

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

TRABAJO DE GRADUACIÓN



TESIS

DELIMITACIÓN DE ZONAS POR VULNERABILIDAD INTRÍNSECA  
DE LOS ACUÍFEROS KÁRSTICOS EN EL ÁREA URBANA Y EN  
LOS ALREDEDORES DEL MUNICIPIO DE SAN JUAN CHAMELCO,  
ALTA VERAPAZ

LUIS RAYMUNDO TOC PERALTA

COBÁN, ALTA VERAPAZ, MAYO DE 2017

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

TRABAJO DE GRADUACIÓN

TESIS

DELIMITACIÓN DE ZONAS POR VULNERABILIDAD INTRÍNSECA  
DE LOS ACUÍFEROS KÁRSTICOS EN EL ÁREA URBANA Y EN  
LOS ALREDEDORES DEL MUNICIPIO DE SAN JUAN CHAMELCO,  
ALTA VERAPAZ

PRESENTADO AL HONORABLE CONSEJO DIRECTIVO DEL  
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE

POR  
LUIS RAYMUNDO TOC PERALTA  
CARNÉ 200844083

COMO REQUISITO PREVIO A OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
GEÓLOGO

COBÁN, ALTA VERAPAZ, MAYO DEL 2017

## **AUTORIDADES UNIVERSITARIAS**

### **RECTOR MAGNÍFICO**

Dr. Carlos Guillermo Alvarado Cerezo

### **CONSEJO DIRECTIVO**

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| PRESIDENTE:                   | Lic. Zoot. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales                    |
| SECRETARIO:                   | Ing. Geól. César Fernando Monterroso Rey                     |
| REPRESENTANTE DE DOCENTES:    | Lcda. T.S. Floricelda Chiquin Yoj                            |
| REPRESENTANTE EGRESADOS:      | Lic. en Admón. Fredy Fernando Lemus Morales                  |
| REPRESENTANTES ESTUDIANTILES: | Br. Fredy Enrique Gereda Milián<br>PEM. Cesar Oswaldo Bol Cú |

### **COORDINADOR ACADÉMICO**

Ing. Ind. Francisco David Ruiz Herrera

### **COORDINADOR DE LA CARRERA**

Ing. Geól. Sergio David Morán Ical

### **COMISIÓN DE TRABAJOS DE GRADUACIÓN**

|              |  |
|--------------|--|
| COORDINADOR: | Ing. Geól. Ricardo Enrique Milián de la Cruz |
| SECRETARIO:  | Ing. Geól. Edwin Orlando Yash Asencio        |
| VOCAL:       | Inga. Geól. Silvia Friné Cortez Bendfeldt    |

### **REVISOR DE REDACCIÓN Y ESTILO**

Ing. *M. Sc.* Julio Enrique Reynosa Mejía

### **REVISORA TRABAJOS DE GRADUACIÓN**

Inga. Geól. Silvia Friné Cortez Bendfeldt

### **ASESOR**

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

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



CENTRO UNIVERSITARIO  
DEL NORTE (CUNOR)  
CARRERA GEOLOGÍA

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz  
PBX: 79 566 600 Ext. 209  
Guatemala, C. A.  
e. c.: [geologiausaci@gmail.com](mailto:geologiausaci@gmail.com)

Ref. 15-CG-295/2016  
21 de octubre de 2016

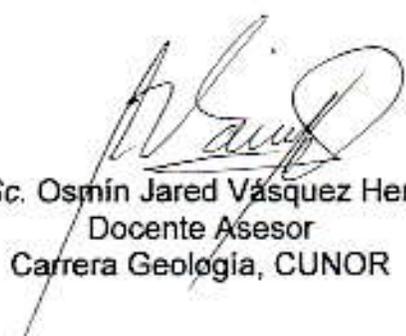
Señores  
Comisión Trabajos de Graduación  
Carrera Geología  
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **ASESORÍA** del informe final de Trabajo de Graduación del T.U. **GEÓL. LUIS RAYMUNDO TOC PERALTA**, carné n.º **200844083**, titulado: **“DELIMITACIÓN DE ZONAS POR VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE LOS ACUÍFEROS KÁRSTICOS EN EL ÁREA URBANA Y EN LOS ALREDEDORES DEL MUNICIPIO DE SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ”**, 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. M.Sc. Osmin Jared Vásquez Hernández  
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  
PBX: 79 566 600 Ext. 209  
Guatemala, C. A.  
e. e.: [geolnriusac@gmail.com](mailto:geolnriusac@gmail.com)

Ref. 15-CG-57/2017  
17 de febrero de 2017

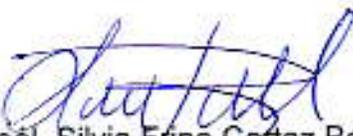
Señores  
Comisión Trabajos de Graduación  
Carrera Geología  
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **REVISIÓN** del informe final de Trabajo de Graduación del T.U. **GEÓL. LUIS RAYMUNDO TOC PERALTA**, carné n.º **200844083**, titulado: **“DELIMITACIÓN DE ZONAS POR VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE LOS ACUÍFEROS KÁRSTICOS EN EL ÁREA URBANA Y EN LOS ALREDEDORES DEL MUNICIPIO DE SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ”**, 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. Geól. Silvia Frine Cortez Bendfeldt  
Docente Revisora  
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  
PBX: 79 566 600 Ext. 209  
Guatemala, C. A.  
e. e.: [penlogriusac@gmail.com](mailto:penlogriusac@gmail.com)

Ref. 15-CG-81/2017  
09 de marzo de 2017

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: **“DELIMITACIÓN DE ZONAS POR VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE LOS ACUÍFEROS KÁRSTICOS EN EL ÁREA URBANA Y EN LOS ALREDEDORES DEL MUNICIPIO DE SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ”**, realizado por el (la) T T.U. **GEÓL. LUIS RAYMUNDO TOC PERALTA**, carné n.º **200844083**, 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”**

  
Ing. M. Sc. Julio Enrique Reynosa Mejía  
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 Informe Final de Trabajo de Graduación titulado: Delimitación de zonas por vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos kársticos en el área urbana y en los alrededores del municipio de San Juan Chamelco, Alta Verapaz, como requisito previo a optar al título profesional de Ingeniero Geólogo.



Luis Raymundo Toc Peralta  
Carné No. 200844083

## **RESPONSABILIDAD**

“La responsabilidad del contenido de los trabajos de graduación es: Del estudiante que opta el 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. 17-2002 de Sesión extraordinaria de Consejo Directivo de fecha 18 de julio del año 2012.

## **DEDICATORIA**

A mis padres, José Luis Toc Oxóm (†) y María Teresa Peralta Coc.

## **AGRADECIMIENTOS**

Dios, por su infinita fidelidad y amor.

Mis padres, José Luis Toc Oxóm (†) y María Teresa Peralta Coc por su esfuerzo, dedicación, amor, paciencia, confianza y ser mi mejor ejemplo.

Mis hermanos, José y Kimberly por su amor y paciencia.

Mis amigos Julio Reynosa y Carlos por todo el apoyo durante esta etapa de mi vida.

Krista, Vila, Maritza, Carla, Jans, Gustavo, Jaquelin, Gilmar y compañeros de Geología por sus muestras de cariño y aprecio.

La Universidad de San Carlos de Guatemala, especialmente al CUNOR por permitirme seguir creciendo en conocimiento y sabiduría.

La carrera de Geología y cada uno de sus catedráticos, por sus enseñanzas y consejos.

# ÍNDICE GENERAL

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS</b>                           | v           |
| <b>RESUMEN</b>  | vii         |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>   | 1           |
| <b>CAPÍTULO 1</b>   |             |
| <b>INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN</b>                          |             |
| 1.1 Planteamiento del problema                                  | 3           |
| 1.2 Justificación   | 3           |
| 1.3 Hipótesis   | 4           |
| 1.3.1 Variables   | 4           |
| a. Dependiente  | 4           |
| b. Independientes   | 4           |
| 1.4 Antecedentes  | 4           |
| 1.5 Objetivos   | 5           |
| 1.5.1 General   | 5           |
| 1.5.2 Específicos   | 6           |
| 1.6 Ubicación y extensión del área de investigación             | 6           |
| 1.7 Accesos   | 7           |
| 1.8 Marco geológico   | 8           |
| 1.8.1 Contexto geológico local                                  | 8           |
| a. Formación Todos Santos (JKts)                                | 9           |
| b. Formación Cobán (Kco1-Kco2)                                  | 9           |
| c. Depósitos Terciarios-Cuaternarios (TQs-Qp-Qa)                | 10          |
| 1.9 Marco teórico   | 12          |
| 1.9.1 Definición de términos                                    | 12          |
| <b>CAPÍTULO 2</b>   |             |
| <b>METODOLOGÍA</b>  |             |
| 2.1 Marco metodológico  | 15          |
| 2.1.1 Etapa de análisis bibliográfico y reconocimiento del área | 15          |
| 2.1.2 Etapa de campo  | 16          |
| 2.1.3 Etapa de laboratorio                                      | 16          |
| 2.1.4 Etapa de gabinete   | 16          |
| 2.2 Elaboración del mapa de vulnerabilidad intrínseca           | 16          |
| 2.2.1 Evaluación del parámetro E ( <i>epikarst</i> )            | 18          |
| 2.2.2 Evaluación de cubierta protectora P (suelo)               | 21          |

|  |    |
|--|----|
| a. Recolección de muestras   | 21 |
| b. Determinación de textura  | 23 |
| c. Procedimiento para determinar la textura por medio del método de <i>Bouyoucos</i> | 24 |
| d. Clasificación de muestras   | 26 |
| 2.2.3 Evaluación de infiltración I   | 29 |
| 2.2.4 Evaluación del desarrollo kárstico K   | 32 |
| 2.2.5 Cálculo del índice de vulnerabilidad intrínseca                                | 36 |

### **CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

|  |    |
|--|----|
| 3.1 Parámetro E (Epikarst)                       | 39 |
| 3.2 Parámetro cubierta protectora (P)            | 42 |
| 3.3 Parámetro de condiciones de infiltración (I) | 46 |
| 3.4 Parámetro de desarrollo kárstico (K)         | 49 |
| 3.5 Mapa de vulnerabilidad intrínseca            | 53 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| <b>CONCLUSIONES</b>    | 57 |
| <b>RECOMENDACIONES</b> | 59 |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>    | 61 |
| <b>ANEXOS</b>          | 63 |

### **ÍNDICE DE TABLAS**

|  |    |
|--|----|
| 1. Coordenadas <i>UTM</i> del área de investigación                        | 6  |
| 2. Clasificación del <i>epikarst</i>                                       | 19 |
| 3. Clasificación del parámetro P   | 28 |
| 4. Clasificación del parámetro I   | 32 |
| 5. Clasificación del parámetro K   | 33 |
| 6. Formula y ponderación de coeficientes                                   | 36 |
| 7. Valores de las categorías <i>EPIK</i>                                   | 36 |
| 8. Grados o niveles de vulnerabilidad intrínseca por el método <i>EPIK</i> | 37 |
| 9. Textura de muestras recolectadas  | 44 |
| 10. Velocidad de infiltración en el área de investigación                  | 47 |

### **ÍNDICE DE FIGURAS**

|  |    |
|--|----|
| 1. Ubicación del área  | 7  |
| 2. Accesos del área de investigación                           | 8  |
| 3. Procesos hidrogeológicos en el <i>epikarst</i>              | 18 |
| 4. Diagrama ternario para la determinación de textura de suelo | 24 |
| 5. Triángulo textural de las muestras                          | 27 |
| 6. Sistema de infiltración en el método <i>Porchet</i>         | 30 |
| 7. Proceso del cálculo de infiltración                         | 31 |

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1. | Categoría E <sub>1</sub> del parámetro <i>epikarst</i>   | 19 |
| 2. | Categoría E <sub>2</sub> del parámetro <i>epikarst</i>   | 20 |
| 3. | Categoría E <sub>3</sub> del parámetro <i>epikarst</i>   | 21 |
| 4. | Equipo de laboratorio para el método de <i>Bouyoucos</i> | 26 |
| 5. | Categoría de suelos                                      | 28 |
| 6. | Desarrollo kárstico K <sub>1</sub>                       | 35 |
| 7. | Desarrollo kárstico K <sub>2</sub>                       | 35 |

## ÍNDICE DE MAPAS

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1. | Litología del área de interés                         | 11 |
| 2. | Ubicación de las muestras de suelo e infiltración     | 22 |
| 3. | Lineamientos estructurales                            | 34 |
| 4. | Parámetro de <i>epikarst</i>                          | 41 |
| 5. | Parámetro de suelo                                    | 45 |
| 6. | Parámetro de condiciones de infiltración              | 48 |
| 7. | Parámetro de desarrollo kárstico                      | 51 |
| 8. | Dolinas o depresiones en área de investigación        | 52 |
| 9. | Vulnerabilidad intrínseca en el área de investigación | 55 |



## ÍNDICE DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

|                 |   |
|-----------------|---|
| °               | Grados  |
| %               | Por ciento  |
| °C              | Grados Celsius  |
| CA-14           | Carretera Centroamericana                                       |
| COCODES         | Consejo Comunitario de Desarrollo                               |
| cm/h            | Centímetro por hora   |
| <i>EPIK</i>     | <i>Epikarst, Protective cover, Infiltration y Karst network</i> |
| g               | Gramo   |
| h               | Hora  |
| IGN             | Instituto Geográfico Nacional                                   |
| ITGE            | Instituto Tecnológico GeoMinero de España                       |
| JKts            | Formación Todos Santos  |
| Kco-1           | Formación Cobán   |
| km              | Kilómetros  |
| Km <sup>2</sup> | Kilómetro cuadrado  |
| MARN            | Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales                     |
| min             | Minutos   |
| ml              | Mililitro   |
| mm              | Milímetro   |
| <i>NE</i>       | <i>Northeast</i>  |
| <i>NW</i>       | <i>Northwest</i>  |
| RD-1            | Carretera Departamental   |
| s               | Segundos  |
| <i>SE</i>       | <i>Southeast</i>  |

|      |  |
|------|--|
| SIG  | Sistema de Información Geográfica              |
| SW   | <i>Southwest</i>                               |
| TQs  | Deposito Ternario                              |
| USDA | <i>United States Department of Agriculture</i> |
| UTM  | <i>Universal Transverse Mercator</i>           |
| Web  | <i>World Wide Web</i>                          |
| WGS  | <i>World Geodetic System</i>                   |

## RESUMEN

La presente “Delimitación de zonas por vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos kársticos en el área urbana y en los alrededores del municipio de San Juan Chamelco, Alta Verapaz”, es un estudio que ayuda a proteger el agua subterránea al determinar zonas vulnerables a la contaminación.

