

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE
CARRERA DE GEOLOGÍA

TRABAJO DE GRADUACIÓN



TESIS

IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA
HÍDRICA, USANDO TÉCNICAS DE SISTEMA DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICO EN LA MICROCUENCA DEL RÍO ESQUICHÁ,
UBICADO AL SUR DEL MUNICIPIO DE TACANÁ, SAN MARCOS

LIZANDRO ESTUARDO MACZ CAAL

COBÁN, ALTA VERAPAZ, OCTUBRE DE 2 014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE
CARRERA DE GEOLOGÍA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

TESIS

IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA
HÍDRICA, USANDO TÉCNICAS DE SISTEMA DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICO EN LA MICROCUENCA DEL RÍO ESQUICHÁ,
UBICADO AL SUR DEL MUNICIPIO DE TACANÁ, SAN MARCOS

PRESENTADO AL HONORABLE CONSEJO DIRECTIVO DEL
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE

POR

LIZANDRO ESTUARDO MACZ CAAL
CARNÉ 2003 40015

COMO REQUISITO PREVIO A OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO

COBÁN, ALTA VERAPAZ, OCTUBRE DE 2 014

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR MAGNÍFICO

Dr. Carlos Guillermo Alvarado Cerezo

CONSEJO DIRECTIVO

PRESIDENTE: Lic. Zoot. M.A. Fredy Giovani Macz Choc

SECRETARIO: Lic. Econ. Héctor Virginio Escobar Rubio

REPRESENTANTE EGRESADOS: Ing. Agr. Julio Oswaldo Méndez Morales

REPRESENTANTES ESTUDIANTILES: PEM. Hugo Francisco Ruano Rivera

Br. Marco Tulio Medina Pérez

COORDINADOR ACADÉMICO

Lic. Zoot. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales

COORDINADOR DE LA CARRERA

Ing. Geol. M. Sc. Osmín Jared Vásquez Hernández

COMISIÓN DE TRABAJOS DE GRADUACIÓN

COORDINADOR: Ing. Geol. M. Sc. Bernie Gamaliel
Castillo Moeschler

SECRETARIA: Ing. Geol. Silvia Friné Cortez
Bendfeldt

VOCAL: Ing. Geol. M. Sc. Osmín Jared
Vásquez Hernández

REVISOR DE REDACCIÓN Y ESTILO

Ing. Geol. Silvia Friné Cortez Bendfeldt

REVISOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Ing. Geol. M. Sc. Bernie Gamaliel Castillo Moeschler

ASESOR

Ing. Geol Sergio David Morán Ical

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



Ref. 15-CG-97/2014
24 de febrero de 2014

**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE – CUNOR –
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
Telefax: 7952-1064 y 7956-6600 Ext. 209
Guatemala, C. A.
E-mail: geologiausac@gmail.com

Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **ASESORÍA** del informe final de Trabajo de Graduación del T.U. **GEOL. LIZANDRO ESTUARDO MACZ CAAL**, carné No. **200340015**, titulado: **“IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA USANDO TÉCNICAS DE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO EN LA MICROCUENCA DEL RÍO ESQUICHÁ, UBICADO AL SUR DEL MUNICIPIO DE TACANÁ, SAN MARCOS”**, el cual considero llena los requisitos establecidos para su aprobación, por lo que someto a consideración de ustedes dicho informe.

Atentamente

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. Sergio David Morán Icaj
Docente Asesor
Carrera Geología, CUNOR



c.c. archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE – CUNOR –
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
Telefax: 7952-1064 y 7956-6600 Ext. 209
Guatemala, C. A.

E-mail: geologiausac@gmail.com

Ref. 15-CG-180/2014
23 de mayo de 2014

Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **REVISIÓN** del informe final de Trabajo de Graduación del T.U. **GEOL. LIZANDRO ESTUARDO MACZ CAAL**, carné No. **200340015**, titulado: **“IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA USANDO TÉCNICAS DE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO EN LA MICROCUENCA DEL RÍO ESQUICHÁ, UBICADO AL SUR DEL MUNICIPIO DE TACANÁ, SAN MARCOS”**, el cual considero llena los requisitos establecidos para su aprobación, por lo que someto a consideración de ustedes dicho informe.

Atentamente

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. Msc. Bernnie Gamaliel Castillo Moeschler
Docente Revisor
Carrera Geología
CUNOR

c.c. archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



**CENTRO UNIVERSITARIO
DEL NORTE – CUNOR –
CARRERA GEOLOGÍA**

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz
Telefax: 7952-1064 y 7956-6600 Ext. 209

Guatemala, C. A.

E-mail: geologiausac@gmail.com

Ref. 15-CG-264/2014
30 de septiembre de 2014

Señores
Comisión Trabajos de Graduación
Carrera Geología
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio remito el informe Final de Trabajo de Graduación a nivel de grado titulado: **“IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA USANDO TÉCNICAS DE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO EN LA MICROCUENCA DEL RÍO ESQUICHÁ, UBICADO AL SUR DEL MUNICIPIO DE TACANÁ, SAN MARCOS”**, realizado por el (la) T.U. GEOL. LIZANDRO ESTUARDO MACZ CAAL, carné No. **200340015**, el cual ya fue revisado por la **COMISIÓN DE REDACCIÓN Y ESTILO** de la Carrera de Geología, quienes consideramos llena los requisitos establecidos para su aprobación.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

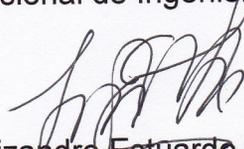

Inga. Geol. Silvia Frine Cortez Bendfeldt
Comisión Redacción y Estilo
Carrera Geología, CUNOR



c.c. archivo

HONORABLE COMITÉ EXAMINADOR

En cumplimiento a lo establecido por los estatutos de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a consideración de ustedes el trabajo de graduación titulado: Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica, usando técnicas de sistema de información geográfico en la microcuenca del río Esquichá, ubicado al Sur del municipio de Tacaná, San Marcos, como requisito previo a optar al título profesional de Ingeniero Geólogo.



Lizandro Estuardo Macz Caal
Carné 20340015

RESPONSABILIDAD

“La responsabilidad del contenido de los trabajos de graduación es: Del estudiante que opta al título, del asesor y del revisor; la Comisión de Redacción y Estilo de cada carrera, es la responsable de la estructura y la forma”.

Aprobado en punto SEGUNDO, inciso 2 .4, subinciso 2.4.1 del Acta No. 17-2012 de Sesión extraordinaria de Consejo Directivo de fecha 18 de julio del año 2012.

DEDICATORIA

A:

Dios Todopoderoso:

Por ser mí guía en los momentos más importantes de mi vida y me permite ser quien soy.

Mis padres:

Román Macz y María Caal, por sus sacrificios, luchas incansables y por el apoyo desinteresado en todo momento de mi vida. Gracias por todo, por su amor, comprensión y motivación para seguir adelante.

Mis hermanos:

Leticia, Erwin, Dinora, Elizabeth y Sergio; gracias por todos los buenos momentos que pasamos juntos, por todo el cariño que nos tenemos y por su apoyo.

Mis abuelos (+):

Que Dios los tenga en su gloria.

AGRADECIMIENTOS

A:

Universidad de San Carlos de Guatemala y al Centro Universitario del Norte, por haberme albergado todos estos años en tan prestigiosa casa de estudios y especialmente a la carrera de Geología.

A Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo y por su apoyo.

Catedráticos de la Carrera de Geología, por su apoyo y recomendación en todo momento, y especialmente en la elaboración de este trabajo.

Mis compañeros de estudio, por compartir en cada momento de mi vida experiencias y triunfos.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	Pág.
RESUMEN	V
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

1.1	El problema	3
1.1.1	Antecedentes	3
1.1.2	Planteamiento	5
1.1.3	Justificación	5
1.1.4	Alcances y limitaciones de la investigación	6
1.2	Objetivos	7
1.2.1	General	7
1.2.2	Específicos	7
1.3	Aspectos metodológicos de la investigación	7
1.3.1	Metodología de campo	8
1.3.2	Metodología para la identificación de recarga hídrica	8
1.3.3	Gabinete	11

CAPÍTULO 2

LOCALIZACIÓN Y EXTENSIÓN DEL ÁREA DE LA MICROCUENCA

2.1	Acceso al área de estudio	15
-----	---------------------------	----

CAPÍTULO 3

GEOGRAFÍA FÍSICA

3.1	Fisiografía	17
3.2	Clima	20

3.3	Drenaje	21
3.4	Suelos	22
3.5	Vegetación	22
3.6	Índice de precipitación	23

CAPÍTULO 4

MARCO TEÓRICO

4.1	Fundamentos	25
4.2	Variables	26
4.2.1	Ciclo hidrológico	26
4.2.2	Cuenca	26
4.2.3	Densidad de drenaje	27
4.2.4	Lineamientos	27
4.2.5	Densidad de lineamientos	27
4.2.6	Litología	28
4.2.7	Recarga hídrica	28
4.2.8	Uso del suelo	28
4.2.9	Mapa de precipitación	29
4.2.10	Mapa de pendientes	29
4.2.11	Topografía y modelos de elevación digital	29
4.2.12	Vegetación	30
4.2.13	Sistema de información geográfico	30
4.3	Limitantes de la metodología	33

CAPÍTULO 5

AMBIENTE GEOLÓGICO REGIONAL

5.1	Ambiente geológicos estructural	35
5.2	Estratigrafía	37
5.2.1	Cenizas volcánicas cuaternarias	37
5.2.3	Rocas volcánicas del cuaternario	37

CAPÍTULO 6

GEOLOGÍA LOCAL

6.1	Unidad de basalto (Uba)	41
6.2	Unidad de cenizas y tobas (Uct)	47
6.3	Unidad de lahares (UL)	48
6.4	Unidad de coluvión (Uc)	51
6.5	Unidad de aluvión (Ua)	52

CAPÍTULO 7
GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

7.1	Lineamientos	55
7.2	Fracturas	56

CAPÍTULO 8
ZONIFICACIÓN DE RECARGA HÍDRICA

8.1	Parámetros utilizados en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica	57
8.1.1	Drenaje fluvial	58
8.1.2	Uso del suelo	59
8.1.3	Precipitación	60
8.1.4	Lineamientos	62
8.1.5	Pendientes	63
8.1.6	Mapa de densidad de drenaje y lineamientos	65
8.1.7	Ponderación de parámetros	68
8.1.8	Recarga hídrica - litología	70
8.1.9	Zonificación de recarga hídrica	73

CAPÍTULO 9
ANÁLISIS DE RESULTADOS

CONCLUSIONES	81
RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFÍA	85
ANEXOS	89

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1 Flujograma de la metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica	9
2 Flujograma de integración de datos de SIG	31
3 Representación esquemática del trabajo en SIG	32
4 Tectónica regional de Guatemala	36
5 Columna litoestratigráfica de la microcuenca del río Esquichá	40
6 Minerales de hornblenda y plagioclasa	42
7 Afloramiento de basaltos fracturados	43
8 Afloramiento de basalto diaclasado	44
9 Meteorización gradual del basalto	45
10 Depósitos de lahares en matriz de ceniza	49
11 Roseta de lineamientos	55
Rosetas unidireccional de fracturas	56

ÍNDICE DE MAPAS

	Pág.
1 Ubicación de la microcuenca del río Esquichá	14
2 Carreteras de la microcuenca del río Esquichá	16
3 Topográfico de la microcuenca del río Esquichá	19
4 Temperatura media anual	20
5 Drenaje	21
6 Lineamientos de la microcuenca del río Esquichá	55
7 Drenaje de la microcuenca del río Esquichá	60
8 Uso del suelo de la microcuenca del río Esquichá	62
9 Precipitación de la microcuenca del río Esquichá	63
10 Lineamientos de la microcuenca del río Esquichá	65
11 Pendientes de la microcuenca del río Esquichá	66
12 Densidad de drenaje de la microcuenca del río Esquichá	68
13 Densidad de lineamientos de la microcuenca del río Esquichá	69
14 Identificación de zonas de recarga hídricas	75

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1 Valores de peso (ponderación) de acuerdo con diferentes parámetros	71
2 Evaluación general	74

LISTADO DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

Dd:	Densidad de drenaje
Ibídem:	En el mismo lugar
INSIVUMEH:	Instituto de sismología, vulcanología, meteorología e hidrología
Ld:	Densidad de lineamientos)
Lt:	Litología
Lu:	Uso del suelo
MAGA:	Ministerio de agricultura, ganadería y alimentación
Qal:	Unidad de Aluvión
Rf:	Precipitación anual
SIG:	Sistema de información geográfica
S:	Pendiente
St:	Tipo de suelo
Te:	Elevación topográfico
Uba:	Unidad de Basalto
Uc:	Unidad de Coluvión
Uct:	Unidad de Ceniza y Tobas
UICN:	Unión internacional para la conservación de la naturaleza
USAC:	Universidad de San Carlos de Guatemala
URL:	Unidad de Lahares
UVG:	Universidad del Valle de Guatemala

RESUMEN

Durante el desarrollo de la práctica se realizó un levantamiento geológico como base esencial de la investigación en un área de 38 km², para determinar las zonas principales de recarga hídrica de la microcuenca del río Esquichá, ubicado al Sur del municipio de Tacaná, San Marcos. Como fundamento de esta metodología, se procedió a la cartografía geológica determinando las unidades litológicas siguientes: Basalto, Cenizas y Tobas, Lahares, Coluvión y Aluvión.

El trabajo consistió en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica, a través de la metodología propuesta por Erhan Sener et al (2004) "*An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: A case study in Burdur, Turkey.*" Adaptado a esta microcuenca por medio de la integración de mapas temáticos, como los siguientes: precipitación, geológico, densidad, lineamientos, uso del suelo, elevación topográfica, pendientes y densidad de drenaje.

También se utilizaron técnicas de información geográfica para la integración de las variables como: las densidades de lineamientos y de drenajes, pendientes, uso del suelo, litología, precipitación y elevación topográfica, las cuales dieron como resultado la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica.

Se identificaron cuatro zonas de recarga hídrica en niveles: alto que representa un 15.4 por ciento, ubicado en la parte central del área, seguidamente el nivel moderado que representa un 34.49 por ciento, además del nivel bajo abarcando 25.70 por ciento y por último el nivel muy bajo abarca un 24.33 por ciento, localizado en las partes aguas de la cuenca.

INTRODUCCIÓN

Las investigaciones geológicas enfocadas a estudios sobre recarga hídrica están tomando importancia en varios países. Esto obedece a la protección del recurso hídrico, como la que se realiza en muchas regiones de Guatemala; por tanto, las actividades que se ejecutan son de vital importancia para contribuir al desarrollo de las sociedades, así como para el crecimiento de la responsabilidad social-ambiental y la conservación de fuentes hídricas, como la que se efectúa dentro de la microcuenca del río Esquichá.

Este informe es el resultado de la cartografía geológica de superficie llevada a cabo en la microcuenca del río Esquichá, que tiene un área aproximada de 38 km². Durante el levantamiento se realizaron caracterizaciones de rocas *in situ*, las que incluyeron: Textura, coloración, estructura y pseudoestratificaciones.

El trabajo consistió en la identificación de zonas potenciales de recarga, hídrica, a través del método modificado: “Una integración del Sistema de Información Geográfica (SIG) en investigaciones de recargas hídricas”, metodología adaptada a esta microcuenca con integraciones de todos los mapas a través de técnicas del SIG, dando como resultado la identificación potencial de recarga hídrica en la microcuenca.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

1.1 El problema

En la actualidad, la población del municipio de Tacaná, sufre las consecuencias climáticas de las estaciones de cada año, especialmente durante la época de verano, porque existe carencia de agua en los nacimientos, así como el bajo caudal de los ríos. Con base a lo anterior, se plantea lo siguiente: Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica, usando técnicas de sistema de información geográfico en la microcuenca del río Esquichá, ubicado al Sur del municipio de Tacaná, San Marcos.

1.1.1 Antecedentes

En distintas áreas del país existe escasa información sobre recarga hídrica que incluyan datos geológicos de las unidades rocosas y que estén enfocados a proteger las fuentes hídricas y el medio ambiente.

En los siguientes párrafos se hace mención de estudios anteriores realizados en el municipio de Tacaná, enfocados a riesgos geológicos y sobre recarga hídrica que tienen relación con este proyecto de investigación:

“La Universidad Autónoma de México y el Departamento de vulcanología, Instituto de geofísica realizaron estudios geológicos, geoquímicos y Vulcanológicos que sirvió para saber el comportamiento del pasado del complejo volcánico del Tacaná. El volcán Tacaná presenta flujos de lava basáltico andesíticos, flujos de lava y domos andesíticos y dacíticas, y flujos piroclásticos con líticos juveniles de composición andesíticas. La investigación titulada: El estudio geológico regional sobre la historia eruptiva de algunos volcanes activos de los países México-Guatemala: como el volcán de Tacana”.¹

La investigación mencionada se utilizó para contrastar las unidades litológicas mapeadas en el área de investigación y por la influencia del volcán de Tacaná que se localiza cerca del área de estudio.

“La Universidad del Valle de Guatemala realizo el estudio titulado: Proyecto Institucionalidad local para el manejo de bosque y agua en comunidades indígenas. Consiste en estimación de recurso bosque para distintos cantones de la aldea Cunlaj, Chemealón, donde se concluye que la mayoría de los recursos de bosque son de tipo comunal. Además este estudio hace mención sobre recurso hídrico de las aldeas mencionadas.”²

Con respecto a investigaciones hidrogeológicas, no existe ninguno hasta el momento; por tanto, es una buena oportunidad para realizar dicho estudio y enfocarlo al aspecto de protección de recurso hídrico para la microcuenca del Río Esquichá.

¹ José Luis Macías. *Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México*. Departamento de Vulcanología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Del. Coyoacán, México. D. F. [http://www.geociencias.unam.mx/~alaniz/SGM/Centenario/57-3/\(6\)Macias.pdf](http://www.geociencias.unam.mx/~alaniz/SGM/Centenario/57-3/(6)Macias.pdf) (15 de agosto de 2 012).

² Universidad del Valle de Guatemala: *Institucionalidad local para el manejo de bosque y agua en Comunidades Indígenas. Sitio Cerro Chemealón, Sitio El Chilar*. Guatemala. Centro de Estudios Ambientales, 2 008.

1.1.2 Planteamiento

En la actualidad, en la microcuenca del río Esquichá, no se ha realizado estudio hidrogeológico que identifique zonas potenciales de recarga hídrica, que ayudaría a proporcionar información sobre la problemática del manejo de este recurso para esta microcuenca.

Uno de los principales factores que afectan las microcuencas en todo el país es la tala incontrolada del recurso bosque, y con la implementación del estudio en la microcuenca, se pretende ubicar zonas que puedan recuperarse por medio de la reforestación.

Las urbanizaciones en muchos sectores hace que se reduzcan las zonas de recarga hídrica, al impermeabilizar con diversos tipos de construcciones como: Casas, escuelas y carreteras (pavimento o asfalto).

1.1.3 Justificación

En el municipio de Tacaná, del departamento de San Marcos existe poca información sobre estudios de recarga hídrica, por ello se vio la necesidad de realizar el estudio de recarga hídrica de la microcuenca del río Esquichá, ya que no se tiene información de tipo hidrogeológico.

Además en la actualidad no existen informes publicados, tampoco documentos técnicos que tengan relación con estudios sobre recarga hídrica.

Ante esta situación se planteó realizar este estudio en la microcuenca del río Esquichá, con el propósito de identificar zonas

potenciales de recarga hídrica, y así tratar de recuperar sectores que están siendo afectados por actividades antrópicas y agrícolas.

1.1.4 Alcances y limitaciones de la investigación

La investigación se realizó específicamente en el área de la microcuenca del río Esquichá, que corresponde al municipio de Tacaná. Los resultados obtenidos en esta investigación no se pueden generalizar para otras microcuencas.

Uno de los principales obstáculos encontrados durante la etapa de campo en el área de la microcuenca, fue la poca participación de las personas para realizar este estudio, porque asociaron esta actividad a exploración minera.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Identificar las zonas principales de recarga hídrica en la microcuenca del río Esquichá, ubicado al Sur del municipio de Tacaná, San Marcos.

1.2.2 Específicos

- a. Analizar la información geológica de la microcuenca: Litología, fracturas y fallas.
- b. Describir todas las unidades geológicas cartografiadas.
- c. Proponer un mapa de identificación de recarga hídrica de la microcuenca a escala 1:25,000.
- d. Zonificar los lugares donde se identificarán recargas hídricas con base a la integración de variables como: Geología, precipitación, lineamientos, modelos de elevación, uso del suelo, cobertura vegetal y mapa de pendiente.

