciar acciones para cambiar las circunstancias o cambiar de sitio y orientar a la población para dar prioridad a la naturaleza como aliada para prevenir desastres (p.e. no modificar lechos de ríos, etcétera).
4. De la organización comunitaria, se reconoce la existencia de gran número de comités comunitarios dentro de los grupos de base (comités de agua potable, comités pro energía eléctrica, de caminos vecinales y otros); sin embargo se hace necesario dirigir los esfuerzos de organización comunitaria y pasar de fines específicos y de corto plazo, a grandes propósitos de cobertura ampliada.
5. Se recomienda, la formación de comités comunitario o comunal de desarrollo sostenible, que agrupe representantes de todos los comités locales y que cuente con un plan de acción específico para el manejo de los recursos naturales básicos (agua, suelo y bosque) en su área de influencia. También el fortalecimiento de la participación municipal, a través de la comisión de concejales encargados para la promoción y gestión de los recursos naturales del municipio.
6. Para evaluar las características físicas del suelo de la CRT, en este caso, se tomó un punto de estudio por área de muestreo, por lo tanto se recomienda que para futuras investigaciones similares se pueda obtener dos o más puntos de estudio por área de muestreo, con el fin de implementar análisis estadísticos.

BIBLIOGRAFÍA

1. **CRESPO VILLALAZ, CARLOS (1996)**. Mecánica de suelos y cimentaciones. 5 ed. México, Limusa.
2. **CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA – CATIE- (2006)**. Importancia de los bosques para la adaptación de la sociedad al cambio climático.
3. **DAS, BRAJA M. (2001)**. Fundamentos de ingeniería geotécnica, México, Thomson.
4. **ELFEGO OROZCO (2007)**. Estudio hidrológico de la parte alta del cuenca del río El Naranjo. Guatemala.
5. **FERNÁNDO SUÁREZ DE CASTRO, (1982)**. Conservación de suelos. Instituto interamericano de cooperación para la agricultura. San José Costa Rica 1982
6. **FUNDACIÓN SOLAR (2004)**. Estado del Agua en la Cuenca del Río el Naranjo. NOVIB.
7. **INSTITUTO NACIONAL DE BOSQUES – INAB – (1998)**. Manual para la clasificación de tierras por capacidad de uso.
8. **INSTITUTO NACIONAL DE BOSQUES – INAB – (2005)**. Memoria técnica del mapa de tierras forestales de captación y regulación hidrológica de Guatemala.
9. **IRENE ENRÍQUEZ GÓMEZ (2006)**. Gestión del Abasto de Agua Municipio de San Antonio Sacatepéquez, San Marcos. Quetzaltenango, Guatemala.

10. **JOSEPH E BOWLES (1981)**. Manual de laboratorio de suelos en Ingeniería Civil. Bogotá, Mc Graw Hill.
11. **JUÁREZ BADILLO, EULALIO (1991)**. Mecánica de suelos, tomo 1. México, Limusa.
12. **MINISTERIO DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y ALIMENTACIÓN - MAGA (2004)**- Atlas temático de las cuencas hidrográficas de la república de Guatemala.
13. **ORGANIZACIÓN DEL LOS ESTADOS AMERICANOS Y EL CENTRO TÉCNICO DE EVALUACIÓN FORESTAL (1973)**. Programa para manejo y conservación de los recursos suelo, vegetación y agua de la región del altiplano de Guatemala.
14. **SERVICIOS PARA EL DESARROLLO –SER- (2006)**. Plan de Manejo Adecuado del Recurso Hídrico en la Sub - Cuenca del Río el Naranjo Departamento de San Marcos.
15. **SIMMONS, C.; TARANO, J. M.; PINTO, J. H. (1959)**. Clasificación a nivel de reconocimiento de los suelos de la república de Guatemala. Trad. por Pedro Tirado Salsuna. Guatemala, José Pineda Ibarra.
16. **TORRES, JUAREZ Y LÓPEZ (1986)**. Estudio sobre la capacidad de Infiltración y permeabilidad para la cuenca Xenimaquín.

APÉNDICE

Figura 1. Ubicación de puntos de muestreo

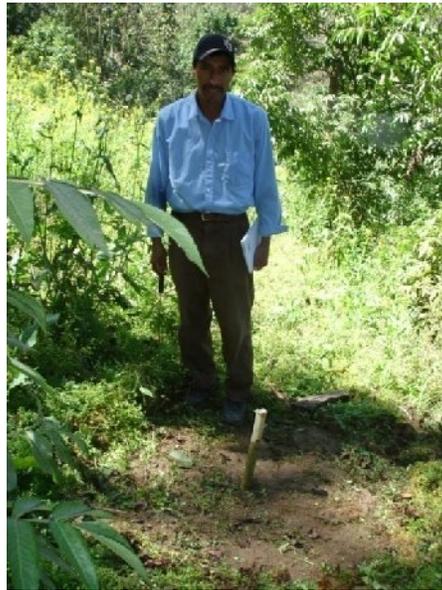


Figura 2. Personas de la comunidad colaborando para el desarrollo de la investigación.



Figura 3. Excavación de pozos a cielo abierto



Figura 4. Obtención de muestras inalteradas



Figura 5. Muestras alteradas puestas al sol para secar



Figura 6. Ensayos de laboratorio