Para esta investigación se utilizó la metodología llamada por sus siglas en inglés **EPIK (Epikarst, Protective cover, Infiltration y Karst network)** ya que está formulada para medios kársticos como el del departamento de Alta Verapaz, rocas formadas por la disolución de carbonatos.

En el área de investigación se determinaron 4 zonas vulnerables a una contaminación definidas en muy alta con el 20,67 % del área, alta con un 59,63 %, es la más grande y se extiende en todas las direcciones e incluye comunidades como Chió, Chivencab, Saquijá, barrio San Luis, así como también el basurero municipal de San Juan Chamelco y San Pedro Carcha. Por último, pero no menos importante la zona moderada y baja que cubren el resto del área, la moderada se encuentra al centro, noroeste y sureste del área.

En el casco urbano de San Juan Chamelco se presentan las zonas alta y muy alta, donde existe un desarrollo kárstico, presente por medio de cuevas, sumideros, dolinas, fracturación y otras depresiones. Estas zonas son las más vulnerables a una contaminación.

El agua subterránea es una de las principales fuentes de agua, determinar en qué zonas pueden presentarse mayor vulnerabilidad intrínseca, es de gran

importancia ya que de esto se puede partir para determinar medidas de mitigación para contrarrestar la contaminación, principalmente.

Promover y apoyar medidas de prevención a la contaminación del recurso hídrico, así como establecer jornadas de capacitación a las autoridades comunitarias (COCODES), municipales, organizaciones gubernamentales, escuelas, institutos y a la población en general con relación al cuidado que se debe de tener al agua subterránea.

## INTRODUCCIÓN

Guatemala tiene un recurso hídrico abundante, que, desde el 2004 su uso ha aumentado de manera acelerada, los lagos y ríos están contaminados, principalmente por el uso de agroquímicos, desechos sólidos, urbanización sin control, letrinas en zonas vulnerables y basureros en lugares inadecuados, entre otras.

Para el 2030 se prevé un mejoramiento según estrategias del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), por medio del Pacto Ambiental en Guatemala 2016-2020.<sup>1</sup> Parte de esta estrategia es prevenir la contaminación a este recurso natural vital, donde se fomentan estudios como el presente.

Este informe resume el estudio en tres capítulos: marco teórico, metodología y por último análisis y discusión de resultados.

El capítulo del marco teórico consiste en revisión literaria, contexto geológico del área, planteamiento del problema y alcances. En el siguiente capítulo (metodología) se especifican los parámetros geológicos establecidos para esta investigación y en la manera en que se aplicó. Y por último se encuentra análisis y discusión de resultados que consta del análisis de cada factor evaluado en el área.

---

<sup>1</sup> Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales –MARN-. *Documento base del pacto ambiental en Guatemala 2016-2020*. Guatemala: MARN., 2016.

Cada factor fue evaluado tanto en su vulnerabilidad individual como la interpolación de todos en conjunto, plasmados en un mapa de vulnerabilidad intrínseca.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La vulnerabilidad intrínseca se obtiene a partir de la evaluación de características geológicas e hidrológicas de un área determinada y éstas determinan el nivel de contaminación probable para las aguas subterráneas por actividades humanas o por algún contaminante.

Hoy ríos, barrancos, calles y carreteras son utilizados como basureros, en Guatemala se genera 2,3 millones de toneladas métricas de desechos al año de la cual solo el 30 % se recolecta <sup>2</sup>, provocando que el resto contamine casi toda el agua de ríos, nacimientos o pozos, por lo cual, en el área de interés se plantea la siguiente interrogante; **¿Qué áreas del casco urbano y en los alrededores de San Juan Chamelco presentan vulnerabilidad intrínseca alta a la contaminación del agua subterránea?**

### 1.2 JUSTIFICACIÓN

El agua subterránea es una de las principales fuentes de agua y determinar zonas donde pueden presentar una vulnerabilidad intrínseca alta, es de gran importancia ya que de esto se puede partir para determinar medidas de mitigación para contrarrestar la contaminación.

---

<sup>2</sup> Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales –MARN-. *Documento base del pacto ambiental en Guatemala 2016-2020*. Guatemala: MARN., 2016.

Este tipo de agua en medios kársticos como es el caso del municipio de San Juan Chamelco, hace que la contaminación sea un problema a tomar en cuenta, ya que este tipo de medio posee características que permite que la infiltración sea mucho mayor hasta llegar a las aguas subterráneas, de ahí la necesidad de realizar mapas que permitan delimitar y evaluar zonas que están vulnerables a la contaminación humana.

Este estudio beneficia a las autoridades en turno como la municipalidad de San Juan Chamelco, el MARN y la población en general, como una herramienta para un mejor ordenamiento territorial y el cuidado del medio ambiente.

### **1.3 HIPÓTESIS**

Por características y estructuras geológicas como fracturas, fallas y dolinas, se determina que las zonas donde se pueden presentar una mayor vulnerabilidad intrínseca a la contaminación se encuentran en la parte sur y norte del área de interés.

#### **1.3.1 VARIABLES**

##### **a. Dependiente**

Como variable dependiente se tiene la vulnerabilidad intrínseca.

##### **b. Independientes**

Como variables independientes se tiene la litología, textura del suelo, infiltración y las estructuras kársticas.

### **1.4 ANTECEDENTES**

Se han realizado estudios geológicos donde se encuentra el área de investigación.

La caracterización del Karst del Cuadrángulo Cobán, donde se concluye que en el área de estudio se encuentra un desarrollo alto de *epikarst* y densidad alta de dolinas, las cuales son de mucha importancia en esta investigación.<sup>3</sup>

El proyecto de evaluación hidrogeológica de Alta Verapaz, donde parte de sus resultados es que en el área de investigación existe una alta probabilidad de contaminación por sus características geológicas.<sup>4</sup>

En la aplicación de la metodología *EPIK* en los municipios de Cobán<sup>5</sup> y Santa Cruz Verapaz<sup>6</sup>, ambas de Alta Verapaz, se determinaron los sectores o zonas que presentan una alta vulnerabilidad de contaminación intrínseca.

## 1.5 OBJETIVOS

### 1.5.1 General

Delimitar los niveles de vulnerabilidad intrínseca que existen en los acuíferos kársticos en el área urbana y los alrededores de San Juan Chamelco, Alta Verapaz, comprendidos en una superficie de 42 km<sup>2</sup>, a escala 1: 50 000.

---

<sup>3</sup> Chiquín Marroquín, Luis G. *Caracterización Geológica del Karst del cuadrángulo Cobán escala 1: 50 000*. Tesis de Ingeniero Geólogo. Centro Universitario del Norte. Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán, Alta Verapaz. Guatemala: Carrera de Geología., 2003.

<sup>4</sup> Machorro Sagastume, Rudy. Et Al. *Evaluación hidrogeológica de Alta Verapaz*. Guatemala: Secretaria Nacional de Ciencia y Tecnología., 2005.

<sup>5</sup> Solares García, Sergio Estuardo. *Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos Kársticos en el área urbana y los alrededores del municipio de Cobán, Alta Verapaz*. Tesis de Ingeniero Geólogo. Centro Universitario del Norte. Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán, Alta Verapaz. Guatemala: Carrera de Geología., 2015.

<sup>6</sup> Reiche de la Cruz, Andrea María. *Análisis e identificación de zonas vulnerables a la contaminación intrínseca de acuíferos cársticos, por medio del método EPIK, en el municipio de Santa Cruz Verapaz, A.V.* Tesis de Ingeniero Geólogo. Centro Universitario del Norte. Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán, Alta Verapaz. Guatemala: Carrera de Geología., 2015.

### 1.5.2 Específicos

- a. Determinar la textura del suelo presente en el área de interés.
- b. Definir la velocidad de infiltración de los suelos del área, con la finalidad de clasificarlos de acuerdo a la metodología *EPIK*.
- c. Aplicar la metodología *EPIK* para la determinación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de los acuíferos en el área de interés.
- d. Definir un mapa sobre los niveles de vulnerabilidad intrínseca en el casco urbano y alrededores de San Juan Chamelco.

## 1.6 UBICACIÓN Y EXTENSIÓN DEL ÁREA DE INVESTIGACIÓN

El área está ubicada en el municipio de San Juan Chamelco, encontrándose al este de la cabecera departamental de Alta Verapaz y al norte de la ciudad capital de la República de Guatemala.

La investigación incluye una superficie de 42 km<sup>2</sup> ubicada en la hoja Cartográfica de COBÁN 2162 III del Instituto Geográfico Nacional (IGN) en 1999, actualizada en el 2014 en formato digital a escala 1: 50 000.

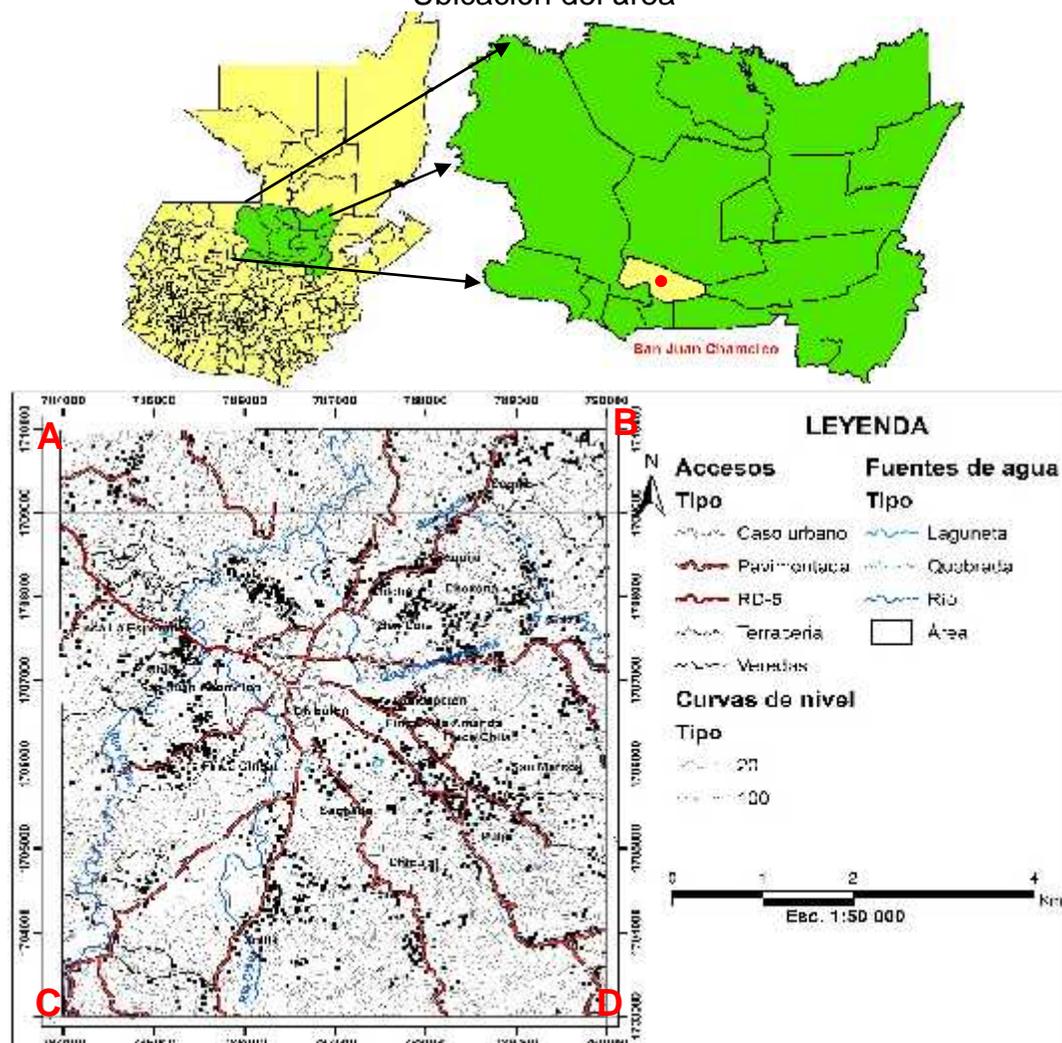
En la tabla 1 se observan las coordenadas *UTM* del límite del área de investigación.