1.3 Aspectos metodológicos de la investigación

Este apartado se divide en dos partes: Una incluye la metodología de gabinete, que a su vez se dividió en recopilación bibliográfica, trabajo de campo y gabinete, fase para la recolección de textos bibliográficos y la redacción del informe; y el otro, narra los pasos de la investigación de identificación potenciales de zonas de recarga hídrica.

1.3.1 Metodología de campo

En esta etapa de trabajo de campo, se procedió a la exploración geológica del área, esta se efectuó con la ayuda de mapa base a escala 1: 25 000, el mapa sirvió para ubicar los diferentes afloramientos y así realizar el mapeo geológico de superficie, utilizando el método de caminamiento. Este consiste en realizar recorridos por carreteras, veredas y quebradas para el registro de datos estructurales y litológicos.

1.3.2 Metodología para la identificación de recarga hídrica

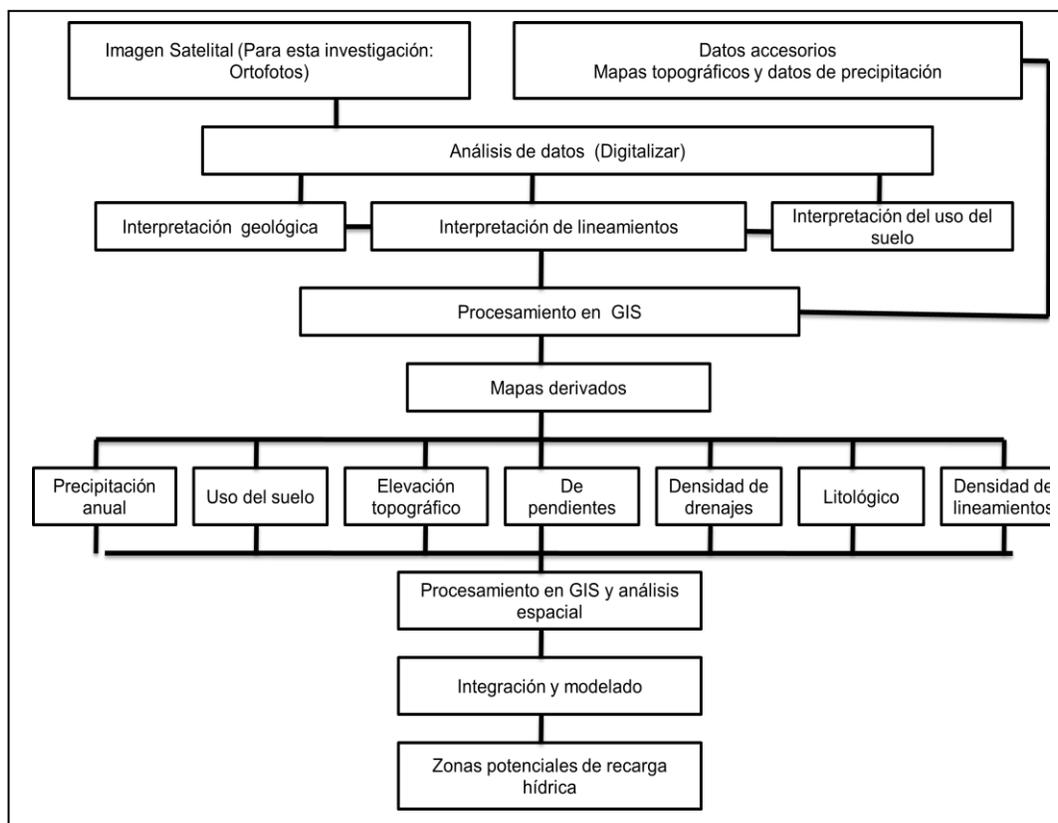
La metodología utilizada para la identificación potencial de recarga hídrica está basada en la elaboración de mapas temáticos como los siguientes: Mapa de precipitación, de densidad de lineamientos, geológico, de densidad de drenaje, de uso de la tierra y de pendiente, en donde la suma de todos genera un mapa de zona potencial de recarga hídrica en la microcuenca del río Esquichá.

Este método propuesto por *E. Sener et al. 2005: Hydrogeolgy Journal. Departament of Geological Engineering, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey*, fue adaptado para el estudio de zonas potenciales de recarga hídrica para la microcuenca del río Esquichá del municipio de Tacaná, San Marcos.

En la figura 1 se observa cada paso que se siguió para procesar toda la información y a la creación de cada mapa temático, y luego la integración para generar un mapa de recarga hídrica.

FIGURA 1

FLUJOGRAMA DE LA METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ZONAS POTENCIALES DE RECARGA HÍDRICA



FUENTE: Modificación propia al español, octubre de 2012, de E. Sener et al. 2005: *Hydrogeology Journal. Department of Geological Engineering, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey.* 2 005.

Los lineamientos y la red de drenaje fueron digitalizados sobre imágenes rectificadas como las ortofotos que cubren el área de la microcuenca del río Esquichá, posteriormente fueron medidos con ayuda del SIG, a través de su extensión *Xtool Pro* y se calcularon las densidades por kilómetros cuadrados (lineamientos y ríos), todo con la ayuda de la extensión del *software* ya mencionado, por medio de su extensión *Analyst tool*.

El uso del suelo fue caracterizado como: Bosque, actividad agrícola y pastos con ayuda del SIG y de imágenes ortorrectificadas. El mapa de precipitación anual para la búsqueda de recarga hídrica fue preparado por el método de interpolación de datos meteorológicos del occidente del país guatemalteco y el Sur de México, con ayuda del *software Arcmap* a través de su extensión *Analyst tool*, y modificado de acuerdo con las alturas topográficas de la microcuenca.

La fórmula para la identificación potencial de recarga hídrica se muestra así:

$$I_{prh} = R_f + L_t + L_d + L_u + T_e + S + D_d + S_t$$

Dónde:

R_f = Precipitación anual (mm)

L_t = Litología

L_d = Densidad de lineamientos (km/km^2)

L_u = Uso del suelo

T_e = Elevación topográfico (m)

S = pendiente (grados)

D_d = Densidad de drenaje (km/km^2)

S_t = Tipo de suelo

1.3.3 Gabinete

Incluye el procesamiento de todos los datos litológicos y estructurales recolectados en el campo y los datos obtenidos de gabinete para su interpretación correspondiente, con la ayuda de *softwares* como *ArcGis*, *Autocad* y *Microsoft Word*, para luego redactar el informe final.

CAPÍTULO 2

LOCALIZACIÓN Y EXTENSIÓN DEL ÁREA DE LA MICROCUCENCA

“El departamento de San Marcos se localiza en la zona occidental de la República de Guatemala, en los paralelos: longitud 91°37´ y 92° 11´ y latitud de 14°30´ y 15° 23´: delimitado, al oeste con la República de México, al norte con el departamento de Huehuetenango, al sur con el departamento de Quetzaltenango y el Océano Pacífico y al este por los departamentos de Quetzaltenango y Retalhuleu”³.

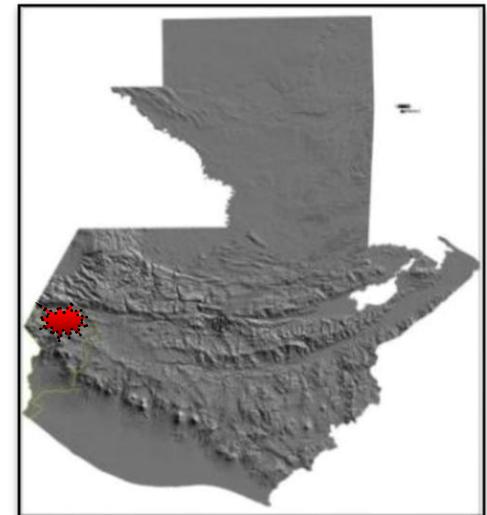
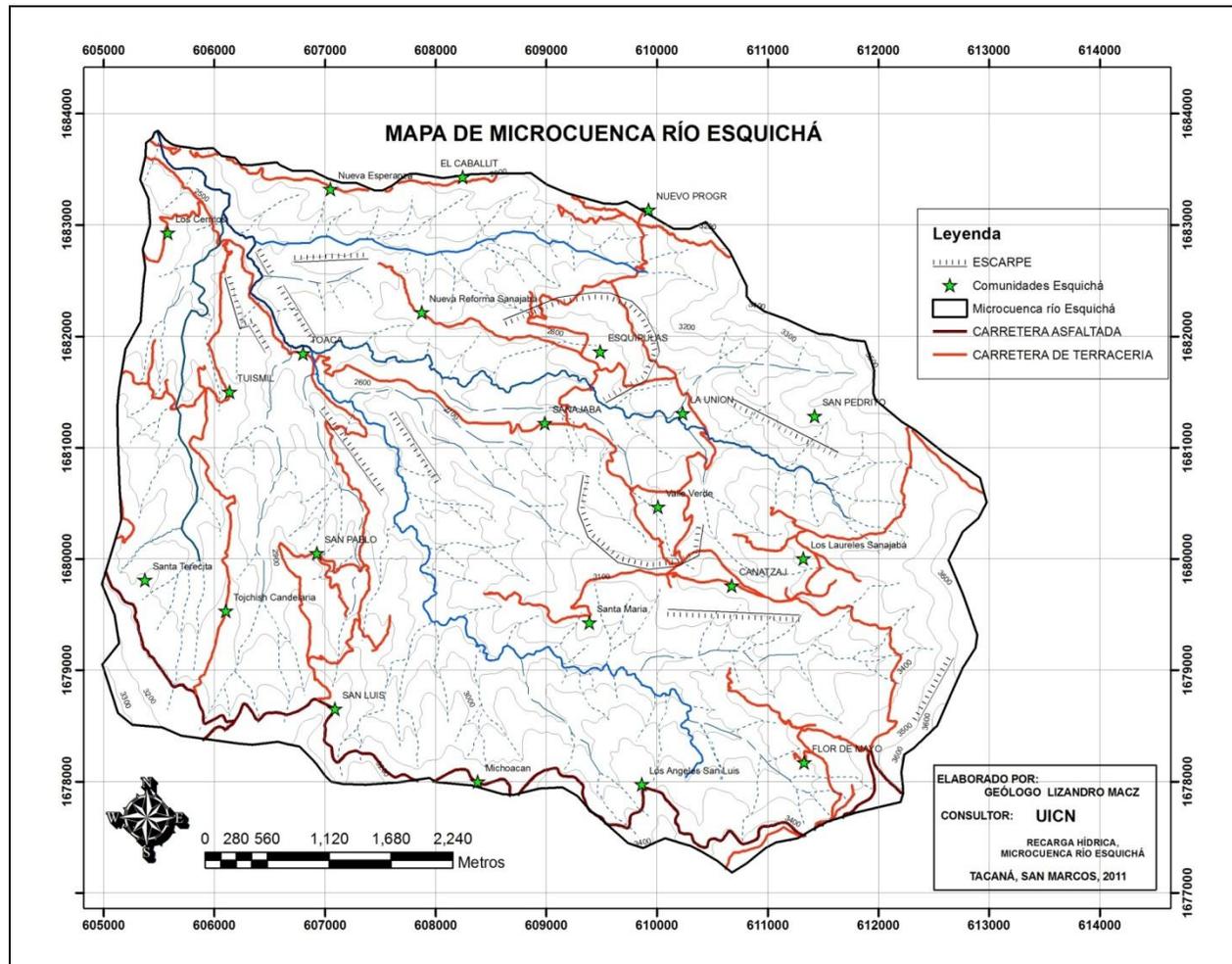
EL área de interés se encuentra en el municipio de Tacaná, específicamente al Sureste, delimitado por la microcuenca del río Esquichá, (ver mapa 1), donde se realizó la investigación. Aunque una parte de esta microcuenca también pertenece a los municipios de Ixchiguán y San José Ojetenam respectivamente.

La microcuenca del río Esquichá se ubica a unos kilómetros del municipio de Tacaná y dista a 72 km aproximadamente de la cabecera departamental de San Marcos. Asimismo la microcuenca dista aproximadamente 2 kilómetros del municipio de Ixchiguán.

³Municipalidad de Tacaná, San Marcos: *Geografía*. http://www.inforpresa.com/tacana/?page_id=7 (10 de diciembre de 2 012).

MAPA 1

UBICACIÓN DE LA MICROCUENCA DEL RÍO ESQUICHÁ



Fuente: Investigación de campo. Año 2 012.

2.1 Acceso al área de estudio

De la cabecera departamental de San Marcos se puede ingresar por la carretera que conduce al Altiplano marquense, carretera asfaltada en buenas condiciones que tiene una distancia de 72 km hasta el municipio de Tacaná, transitable todo el año.

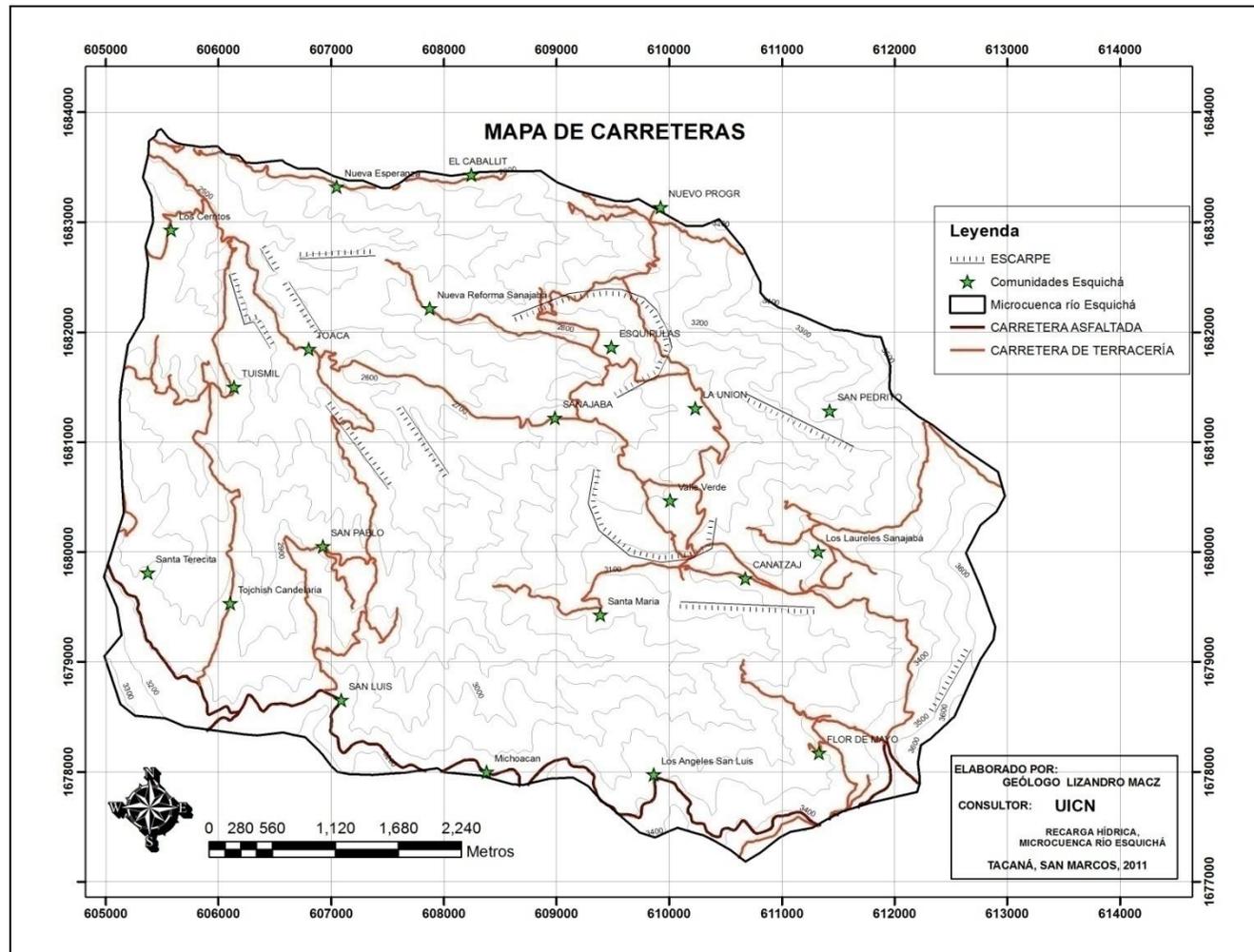
A la microcuenca se puede llegar a través de la carretera asfaltada, que de Ixchiguan conduce hasta el municipio de Tacaná, transitable todo el año. Esta carretera se localiza en la parte Este de la microcuenca, donde se bifurcan otros accesos de terracería para llegar a otros cantones.

Además, se puede llegar por medio de carreteras de terracería en regulares condiciones, transitables en verano y aunque algunas partes están ubicadas en pendientes abruptas y en mal estado; así también se puede realizar recorrido por veredas que están interconectadas entre sí. También por la parte Sur por el cantón Flor de Mayo, se puede ingresar por medio de carreteras de terracería en condiciones regulares.

El municipio de San José Ojetenam cuenta con acceso para la microcuenca y es por carretera de terracería, transitable en verano, pasando por el cantón Esquipulas.

En el mapa 2 se pueden apreciar las ubicaciones de las distintas carreteras, tanto de terracería como asfaltada, para transitar dentro del límite de la microcuenca. La carretera asfaltada está resaltada con una tonalidad roja oscura.

MAPA 2 CARRETERAS EN LA MICROCUENCA DEL RÍO ESQUICHÁ



Fuente: investigación de campo. Año 2 012.

CAPÍTULO 3

GEOGRAFÍA FÍSICA

3.1 Fisiografía

Basado en la clasificación de provincias fisiográficas de la república de Guatemala (Atlas de la república de Guatemala, 1972), la zona de estudio se ubica dentro de la provincia fisiográfica denominada: Tierras Altas Cristalinas.

“El departamento de San Marcos está conformado por cuatro provincias fisiográficas. Sus paisajes lo caracterizan un sistema de Cordilleras en el Altiplano, provincia Volcánica con un contrastante Valle y Tierras Bajas de la Llanura Costera. El Altiplano de la Cordillera Central se ubica entre dos sistemas de fallas de rocas dislocadas, desde el Paleozoico con rocas metamórficas lo que ilustra el curso del río Cuilco y otros ríos controlados y labrados por valles profundos por las diversas fallas existentes”.⁴

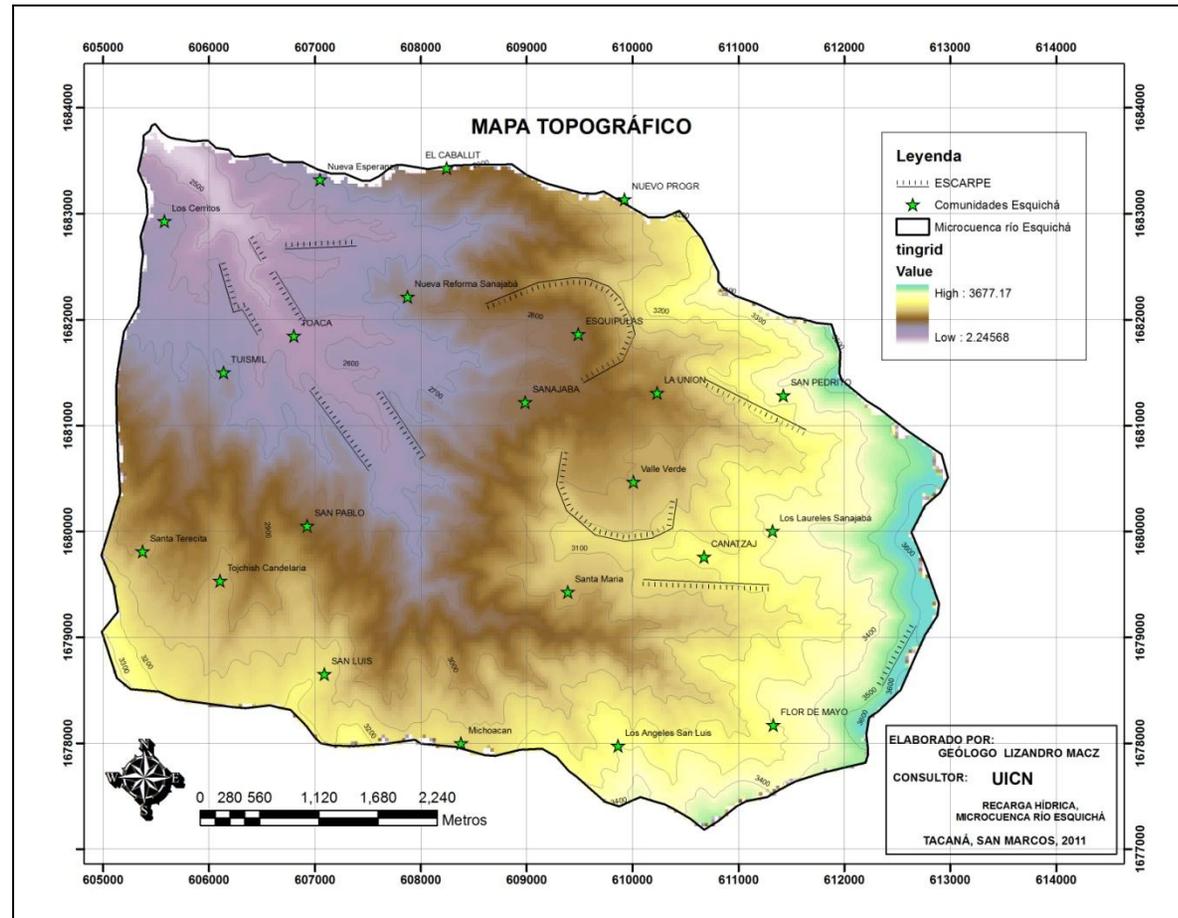
La fisiografía de la microcuenca del río Esquichá, presenta topografía muy ondulada, formada por la erosión en épocas lluviosas. Regularmente esta topografía del terreno está controlada por fallas y/o fracturas en las rocas. También se pueden apreciar escarpes más o menos orientados a lo largo del río Esquichá.