TABLA 1  
Coordenadas *UTM* del área de investigación

| Vértice  | Este (X) | Norte (Y) | Proyección            |
|----------|----------|-----------|-----------------------|
| <b>A</b> | 784000   | 1710000   | <i>WGS84</i> Zona 15N |
| <b>B</b> | 790000   | 1710000   |                       |
| <b>C</b> | 784000   | 1703000   |                       |
| <b>D</b> | 790000   | 1703000   |                       |

**Fuente:** Hoja cartográfica Cobán 2162 III, Instituto Geográfico Nacional (IGN).

FIGURA 1  
Ubicación del área



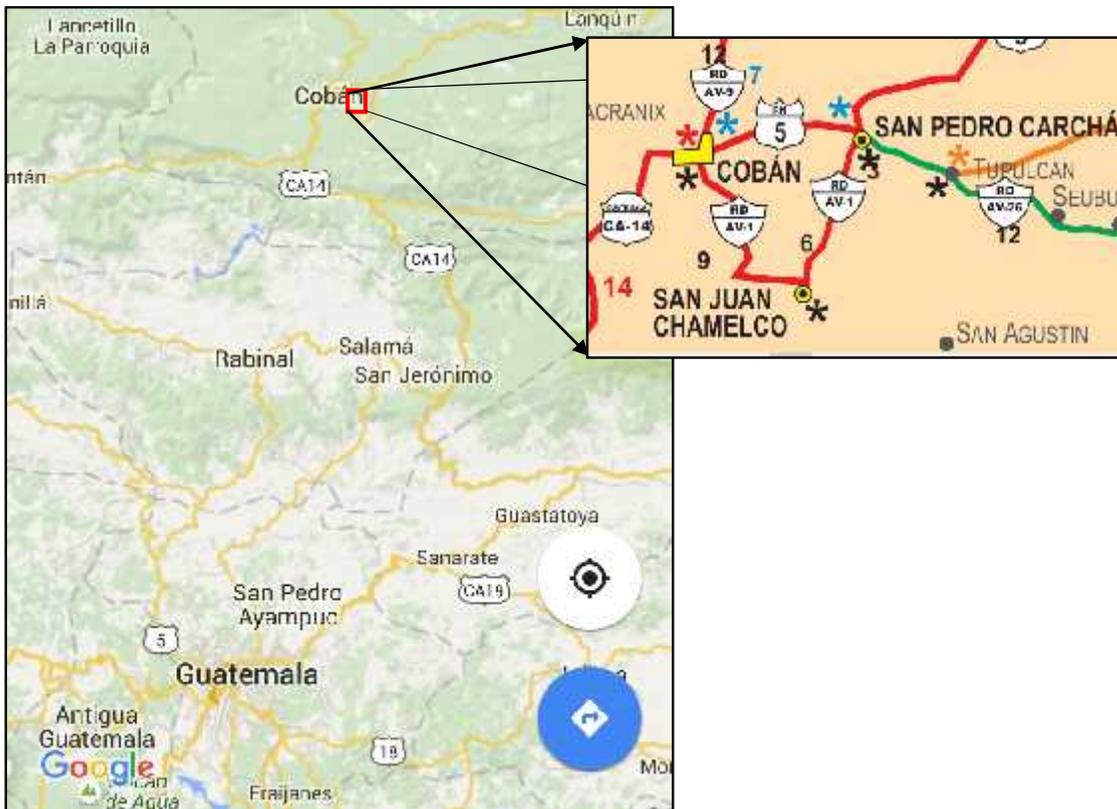
Fuente: modificado del mapa digital del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

## 1.7 ACCESOS

El municipio de San Juan Chamelco se encuentra a 8 km de la cabecera departamental de Alta Verapaz por medio de la carretera departamental (RD-1) y a 219 km de la capital de Guatemala, sobre la carretera Jacobo Árbenz Guzmán y a la altura de El Rancho (El Progreso) se toma la CA-14, la carretera es totalmente asfaltada, transitable todo el año.

Las vías de comunicación al interior del municipio son asfaltadas y de terracería, la mayoría transitable todo el año. Tiene acceso desde San Pedro Carchá es a través de 8,5 km de carretera asfaltada. (ver figura 2)

FIGURA 2  
Accesos al área de investigación



Fuente: Disponible en Google Maps, 2015. (20/03/2016)

## 1.8 MARCO GEOLÓGICO

A continuación, se describe el contexto geológico regional y local del municipio de San Juan Chamelco, Alta Verapaz.

### 1.8.1 CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL

En el area de interés se encuentran rocas mayormente sedimentarias, como se observa en el mapa 1.

### a. FORMACIÓN TODOS SANTOS (JKts)

La localidad tipo de esta formación se encuentra vecina con la población de Todos Santos en los Altos Cuchumatanes, en el departamento de Huehuetenango. En el área de estudio se encuentra esta formación, está constituida por areniscas, limolita (facies de “capa roja”), conglomerados, caliza, *chert* y dolomita gris. (S. M. Millan 1985) <sup>7</sup>

Al norte de la zona de falla Chixoy-Polochic, la Formación Todos Santos aparece donde las calizas Cretácicas suprayacentes han sido removidas por fallamiento y erosión. No se conoce algún afloramiento de la formación en el oeste de Guatemala, al sur de la zona de falla Chixoy-Polochic. (S. M. Millan 1985)

La edad de la formación se conoce mayormente a partir de información paleontológica de intercapas marinas en México. Las capas contienen amonites del Jurásico Tardío, se ha hallado fauna del Cretácico Temprano cerca del tope (Viniegra, 1971). Blair (1981) reportó flora palinomorfa del Cretácico Temprano (Berriasiano) en Chiapas.

### b. FORMACIÓN COBÁN (Kco1-Kco2)

Esta formación fue descrita por Sapper (1899); es una gruesa secuencia de carbonatos y evaporitas del Cretácico.

La Unidad de Caliza se presenta en dos tonalidades de gris, uno claro y el otro oscuro. Se debe a que son de diferente tiempo geológico uno llamado Caliza Inferior Kco1 (tono oscuro) y el otro Caliza Superior Kco2 (tono claro), ambos pertenecientes a la

---

<sup>7</sup> Chiquín Yoj, Mauricio (Comp.) *Norte y Centro América: Bloque Maya y Chortís*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Dirección General de Investigación., 2000.

Formación Cobán. En el área de interés se presentan ambos según el mapa geológico del cuadrángulo Cobán 2162 III G.

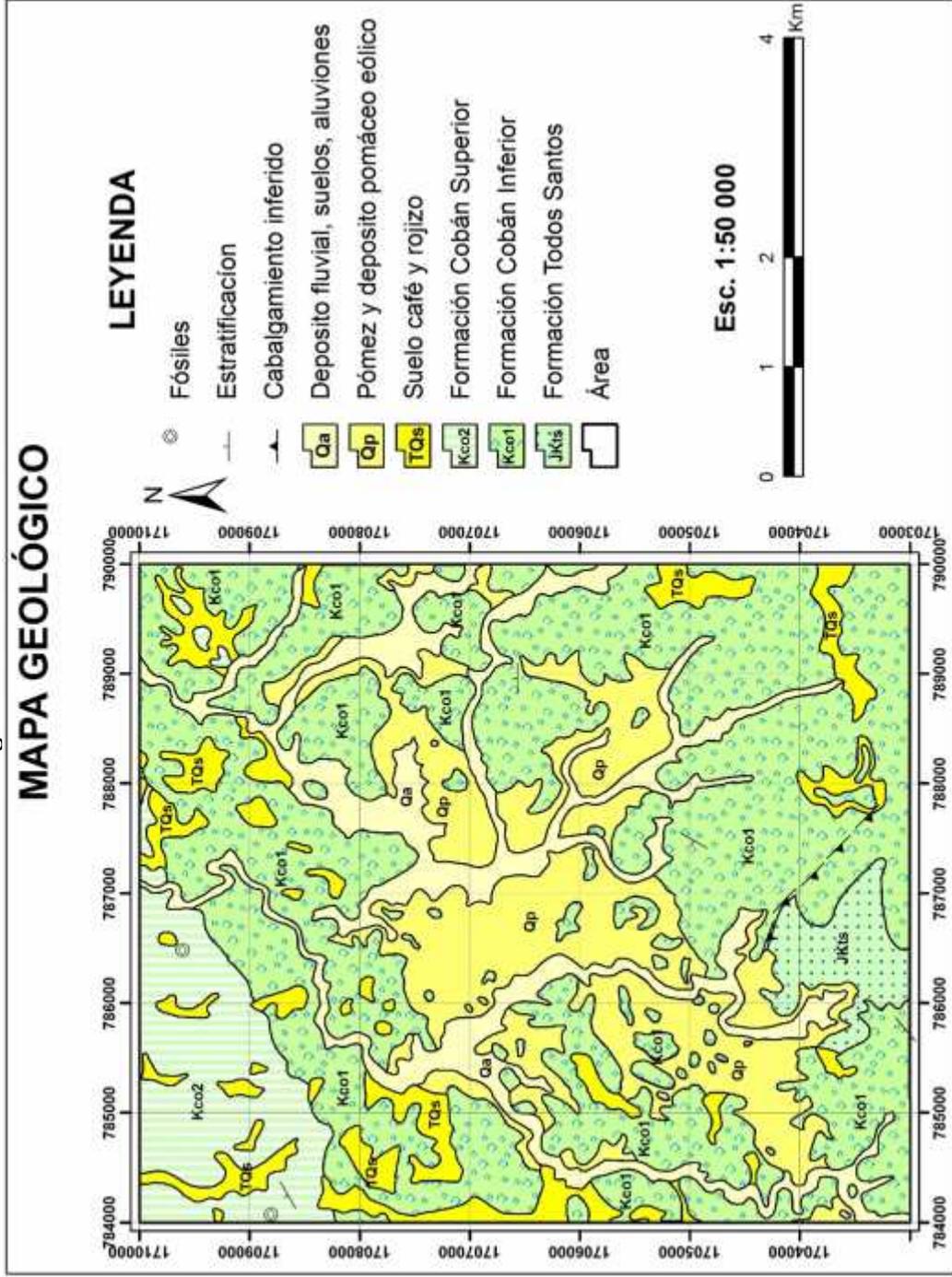
Litológicamente posee Calizas dolomíticas masivas altamente recristalizadas. Brechas intraformacionales son comunes, son predominantemente dolomíticas, pero contienen calizas silíceas, y escasas lutitas y limolitas. Secciones de calizas delgadas de decenas de metros en espesor con poca dolomita ocurren cerca de la base de la Formación Cobán. Brechas de solución evaporítica son comunes (Blount y Moore, 1969), y hay varias ocurrencias de yeso secundario cerca de los afloramientos de esta unidad.

La microfauna presente, indica una edad que varía desde el Cenomaniano al Santoniano. Fourcade propone conservar una nomenclatura simplificada y designar a la formación como de edad Aptiano Temprano a Cenomaniano, posiblemente del Cenomaniano Temprano.

### **c. DEPÓSITOS TERCIARIOS-CUATERNARIOS (TQs-Qp-Qa)**

Las principales formaciones de edad reciente en el área de interés son: Suelos café y rojizo (TQs), Pómez y depósito pomáceo eólico, en parte redepositado (Qp) y depósito fluvial, suelos y aluviones (Qa).

MAPA 1  
Litología del área de interés



Fuente: Modificado de Mapa geológico Cobán 2162 III G. IGN. 1 976.

## 1.9 MARCO TEÓRICO

### 1.9.1 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

**Vulnerabilidad:** Es la sensibilidad del acuífero a la contaminación, un acuífero es tanto más vulnerable cuanto más rápida e intensamente responde a una agresión exterior. <sup>8</sup>

Vrba y Zaporozec (1994) definen a la vulnerabilidad como “una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad del mismo a los impactos humanos y/o naturales”. De la definición se desprende que los autores incluyen en la misma tanto al sistema subterráneo como a los contaminantes y dentro de estos a los artificiales y a los naturales. <sup>9</sup>

**Vulnerabilidad intrínseca:** la vulnerabilidad intrínseca de un acuífero es una propiedad referida exclusivamente al medio es decir a un tipo de acuífero, cobertura, permeabilidad, profundidad y recarga, entre otros factores, sin tener en consideración la incidencia de alguna sustancia contaminante en específico.

**Acuífero:** es una estructura geológica que contiene agua y que es capaz de cederla en cantidades aprovechables mediante galerías, zanjas, pozos, sondeos o el uso directo de manantiales.

**Dolinas:** son depresiones que se forman en la superficie de las zonas kársticas. Su origen es la disolución de las rocas y permiten que el agua se dirija a las zonas donde el proceso está más avanzado.

**Procesos kársticos:** Los aspectos geomorfológicos incluyen la existencia de sumideros, ausencia de redes de drenaje

---

<sup>8</sup> Instituto Tecnológico GeoMinero de España –ITGE-. *Vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, importancia de la protección de las aguas subterráneas*. España: ITGE., 1995.

<sup>9</sup> Auge, Miguel. *Vulnerabilidad de acuíferos, conceptos y métodos*. Buenos Aires, Argentina: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas., 2004.

superficiales y presencia de redes de drenaje kársticas debido a la disolución de la roca. La calidad del agua refleja variaciones químicas en función de las tasas de descarga.<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup> Instituto Geológico y Minero de España –ITGE-. *Protección de las captaciones de abastecimientos urbano de medios kársticos. Métodos y consideraciones específicas*. España: ITGE., 2014.



## **CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA**

Desde que Margat J. en 1968 <sup>11</sup>, introdujera el término “Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación”, se han elaborado o planteado varias definiciones, calificativos y métodos, en muchos de los casos están dirigidas a representaciones cartográficas.

Para determinar una metodología adecuada para la investigación fue necesario revisar y analizar los distintos tipos de metodologías existentes sobre el cálculo de niveles de vulnerabilidad intrínseca de acuíferos.

### **2.1 MARCO METODOLÓGICO**

El desarrollo de la investigación se llevó a cabo en 4 etapas: análisis bibliográfico y reconocimiento de área, fase de campo, etapa de laboratorio y por último una fase de gabinete, las cuales se describen de la siguiente manera:

#### **2.1.1 ETAPA DE ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y RECONOCIMIENTO DE ÁREA**

En esta etapa se consultó diversos materiales bibliográficos, revistas, tesis, proyectos, páginas *web*, informes, mapas, libros sobre acuíferos y su vulnerabilidad, especialmente en medios kársticos. Además de realizar visitas al área.

---

<sup>11</sup> Margat J. *Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine á la pollution. Bases de sa cartographie*. Orléans, France: Bureau de Recherches Géologiques et Minières., 1968.

### **2.1.2 ETAPA DE CAMPO**

Consistió en la recolección de 42 muestras de suelo, 42 mediciones de infiltración y observar el grado de desarrollo de karst y geoformas. En el mapa 2 se observa la ubicación exacta de cada una de las muestras de suelo e infiltración. (Ver anexo 1)

### **2.1.3 ETAPA DE LABORATORIO**

Etapa donde se realizaron pruebas para determinar la textura de las muestras de suelo recolectadas en la etapa anterior.

### **2.1.4 ETAPA DE GABINETE**

Etapa donde se relacionó e interpretó los datos obtenidos en campo y laboratorio, además de un análisis para la determinación y delimitación de dolinas, para elaborar los mapas requeridos por la metodología de investigación. De ello resultó un mapa donde se presenta la vulnerabilidad intrínseca en San Juan Chamelco. (Ver mapa 9).

## **2.2 ELABORACIÓN DEL MAPA DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA**

Entre las tantas metodologías para determinar la vulnerabilidad intrínseca, hay una llamada *EPIK*, la cual consiste en evaluar factores que ayudan en el mapeo de la vulnerabilidad de aguas subterráneas en medios kársticos como las que se encuentran en Alta Verapaz, es por esta razón que se implementó esta metodología.

Este método fue desarrollado por Doerfliger y Zwahlen en 1997 <sup>12</sup> como una herramienta indispensable para el establecimiento de zonas o áreas de protección a aguas subterráneas.

---

<sup>12</sup> Doerfliger N. Et.al *Practical Guide. Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK)*. Suiza: Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape., 1998.

Esta metodología se basa en la dinámica que existe en las aguas subterráneas específicas para acuíferos kársticos, los parámetros que evalúa son:

- a) Desarrollo del *epikarst*
- b) La eficacia de la cubierta protectora (suelo)
- c) Las condiciones de infiltración
- d) Desarrollo de la red kárstica

Estos parámetros hidrogeológicos corresponden a aspectos específicos del régimen de un acuífero kárstico, como se ha mencionado anteriormente. El método permite calcular la sensibilidad de un acuífero kárstico a las influencias naturales y humanas.

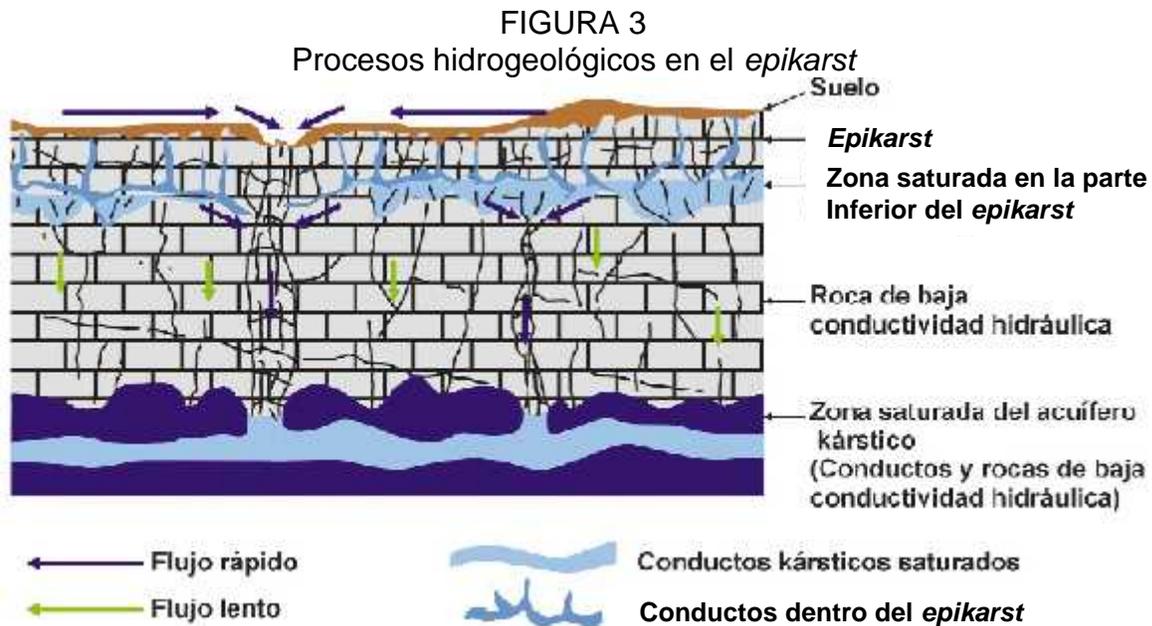
El método *EPIK* se implementa en tres etapas:

- a) Evaluación semi-cuantitativa y la cartografía de cada uno de los cuatro parámetros *epikarst*, cubierta protectora (suelo), condiciones de infiltración y el desarrollo de la red kárstica. Durante esta evaluación a cada parámetro se le asignó un valor que va de uno a cuatro a partir de valores ya establecidos por medio de ensayos realizados en sitios representativos diferentes en diversos entornos geológicos.
- b) Cálculo de un índice de protección mediante la combinación y la ponderación de los valores de los cuatro parámetros de cada unidad de superficie de área, esta etapa se realizó por medio de un SIG (Sistema de información geográfica) llamado *ArcGIS* Versión 10.3.0.
- c) Delimitación de zonas de vulnerabilidad, esto se llevó a cabo por medio de una representación cartográfica de la distribución del índice de vulnerabilidad para la totalidad del área de estudio.

La descripción de cada parámetro evaluado, así como su ponderación que se les asignó y el valor de los factores se presentan de la siguiente manera:

### 2.2.1 EVALUACIÓN DEL PARÁMETRO E (*Epikarst*)

La caracterización del *epikarst* se basa en el estudio de las zonas altamente fisuradas que corresponde a las formaciones descomprimidas y meteorizadas en las inmediaciones de la superficie del terreno, es decir, las formas de relieve del karst y la elevada permeabilidad en la superficie. (Ver figura 3)



**Fuente:** Modificada de Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage(OFEFP), 1998.

La clasificación (evaluación) de E en las tres categorías (ver tabla 2) de E<sub>1</sub> a E<sub>3</sub>, se determina principalmente mediante la asignación de características geomorfológicas, por medio de mapas topográficas, geomorfológicas, fotos aéreas y orto fotos, éstas también pueden ser utilizadas como una fuente de información complementaria. También se verificó este parámetro en el campo en el momento de verificar los otros factores.

TABLA 2  
Clasificación del *epikarst*

| Categoría      | Descripción   | Ponderación |
|----------------|---|-------------|
| E <sub>1</sub> | Indica la situación más vulnerable. Dolinas. Depresiones. Afloramientos intensamente fracturados. Cuevas. Sumideros.    | 1           |
| E <sub>2</sub> | Incorpora zonas intermedias en los campos de alineaciones de dolinas (superficies de debilidad). Valles secos. Cañones. | 3           |
| E <sub>3</sub> | Incorpora el resto de la zona que presenta poca característica morfológica.   | 4           |

**Fuente:** Modificado de Doerfliger N. Et.al *Practical Guide. Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK)*. Suiza: Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape., 1998.

En la fotografía 1 se observa la primera categoría (E<sub>1</sub>), en donde existe una alta vulnerabilidad intrínseca a la contaminación, ya que se encuentra altamente fracturado y permite la formación de dolinas, sumideros y cualquier otra depresión morfológica en el área de investigación.

FOTOGRAFÍA 1  
Categoría E<sub>1</sub> del parámetro *epikarst*



Tomadas por: Luis Toc Peralta, 2016.

En la fotografía 2 se observa la categoría E<sub>2</sub>, sección donde se encuentran los valles secos encontrados al norte y en la carretera que va de San Juan Chamelco a Santa Cruz Verapaz.

Y por último la categoría E<sub>3</sub>, en donde se presentan pocas depresiones morfológicas, como se observa en la fotografía 3.

FOTOGRAFÍA 2  
Categoría E<sub>2</sub> del parámetro *epikarst*



Tomadas por: Luis Toc Peralta, 2016.

FOTOGRAFÍA 3  
 Categoría E<sub>3</sub> del parámetro *epikarst*



Tomadas por: Luis Toc Peralta, 2016.

### 2.2.2 EVALUACIÓN DE CUBIERTA PROTECTORA P (suelo)

La cubierta protectora, término que incluye el suelo (en un sentido pedológico), así como otras formaciones geológicas que pueden superponerse a un acuífero kárstico, como los depósitos cuaternarios (morrenas, limos y sedimentos) o pre-cuaternarios, formaciones no kársticas (arcillas, areniscas y margas).

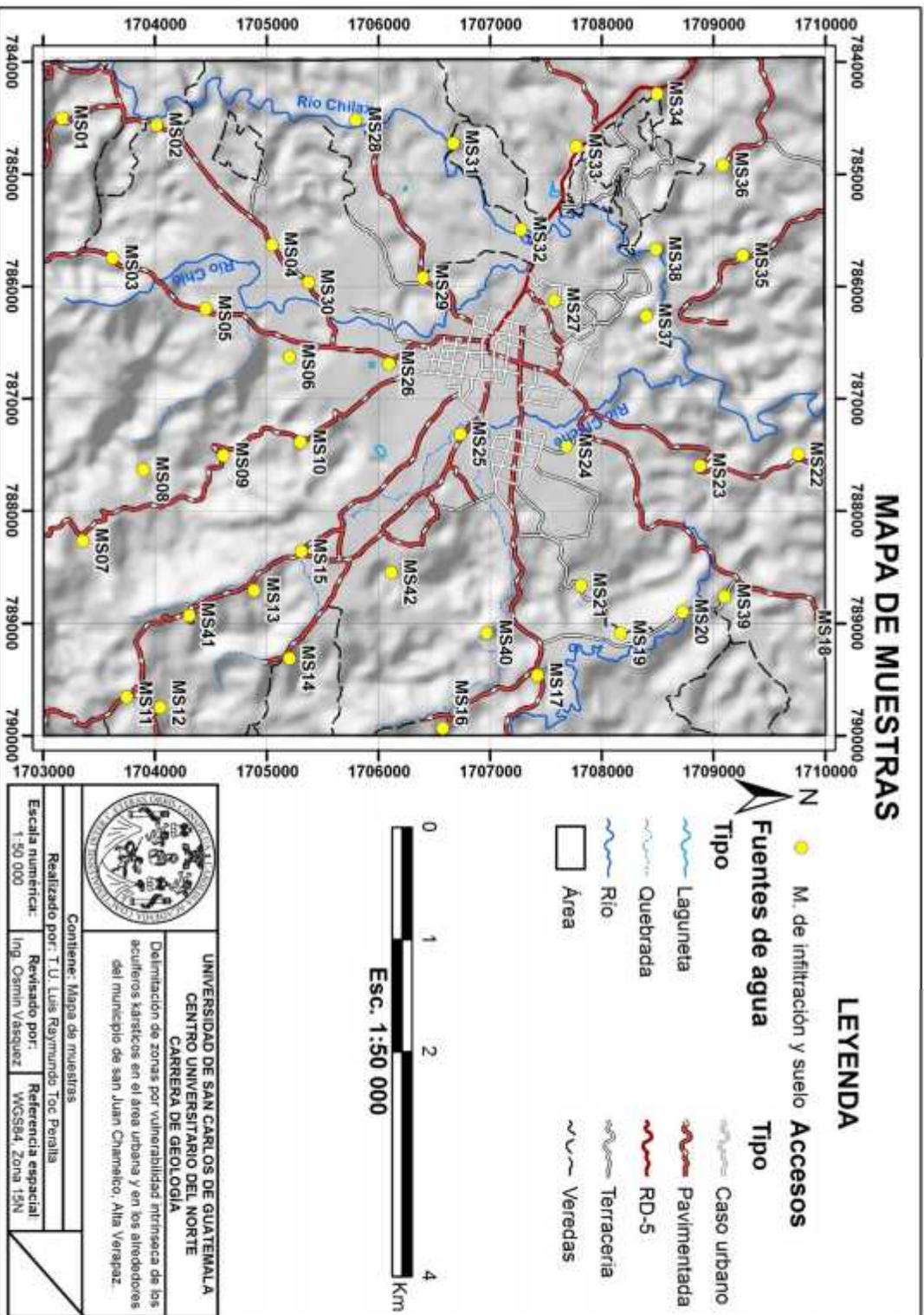
El suelo es el principal protector de cobertura en el área de investigación, a cada tipo de suelo se le evaluó su textura ya que es la principal característica que puede proveer una mayor o menor permeabilidad, es decir el grado que permite de protección.

#### a. RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

Las muestras fueron recolectadas *ínsitu*, para tener los resultados acordes a las características geológicas presentes, se tomó 42 muestras a las que se realizó individualmente cálculo de infiltración y textura del suelo. (Ver anexo 2).