En el mapa 3 se puede observar a través de las tonalidades, la topografía de la microcuenca. El color verde claro corresponde a la parte más alta, que tiene una cota de 3600 msnm, y la altura media oscila entre los 3000 msnm., corresponde a las tonalidades de amarillo claro, café claro

⁴ San Marcos: provincias fisiográficas. <http://departamentosdeguate.galeon.com/>. (12 de agosto de 2 011)

y café, respectivamente: y la parte más baja está situada a 2500 msnm, y presenta tonalidad morado claro, donde desemboca el río Esquichá al río Coatán.

MAPA 3 MAPA TOPOGRÁFICO DE LA MICROCUENCA RÍO ESQUICHÁ



Fuente: Investigación de campo. Año 2 012.

3.2 Clima

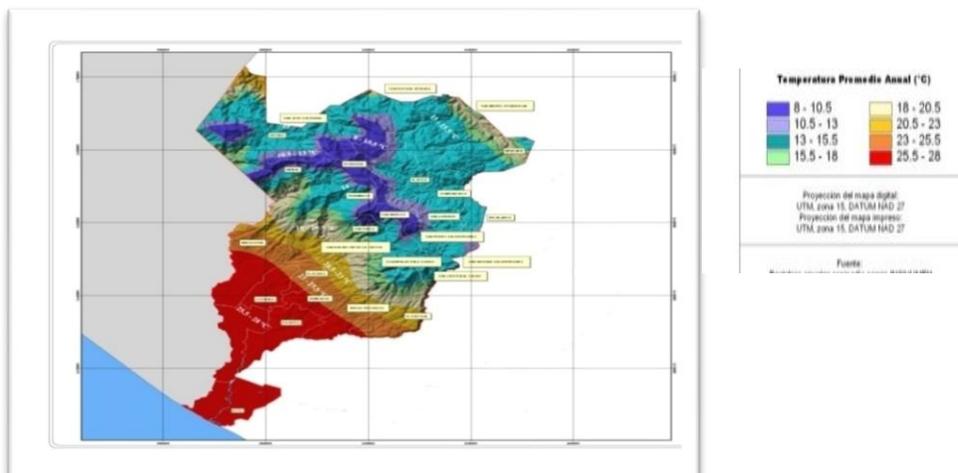
La mayor parte del departamento de San Marcos, presenta montañas, con elevaciones mayores o iguales a 5400 msnm, generando diversidad de microclimas; son regiones densamente pobladas, por lo que la acción humana se convierte en factor de variación apreciable.

Según el mapa 4, el promedio de temperatura anual del municipio de Tacaná es de 10.5 a 13 grados centígrados en época de invierno, y según comentarios de los vecinos y del COCODE, se forman escarchas de hielo, dañando la agricultura de la región.

El área de estudio presenta alturas de hasta 3600 msnm, con topografía muy quebradiza, y en épocas de frío se forman escarchas de hielo.

MAPA 4

DE TEMPERATURA MEDIA ANUAL



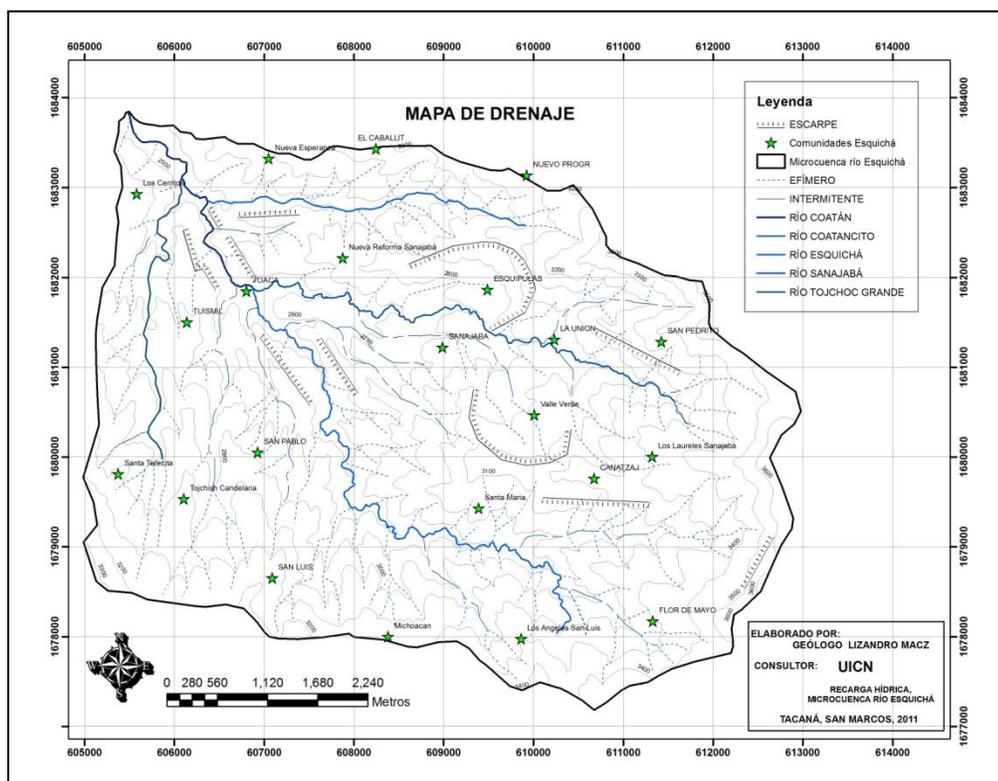
Fuente: Modificado y descargado del portal del Maga en su sitio Web. www.maga.com.gt (12 de octubre de 2 012).

3.3 Drenaje

A nivel de microcuenca, todo el drenaje desemboca en el río Coatán que se ubica también dentro de esta área. Este está controlado principalmente por estructuras geológicas como fracturamiento y por tipo de roca. En la zona de estudio se distingue el drenaje caracterizado tipo dendrítico (ver mapa 5). La orientación del sistema de drenaje para esta microcuenca es de Sur a Norte.

El drenaje del área está caracterizado por tres tipos: Ríos que son perennes, como los ríos principales; intermitentes, que se forman a partir de nacimientos o resurgencias de agua, y por último, se mencionan los efímeros que se forman durante las épocas lluviosas.

MAPA 5 DE DRENAJE



Fuente: Investigación de campo. Año 2 012.

3.4 Suelos

“Los suelos de la microcuenca son de origen volcánico. Se formaron a partir de la meteorización de rocas ígneas. Estas incluyen tobas, coladas de lava, material lahárico y sedimentos volcánicos. Se encuentran clasificados dentro de la serie Camanchá, que son suelos originados de ceniza volcánica. Van desde planicies suaves hasta fuertemente onduladas, con buen drenaje, de color superficial café muy oscuro. Su textura superficial es franca y su textura profunda es franco arcillosa”.⁵

Localmente los suelos observados en la microcuenca están formados de la meteorización de rocas basálticas y de cenizas volcánicas, con características texturales, arenosas y arcillosas.

3.5 Vegetación

Según recorrido de campo, la totalidad de bosques que existen en la microcuenca son de propiedad privada. Las especies arbóreas se pueden apreciar con mucha distinción, entre la vegetación, están: Ciprés común (*Cupressus*), pino blanco (*Pinus pseudostrubus*), aliso (*Alnus acuminata*), roble (*Quercus robur*) y eucalipto (*eucaliptus*). El principal uso de los árboles es para consumo, como leño, y para tabla, útiles en la construcción de muebles y casas. Aunque algunos lugares están siendo restaurados con la siembra de arbolitos, como el pino (*Pinus*) y el pinabete (*Abies guatemalensis*).

Se pueden ver especies herbáceas, estas se encuentran en forma natural, para usos medicinales, ornamentales y mojones. Existen otras especies, como: Arrayan (*Luma apiculata*), chilca (*Senecio salignus*), izote (*Yucca elephantipes Schlecht*), sauco (*Sambucus mexicana*), copal (*Bursera graveolens*) y tzolój (*Tzolojclie*).

⁵ E. Coré López Barrios: *Proyecto Tacaná II. Producción de Agua en Armonía con la Cultura y la Naturaleza en las Cuencas de los Ríos Suchiate y Coatán*. Centro Universitario de San Marcos. USAC. Tacana, San Marcos. 2 008.

3.6 Índice de precipitación

“La mayor precipitación corresponde de los meses de mayo a septiembre y es donde la precipitación aumenta de promedio de 2 000 mm, y en los siguientes meses está enmarcado por el verano”.⁶

La época lluviosa afecta muchos sectores del municipio, porque provoca riesgos por deslizamiento o derrumbes, destruyendo carreteras de terracerías.

⁶ Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología: *Meteorología*. (INSIVUMEH) Protocolo: [www. http://www.insivumeh.gob.gt/](http://www.insivumeh.gob.gt/) (12 de noviembre de 2 011).

CAPÍTULO 4

MARCO TEÓRICO

4.1 Fundamentos

Esta investigación está fundamentada en “*An intregation of GIS and remote sensing in groundwater investigations: A case study in Burdur, Turkey*”, y se usó para el estudio sobre la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica utilizando técnicas de sistemas de información geográfica para la microcuenca del río Esquichá.

Esta metodología fue propuesta por Erhan Sener, Aysén Davraz y Mehmet Ozcelik, del Departamento de Ingeniería Geológica de la Universidad de Suleyman Demirel, Isparta. Turquía, en el año 2 004 y publicado en el *Journal Hydrogeology* en el año 2 005.

Para determinar las prioridades donde hay buena recarga hídrica se utilizaron varias variables, como: lineamientos, densidad de drenajes y de lineamientos, ríos, cobertura vegetal, pendientes, precipitación, y por último, la litología, las cuales fueron descritas y mapeadas en el área de la microcuenca del río Esquichá, este último es la base fundamental de la investigación.

La integración de cada una de las variables mencionadas arrojan como resultado el mapa de las zonas potenciales de recarga hídrica para esta microcuenca.

4.2 Variables

A continuación se describen las variables que se utilizaron para la determinación de zonas potenciales de recarga hídrica y para tener un mejor concepto de la investigación.

4.2.1 Ciclo hidrológico

“La precipitación que cae en la tierra se distribuye en varias formas. Parte es interceptada por la vegetación, los edificios y otros objetos; esta agua interceptada puede evaporarse por los mismos objetos, hasta llegar al suelo. Parte de la precipitación corre sobre la superficie del suelo hacia los ríos y lagos, mientras que otra parte es retenida por las depresiones en la superficie del suelo. Parte del agua caída en la superficie del suelo se infiltra y se distribuye de la siguiente manera: una porción se queda cerca de la superficie del suelos constituyendo la humedad del suelo; esta puede percollarse hacia los depósitos subterráneos o volver a aparecer en la superficie, regresar a la atmosfera mediante los procesos de evaporación del suelos y de transpiración por las plantas.

Una porción de las aguas infiltradas se mueve en las capas superficiales para luego reaparecer en las superficies del suelo o en el lecho del río en forma de escorrentía subsuperficial. Otra porción alcanza un embalse más o menos permanente del agua subterránea por percolación profunda y reaparecerá después de largos intervalos de tiempo a menudo en puntos muy distantes”.⁷

4.2.2 Cuenca

Según Isaac Herrera cita a Salvart, 1975:

“Para definir una cuenca como el territorio en que las aguas convergen hacia los puntos más bajos de la superficie del mismo y se unen en una corriente resultante o río principal que las evacúa hacia un lago, mar y océano. Sus límites suelen coincidir con la línea de cimas que marca la divisoria de las aguas entre las vertientes”.⁸

Por la definición anterior, deja claro que la cuenca está limitada por las partes altas donde convergen las aguas hacia las partes bajas.

⁷ Isaac R Herrera Ibáñez, *Manual de hidrología*. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 1 995.

⁸Ibídem. 12.

4.2.3 Densidad de drenaje

“Por densidad de drenaje se entiende la mayor o menor facilidad que presenta una cuenca hidrográfica para evacuar las aguas provenientes de las precipitaciones y que quedan sobre la superficie de la tierra, debido al grado de saturación de las capas del subsuelo. Si éste se encuentra saturado, y la lluvia continúa almacenándose sobre la superficie, llegará un momento en que las agua allí contenidas, escurren hacia el cauce natural, produciéndose así el drenaje en la cuenca”.⁹

4.2.4 Lineamientos

“Los estudios de lineamientos son importantes para las investigaciones de aguas subterráneas. Las técnicas de mapeo de trazas y fracturas locales sobre fotografías aéreas para la localización de zonas de mayor permeabilidad en terrenos de roca duras, fue propuesto por: Parizek (1976); también Lattman y Parizek (1964), y estos fueron extendidos en imágenes satelitales. Se ha demostrado que los pozos situados cerca de las fracturas pueden producir más agua que la de los pozos localizados más distantes de los lineamientos.

¿Qué es un lineamiento? Es un término utilizado, en general, en un sentido geomorfológico, como una característica mapeable línea simple o compuesta de una superficie cuyas partes están alineadas en una relación rectilínea o ligeramente curvilínea, y que se diferencia claramente de un patrón de la superficie.

Generalmente, los lineamientos están relacionados a los sistemas de fracturamientos, planos de discontinuidad, fallas y zonas de cizallas en rocas. El término también incluye trazas de fracturas que se describe sobre fotografías aéreas cuando se analiza o se interpreta durante un trabajo”.¹⁰

4.2.5 Densidad de lineamientos

“Es un tratamiento estadístico de la distribución de lineamientos en un área. Es considerando el número de lineamientos por unidad de área; segundo, la medición de la longitud total de los lineamientos por unidad de área; tercero, contando el número de intersecciones de lineamiento por unidad de área.

Los mapas de densidad de lineamiento y de drenaje también pueden ser combinados para la exploración de aguas subterráneas a nivel regional; las zonas de objetivo están marcadas generalmente por la

⁹ Ibídem. 13.

¹⁰ Singha, B.B. I & R.P. Gupta: *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. New York United Of America. Academic Publishers Springer, 1 999.

densidad lineamiento superior (lo que representa una mayor fractura) y menor densidad drenaje (implica infiltración)".¹¹

4.2.6 Litología

“Las distintas unidades litológicas, es decir, los tipos de rocas se pueden inferir indirectamente basados en las estructuras de la roca y los accidentes geográficos. La primera tarea es identificar el terreno, por ejemplo: roca dura fracturada versus sedimentos inconsolidados. Sobre fotografías y las imágenes, se caracterizan las zonas de roca dura por la presencia de características tales como bandas que composicionales, estratificación, foliación, fracturas, pliegues, etc”.¹²

4.2.7 Recarga hídrica

“El cual es el 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 donde ocurre la recarga se llama zona de recarga hídrica y generalmente se ubica en las partes altas de las cuencas”.¹³

4.2.8 Uso del suelo

“Suelos está íntimamente relacionada con la roca madre. Por ejemplo, el suelo arenoso se originó a partir de rocas areniscas y silíceas; suelos arcillosos desarrollan a partir de rocas argílicas; basaltos se caracterizan por producir suelos negros claros. El contenido de humus en el suelo se relaciona con la vegetación y la humedad, la que conduce a tonos más oscuros”.¹⁴

Este se caracteriza con las actividades que se desarrollan sobre los suelos, ejemplo: La agricultura (cultivos), pastoreo sobre pastas, bosques, construcciones cuando está en área urbana, matorrales, etc.

¹¹ ibíd.

¹²ibíd.

¹³Acerca del Agua: *Hidrología Superficial*.

http://www.infoiarna.org.gt/guateagua/subtemas/3/3_5.htm (08 de noviembre de 2 012)

¹⁴ Singha, B.B. I & R.P. Gupta: *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. New York United Of America. Academic Publishers Springer, 1 999.

4.2.9 Mapa de precipitación

“Mejor de los tipos de precipitación son llovizna, lluvia, nieve y granizo. La precipitación atmosférica es un resultado de la condensación de vapor de agua alrededor de los núcleos higroscópicos en la atmósfera. La precipitación se mide con la ayuda de indicador de lluvia y se expresa en términos de profundidad de agua en milímetros o centímetros.

La distribución espacial de la precipitación en una cuenca para una tormenta o período dado se expresa en términos de isoyetas que se señalan en los puntos de igual precipitación en un área. La profundidad media de la precipitación en una cuenca puede ser calculada por un método aritmética), b) método de isoyetas, d) polígono de Thiesen para los detalles de estos métodos”.¹⁵

4.2.10 Mapa de pendientes

“Mapa temático que, mediante cualquier sistema gráfico, representa los diferentes grados de pendientes de un territorio. La pendiente topográfica es la inclinación de una superficie con respecto a la horizontal. La finalidad de este mapa es representar mediante colores zonas del territorio con pendientes semejantes”.¹⁶

4.2.11 Topografía y modelos de elevación digital

“La topografía superficial pronunciada influencia la presencia de agua subterránea. La topografía también regula los límites de la cuenca. Regionalmente la topografía se estudia mejor a través de fotografías aéreas.

Por otro lado el modelo de elevación digital (MED) constituye un aporte básico importante en cualquier estudio de las características de la superficie de tierra. El MED puede obtenerse de muchas maneras. Digitalización de mapas topográficos seguido por interpolación para generar un modelo de elevación”.¹⁷

¹⁵Ibíd.

¹⁶Técnicas geográficas de medio natural: *Mapa de pendientes*. <http://tecnicasgficas07ujaen.blogspot.com/search?q=mapa+de+pendientes> (4 de junio de 2 012).

¹⁷Ibíd.

4.2.12 Vegetación

“La vegetación constituye una importante guía para las investigaciones de agua subterráneas, y las anomalías de las mismas pueden servir como guías directas. La presencia de plantas xerofíticas indican condiciones secas áridas, mientras que la vegetación freatofitas (plantas toman el agua directamente de la capa freática) denota freático poco profundo”.¹⁸

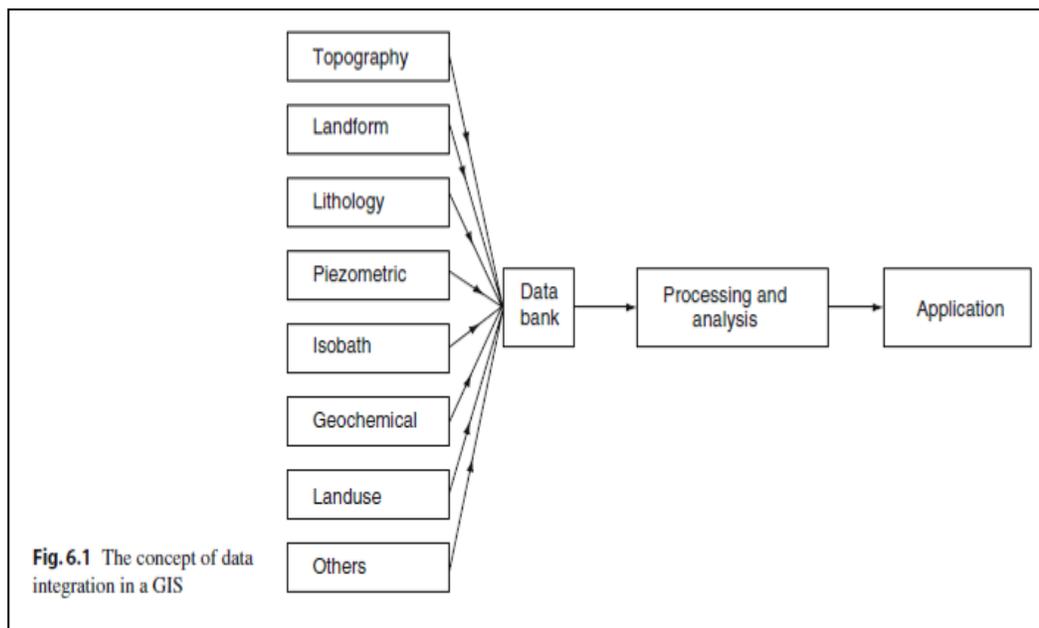
4.2.13 Sistema de Información Geográfico

Para el manejo de datos de recarga hídrica, la tecnología del sistema de información geográfico es acertadamente adecuado por una las razones principales: La facilidad de manipulación de bases de datos (figura 2).