En el mapa 2 se observa la ubicación de las muestras en el área de investigación, abarcan el casco urbano de San Juan Chamelco y sus alrededores.

MAPA 2  
Ubicación de las muestras de suelo e infiltración



## b. DETERMINACIÓN DE TEXTURA

Para determinar o definir la textura se utilizó el método de *Bouyoucos*, el cual consiste en la determinación de los porcentajes de arena, limo y arcilla, presentes en la fracción mineral del suelo.

Se analizó un promedio de una muestra por kilómetro cuadrado del área (42 en total), para tener un mejor análisis en cuanto a la textura.

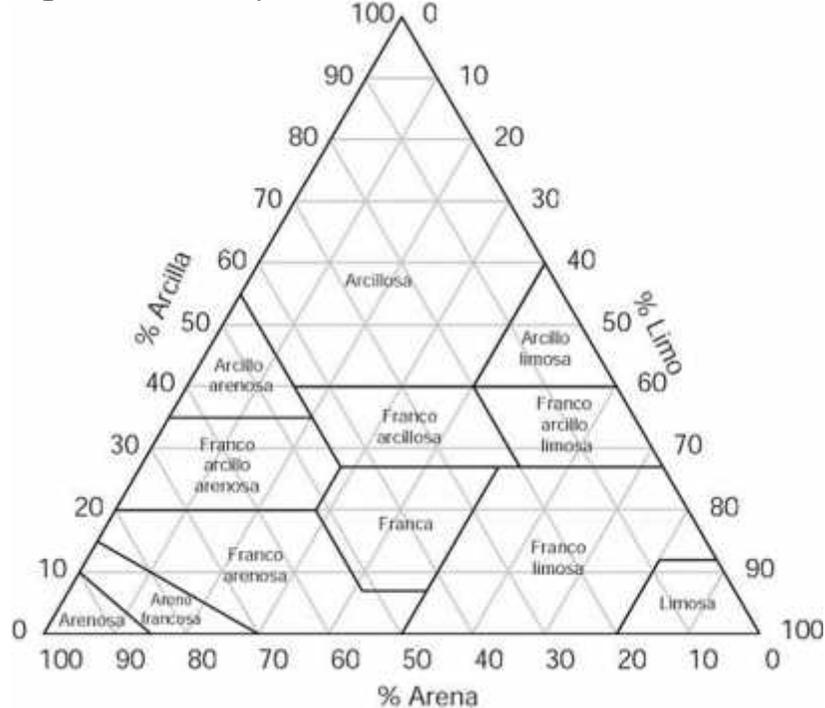
El principio de *Bouyoucos*, dice que las partículas suspendidas en el agua se asientan diferencialmente según la cantidad de superficie por unidad de volumen. Las partículas de arcilla tienen una gran área superficial por unidad de volumen y se asientan lentamente, mientras que las partículas de arena se asientan rápidamente debido a su baja superficie específica.<sup>13</sup>

Estos porcentajes se obtienen mediante la separación de las partículas en grados clasificados de acuerdo a su diámetro, colocándolos en la gráfica ternaria del departamento de agricultura de los Estados Unidos de Norte América (*USDA*) para determinar el nombre textural. (Ver figura 4)

---

<sup>13</sup> Cano, Adán. *Manual de prácticas de la materia de edafología*, 2013. Disponible en <http://www.utselva.edu.mx/pai/8/7/25.1.pdf>

FIGURA 4  
Diagrama ternario para la determinación de textura de suelo



Fuente: Disponible en <http://www.edafologia.net/introeda/tema04/text.htm> (20/03/2016).

### c. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA TEXTURA POR MEDIO DEL MÉTODO DE *BOUYOCOS*

- Tamizar la muestra de suelo a 2 mm.
- Pesar 50 g de suelo, si el suelo es de textura fina (arcilloso) o 100 g si es de textura gruesa (arenoso).
- Colocar la muestra en un beaker de 250 ml (previamente numerado). Agregar agua destilada hasta la mitad y adicionar 10 ml de hidróxido de sodio.
- Agitar la mezcla con una varilla de vidrio y dejarla en reposo por lo menos durante 16 h. Con ayuda de una pizeta trasladar la muestra remojada al vaso de agitación, conectar en la agitadora y agitar de 2 min a 5 min, para suelo arenoso y de 7 min a 10 min para suelo arcilloso.
- Trasladar la suspensión a un cilindro de sedimentación, agregar agua destilada a temperatura ambiente hasta un poco más de la

mitad, introducir cuidadosamente el hidrómetro y completar hasta la marca inferior del cilindro 1 130 ml. Para suelos arcillosos y si se usan 100 g de muestra entonces llenar el cilindro hasta la marca superior.

- En otro cilindro agregar agua destilada y 10 ml de hidróxido de sodio. Remover el hidrómetro y colocar un tapón de hule o la palma de la mano en la boca del cilindro.
- Agitar la suspensión con volteos hacia arriba y hacia abajo durante un minuto, con 20 ó 30 movimientos durante ese minuto. Inmediatamente después de la última vuelta del cilindro hacia arriba, colóquelo en una superficie firme y tome el tiempo. Si hay mucho burbujeo o espuma en la superficie agregar de 1 a 3 gotas de alcohol isoamílico inmediatamente después de la agitación.
- A los 20 s introducir cuidadosamente el hidrómetro, liberarlo en la suspensión y a los 40 s exactos tomar la primera lectura. Inmediatamente sacar el hidrómetro y lavarlo en un cilindro con agua destilada limpia.
- Cuidadosamente introducir el termómetro en la suspensión, observe y anote. El hidrómetro está calibrado para leer a una temperatura de 20 °C. La corrección por temperatura se hace sumando 0,36 a la lectura por cada grado centígrado arriba de 20 °C o restando 0,36 por cada grado debajo de 20 °C.
- Colocar el hidrómetro en el cilindro con agua destilada con los 10 ml de hidróxido de sodio y leer el hidrómetro en la parte superior del menisco. Esta lectura debe restarse de la lectura a los 40 s y 2 h para corregir la contribución hecha por el agente dispersante. El hidrómetro está calibrado para leer en la parte inferior del menisco.
- A las dos horas tomar la segunda lectura del hidrómetro, así como la temperatura de la suspensión para hacer la respectiva

corrección. Una vez determinados los porcentajes de las diferentes partículas, usar el triángulo textural para determinar la clase textural de la muestra.

En la fotografía 4 se observa el equipo utilizado para el proceso de laboratorio para la aplicación de *Bouyoucos*.

FOTOGRAFÍA 4  
Equipo de laboratorio para el método de *Bouyoucos*



Fuente: Investigación de campo. 2 016.

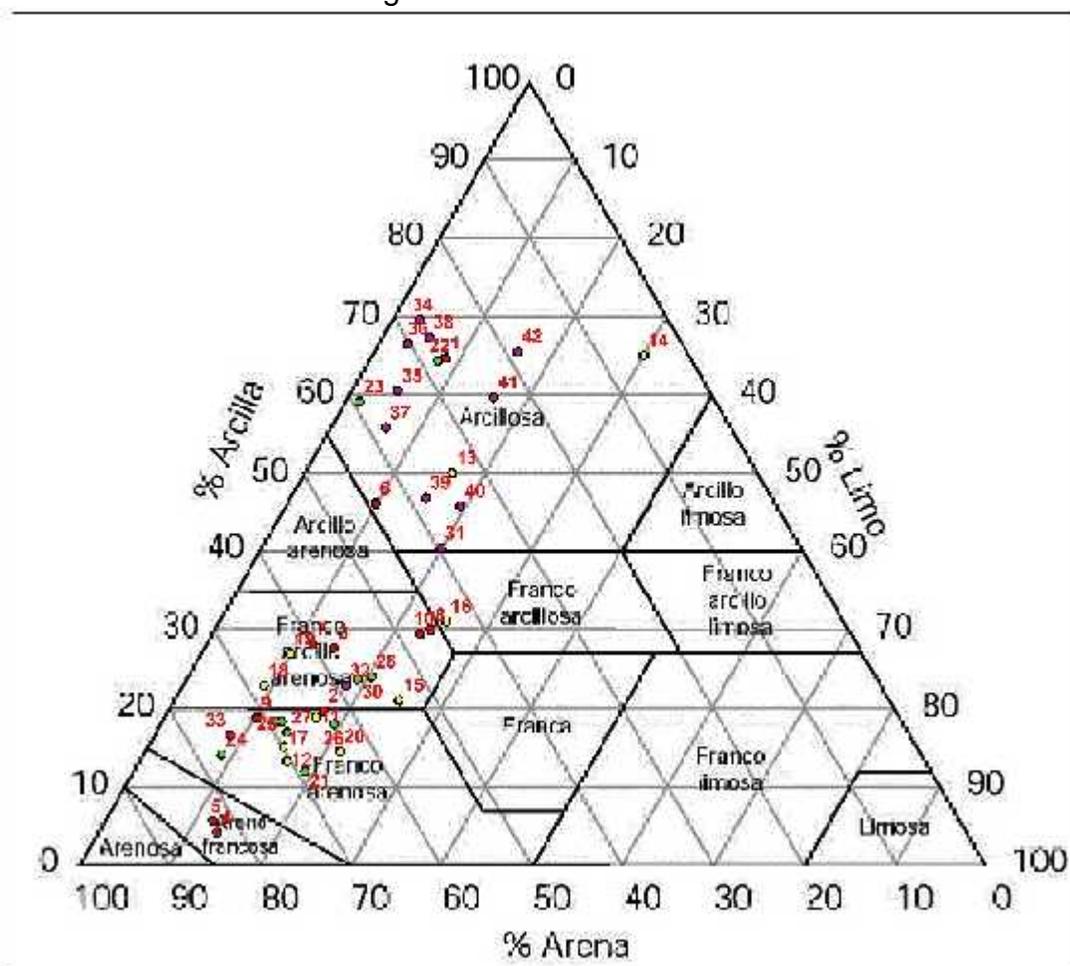
#### d. CLASIFICACIÓN DE MUESTRAS

Las texturas de los suelos recolectados se definieron en base a el porcentaje de arcilla, limo y arena, en la tabla 9 (Capítulo de resultados) se observa las 42 muestras con sus respectivos porcentajes.

Se determinaron otros datos del suelo, los cuales se encuentran en el anexo 2.

En la figura 5 se puede observar el triángulo textural del departamento de agricultura de los Estados Unidos de Norte América (*USDA*), donde se ubican las 42 muestras de suelo, determinadas por medio del porcentaje de arcilla, limo y arena.

FIGURA 5  
Triángulo textural de las muestras



Fuente: Investigación de campo. 2016.

Una vez determinada la textura del suelo se clasifica por medio de la tabla 3, para determinar su categoría y su ponderación en la metodología propuesta.

**TABLA 3**  
Clasificación del parámetro P

| Categoría      | Descripción   | Ponderación |
|----------------|---|-------------|
| P <sub>1</sub> | Suelos con textura arenosa, franco arenosa, franco arenosa.                   | 1           |
| P <sub>2</sub> | Suelos franco, franco limosa, franco arcillo arenosa, arcillo arenosa y limo. | 2           |
| P <sub>3</sub> | Suelos franco arcillosa, franco arcillo limosa y arcillo limosa.              | 3           |
| P <sub>4</sub> | Suelos arcillosas   | 4           |

**Fuente:** Modificado de Solares García, Sergio Estuardo. *Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos Kársticos en el área urbana y los alrededores del municipio de Cobán, Alta Verapaz*. Tesis de Ingeniero Geólogo. Centro Universitario del Norte. Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán, Alta Verapaz. Guatemala: Carrera de Geología., 2015

**FOTOGRAFÍA 5**  
Categoría de suelos



**Fuente:** Investigación de campo. 2016.

En la fotografía anterior se presentan las categorías para el parámetro de suelo, en la sección (a) arcilla cerca de la aldea Chilaxito clasificada a P4, en la (b) textura areno francosa para P1 encontrada en la aldea Chimox, sección (c) suelo franco arcillo arenoso para la categoría P2 encontrada en la carretera que va a la aldea Campát y por último la sección (d) con suelo franco arcilloso para P3.

### 2.2.3 EVALUACIÓN DE INFILTRACIÓN I

La condición de infiltración se da en el suelo a partir de su textura, estructura y compactación. Sin embargo, la infiltración básica permanece casi constante al llegar al punto de saturación, es el cálculo más importante puesto que de esto depende el tiempo en que se tarda aproximadamente un contaminante en llegar un acuífero.

Las pruebas de infiltración se realizaron *insitu*, esto para no tener errores en los datos, la cantidad de pruebas son las mismas que las muestras de suelo para definir su textura (42). (Ver anexo 3)

Para el cálculo de la infiltración en el suelo se utilizó el método de *Porchet*, que utiliza el siguiente modelo:

La superficie a través de la cual se infiltra agua es:

$$S = x R (2h + R)$$

Para un tiempo, dt, suficientemente pequeño para suponerse que la capacidad de infiltración, f, es constante:

$$x R (2h + R) x f = - x R^2 x dh/dt$$

Se simplifica y separa variables:

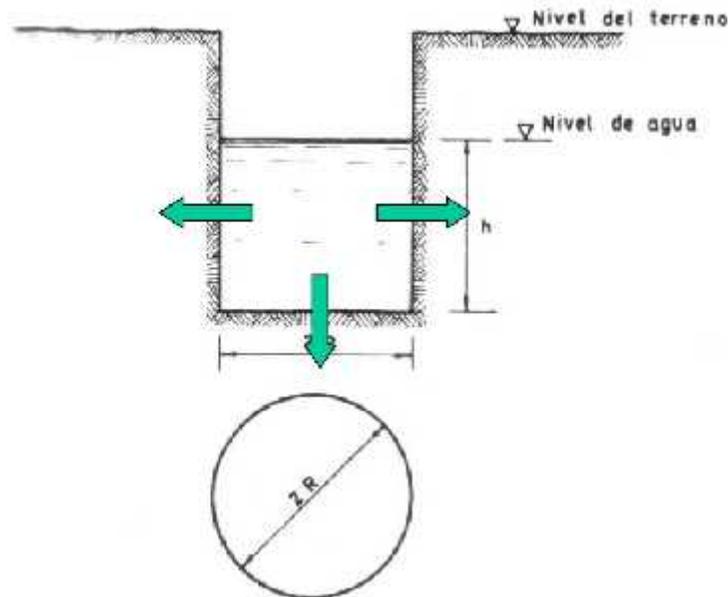
$$f x dt = - R x (dh/2h+R)$$

Luego de integrar la ecuación anterior se tiene finalmente:

$$f = ((R) / (2 (t_2 - t_1))) x \ln ((2h_1 + R) / (2h_2 + R))$$

En la figura 6 se muestra un esquema del método de infiltración de *Porchet*.

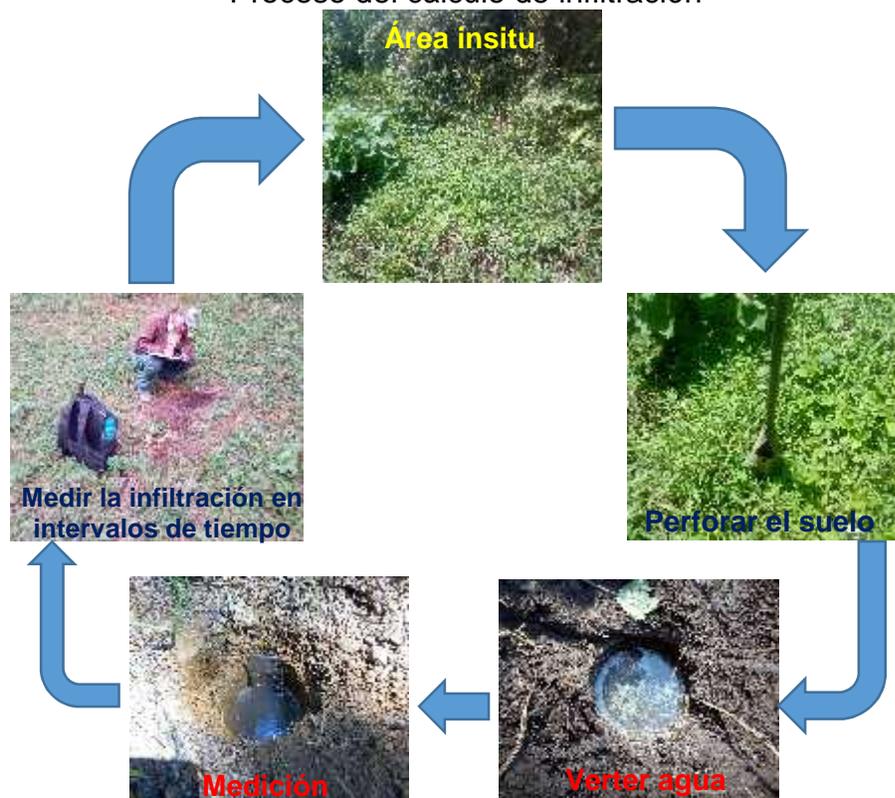
FIGURA 6  
Sistema de infiltración en el método *Porchet*



**Fuente:** Departamento de ingeniería civil. Hidráulica de aguas subterráneas y su aprovechamiento. Universidad de Chile.

Para determinar la velocidad de infiltración, por medio de *Porchet*, el proceso consiste en abrir o perforar un cilindro, en este caso fue de radio 2,9 cm y profundidad de 30 cm. Verter agua y medir el tiempo en intervalos de 1, 2, 3, 5, 10, 15 y 20 min como se muestra en la figura 7.

FIGURA 7  
Proceso del cálculo de infiltración



Fuente: Investigación de campo. 2016.

La velocidad de infiltración de las muestras de suelo tiene relación con la textura de los suelos encontrados en el área de investigación, desde muy rápidas en suelos arenosos a lentas en arcillas, los resultados se muestran en tabla 10 (Capítulo de resultados).

Una vez determinada la velocidad se clasifica, en categorías propuestas para esta investigación, como se muestra en la tabla 4.

**TABLA 4**  
**Clasificación del parámetro I**

| Categoría      | Descripción<br>Velocidad de infiltración en cm/h | Ponderación |
|----------------|--|-------------|
| I <sub>1</sub> | 2,0 >  | 1           |
| I <sub>2</sub> | 0,50 – 2,0                                       | 2           |
| I <sub>3</sub> | 0,10 – 0,50                                      | 3           |
| I <sub>4</sub> | < 0,10   | 4           |

**Fuente:** Solares G., Sergio E. *Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos Kársticos en el área urbana y los alrededores del municipio de Cobán, Alta Verapaz*. Tesis de Ingeniero Geólogo. Centro Universitario del Norte. Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán, Alta Verapaz. Guatemala: Carrera de Geología., 2015.

#### 2.2.4 EVALUACIÓN DEL DESARROLLO KÁRSTICO K

La vulnerabilidad se evalúa en términos de la presencia o ausencia de una red karst y el grado en el que se desarrolla la red. Con el fin de determinar la importancia de la red en relación con el volumen de roca que rodea la permeabilidad, se consideran diferentes indicadores (fisuras o masivas).

El primer indicador es la identificación directa de los componentes de la red, tales como cuevas, simas, agujeros y otras depresiones morfológicas.

Si no hay indicadores de red kárstica, hay que recurrir a métodos indirectos. Estos se basan en el análisis de hidrogramas de flujos, ensayos de trazadores, interpretación y análisis de la variabilidad de la calidad de agua.

En esta investigación se determinó el parámetro de desarrollo kárstico por medio de la observación, relación con el parámetro *epikarst*, mapa de lineamientos estructurales, orto fotos y un mapa geológico.

El mapa de lineamientos presenta un sistema donde existen fallas con dirección *NE-SW* al norte del área, esto permitió un mayor desarrollo de fracturas en la roca que permite el ingreso o filtración de agua, lo que disuelve la roca carbonatada y desarrolla kárst, como se muestra en el mapa 3.

Una vez determinado del desarrollo de kárst se clasificó en categorías como se muestra la tabla 5.

TABLA 5  
Clasificación del parámetro K

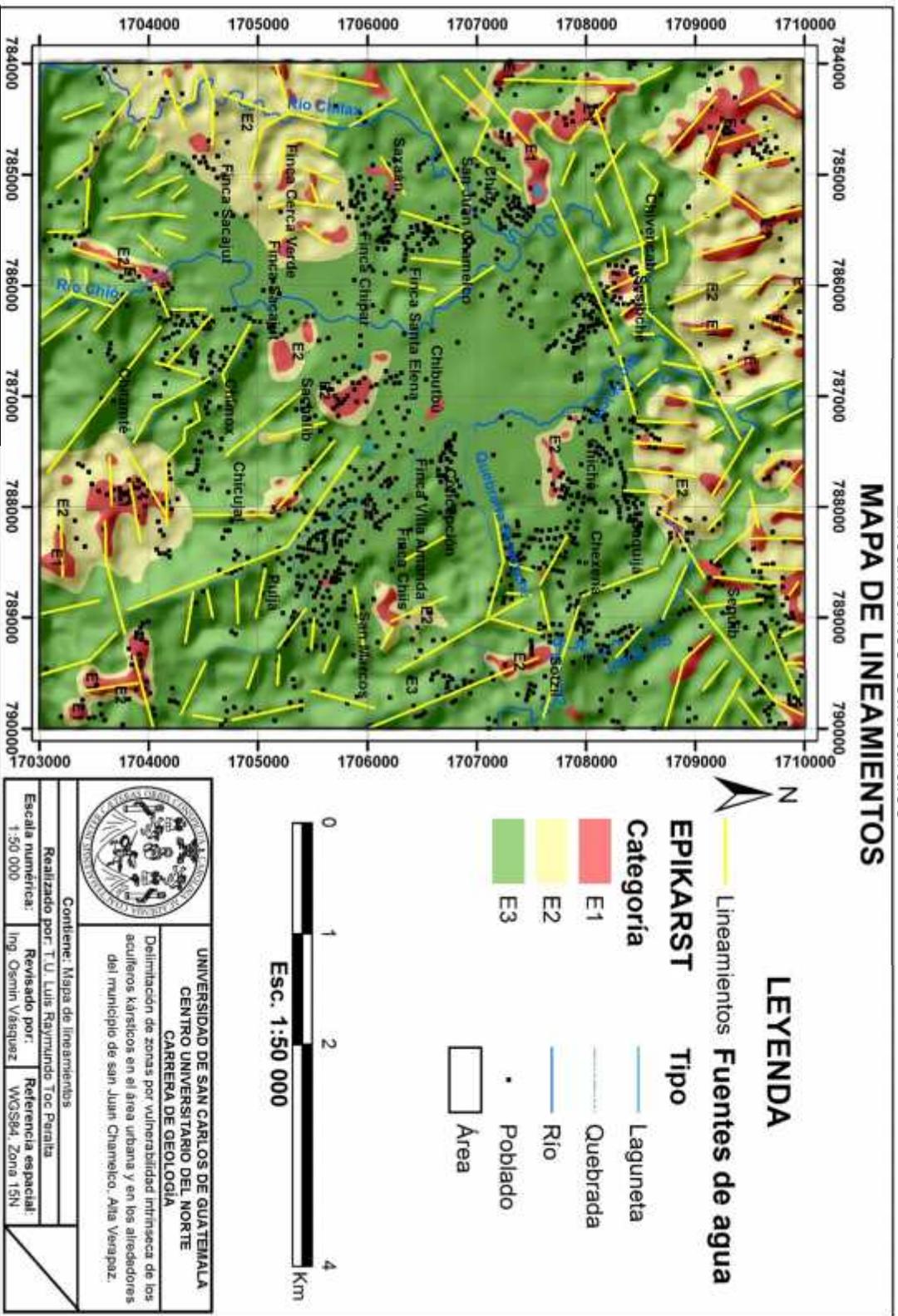
| Categoría      | Descripción                         | Ponderación |
|----------------|-------------------------------------|-------------|
| K <sub>1</sub> | Bien desarrollada la red kárstica   | 1           |
| K <sub>2</sub> | Moderado desarrollo de red kárstica | 2           |
| K <sub>3</sub> | Escaso desarrollo de karst          | 3           |

**Fuente:** Modificado de Doerfliger N. Et.al *Practical Guide. Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK)*. Suiza: Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape., 1998

En la fotografía 6 se observa una serie de ejemplos que nos indican que existe un desarrollo de red kárstica de categoría K<sub>1</sub>, en donde la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación es muy alta.

La categoría K<sub>2</sub> representa un moderado desarrollo de red kárstica, en el área de investigación se representa al norte y sur por medio de pequeñas aberturas en rocas calizas. (Ver fotografía 7)

MAPA 3  
Lineamientos estructurales



FOTOGRAFÍA 6  
Desarrollo kárstico K<sub>1</sub>



Fuente: Investigación de campo. 2016.

FOTOGRAFÍA 7  
Desarrollo kárstico K<sub>2</sub>



Fuente: Investigación de campo. 2016.

### 2.2.5 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA

Los cuatro parámetros previamente categorizados permiten un valor de índice de vulnerabilidad intrínseca (F), el cálculo se lleva a cabo por medio de la fórmula:

$$F = (a * E) + (b * P) + (g * I) + (d * K)$$

En dónde;

a, b, g y d son coeficientes de ponderación de cada parámetro

E, P, I y K son las categorías de cada parámetro

El valor de los coeficientes de ponderación en el método *EPIK* fueron establecidos por medio de evaluaciones en distintos medios geológicos. En la tabla 6 se observa la fórmula de vulnerabilidad intrínseca y la ponderación de los coeficientes.

TABLA 6  
Formula y ponderación de coeficientes

| <b>F = (a * E) + (b * P) + (g * I) + (d * K)</b> |          |          |          |
|--|----------|----------|----------|
| <b>a</b>   | <b>b</b> | <b>g</b> | <b>d</b> |
| <b>3</b>   | <b>1</b> | <b>3</b> | <b>2</b> |

**Fuente:** Modificado de Doerfliger N. Et.al *Practical Guide. Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK)*. Suiza: Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape., 1998.

Como se observa en la tabla 7, las ponderaciones más altas son de *epikarst* e infiltración, porque su existencia es muy importante para determinar la vulnerabilidad, ya que, si existe una permeabilidad alta, cualquier contaminante llegara más rápido al acuífero.