¹⁸ *Ibíd.*

FIGURA 2

FLUJOGRAMA DE INTEGRACIÓN DE DATOS DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO



Fuente: Singhal, B.B.S., R.P. Gupta: *Applied hydrogeology of fractured rocks*. New York. 2 010.

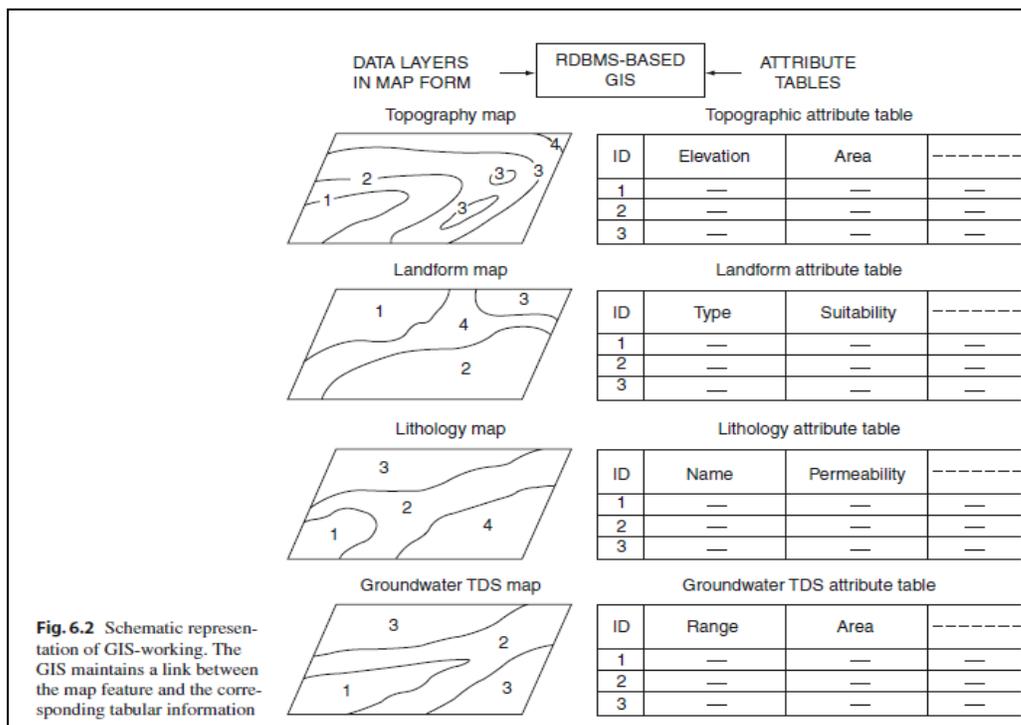
El sistema de información geográfico es útil para la realización de diversos estudios como recarga hídrica, porque presenta herramientas que ayudan a la manipulación de bases de datos simultaneas; además, permite realizar cálculos de datos y generar distintos tipos de mapas.

“Las variables (mapas temáticos) que se puede tratar con este sistema, además es fundamental en la integración de datos cualitativos y cuantitativos. La flexibilidad de operaciones y de mostrar funciones en la búsqueda, clasificación y el procesamiento en forma simultánea e interactiva de grandes volúmenes de datos”.¹⁹

¹⁹ Ibídem., 25.

FIGURA 3

REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL TRABAJO EN SIG



Fuente: Singhal, B.B..P. Gupta: *Applied hydrogeology of fractured rocks*. New York. 2 010.

La figura 3 representa el esquema idealizado del trabajo de investigación, para determinar las zonas de recarga hídrica en la microcuenca Esquichá. Cada paso fue realizado con el apoyo de un *software* para la integración de cada variable, de acuerdo con las ponderaciones usadas, estos fueron con base a criterios tanto de campo y como de gabinete.

Para procesar cualquier información puede utilizarse de manera similar el flujograma mencionado, además, se puede usar en estudio como: Exploración de aguas subterráneas, geofísica, geoquímica, etc.

La metodología SIG tiene la ventaja que puede manejarse en cualquier cantidad de bases de datos.

4.3 Limitantes de la metodología

La metodología de Erhan Sener et al. 2 004; muestra las limitantes siguientes:

- a. La metodología no menciona las características texturales del suelo, tampoco la porosidad y el tamaño de granos.
- b. En cuanto a la geología, hace referencia al ámbito regional y no local, como lo realizado durante la investigación donde se hizo exploración en la microcuenca, definiendo las unidades de roca en campo.
- c. No se implementa un mapeo estructural a detalle con el propósito de definir bien las orientaciones de fallas, fracturas y pseudoestratificaciones.
- d. Además se no hace referencia a caracterización de las fracturas para zonificarlo y tener mejor percepción de la dirección de flujo de agua subterránea.

CAPÍTULO 5

AMBIENTE GEOLÓGICO REGIONAL

5.1 Ambiente geológico estructural

El área de estudio se encuentra al Sur del sistema de fallas Cuilco-Chixoy-Polochic, enmarcadas dentro del Bloque Chortís. Geológicamente Guatemala es un país muy diverso, donde se encuentran cuencas estructurales y estratigráficas distintas; así como también otros rasgos estructurales de bastante importancia como la zona de falla transcurrente que comprende el sistema Polochic-Motagua-Jocotán (ver figura 9).

En la parte Sur del país, paralela a la costa del pacífico, que bordea a Centroamérica, forma un margen activo entre la placa de El Caribe y la Placa de Cocos. En el fondo de esta fosa se da el proceso de subducción, caracterizado por el hundimiento de una porción de la placa de Cocos bajo la de El Caribe. Este choque y subducción entre placas provoca el apareamiento de sismicidad y de la cadena volcánica al Sur del país guatemalteco.

Donnelly T.W, et al 1 990 cita en:

“Este proceso de subducción desaparece corteza oceánica, y para guardar un equilibrio, tiene que existir otra generación de corteza nueva, que al final es la creación de volcanes y de terrenos continentales²⁰.”

²⁰ Donnelly, T.W. et al. *The geology of North America. The Caribbean Region. Chapter 3. Northern Central America; The Maya and Chortís Blocks.* United State of America. Geological Society of America. 1 990.

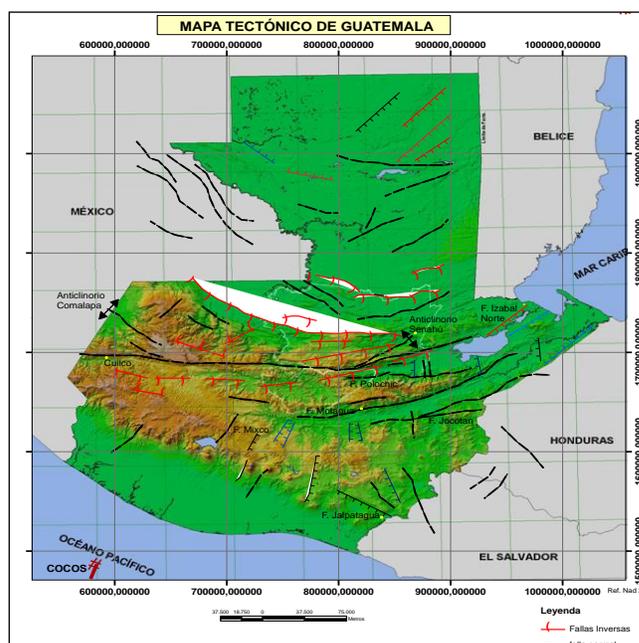
Las fallas que dominan el área es producto, del límite de los sistemas de fallas que atraviesan el país, y estos a su vez hacen aparecer otras estructuras pequeñas que difieren de un lugar a otro.

“Los distintos materiales de edad cuaternaria de rocas volcánicas y la actividad que los produjo están asociados con una zona fallada paralela a la costa a lo largo de las laderas hacia el Sur del altiplano volcánico. Las fallas hacia el Sur son formadas por coladas de lava, ceniza volcánica y en algunas áreas lahárico o de lodo volcánico”.²¹

“Respecto a la geología estructural del área podría estar influenciado por la falla de Cuilco-Polochic, o bien por la falla del Motagua, como lo describen otros estudios, cuyas trazas tienden en dirección E-W, llegando hasta la frontera de México y ubicándose cerca del volcán de Tacaná”.²²

FIGURA 4

TECTÓNICA REGIONAL DE GUATEMALA



Fuente: T.W. Donnelly, 1 990.

²¹ Ibíd.

²² Instituto Interamericano para la Agricultura: *Diagnóstico preliminar de las cuencas fronterizas Guatemala-México, Cuencas de los Ríos Suchiate, Coatán, Cuilco, Selegua y Nentón*. Guatemala 1994. <http://books.google.com.gt/books?id=7d4qAAAAYAAJ&pg=PA9&lpg=PA9&=geologia+malacatan&source>. (10 de octubre 2 012).

5.2 Estratigrafía

“La estratigrafía volcánica del bloque Chortís ha sido revisada ampliamente por Reynolds (1971, 1980). Esta es compleja y consiste en unidades volcánicas de extensión generalmente local, con unidades biogénicas menores (lignitos, calizas de agua fresca, diatomitas). Reconstrucciones de la historia geológica del oeste del bloque Chortís (Dupré, 1970) enfatizan que superficies de tierra contemporáneas estaban más controladas en el Terciario temprano, lo que se originaron unidades estratigráficas más extensas durante ese tiempo”.²³

5.2.1 Cenizas volcánicas cuaternarias

“Las investigaciones sobre la actividad del vulcanismo Cuaternario en Guatemala están representadas en mejor forma por trabajos de Stoiber y Carr (1974). De acuerdo a Carr (1979), las rocas volcánicas recientes en Centroamérica ocurren en tres situaciones estructurales: El primer ambiente estructural ocurre en una estrecha zona de volcanes; el frente volcánico, donde erupcionan grandes volúmenes de rocas de composición calco-alcalina. La mayoría de volcanes en esta zona son conos compuestos de rocas basálticas”.²⁴

5.2.2 Rocas volcánicas del cuaternario

“Rocas ígneas formadas por la aparición de la cadena volcánica que se dio en el periodo cuaternario, o sea, rocas volcánicas más jóvenes, formadas por andesitas, basaltos, riolitas, lahares, y tobas volcánicas, que van de este a oeste en la franja central-sur del país”.²⁵

²³ *Ibidem.*, 32.

²⁴ *Ibidem.*

²⁵ *Ibidem.*

CAPÍTULO 6

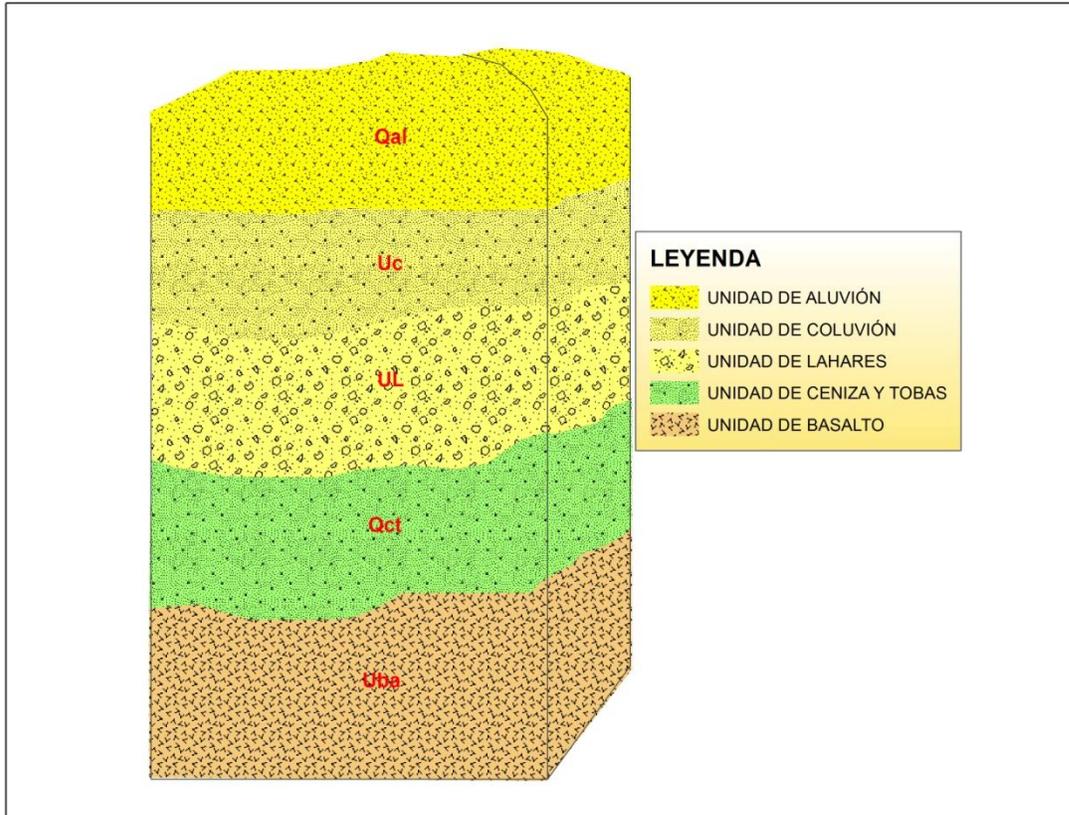
GEOLOGÍA LOCAL

En esta sección se describen las principales características macroscópicas de las diferentes unidades de roca que fueron reconocidas en el área de estudio, realizado durante la etapa de la cartografía geológica en la microcuenca del río Esquichá. Los criterios utilizados para la clasificación litológica de las unidades de rocas fueron básicamente: Textura y composición mineralógica.

La cartografía fue realizada utilizando mapas topográficos base, a escala 1:30 000 y las fotografías aéreas de la región a escala 1:40 000. A continuación se agruparon en orden cronológicas, de la más antigua a la más reciente y corresponden en general a rocas de origen volcánico, siendo las siguientes: Unidad de Basalto (Uba), Unidad de Ceniza y Tobas (Uct), Unidad de Lahares (UL), Unidad de Coluvión (Uc) y la Unidad de Aluvión (Qal).

FIGURA 5

COLUMNA LITOSTRATIGRÁFICA DE LA MICROCUENCA DEL RÍO ESQUICHÁ



Fuente: Investigación de campo. Año 2 012.

En la figura 5, se muestra la columna litostratigráfica para tener una idea sobre la edad de las formaciones de las unidades volcánicas cartografiadas. Las rocas más recientes sobreyacen a las otras unidades de origen volcánico y volcanoclásticos (Terciario).

6.1 Unidad de basalto (Uba)

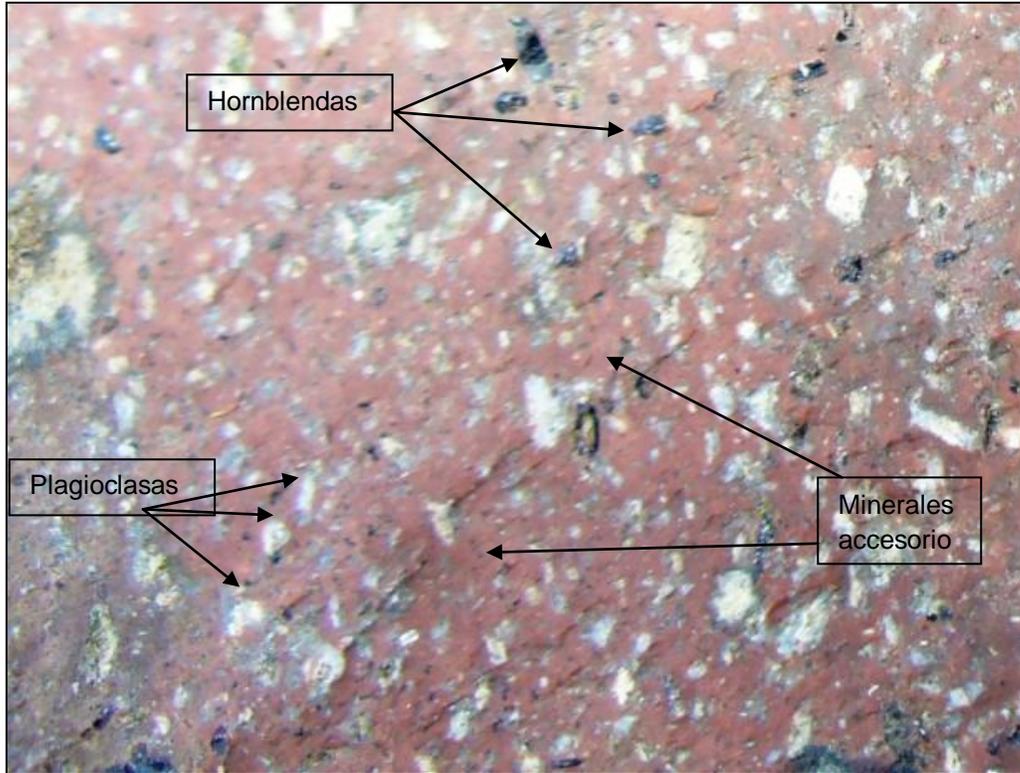
Esta unidad se encuentra localizada en la parte Norte, Este y Sureste del lugar de trabajo, abarcando los cantones: Toacá, Nueva Reforma Sanajabá, Esquipulas, Los Ángeles, San Luis, Flor de Mayo, Santa María, Canatzaj, Los Laureles Sanajabá, La Unión, y San Pedrito, cubriendo aproximadamente el 58 por ciento de área y en algunos lugares se puede observar afloramiento en forma masiva.

Esta unidad aflora en un área de aproximadamente 22 km² dentro de la microcuenca y consiste de roca basalto. Tiene textura fanerítica, está compuesta mineralógicamente por plagioclasas en su mayoría, también por fenocristales de hornblenda y de otros minerales accesorios afaníticos. El tamaño de los minerales cambia tanto lateral como horizontal de grano medio a grande. Las hornblendas están diseminadas en los basaltos y algunos miden alrededor de 8 mm.

En el cantón Los Laureles se expone un afloramiento de basalto en forma de escarpe, con una extensión aproximada de 20 metros.

En la figura 5 se observan los minerales de hornblenda de color negro, presentes en un 5 por ciento, también los minerales de plagioclasas de color blanco que son constituyentes principales de los basaltos con un 40 por ciento en una matriz de minerales accesorios que representa un 65 por ciento, por ciento observadas en muestra de mano.

En algunos afloramientos mapeados no se observaron minerales hornblenda.

FIGURA 6**MINERALES DE HORNBLENDA Y PLAGIOCLASA**

Fuente: Investigación de camp. Año 2 012.

En la figura 7 se observa el afloramiento de basalto muy fracturado, ubicado a la orilla de la carretera que conduce al cantón Flor de Mayo. En esta misma figura se observa una fractura que tiene un desplazamiento de rumbo provocado por una falla.

FIGURA 7

AFLORAMIENTO DE BASALTO FRACTURADOS



Fuente: Investigación de campo. Año 2 012.

En el corte de carretera del cantón Canatzaj se observan afloramientos de basaltos (figura 8), con alto grado de fracturamiento, además, de la presencia de clivaje de fractura. En este afloramiento, los planos de fracturas buzcan hacia el Oeste, mientras las otras tiene un patrón de buzamiento bien definido hacia el Este.

Las rocas están cubiertas por una pequeña capa de suelo orgánico y en otros lugares hay exposición de rocas en las superficies. El suelo varía de profundidad de 50 cm a 1 cm. Durante la época de invierno, la erosión afecta muchas áreas de la microcuenca, dejando descubiertos afloramientos de rocas compactas. Los sedimentos son transportados a los lugares bajos o en las orillas de los ríos para la sedimentación.

FIGURA 8

AFLORAMIENTO DE BASALTO DIACLASADO



Fuente: Investigación de campo. Año 2 012.

La meteorización de los basaltos varía de grado II a IV, en algunos cantones se observa la transformación de estas rocas en suelo arenoso, de grano grueso. Además, se puede observar la meteorización en capas de cebolla o concéntricas, como las que se pueden observar en las orillas del corte de la carretera en los Cantones Los Ángeles y San Luis.

Durante la época de invierno se forman escorrentías superficiales erosionando los suelos, dejando en exposición afloramientos de rocas. Esto obedece a la falta de cobertura vegetal en muchas zonas de la cuenca.

En el corte de la carretera que conduce hacia el cantón Flor de Mayo, se observa la meteorización del basalto de grado V, transformándolo en suelo, con algunos fenocristales de hornblenda visibles.

En la figura 9, se hace visible la meteorización del basalto en una sección de la carretera que conduce hacia el centro del cantón Flor de Mayo. La textura del suelo es arenosa, característico de estos tipos de rocas, cubiertos por poca vegetación como el árbol de arrayán, que tiene una altura aproximada de 3 m.

FIGURA 9

METEORIZACIÓN GRADUAL DEL BASALTO



Fuente: Investigación de campo. Año 2 012.

Por la composición mineralógica esta unidad se puede correlacionar con las rocas ígneas que forman parte de: "Cinturón Volcánico, incluidas las lavas basálticas, riolitas, dacitas, tobas (ignimbritas) y lahares. En resumen son producto del vulcanismo mundial que se dio en el periodo terciario superior, o bien, en el plioceno"²⁶.

²⁶ Lucía Fabiola Quiroa Garnica. *Estudio de las características físicas del suelo y su efecto en la regulación del recurso hídrico, en la cuenca del río Tacaná*. Tesis Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. USAC. 2 008. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2922_C.pdf (19 de Agosto de 2 012).

De la Cruz, Hernández, 1 986):

“Identifica 4 periodos de actividad en el volcán Tacana los cuales construyeron la actual estructura. Según la estratigrafía indica la formación de flujos piroclásticos sobreyaciendo a la estructura de cada aparato volcánico creado por cada episodio, estos productos tienen una composición de andesita de hornblenda-biotita, donde el Tacaná no muestra antecedentes de actividad magmática eruptiva en tiempos históricos recientes, sin embargo la actividad fumarólica, acompañada de erupciones freáticas menores, ha sido observada en los siglos XIX y XX”.²⁷

Las actividades volcánicas del complejo volcánico del Tacaná están relacionadas con las formaciones de rocas basálticas, ricas en plagioclasas y hornblendas en una matriz de minerales accesorios de grano fino.

“El edificio del Tacaná está constituido por flujos de lavas de composición basáltica andesíticas (56-61 wt % SiO₂) y por domos de composición andesíticas y dacíticas (61- 64 % SiO₂), los flancos del edificio están cubiertos por depósitos de flujo de bloques y cenizas con edades de 38000, 28000 y 16000 años aproximadamente y los flujos piroclásticos están compuestos por líticos juveniles de composición andesíticas (60-63 % wt SiO₂)”.²⁸

En la cita anterior cabe mencionar que las formaciones de rocas cartografiadas en la microcuenca del río Esquichá, pudieron haberse formado de las erupciones volcánicas del volcán de Tacaná, según muestras de mano examinadas y de la composición mineralógica.

²⁷ Sistema Estatal de Protección Civil: *Plan Operativo Tacaná*. <http://www.proteccioncivil.chiapas.gob.mx/Documentos/Tacana.pdf> (06 de agosto de 2 012).

²⁸ J.C Mora. et al. 2004. *Petrology and Geochemistry of the Tacaná Volcanic Complex México-Guatemala: Evidence for the last 40,000 year activity*. *Geofísica Internacional*. Universidad Nacional Autónoma de México. DF. <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/568/56843303.pdf> (09 de agosto de 2 012).

6.2 Unidad de ceniza y toba (Uct)

La unidad aflora en una extensión de aproximadamente 9 km² de ceniza desde los Cantones: Valle Verde, Esquipulas y Sanajabá. Representa el 24 por ciento del área de la microcuenca, por las características observadas en fotos aéreas, es coluvión de ceniza y cubre los cantones mencionados.

Basado en la topografía, esta unidad se caracteriza por formar terrenos ondulados, valles y pendientes que oscilan entre los 8 a 20 grados (anexo mapa geológico), con paredes escarpadas al Sureste del Cantón Esquipulas y Este del Cantón Valle Verde. Pero también afloran en otros Cantones como: Tuismil, Tojchoc Grande, Los Cerritos y Toacá.

“Las cenizas y tobas se forman a partir de erupciones volcánicas de materiales piroclásticos que posteriormente son depositados en la superficie por acción del viento. Estas cenizas tienen un tamaño inferior a 2mm, por ello la columna eruptiva las eleva a gran altura donde son arrastradas por el viento a grandes distancias antes de caer al suelo. Sin embargo, en erupciones muy grandes, la ceniza está acompañada por piedras que tienen el peso y densidad de granizos”.²⁹

Estas cenizas pueden observarse en algunas partes de la microcuenca, generalmente son de textura de granos finos y contienen cuarzo de color blanco lechoso, clastos de piedras de pómez de diferentes tamaños, generalmente estas rocas son de color blanco a blanco amarillento y gris claro, con textura arenosa.

Estas cenizas y tobas cartografiadas en la microcuenca pueden ser producto del complejo volcánico del Tacaná en cualquiera de las erupciones de materiales fragmentarios o piroclásticos.

²⁹Universidad de Colima, México. *¿Qué es ceniza Volcánica?* <http://www.ucol.mx/volcan/ceniza.htm> (12 de noviembre de 2012).

6.3 Unidad de lahares (UL)

Esta unidad se ubica en la parte Suroeste de la microcuenca, donde sus mejores exposiciones se pueden observar en las orillas de la carretera asfaltada que conduce al municipio de Tacaná. Los depósitos de lahares cubren aproximadamente los 6 km², que representan el 15 por ciento del total de área de la microcuenca del río Esquichá.

Una de las mejores exposiciones de esta unidad es en un corte de carretera que conduce a los municipios de Sibinal y Tacaná, abarcando los cantones de San Luis, Michoacán, Tojchis y Santa Teresita.

Esta unidad se forma con cantos de bloques de basaltos meteorizados en forma esferoidal en una matriz cementada de ceniza. Los basaltos en algunos cantones se pueden observar en bloques superiores de un metro de diámetro y otra por la transformación que ha sufrido, su tamaño es en centimétricos.

FIGURA 10

DEPÓSITOS DE LAHARES EN MATRIZ DE CENIZA



Fuente: Investigación de campo. Año 2 012.

En la figura 10 tomada en el Cantón Tojchish Candelaria se puede observar a la orilla de la carretera la presencia de flujo de lahares en una matriz de ceniza. También aflora en otros cantones como: Santa Teresita, San Luis, Michoacán y una parte en los Ángeles San Luis.

Estos flujos están compuestos por agua y escombros (fragmentos de pómez, rocas y ceniza) y son dirigidos por la gravedad hacia las partes bajas con pendientes suaves, como los afloramientos observados en varios sectores de la microcuenca, tal el caso de los cantones: Santa Teresita, San Luis y Michoacán.

Cecilia Guadalupe Limón Hernández cita a Moore et. al 1993 que:

“Los lahares se pueden formar a través de varios mecanismos: cuando ocurren tormentas simultáneamente con erupciones explosivas: cuando flujos piroclásticos calientes erosionan parte del glaciar que cubre a los volcanes nevados, cuando el material piroclásticos sin consolidar se satura en agua proveniente de manantiales o lluvias inclusive después de varios años de haber ocurrido la erupción y cuando avalanchas saturadas de agua se transforman en lahares (Scott, 1993)”.³⁰

La cita anterior menciona los flujos de lahares en muchas áreas o zonas del municipio de Tacaná y también se observan en otros municipios cercanos. Las mejores exposiciones de flujos de lahares se observa en los cortes de las carreteras, en la microcuenca río Esquichá.

Limón Hernández menciona que:

“Otro mecanismo puede ser la formación de represas por derrames de lava, avalanchas de escombros, flujos piroclásticos o bordes cratéricos, los cuales pueden colapsar por desbordamiento o derrumbe y generar lahares (Houghton et al., 1987). Los lahares representan un peligro potencial para las comunidades que se localizan en las faldas del volcán, ya que se pueden originar durante la actividad eruptiva o cuando el volcán está tranquilo”.³¹

Los flujos de lahares son peligros, especialmente porque son susceptibles a provocar deslizamientos, por las pendientes topográficas muy pronunciadas en ciertos sectores como en el cantón Santa María, donde se observa un cerro con derrumbes en ambos lados.

³⁰ Cecilia Guadalupe Limón Hernández. *Análisis de la percepción del Riesgo en los volcanes Chichón y Tacaná, Chiapas*. <http://www.geo.mtu.edu/~raman/papers2/CGLimonTesis.pdf> (06 de noviembre de 2012).

³¹ *Ibíd.*

6.4 Unidad de coluvión (Uc)

Esta unidad de coluvión se encuentra expuesta en la parte Sur y aflora entre los Cantones Los Ángeles San Luis y Flor de Mayo. Esta representa aproximadamente 2 km², con un porcentaje de 2.63 por ciento del área de esta microcuenca. Otro afloramiento de coluvión se ubica al Oeste del Cantón San Pablo.

Se forma de las mismas rocas que se desprendieron y posteriormente transportadas, posiblemente por fenómenos de deslizamiento en masa. Regularmente este tipo de unidades presenta una morfología muy irregular o de formas peculiares (anexo mapa geológico).

El afloramiento ubicado en el cantón Los Ángeles está formado por la unidad de basaltos, basaltos meteorizados en capas de cebolla y suelo de textura arenosa. Está cubierto por árboles característicos del lugar como el arrayán (*Luma apiculata*), y asimismo hay poca vegetación. Otro afloramiento ubicado en el centro de la microcuenca tiene la misma composición, pertenece a la misma unidad.

Los dos afloramientos fueron transportadas a corta distancia y tienen características de los terrenos con vegetación abierta, pero también se forman cuando pierden estabilidad las laderas, dejando pendientes abruptas como el afloramiento ubicado en el cantón Los Ángeles San Luis, donde tiene mejor exposición.

6.5 Unidad de aluvión (Qal)

Esta unidad representa el 0.85 por ciento, aproximadamente 1 km² cerca y en las orillas del río Coatán. Los depósitos fluviales están constituidos por sedimentos que se acumulan a partir de la actividad de los ríos y de deslizamiento por gravedad. Además de su papel como receptores de información geológica valiosa, los depósitos fluviales también son importantes en el aspecto económico, ya que son proveedores de material para la construcción, como la arena de río.

Este depósito está constituido por rocas basálticas en bloques angulosos o subredondeados, basaltos en matriz de ceniza y de fragmentos líticos, y su mejor exposición en las orillas del río Coatán. Un depósito aluvial está formado por masa de sedimentos detríticos que ha sido transportada y sedimentada por un flujo.

Usualmente el término aluvión se usa para los depósitos de arena, sedimento, grava y limo arrojados por los ríos, arroyos y escorrentías. Generalmente, aluvión o depósito aluvial (como también se le conoce), es de origen reciente o también son conocidos como depósitos cuaternarios.

Las unidades de aluvión se siguen formando constantemente por la deposición de sedimentos por parte de los ríos en lugares con pendientes suaves.

CAPÍTULO 7

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

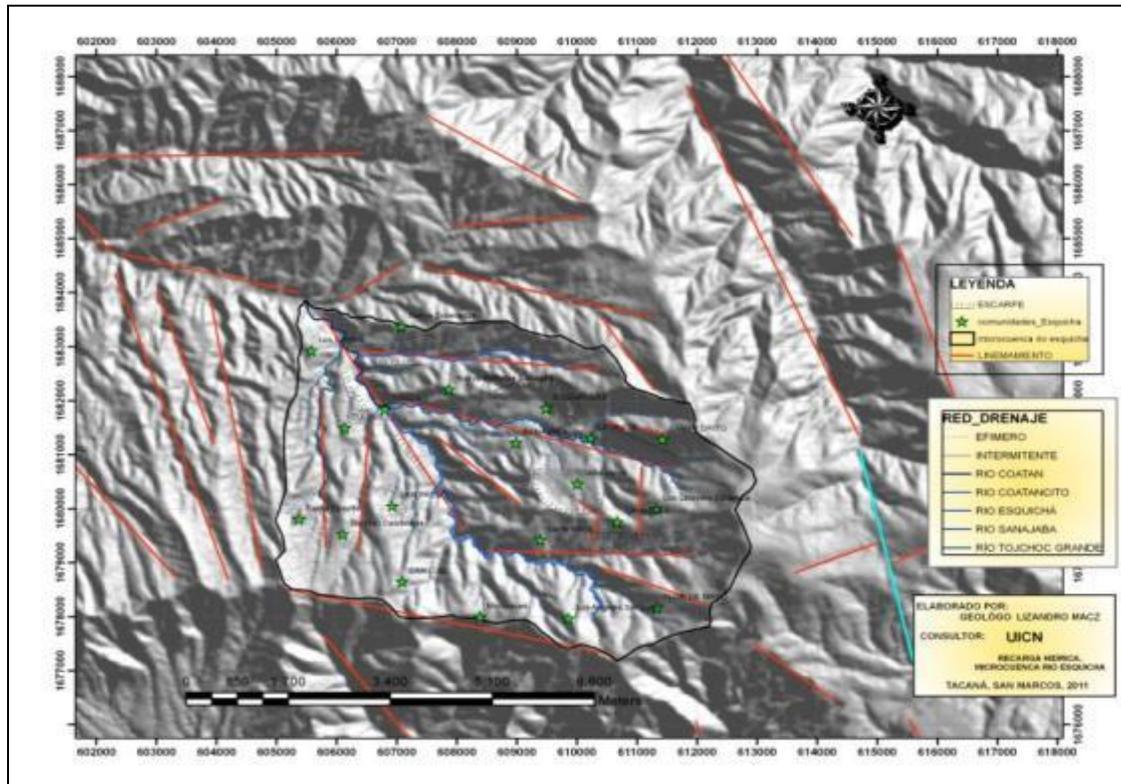
El área de estudio se localiza al Sur de la falla Cuilco-Chixoy y posiblemente se ubica cerca del límite de los bloques Maya y Chortí. Es posible que tenga relaciones estructurales geológicas con la falla Cuilco, por las orientaciones de los lineamientos y fracturas.

En el mapa 6 se muestran trazas de alineamientos de cerros y de los ríos que posiblemente tengan relación con fracturamiento provocado por fallas geológicas ubicadas al Norte de esta microcuenca.

Previa identificación de estructuras a través de análisis de imágenes aéreas, se definieron lineamientos en el área de la microcuenca y áreas aledañas; además se corroboraron las litológicas cartografiadas, estas fueron definidas por las características texturales y topográficas de fotos aéreas.

MAPA 6

DE LINEAMIENTOS DE LA MICROCUENCA DEL RÍO ESQUICHÁ



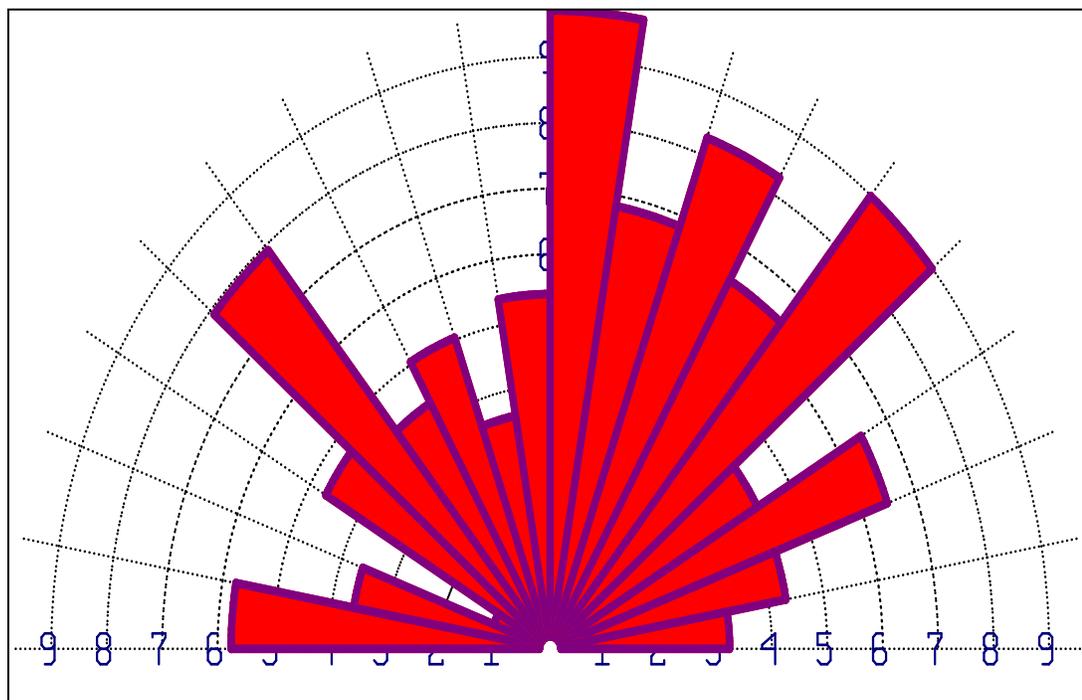
Fuente: Investigación de campo. Año 2 012.

7.1 Lineamientos

El análisis de los lineamientos de la microcuenca del río Esquichá se caracteriza por tres tipos de familias, las que poseen tendencias N45W, N05E y N45E, donde las mismas siguen trazas de los ríos o de escarpes de los basaltos andesíticos.

En la figura 11, diagrama de rosas, presenta la orientación de lineamientos, correspondientes a la microcuenca, que se obtuvieron a través del análisis de las ortofotos y de fotografías aéreas que cubre el área de estudio, de donde se generaron 287 datos de rasgos lineares.

FIGURA 11
ROSETA DE LINEAMIENTOS



Fuente: Investigación de campo. Año 2 012.

El área de la microcuenca posiblemente fue afectado por la falla Cuilco, generando lineamiento con orientación preferencial al Norte y otras con direcciones N-W y N-E, respectivamente.

7.2 Fracturas

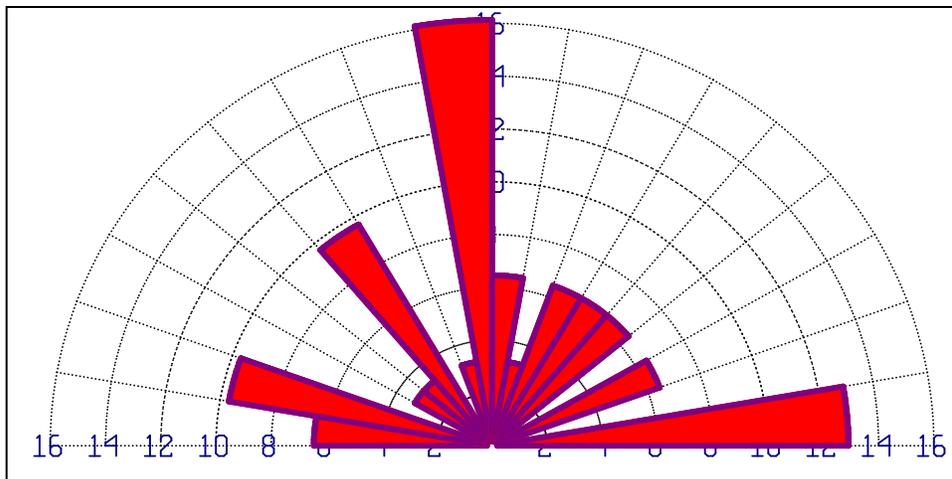
Los basaltos afloran en la parte alta de la microcuenca, se presenta con una leve a moderada meteorización. En los cortes de las orillas de carreteras se observan las mejores exposiciones de las fracturas.

En el área de investigación se tomaron datos estructurales de los fracturamientos para la unidad de basalto, especialmente en algunos cantones como: Flor de Mayo y Santa María. Este mismo diagrama resalta

la predominancia del fracturamiento sobre las direcciones del Norte, Noroeste y Noreste.

La figura 12 muestra las orientaciones preferenciales siguientes N05W, N45W, N75W y N85E, con direcciones predominantes al Norte y Este, respectivamente.

FIGURA 12
ROSETA UNIDIRECCIONAL DE FRACTURAS



Fuente: Investigación de campo. Año 2 012.

El diagrama de rosa, evidencia el patrón de fracturamiento para todas las unidades geológicas cartográficas, en especial el de la unidad de basaltos que cubre un buen porcentaje del área de la microcuenca.

El digrama en mención puede ser el indicador de cómo están orientadas fracturas producidas por fallas ubicadas al Norte.

CAPÍTULO 8

ZONIFICACIÓN DE RECARGA HÍDRICA

El objetivo de las investigaciones hidrogeológicas es localizar los lugares con buen recurso hídrico subterráneo o superficiales, ya sea para explotación o para poder tomar medidas de protección o de restauración de este recurso esencial para la vida. Este tipo de estudio también puede incluirse en minería, túneles, problemas geotécnicos y en la estabilidad de taludes, y asimismo, para análisis de calidad de aguas. Este estudio tiene como objetivo principal establecer zonas de recargas hídricas, utilizando técnicas de sistema de información digital.