TABLA 7  
Valores de las categorías *EPIK*

| <b>E<sub>1</sub></b> | <b>E<sub>2</sub></b> | <b>E<sub>3</sub></b> | <b>P<sub>1</sub></b> | <b>P<sub>2</sub></b> | <b>P<sub>3</sub></b> | <b>P<sub>4</sub></b> | <b>I<sub>1</sub></b> | <b>I<sub>2</sub></b> | <b>I<sub>3</sub></b> | <b>I<sub>4</sub></b> | <b>K<sub>1</sub></b> | <b>K<sub>2</sub></b> | <b>K<sub>3</sub></b> |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>1</b>             | <b>3</b>             | <b>4</b>             | <b>1</b>             | <b>2</b>             | <b>3</b>             | <b>4</b>             | <b>1</b>             | <b>2</b>             | <b>3</b>             | <b>4</b>             | <b>1</b>             | <b>2</b>             | <b>3</b>             |

**Fuente:** Modificado de Doerfliger N. Et.al *Practical Guide. Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK)*. Suiza: Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape., 1998

Al evaluar los parámetros por medio de la fórmula de F, se obtiene como resultado un índice de vulnerabilidad intrínseca o

también llamada factor de protección de un acuífero en medios kársticos, los valores pueden variar de 9 (alta vulnerabilidad) a 34 (baja vulnerabilidad). En la tabla 8 se observan los distintos grados o niveles de vulnerabilidad.

TABLA 8  
Grados o niveles de vulnerabilidad intrínseca por el método *EPIK*

| Vulnerabilidad  | Índice de protección F                  |
|-----------------|---|
| <b>Muy alta</b> | 9 – 19                                  |
| <b>Alta</b>     | 20 – 25                                 |
| <b>Moderada</b> | >25                                     |
| <b>Baja</b>     | >25 con la presencia de $P_4 + I_{3,4}$ |

**Fuente:** Modificado de Doerfliger N. Et.al *Practical Guide. Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK)*. Suiza: Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape., 1998



## **CAPÍTULO 3**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

La metodología *EPIK* propone evaluar la vulnerabilidad intrínseca de ambientes kársticos, a partir de cuatro parámetros; *epikarst*, cubierta protectora, condiciones de infiltración y el desarrollo de la red kárstica.

#### **3.1 PARÁMETRO E (*EPIKARST*)**

En el área de investigación, se determinó en base a orto fotos, mapas geológicos y topográficos, dolinas, valles secos, alineaciones de éstas y otras depresiones morfológicas.

Las diferentes morfologías, se analizaron por medio de un porcentaje y alineaciones que se pueden presentar, representados de la siguiente manera: E1 con un 6,64 %, fue la principal ya que indica la situación más vulnerable, por estar formada de zonas muy fracturadas, dolinas, cuevas, sumideros y cualquier otra depresión morfológica, estos han sido generados en parte por la infiltración del agua por las fisuras y la disolución de las rocas carbonatadas, que por su ubicación geográfica se encuentran sobre la Formación Cobán Superior e Inferior.

En el mapa 4 se observa una cantidad alta de depresiones, forman así una alta densidad en la parte norte y sureste del área (E1), las comunidades de Chibulbub, Sesibché, Saquijá, Chexená, La Esperanza, Chió, Cojilá y San Luis se encuentran en esta zona. Al sur se presenta alta densidad cerca de las aldeas Saxaán, Xolilá, Chimox, Chicujal, Puljá y Sachalib.

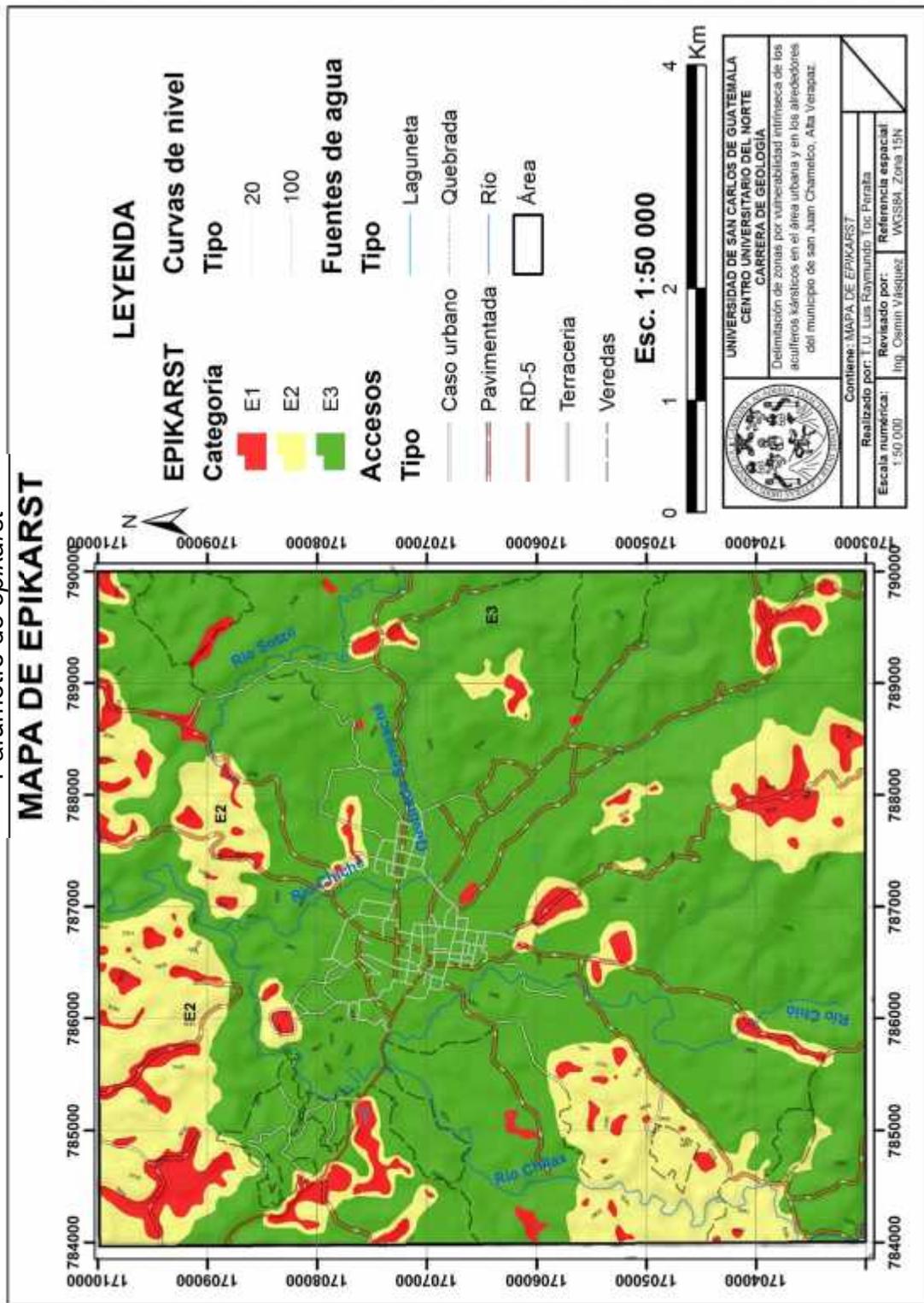
Las depresiones más grandes de aproximadamente 1 km de longitud están al norte y sureste del área de investigación, donde se encuentran aldeas y comunidades sobre éstas, como se muestra en el mapa 4.

La categoría E2 está comprendida por el 21,36 %, es una zona intermedia en los campos de alineaciones de dolinas, valles secos, cañones, cuevas o cualquier otra depresión morfológica (superficies de debilidad).

Esto indica que existe *epikarst* presente, las alineaciones se encuentran en la parte norte con una dirección de *N30W*, *N25W* y *N25E*; en la parte sur se establecen tres patrones: *S65E*, *S35E* y *S70W*. Esta categoría se encuentra sobre la Formación Cobán y unidades cuaternarias.

Y por último la categoría E3 de 72 % del área total de investigación, formada por una zona de captación que carece de las características morfológicas E1 y E2. En esta zona se determinaron depresiones pequeñas aisladas a un sistema más grande, se encuentran mayormente en las partes más bajas del área donde se ubica la población, la geología presente es la Formación Cobán y Todos Santos.

MAPA 4  
Parámetro de epikarst



Fuente: Investigación de campo, 2 016.

### 3.2 PARÁMETRO CUBIERTA PROTECTORA (P)

Este parámetro se determinó con 42 muestras de suelo, para definir protección natural y establecer la vulnerabilidad del acuífero; se consideró la definición de textura por medio de *Bouyoucus*. Los suelos principales son arcillas, franco arcillo arenosa y franco arenoso (ver tabla 9), provenientes de la Formación Cobán, depósitos fluviales y aluviales del cuaternario.

Para el análisis de la cubierta protectora se calcularon porcentajes, para la categoría P1 fue de 33,29 %, que es la más vulnerable porque es más permeable y permite mayor contaminación al acuífero kárstico. En esta zona se encuentra el casco urbano de San Juan Chamelco y algunas comunidades o aldeas como Chicujal, Chitamté, Xolilá, finca Sacajut, finca Cerca Verde, parte de Chimox, finca Chipar, finca Santa Elena, parte de Saxaán y Chexená. Esta zona se localiza sobre unidades geológicas del cuaternario, compuestas de pómez, depósitos pomáceos eólicos, depósitos fluviales y aluviones. (Ver mapa 5)

La categoría P2 está constituida por el 36,91 % (la más grande del área), esta zona es formada por suelos que poseen cantidades del 20 % a 35 % de arcilla que es más impermeable ante un agente contaminante al acuífero kárstico, en esta parte del área se encuentran comunidades como San Marcos, Sachalib, finca El Recuerdo, parte de la finca Villa Amanda, Chió, La Esperanza, Chirreaj, la parte sur de Sesibché, Saquijá y Sequib; se encuentran sobre las unidades de suelo café y rojizo, pómez, depósitos fluviales y Formación Cobán Inferior.

La categoría P3 es la más pequeña con un 0,25 % de suelos que poseen de 25 % a 40 % de arcillas, que ayudan a tener una mayor impermeabilidad al acuífero kárstico, existe sobre esa zona una pequeña parte de la aldea o comunidad Cojilá al este del área de investigación.

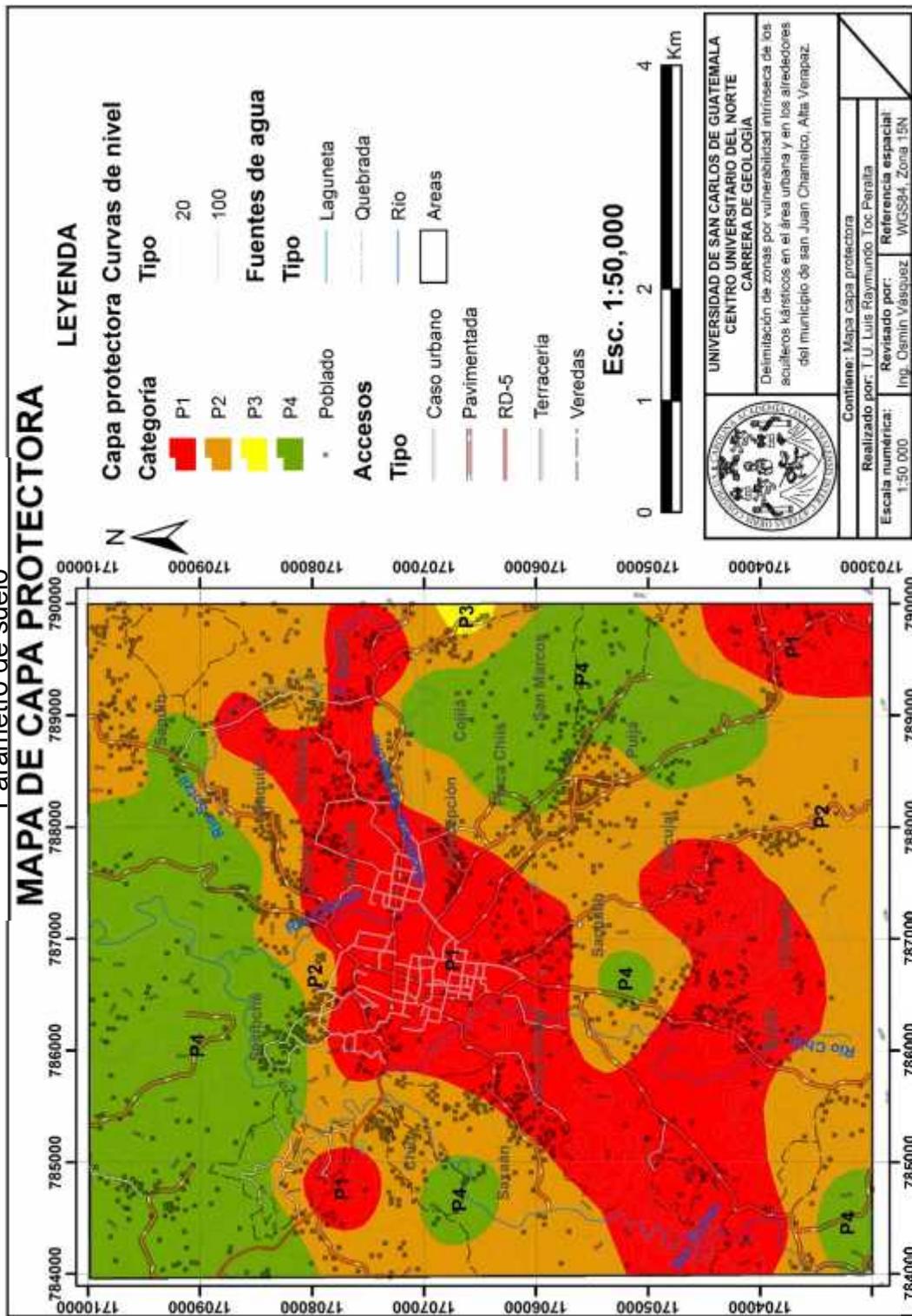
Y finalmente esta la categoría P4 con un 29,55 % del área de investigación, estos suelos poseen más del 40 % de arcillas, forman una buena capa protectora para la mayoría de contaminantes, ya que por su textura no permite mayor infiltración al acuífero kárstico. Esta zona se encuentra al noroeste, sureste y en pequeñas porciones al suroeste del área, sobre ella se encuentran las comunidades o aldeas de San Marcos en su parte norte y sureste, Puljá, Chibulbub, la parte norte de Sesibché, Chivencab y parte de la carretera a San Pedro Carchá, geológicamente está formada por la Formación Cobán Superior e Inferior. (ver mapa 5)