Para la identificación del potencial hídrico para la microcuenca del río Esquichá, se realizó la integración de mapas, donde se utilizó la fórmula siguiente:

$$I_{prh} = R_f + L_t + L_d + L_u + T_e + S + D_d + S_t^{32}$$

8.1 Parámetros utilizados en la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica

A continuación se describe cada variable utilizada para la determinación de zonas de recarga hídrica, luego de su integración con la ayuda de la fórmula ya indicada y posteriormente con apoyo de *software ArcGis* para la integración.

³² E. Sener. et al.: *An integration of GIS and remote sensing in groundwater Investigations: A case study in Burdur, Turkey* Department of Geological Engineering, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey. 2 005.

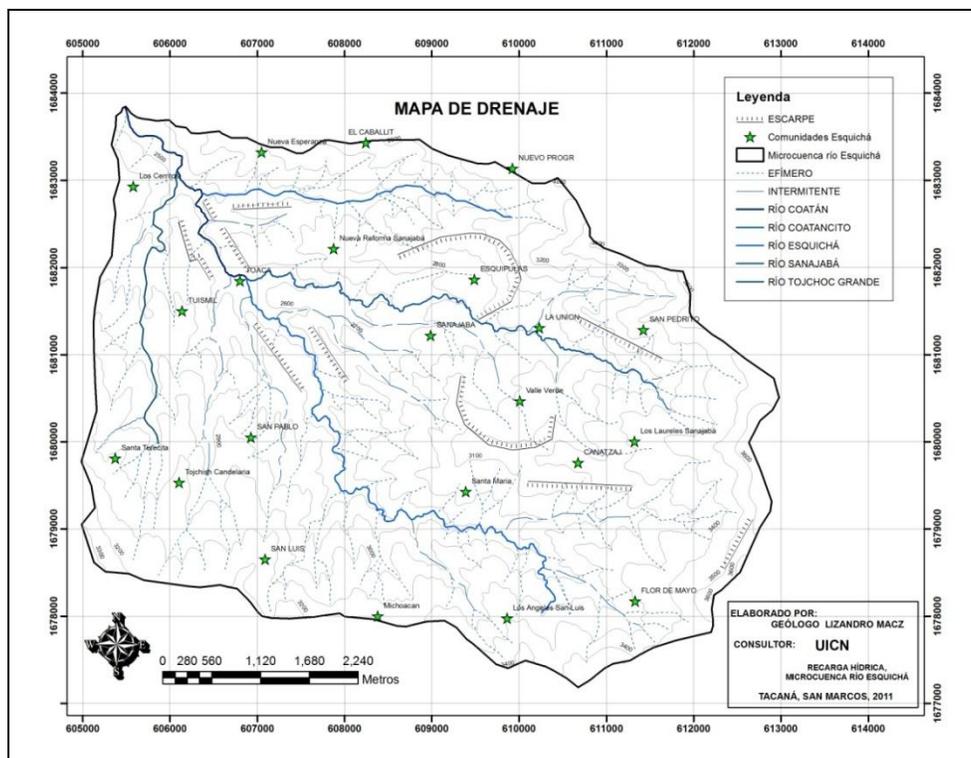
Asimismo, se construyeron tablas de ponderaciones, donde se consideraron factores como la permeabilidad, textura, fracturamiento, cobertura vegetal, pendiente y la litología del área de interés.

8.1.1 Drenaje fluvial

En la microcuenca del río Esquichá se ubican cuatro sistemas de drenajes importantes: El río Esquichá se encuentra en la parte central y Suroeste, y es uno de las más grandes; el río Sanajabá se localiza en la parte Este de la microcuenca y es afluente del río Esquichá; el río Sanajabá se ubica al Norte y el río Coatancito al Oeste. Estos ríos principales son afluente del río Coatán, tal como se puede observar en el mapa 7.

MAPA 7

DRENAJE MICROCUENCA RÍO ESQUICHÁ



Fuente: Investigación de campo. Año 2 012.

En su recorrido el río Esquichá, atraviesa casi la mitad de la microcuenca, drenando desde la parte Sur, en donde es alimentado por varias quebradas o riachuelos permanentes e intermitentes. Este río es uno de los afluentes principales del río Coatán.

En la parte Este se encuentra el río Sanajabá, siendo uno de los más grandes y caudalosos de esta microcuenca, el mismo es alimentado por quebradas o riachuelos; este drena desde el Sureste hacia el Noreste, formando una unión con el río Esquichá, dando inicio al río Coatán en el Cantón Toacá.

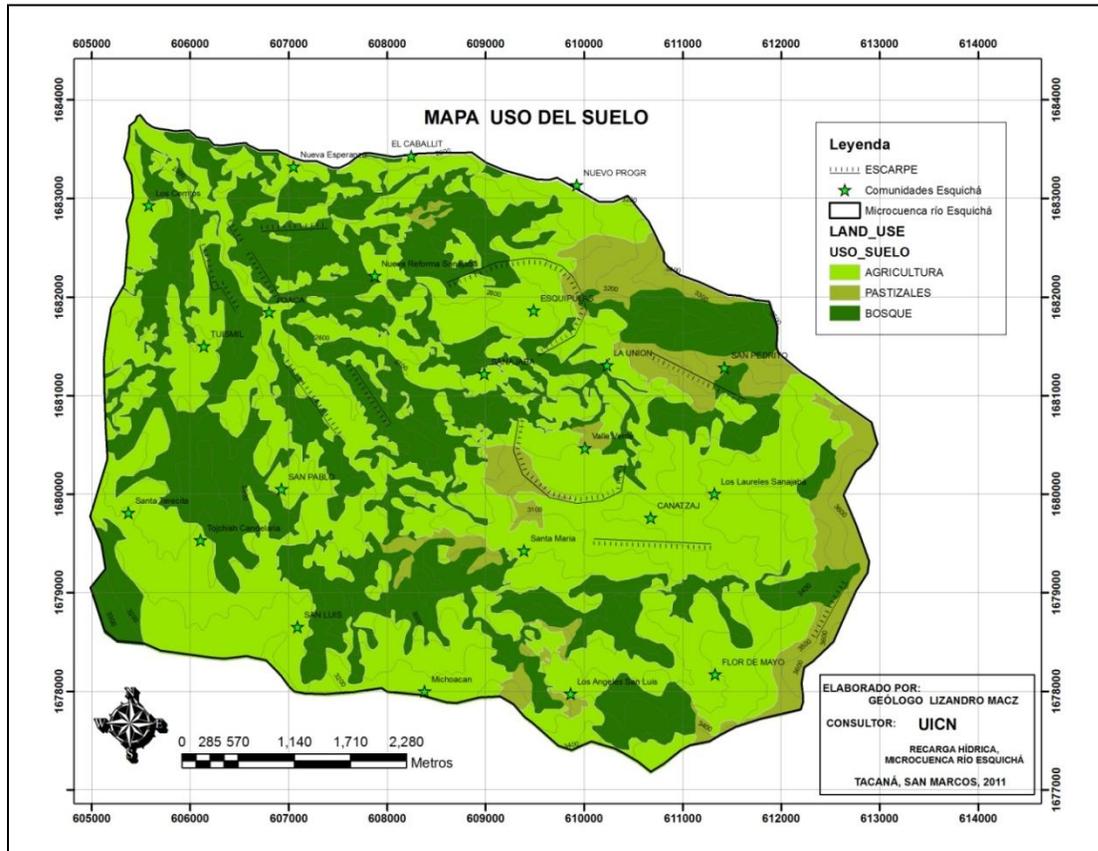
8.1.2 Uso del suelo

De acuerdo con los datos obtenidos en el campo y el análisis o la generación de información a partir de ortofotos de la microcuenca, sobresale la predominancia de la actividad agrícola, puesto que existen pocas áreas con cubierta vegetal en la zona. Esta cubre pocas extensiones en áreas, y la actividad de gran dominancia es al Sur con la práctica agrícola, como: siembra de maíz (*Zea mays*) y de frijol (*Phaseolus vulgaris*). (Ver mapa 8)

En general, los suelos de la microcuenca están relacionados directamente a las rocas volcánicas, de las que se derivaron a partir de la meteorización de estas. Generalmente por las actividades que se desarrollan en varias zonas de la microcuenca, muchos suelos carecen de vegetación, esto hace que sean susceptibles a la erosión.

MAPA 8

USO DEL SUELO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO ESQUICHÁ



Fuente: Investigación de campo. Año 2 012.

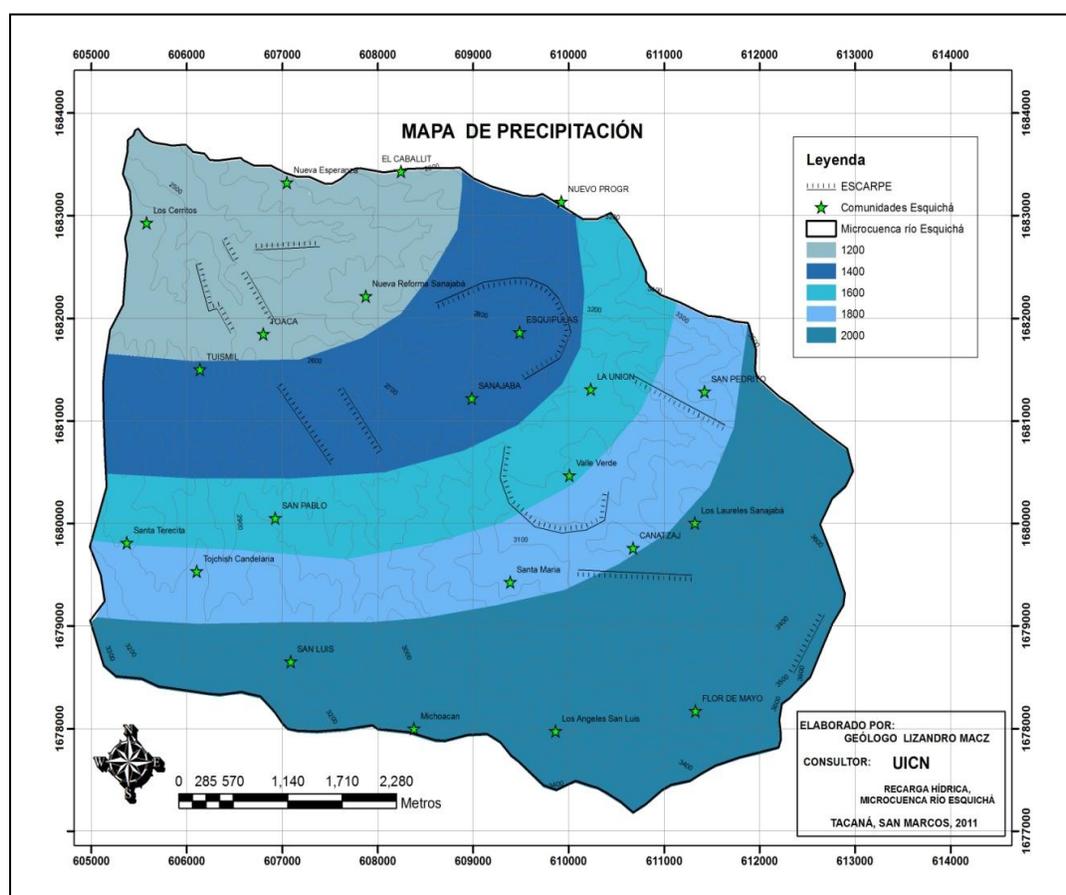
8.1.3 Precipitación

Según datos proporcionados por el INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología), esta microcuenca tiene índices de precipitación que van desde 1 200 mm a 2 000 mm, datos obtenidos durante el año 2 011.

En la parte Sur de la microcuenca es donde ocurre la mayor cantidad de precipitación, que varía de rango desde 2 000 mm a 1 600 mm cada año, de acuerdo con los registros del año 2011. Por el lado Norte, la precipitación es de menor cantidad y tienen rangos de 1400 mm a 1200 mm, por año (Ver mapa 9).

MAPA 9

PRECIPITACIÓN EN MICROCUENCA RÍO ESQUICHÁ



Fuente: Investigación de campo. Año 2 012.

En el mapa 9 se muestran los niveles de precipitación para la cuenca estudiada, donde las estaciones climáticas están bien marcadas; en la época de invierno hay mucha precipitación, y durante el verano se aparece por la sequía severa, afectando los cultivos.

8.1.4 Lineamientos

En el área de la microcuenca existen lineamientos con orientaciones predominantes de Norte-Sur (ver mapa 10). Algunos alineamientos siguen cursos de los principales ríos del área de estudio.

El área de estudio se ubica dentro de la provincia fisiográfica “Tierras Altas Cristalinas”. Y los lineamientos existentes en los límites de la cuenca pueden estar asociados a las fallas ubicadas al Norte.

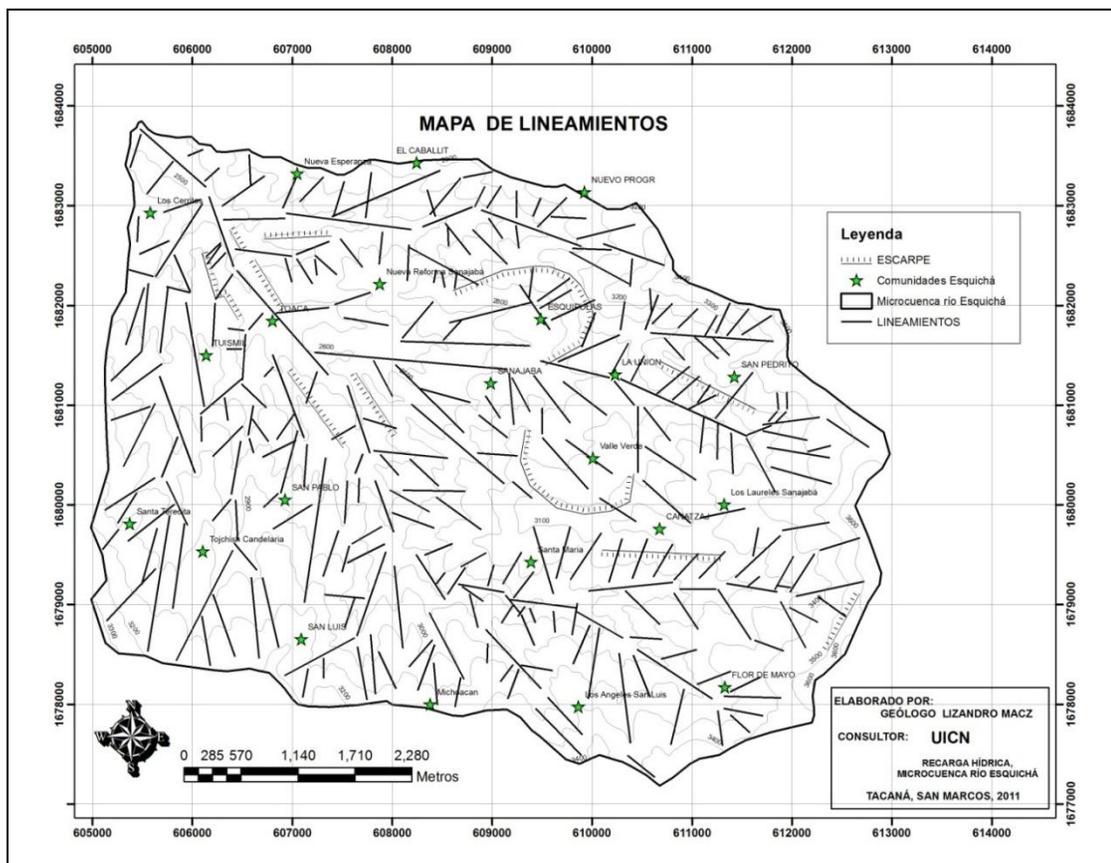
“Respecto a la geología estructural del área podría estar influenciado por la falla de Cuilco-Polochic, o bien por la falla del Motagua, cuyas trazas tienden en dirección E-W, llegando hasta la frontera de México y ubicándose cerca del volcán del Tacaná”.³³

En el mapa 10 se pueden observar las alineaciones de los cursos de los ríos más caudalosos en la microcuenca, esto indica que está influenciada por actividades tectónicas, como se menciona en la cita anterior.

³³Ibidem., 33.

MAPA 10

LINEAMIENTOS EN MICROCUENCA RÍO ESQUICHÁ



Fuente: Investigación de campo. Año 2012.

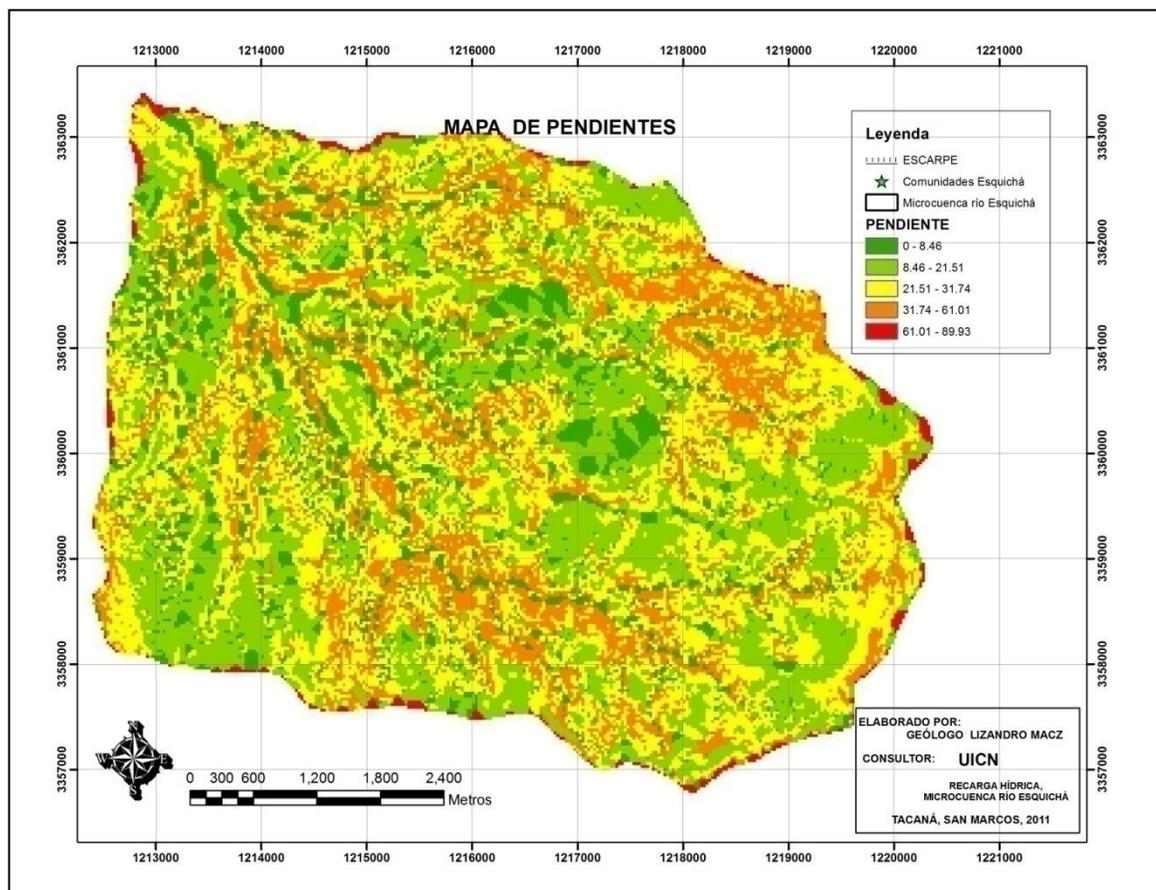
8.1.5 Pendientes

A partir de la generación de modelo de elevación digital (MED), se obtuvo el mapa de pendientes (grados), en donde los cambios bruscos de pendientes corresponden a zonas escarpadas y/o lugares socavados por el curso de la erosión de los ríos.

Topográficamente, el área de la cuenca está formada por pendientes con rangos de 31 a 61 grados, en su mayoría cerca de los cursos de los ríos. En la parte central y al Suroeste se puede apreciar una zona con pendiente suave. Esta suavidad en su topografía, posiblemente se debe a la litología del lugar formada por cenizas y tobas (ver mapa 11).

MAPA 11

PENDIENTES EN MICROCUENCA RÍO ESQUICHÁ



Fuente: Investigación de campo. Año 2 012.

8.1.6 Mapa de densidad de drenaje y de lineamientos

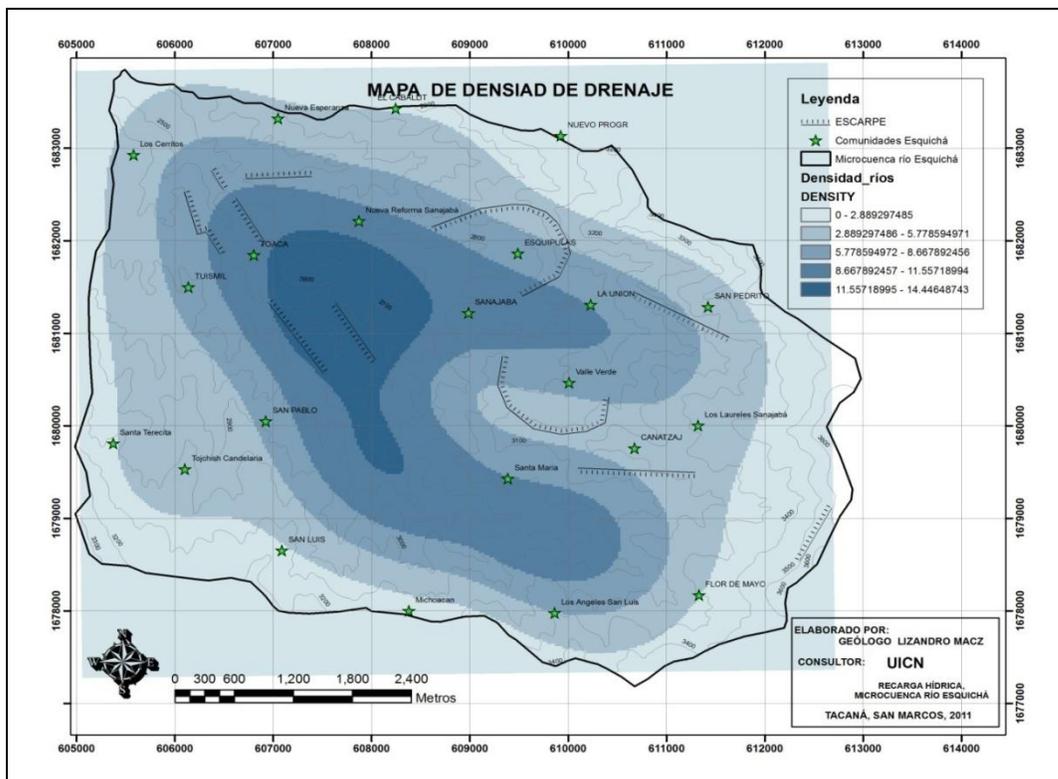
El mapa de densidad de drenaje se generó a partir de la interpolación de longitud de ríos por unidad de área. En el mapa 12 se muestra la parte central de la microcuenca y la concentración de red de drenajes, esto se debe a que allí es donde se unen los ríos importantes.

Además son indicadores de áreas con mayor infiltración de agua. En el caso de esta microcuenca se evidencia la zona central con mayor presencia de infiltración.

El mapa 12 muestra los niveles de densidad como en las partes altas de la microcuenca (Sureste) con poca concentración de ríos y quebradas. En los sectores Este y Oeste ocurre lo mismo con escasa presencia de drenajes, porque son zonas de descarga hacia los niveles bajos.

MAPA 12

DENSIDAD DRENAJE EN MICROCUENCA RÍO ESQUICHÁ



Fuente: Investigación de campo. Año 2 012.

En el mapa 13, se muestran las zonas de alta densidad de lineamientos, ubicados en la parte central de la microcuenca, litológicamente corresponde a la unidad de Tobas y Cenizas

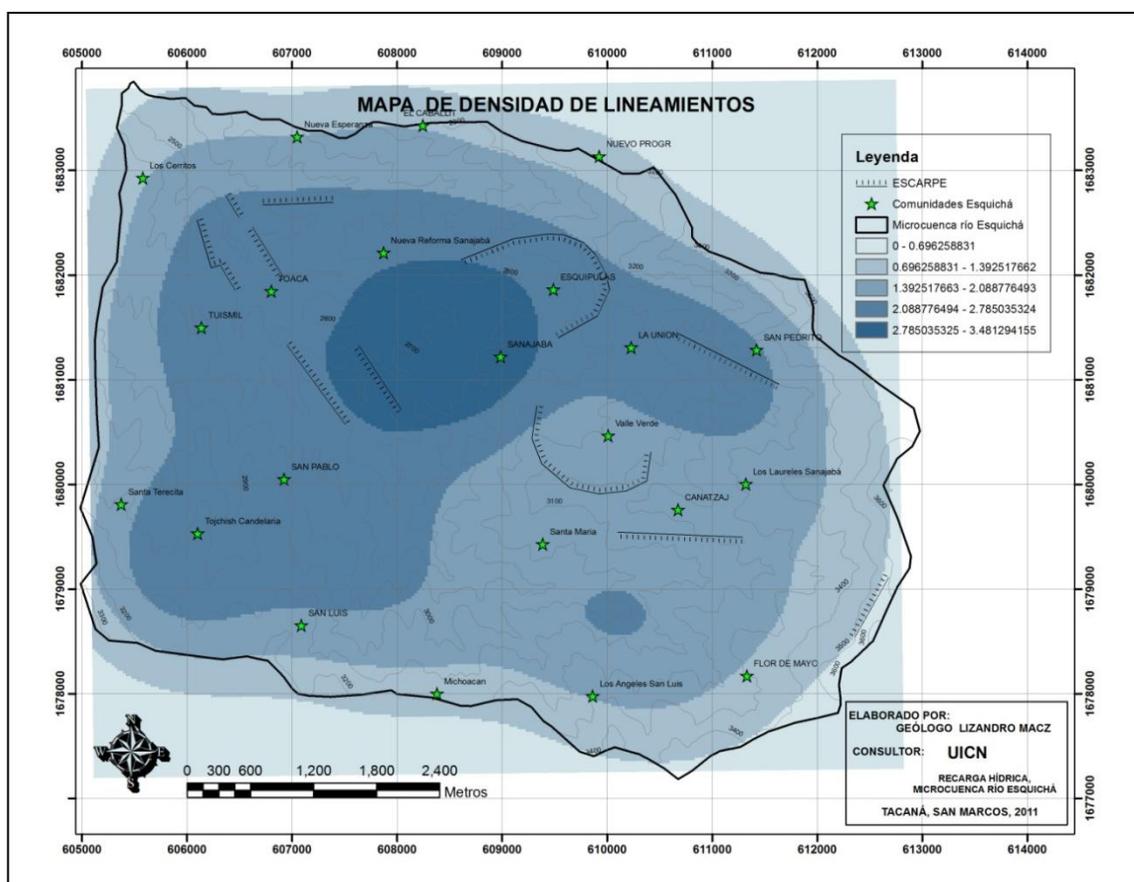
Generalmente los lineamientos están relacionados con sistemas de fracturas, planos discontinuos, fallas y zonas de cizallas en rocas. Según Singhal, B.B. S. menciona que: "lineamientos con frecuencia representan zonas de fracturas en rocas, se asocian generalmente con zonas de mayor erosión, cubierta de vegetación, mayor humedad y alineación de valles."³⁴

³⁴ Singha, B.B. I & R.P. Gupta: *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. New York United Of America. Academic Publishers Springer, 1 999

La interpretación de lineamientos regularmente se realiza a través de fotografías aéreas, con apoyo de un estereoscopio, que ayuda a visualizar zonas en tercera dimensión. Para el área de estudio se realizaron trazas de alineaciones de ríos y cerros.

MAPA 13

DENSIDAD DE LINEAMIENTOS EN MICROCUENCA RÍO ESQUICHÁ



Fuente: Investigación de campo. Año 2 012.

En la figura anterior se observa la presencia de concentración de lineamientos en la parte central y Oeste de la microcuenca, así también ocurre con poca cantidad en la zona Este.

8.1.7 Ponderación de parámetros

En la tabla 1 se observan los valores de ponderación de cada parámetro, tomado en cuenta para esta la identificación potencial de recarga hídrica. La ponderación se determinó con base a características de absorción de agua para cada parámetro estudiado. En el caso de la litología, se analizó la permeabilidad, fracturamiento y cubierta vegetal de las unidades cartografiadas y en función de capacidad de transmisión o absorción de agua, con rangos de 1 a 5, y donde el número 5 posee buena filtración.

En la misma tabla, para el caso de las densidades de lineamientos y de drenajes, se consideraron factores como las concentraciones de los parámetros en mención por unidad de área. Y las ponderaciones se realizaron en rangos de 3 a 7 y donde el rango 3 contiene poca densidad de lineamientos. Para la densidad de drenaje se usaron valores de ponderación de 1 a 5, donde los valores 1 son las que poseen poca concentración de drenajes, regularmente están ubicados en las partes altas de la cuenca.

Para los otros parámetros se ponderaron de forma similar, de acuerdo con sus características y ubicación en cada mapa generado. Además, se usó la exploración geológica de superficie y también se utilizó la correlación de la geología estructural del área a escala local. En la tabla siguiente se resumen todas las ponderaciones realizadas para cada variable.

TABLA 1
VALORES DE PESO (PONDERACIÓN) DE ACUERDO CON
DIFERENTES PARÁMETROS

	Parámetros	Pesos (Weight) (ponderación)
Litología	Coluvión	1
	Basaltos	2
	Lahares	3
	Cenizas y tobas	4
	Aluvión	5
Densidad de Lineamientos (km/km²)	0 – 0.69	3
	0.69 – 1.39	4
	1.39 – 2.08	5
	2.08 – 2.78	6
	2.78 – 3.48	7
Densidad de denaje (km/km²)	0 – 2.889	1
	2.889 – 5.778	2
	5.778 – 8.667	3
	8.667 – 11.557	4
	11.557 – 14.446	5
Elevación topográfica (m)	1308.56	5
	1308.56 – 2256.00	4
	2256.00 – 2844.57	3
	2844.57 – 3360.38	2
	3360.38 – 3677.17	1
Pendiente (Slope gradient)	00 – 8.46	5
	8.46 - 21.51	4
	21.51 – 31.74	3
	31.74 – 61.01	2
	61.01 – 89.93	1
Precipitación anual (mm)	2000	5
	1800	4
	1600	3
	1400	2
	1200	1
Uso de la tierra	Pasto	3
	Agrícola	4
	Bosque	5

Fuente: Modificación con base de datos de campo, 2 012, de E. Sener et al. 2 005: *Hydrogeology Journal*. Vol. 13.

8.1.8 Recarga hídrica - litología

Basado en la integración de mapas (álgebra de mapas: $I_{prh} = R_f + L_t + L_d + L_u + T_e + S + D_d + S_t$) se logró determinar las siguientes características hidrogeológicas para las unidades mapeadas como: Cenizas y tobas, con niveles altos de filtración de agua; lahares, aluvión y cenizas volcánicas; se determinaron niveles medios de recarga hídrica; Basalto y lahares, con nivel bajo de recarga; y por último, la unidad de basalto y coluvión con niveles muy bajos de recarga hídrica o que no tienen absorción del recurso acuífero.

La investigación incluyó la delimitación y la cartografía de las diferentes unidades litológicas, también las formas de los terrenos y las características de drenaje. Estos contribuyen de manera significativa en la identificación de las zonas de recarga en la cuenca.

La unidad de basaltos, abarca la mayor parte de la microcuenca con exposiciones de rocas meteorizadas de grado II-IV, además de exposición de afloramiento con fracturas visibles en los cortes de carreteras. La permeabilidad, el grado de meteorización y el grado de porosidad secundaria pueden indicar la transmisibilidad de líquidos para estas rocas. Según el mapa de identificación de recarga hídrica, solo la parte alta de la microcuenca posee baja recarga hídrica, posiblemente afectado por la falta de cobertura vegetal, por la pendiente muy abrupta y por las pocas densidades de drenaje y de lineamientos.

Los depósitos de ceniza y tobas, afloran en los cantones Sanajabá, Esquipulas, Valle Verde, Los Cerritos, Tojchoc Grande y Tuismil y poseen alta recarga hídrica, se debe al tipo de roca que favorece a la buena infiltración, además de las características texturales del suelo arenoso, también por la pendiente del terreno, y por la cobertura vegetal de las áreas de alta potencial hídrica. Al Norte posee alta recarga hídrica porque actúan

factores que indican el potencial de la zona como la cubierta vegetal, la precipitación, la densidad de drenaje y de lineamientos.

Para la unidad de depósitos de lahares que se componen de basaltos meteorizados en forma esferoidal en una matriz de ceniza, se determinaron niveles moderados de recarga hídrica, posiblemente por la litología, la pendiente, la cobertura y las densidades de lineamientos y de drenaje. Además este tipo de litología solo son buenos conductores de líquidos para transmitirlos a otros sectores donde puede emerger como en una fuente de agua.

En la tabla 2 se realiza una evaluación general de la identificación potencial de recarga hídrica en la microcuenca, de acuerdo con los distintos parámetros tomados en cuenta. Los resultados fueron luego reclasificados en cuatro grupos: Alto, moderado, bajo y muy bajo en identificación potencial de recarga hídrica.

TABLA 2
EVALUACIÓN GENERAL

Zona de identificación potencial de recarga hídrica	Alto	Moderado	Bajo	Muy bajo
Geología/litología	Cenizas y tobas	Lahares, aluvión y cenizas & tobas	Basalto y lahares	Basalto y coluvión
Densidad de lineamientos (km/km²)	2.08 – 2.78 2.78 – 3.48	1.39 – 2.08 2.08 – 2.78	0.69 – 1.39 1.39 – 2.08	0 – 0.69 0.69 – 1.39
Densidad de drenaje (km/km²)	8.66 – 11.55 11.55 – 14.44	5.77 – 8.66 8.66 – 11.55	2.89 – 5.77 5.77 – 8.66	0 – 2.89 2.89 – 5.77
Precipitación mm	1200 - 1400	1400 - 1600	1600 - 1800	1800 - 2000
Elevación Topográfica (m)	2264.86	2264.86 - 2855.71	2855.71 – 3172.77	3172.77 – 3677.17
Pendiente (Grados)	0 - 8.46 8,48 – 21.51	8,48 – 21.51 21.51 – 31.74	21.51 – 31.74 31.74 – 61.01	31.74 – 61.01 61.01 – 89.93

Fuente: Modificado por E. Sener et al. 2005: *Journal Hydrogeolgy.* Vol. 13.

Según la tabla anterior, los depósitos pomáceos y de lahares poseen alta potencial de recarga hídrica que se ubica entre pendientes de aproximadamente 25 grados, favoreciendo a la infiltración, también por la topografía ondulada, las densidades de drenaje y de lineamientos altos. La tabla anterior se contrasta con los mapas temáticos generalizados y se presentan los mismos resultados con la integración, que dio como resultado las zonas principales de recarga hídrica para la cuenca del río Esquichá.

8.1.9 Zonificación de recarga hídrica

La integración del álgebra de mapas: Lineamiento, geológico, drenaje, cobertura vegetal, precipitación, de pendientes y de elevación para la microcuenca dieron como resultado la zonificaciones de recarga hídrica y también se determinaron los niveles: Alto, moderado, bajo y muy bajo para las unidades litológicas cartografiadas.

Como se muestra en el mapa de zonas de recarga hídrica, la parte central de la microcuenca cubierto por la unidad de cenizas volcánicas son las que tienen mayor capacidad de retención de agua. El análisis realizado en la tabla 2, de acuerdo con las ponderaciones se manifiesta con alto nivel de recarga, por poseer buena densidad de drenaje y de lineamiento como indicadores de permeabilidad.

Los cantones de: Sanajaba, San Pablo, Tuismil y Toacá respectivamente, cubren una extensión aproximada de 15.48 por ciento, de la microcuenca y están acentuados sobre zona con buena recarga hídrica.

La topografía en la zona con pendientes que oscilan entre los 8.48 a 21.51 grados, adicionalmente con precipitaciones de 1200 mm a 1400 mm anuales, con densidades de drenajes de 8.66 km/km^2 a 14.44 km/km^2 y de densidades de lineamientos con rangos de 2.08 km/km^2 a 3.48 km/km^2 , indica que es zona de recarga hídrica o de buena posibilidad de encontrar acuíferos en el subsuelo.

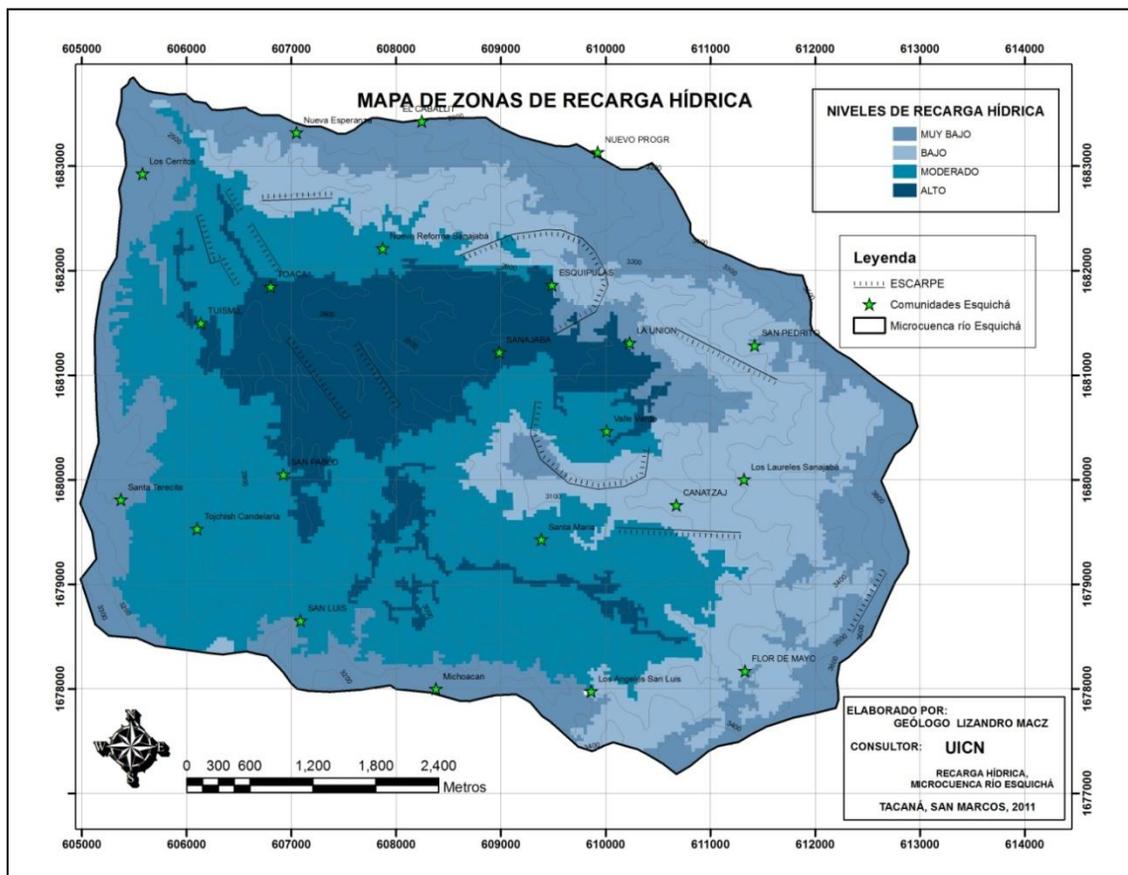
La unidad de basaltos puede tener filtración a través de la porosidad secundaria, ya que son rocas duras e impermeables. La unidad de basalto está ubicada en la microcuenca sobre pendientes que oscilan entre los 61.01 a 89.93 grados, elevación topográfica de 3172.77 msnm a 3677.17 msnm, precipitación de 1800 mm a 2000 mm por año y con buena precipitación durante el año. Esta unidad está localizada en la parte alta de la microcuenca y es zona de aporte de recarga hídrica hacia las zonas bajas.

El mapa de zonas de recarga hídrica muestra la parte alta de la microcuenca, zona de recarga y donde forman escorrentías durante la época de invierno. La formación de escorrentía obedece a la litología y a las pendientes del lugar; además, corresponde a rocas impermeables corroborados con muestra de mano en campo durante el mapeo geológico. Uno de los factores que más afecta la filtración de agua es la poca cubierta vegetal en el Sureste de la microcuenca (ver mapa 8).

El problema radica en el desarrollo de las actividades dentro de esta microcuenca como: Las agrícolas, deforestación, etc., y el otro factor que no se ha mencionado es el clima, es muy brusco durante el invierno, con temperaturas que llegan hasta cero grados centígrados. El clima afecta a todos, inclusive a las rocas que sufren de gelifración durante la época fría.

MAPA 14

IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA



Fuente: Investigación de campo. Año 2 012.

CAPÍTULO 9

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante la investigación para el modelo de recarga hídrica en la microcuenca del río Esquichá. Se basaron sobre las características de distintas variables identificadas en el campo, como: La litología, lineamientos, drenaje y cobertura vegetal.

El análisis de la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica, indica un proceso por el cual se incorporan ciertos volúmenes de agua a los mantos acuíferos que procede de la precipitación, aguas superficiales. La incorporación de acuíferos está en función de muchos factores como: La litología, pendientes topográficas, niveles de precipitación y la cubierta vegetal.

El trabajo de investigación sobre identificación de zonas potenciales de recarga hídrica realizado en la microcuenca río Esquichá es un modelo conceptual. El resultado del estudio no puede utilizar a otras cuencas, porque poseen otras características, como por ejemplo: La litología, cubierta vegetal y condiciones climáticas.

De acuerdo con todos los parámetros utilizados para la determinación de zonas con buena recarga hídrica, se determinaron cuatro niveles: Alto, representa un 15.48 por ciento del área; seguidamente el nivel moderado que representa un 34.49 por ciento; nivel bajo tiene una cobertura de 25.70 por ciento, y por último, el nivel muy bajo abarca un 24.33 por ciento.

De acuerdo con el mapa de identificación de zonas potenciales de recarga, la parte central de la microcuenca del río Esquichá posee alta recarga hídrica y localizado en cota de 2600 msnm a 2700 msnm., con pendiente promedio de 0 a 8 grados. La unidad de ceniza y toba, son buenos para la transmisión de fluidos como el agua, además de las densidades de drenaje y de lineamientos, y donde confluyen los ríos principales de la microcuenca. Alrededor de esta zona están los cantones: Toacá al Norte, San Pablo al Sur, Tuismil al Este y Sanajabá al Oeste.

La unidad de lahares, aluvión, cenizas y tobas son las que presentan moderada recarga hídrica. Posiblemente por el cambio de pendiente que oscila entre los 21 a 32 grados; además de poca cobertura vegetal. La precipitación es otro factor que influye en la recarga hídrica; oscila entre los 1400 mm a 1600 mm, es bajo con relación a niveles de precipitación en la parte alta de la microcuenca que tiene rango máximo de 2000 mm.

La zona baja y muy baja en recarga hídrica se ubica en la parte alta de la microcuenca con pendientes arriba de 32 grados y con alturas que oscilan entre los 3200 msnm a 3600 msnm, y asociado a ellos la falta de cobertura de vegetales para este sector. En la unidad que abarca las zonas bajas de recarga hídrica están los basaltos, que son rocas duras e impermeables, y es en este lugar donde precipita más que otros sectores de la cuenca.

Por la topografía de la zona, cuando llueve se forman rápidamente las escorrentías superficiales, y eso hace que exista poca filtración del agua hacia el subsuelo y unido a ello, la falta de bosques para la mayoría de las partes altas de la microcuenca.

Con base a la metodología y para la realización de un mapa de identificación de zonas potenciales de recarga hídrica, se utilizaron las variables siguientes: Geología, pendientes, drenajes, uso del suelo, lineamientos, elevación topográfica y la precipitación, todo lo anterior creado por el *software ArcGis*, donde se integraron cada una de las variables, y de ahí se generó el modelo propuesto para la microcuenca del río Esquichá.

Una de las limitantes encontradas en la microcuenca, fue el poco interés de las personas para apoyar la investigación, debido al conflicto social que ha generado la actividad de prospección de metales de interés económico en lugares aledaños a la cuenca.

CONCLUSIONES

1. De acuerdo con el análisis de las variables de toda la información geológica para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica a través de: Densidad de lineamientos y de drenaje, uso del suelo, litología, pendientes, cobertura vegetal, y la precipitación, se determinaron diferentes niveles como: Alto que representa un 15.48 por ciento del área, seguidamente el nivel moderado que representa un 34.49 por ciento, además del nivel bajo, abarcando el 25.70 por ciento y por último, el nivel muy bajo que abarca un 24.33 por ciento, recarga hídrica para la microcuenca del río Esquichá.
2. En muchos lugares de la microcuenca carecen de cobertura vegetal como en las partes altas de la microcuenca, donde se determinaron niveles muy bajos de recarga hídrica. Estos lugares con niveles bajos de aporte de recarga hídrica pueden ser restaurados mediante la reforestación.
3. A través del análisis y la descripción de toda la información geológica hecha por medio de las características mineralógicas y texturales de las rocas y corroborados por la fotointerpretación, se determinaron las unidades siguientes: Basalto (Uba), Ceniza y Tobas (Uct), Lahares (UL), Unidad de Coluvión (Uc) y Aluvión (Qal).

4. Se identificaron las zonas de recarga hídrica correspondientes a las unidades de: Caliza y ceniza volcánica (nivel alto), lahares y aluvión y ceniza volcánica (nivel moderado), basalto (nivel bajo) y basalto y coluvión (nivel muy bajo).
5. Los parámetros de superposición ponderada implementado por E. Sener et al. 2005 (precipitaciones, litología, densidad de lineamiento, topografía, pendiente y densidad de drenaje), se ajustaron a los resultados, en contraste a otro estudio llevado a cabo mediante ensayos de infiltración realizado en la microcuenca, los cuales emitieron resultados similares.

RECOMENDACIONES

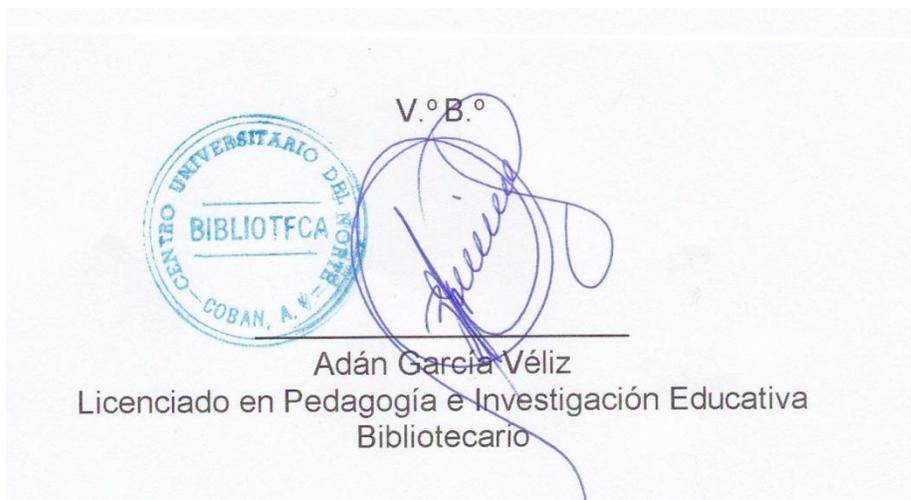
1. Implementar planes estratégicos para prevenir contaminación durante el desarrollo de las actividades agrícolas, pues los envases de estos son abandonados en sectores donde contaminan el acuífero por filtración en la microcuenca.
2. Realizar un análisis geoquímico de la calidad de agua en la microcuenca, con el propósito de identificar los tipos de minerales que transporta el mismo, ya que el agua de algunos nacimientos se usa para consumo humano y de los animales, pues se observa que en los nacimientos existe presencia de óxido, proveniente del basalto que contiene hierro.
3. Realizar un estudio minucioso para identificar los riesgos por deslizamientos en toda la microcuenca, ya que se observaron áreas vulnerables a estos tipos de movimientos, como las que se encuentran en el cantón Santa María.
4. Instalar estaciones pluviométricas para monitorear los niveles de precipitación, tanto mensual como anual, para realizar futuros estudios a la cuenca; esto ayudaría a generar datos más precisos sobre los niveles de precipitación en toda el área.

BIBLIOGRAFÍA

- Carrillo R. J. Joel & M. Adrian Ortega G. *Groundwater flowunderstanding from local to regional scale*. International Association of Hydrogeologist. London, United Kingdom: Select papers, 2 008.
- Donnelly, T.W. Et.Al. *The geology of North America. The Caribbean Region The Chapter 3. Northern Central America; The Maya and Chortís Blocks*. United States of America: Geological Society of America, 1 990
- Herrera Ibáñez, Isaac R. *Manual de hidrología*. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala: Facultad de Agronomía, 1 995.
- Instituto Interamericano para la Agricultura: *Diagnostico preliminar de las cuencas fronterizas Guatemala-México, Cuencas de los Ríos Suchiate, Coatán, Cuilco, Selegua y Nentón*. 1994. <http://books.google.com.gt/books?id=7d4qAAAAYAAJ&pg=PA9&lpg=PA9&=geologia+Malacatan&source> (10 de octubre de 2012).
- Instituto de sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. -INSIVUMEH-. *Meteorología*. <http://www.insivumeh.gob.gt/> (12 de noviembre de 2 011).
- Limón Hernández, Cecilia Guadalupe. *Análisis de la percepción del riesgo en los volcanes Chichón y Tacaná, Chiapas*. <http://www.geo.mtu.edu/~raman/papers2/CGLimonTesis.pdf> (06 de noviembre de 2 012).
- López Barrios, E. Coré. *Plan de manejo de la microcuenca del río Tojgüech, municipio de Tacaná, departamento de San Marcos*. Ejercicio profesional supervisado. Centro Universitario de Noroccidente- Universidad de San Carlos. San Marcos, Guatemala: Carrera de agronomía, 2 008.
- Macías, José Luis. *Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México*. [http://www.geociencias.unam.mx/~alaniz/SGM/Centenario/57-3/\(6\)Macias.pdf](http://www.geociencias.unam.mx/~alaniz/SGM/Centenario/57-3/(6)Macias.pdf) (15 de agosto de 2 012).
- Mora, JC. Et.Al. *Petrology and Geochemistry of the Tacaná Volcanic Complex México-Guatemala: Evidence forthe last 40,000 year activity*. *Geofísica Internacional*. <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/568/56843303.pdf> (09 de agosto de 2 012).

- Municipalidad De Tacana, San Marcos. *Geografía de Tacaná*, San Marcos. http://www.inforpressca.com/tacana/?page_id=7 (10 de diciembre de 2012).
- Murcia, Hugo Fernando y José Luis Macías. *Registro geológico de inundaciones recurrentes e inundación del 4 de octubre de 2005 en la ciudad de hiapas, México*. <http://rmcg.unam.mx/26-1/%2801%29Murcia.pdf> (16 de octubre de 2012).
- Provincias fisiográficas de San Marcos*. <http://departamentosdeguate.galeon.com/> (12 de agosto de 2011).
- Quiroa Garnica, Lucia Fabiola. *Estudio de las características físicas del suelo y su efecto en la regulación del recurso hídrico, en la cuenca del río Tacaná*. Tesis Ingeniería Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 2008. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2922_C.pdf (19 de Agosto de 2012).
- Sener, Erhan. Et. Al. "An integration of GIS and remote sensing in groundwater Investigations: A case study in Burdur, Turkey." *Hydrogeology Journal*. Volume 13. No. 5 – 6. (October 2005).
- Singha, B.B. I & R.P. Gupta: *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. New York, United State Of America. Academic Publishers Springer, 1999.
- Sistema Estatal de Protección Civil de Tacaná, San Marcos. *Plan operativo Tacaná*. <http://www.proteccioncivil.chiapas.gob.mx/Documentos/Tacana.pdf> (06 de agosto de 2012).
- Técnicas geográficas de medio natural. *Mapa de pendientes*. <http://tecnicasgificas07ujaen.blogspot.com/search?q=mapa+de+pendientes> (4 de junio de 2012).
- Universidad del Valle de Guatemala -UVG- *Institucionalidad local para el anejo de bosque y agua en Comunidades Indígenas. Sitio Cerro Chemealón, Sitio El Chilar*. Guatemala: Centro de Estudios Ambientales, 2008.
- Universidad de Colima, México. *Que es ceniza volcánica*. <http://www.ucol.mx/volcan/ceniza.htm> (12 de noviembre de 2012).
- Universidad Rafael Landívar -URL-. *Acerca del agua: hidrología superficial*. http://www.infoiarna.org.gt/guateagua/subtemas/3/3_5.htm (08 de noviembre de 2012).

Valenzuela, Agustín Millares: *Estudio hidrogeológico para la gestión integrada de la cuenca del río Guadalfeo (Granada)*. http://www.2006..cuenca.gadalfeo.com/archivos/Guadalfeo/Libros/DEA_Agustin_Millares.pdf (10 de octubre de 2 012).



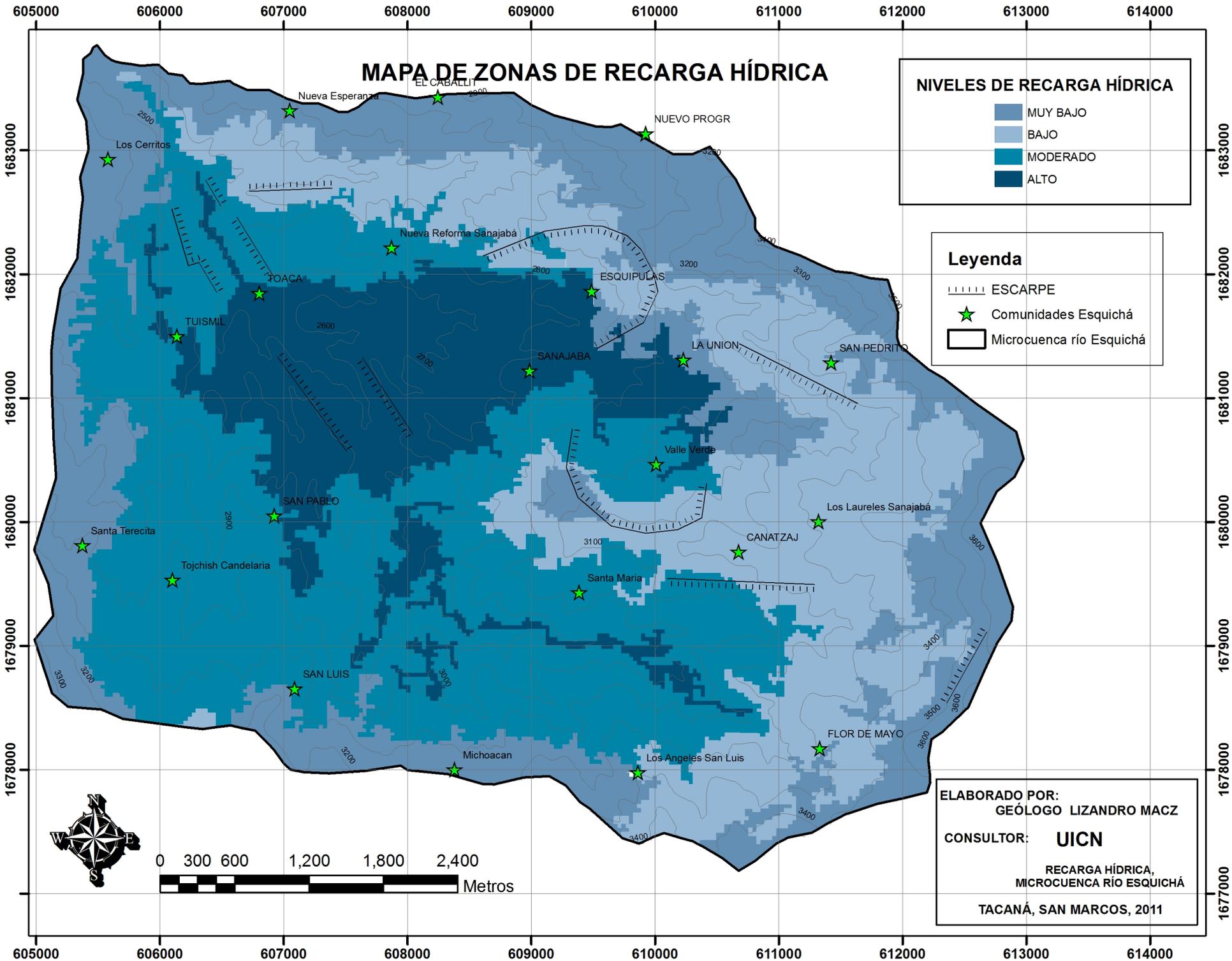
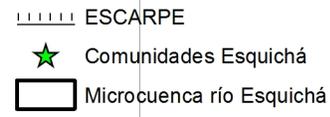
ANEXO

MAPA DE ZONAS DE RECARGA HÍDRICA

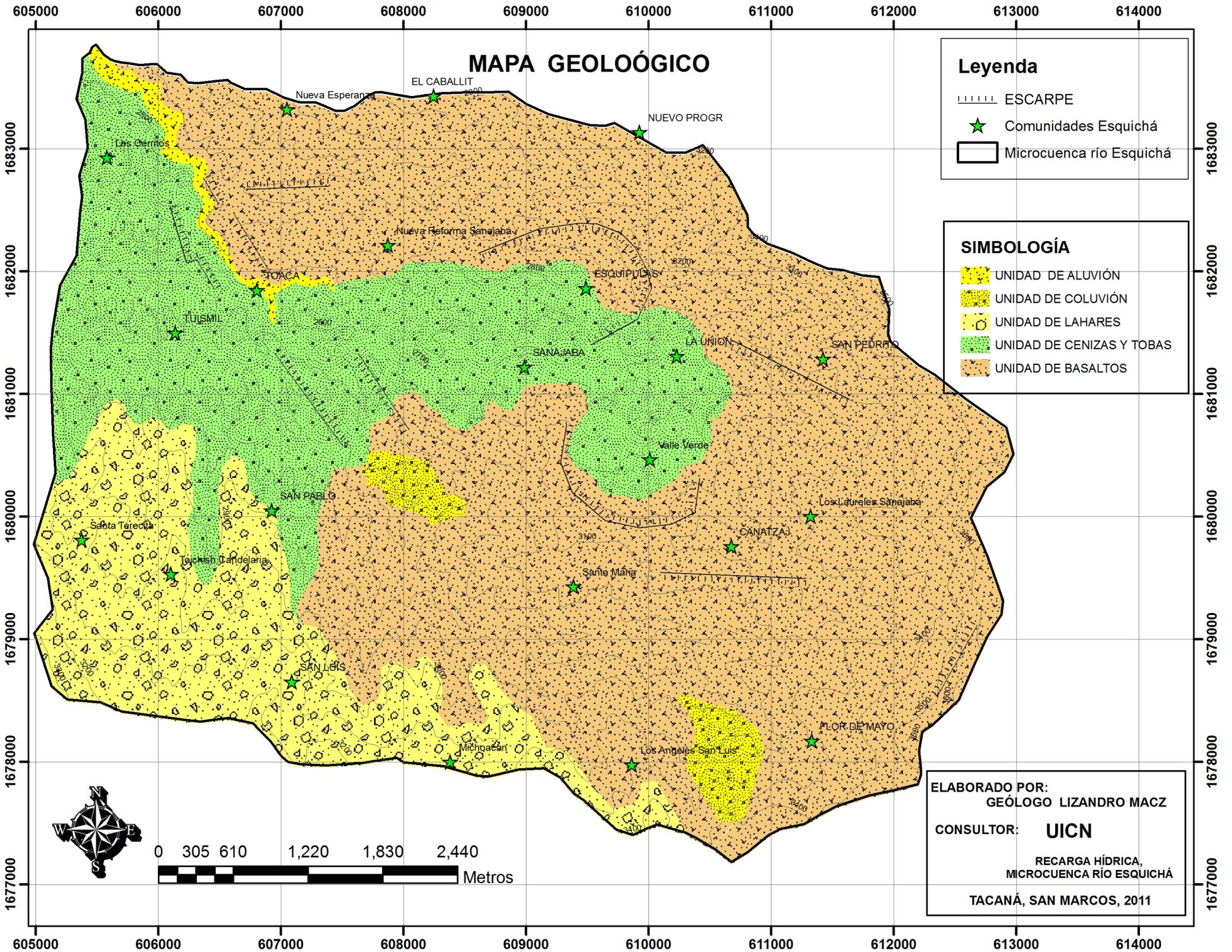
NIVELES DE RECARGA HÍDRICA



Legenda



ELABORADO POR:
GEÓLOGO LIZANDRO MACZ
CONSULTOR: **UICN**
RECARGA HÍDRICA,
MICROCUENCA RÍO ESQUICHÁ
TACANÁ, SAN MARCOS, 2011





CUNOR

CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE

Universidad de San Carlos de Guatemala



14175

El Director del Centro Universitario del Norte de la Universidad de San Carlos, luego de conocer el dictamen de la Comisión de Trabajos de Graduación de la carrera de:

Geología

Al trabajo titulado:

"Identificación de zonas potenciales de recarga hídrica, usando técnicas de sistema de información geográfico en la microcuenca del Río Esquichá, ubicado al sur del municipio de Tacaná, San Marcos"

Presentado por el (la) estudiante:

Lizandro Estuardo Macz Caal

Autoriza el

IMPRIMASE

"Id y enseñad a todos"

Lic. Zoot. ~~M.A. Fredy Giovanni Macz Choc~~
DIRECTOR



Cobán, Alta Verapaz octubre del 2014