**TABLA 9**  
**Textura de muestras recolectadas**

| MUESTRA | ARCILLA % | ARENA % | LIMO % | TEXTURA                |
|---------|-----------|---------|--------|------------------------|
| MS1     | 64        | 27      | 9      | Arcillosa              |
| MS2     | 19        | 64      | 17     | Franco arenosa         |
| MS3     | 28        | 58      | 14     | Franco arcillo arenosa |
| MS4     | 4         | 83      | 13     | Areno francosa         |
| MS5     | 5         | 82      | 13     | Areno francosa         |
| MS6     | 46        | 44      | 10     | Arcillosa              |
| MS7     | 29        | 60      | 11     | Franco arcillo arenosa |
| MS8     | 30        | 46      | 24     | Franco arcillo arenosa |
| MS9     | 19        | 71      | 10     | Franco arenosa         |
| MS10    | 30        | 47      | 23     | Franco arcillo arenosa |
| MS11    | 20        | 63      | 17     | Franco arenosa         |
| MS12    | 13        | 71      | 16     | Franco arenosa         |
| MS13    | 51        | 33      | 16     | Arcillosa              |
| MS14    | 65        | 5       | 30     | Arcillosa              |
| MS15    | 21        | 54      | 25     | Franco arcillo arenosa |
| MS16    | 31        | 44      | 25     | Franco arcillosa       |
| MS17    | 15        | 70      | 15     | Franco arenosa         |
| MS18    | 23        | 68      | 9      | Franco arcillo arenosa |
| MS19    | 27        | 63      | 10     | Franco arcillo arenosa |
| MS20    | 15        | 64      | 21     | Franco arenosa         |
| MS21    | 12        | 69      | 19     | Franco arenosa         |
| MS22    | 65        | 28      | 7      | Arcillosa              |
| MS23    | 59        | 39      | 2      | Arcillosa              |
| MS24    | 15        | 77      | 8      | Franco arenosa         |
| MS25    | 18        | 68      | 14     | Franco arenosa         |
| MS26    | 18        | 63      | 19     | Franco arenosa         |
| MS27    | 17        | 68      | 15     | Franco arenosa         |
| MS28    | 24        | 55      | 21     | Franco arcillo arenosa |
| MS29    | 19        | 69      | 12     | Franco arenosa         |
| MS30    | 24        | 57      | 19     | Franco arcillo arenosa |
| MS31    | 41        | 40      | 19     | Arcillosa              |
| MS32    | 23        | 59      | 18     | Franco arcillo arenosa |
| MS33    | 17        | 75      | 8      | Franco arenosa         |
| MS34    | 70        | 27      | 3      | Arcillosa              |
| MS35    | 61        | 34      | 5      | Arcillosa              |
| MS36    | 67        | 30      | 3      | Arcillosa              |
| MS37    | 56        | 38      | 6      | Arcillosa              |
| MS38    | 67        | 27      | 6      | Arcillosa              |
| MS39    | 47        | 38      | 15     | Arcillosa              |
| MS40    | 46        | 34      | 20     | Arcillosa              |
| MS41    | 60        | 24      | 16     | Arcillosa              |
| MS42    | 66        | 19      | 15     | Arcillosa              |

Fuente: Investigación de campo. 2 016.

MAPA 5  
Parámetro de suelo



Fuente: Investigación de campo. 2016.

### 3.3 PARÁMETRO DE CONDICIONES DE INFILTRACIÓN (I)

Se define este parámetro a partir de la velocidad de infiltración básica de cada muestra realizada (ver anexo 3), en este caso fueron 42 como se muestra en la tabla 10, se determinó esta velocidad ya que ésta permanece constante cuando el suelo se satura, lo que indica la capacidad que tiene el suelo de permitir la conducción de agua.

De acuerdo a la metodología propuesta en el capítulo anterior, el parámetro de infiltración se divide en 4 categorías, donde la de mayor velocidad es I1 y la de menor velocidad I4.

La primera categoría es I1, representa el 21,5 % del área, se encuentra en el centro, norte, noreste y suroeste, en las comunidades de Saquijá, Chexená, Chiché, parte de San Luis y Cojilá, la velocidad de infiltración básica es mayor o igual a 2 cm/h, con suelos de textura franco arenosa, franco arcillo arenosa y areno francosa, sobre la geología de unidades cuaternarias y la Formación Cobán Inferior.

La segunda categoría es I2 que contiene el 53,5 %, esta zona se encuentra distribuida en el área, presenta un mayor porcentaje en la parte sur, algunas comunidades como Sequib, Sotzil, San Marcos, Sachalib, Saxaán y Chivencab, se encuentran en esta parte, la velocidad de infiltración básica va de 0,50 cm/h a 2 cm/h, formada por suelos franco arenosa y franco arcillo arenosa, la geología de esta zona son unidades del cuaternario, la Formación Cobán y Todos Santos.

La categoría I3 representa el 23,3 % del área de investigación, esta zona se encuentra al noroeste y sureste, las comunidades de Chibulbub, Chirreaj, La Esperanza y Chimox, se encuentran en esta zona, su velocidad de infiltración va de 0,10 cm/h a 0,50 cm/h, formada por suelos arcillosas y franco arenosas; la Formación Cobán se encuentra en esta zona.

Y por último la categoría I4 con 1,7 % al sureste del área, por suelos arcillosos con una velocidad de menor a 0,10 cm/h; esta zona es la menos probable de contaminación intrínseca, en cuanto a su geología pues se encuentra sobre la Formación Cobán Inferior.

Es importante mencionar que la velocidad de infiltración básica no solo depende de la textura del suelo, sino que también de factores como su espesor, porosidad, fabrica y compactación. En la tabla 10 se observa las coordenadas en *UTM* de las muestras de infiltración y en el mapa 6 su ubicación en el área de estudio.

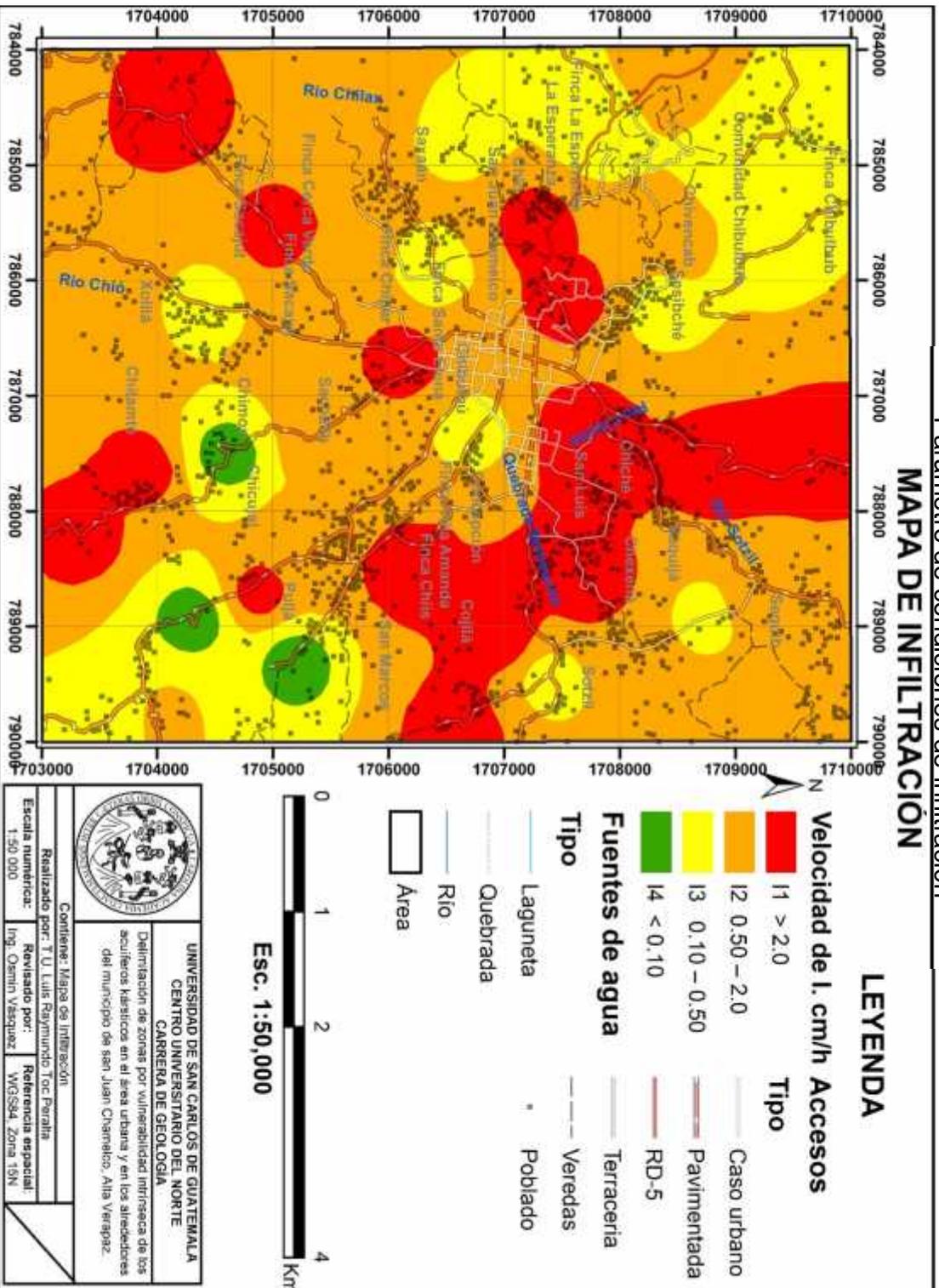
**TABLA 10**  
Velocidad de infiltración en el área de investigación

| Muestra | Este (X) | Norte (Y) | Vel. de Infiltración (cm/h) | Muestra | Este (X) | Norte (Y) | Vel. de Infiltración (cm/h) |
|---------|----------|-----------|-----------------------------|---------|----------|-----------|-----------------------------|
| MI01    | 784503   | 1703161   | 0,2                         | MI22    | 787498   | 1709749   | 2,63                        |
| MI02    | 784565   | 1704010   | 0,256                       | MI23    | 787603   | 1708873   | 3,23                        |
| MI03    | 785748   | 1703615   | 0,55                        | MI24    | 787424   | 1707675   | 2,21                        |
| MI04    | 785633   | 1705042   | 4,35                        | MI25    | 787317   | 1706729   | 0,21                        |
| MI05    | 786198   | 1704450   | 0,42                        | MI26    | 786690   | 1706088   | 4,17                        |
| MI06    | 786633   | 1705200   | 0,8                         | MI27    | 786127   | 1707570   | 3,55                        |
| MI07    | 788271   | 1703349   | 2,65                        | MI28    | 784517   | 1705794   | 1,96                        |
| MI08    | 787635   | 1703891   | 2,68                        | MI29    | 785925   | 1706395   | 0,24                        |
| MI09    | 787510   | 1704607   | 0,02                        | MI30    | 785967   | 1705370   | 0,51                        |
| MI10    | 787388   | 1705296   | 0,56                        | MI31    | 784726   | 1706666   | 0,23                        |
| MI11    | 789660   | 1703744   | 0,3                         | MI32    | 785497   | 1707271   | 5,38                        |
| MI12    | 789753   | 1704038   | 0,79                        | MI33    | 784758   | 1707765   | 0,29                        |
| MI13    | 788709   | 1704880   | 5,15                        | MI34    | 784286   | 1708489   | 1,1                         |
| MI14    | 789315   | 1705198   | 0,1                         | MI35    | 785727   | 1709254   | 0,49                        |
| MI15    | 788362   | 1705307   | 0,97                        | MI36    | 784920   | 1709077   | 0,12                        |
| MI16    | 789939   | 1706570   | 2,42                        | MI37    | 786268   | 1708392   | 0,5                         |
| MI17    | 789468   | 1707417   | 0,16                        | MI38    | 785672   | 1708481   | 1,2                         |
| MI18    | 789004   | 1709962   | 0,82                        | MI39    | 788766   | 1709093   | 0,55                        |
| MI19    | 789093   | 1708164   | 1                           | MI40    | 789089   | 1706965   | 2,6                         |
| MI20    | 788902   | 1708719   | 0,2                         | MI41    | 788933   | 1704302   | 0,07                        |
| MI21    | 788667   | 1707808   | 2,3                         | MI42    | 788549   | 1706110   | 5,22                        |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

MAPA 6

Parámetro de condiciones de infiltración



### 3.4 PARÁMETRO DE DESARROLLO KÁRSTICO (K)

Este parámetro se definió por medio de la morfología kárstica presente o ausente en el área de investigación. Se realizó de manera directa por medio de la observación en el campo, fotografías aéreas, orto fotos, mapas topográficos, nacimientos de agua, mapa de dolinas y mapa de *epikarst*. Se delimitaron zonas por el grado de desarrollo kárstico (cuevas, sumideros, dolinas, depresiones) presentes.

En el mapa 7 se observa la distribución espacial de este parámetro K, las categorías se dividen según de su desarrollo kárstico de la siguiente manera:

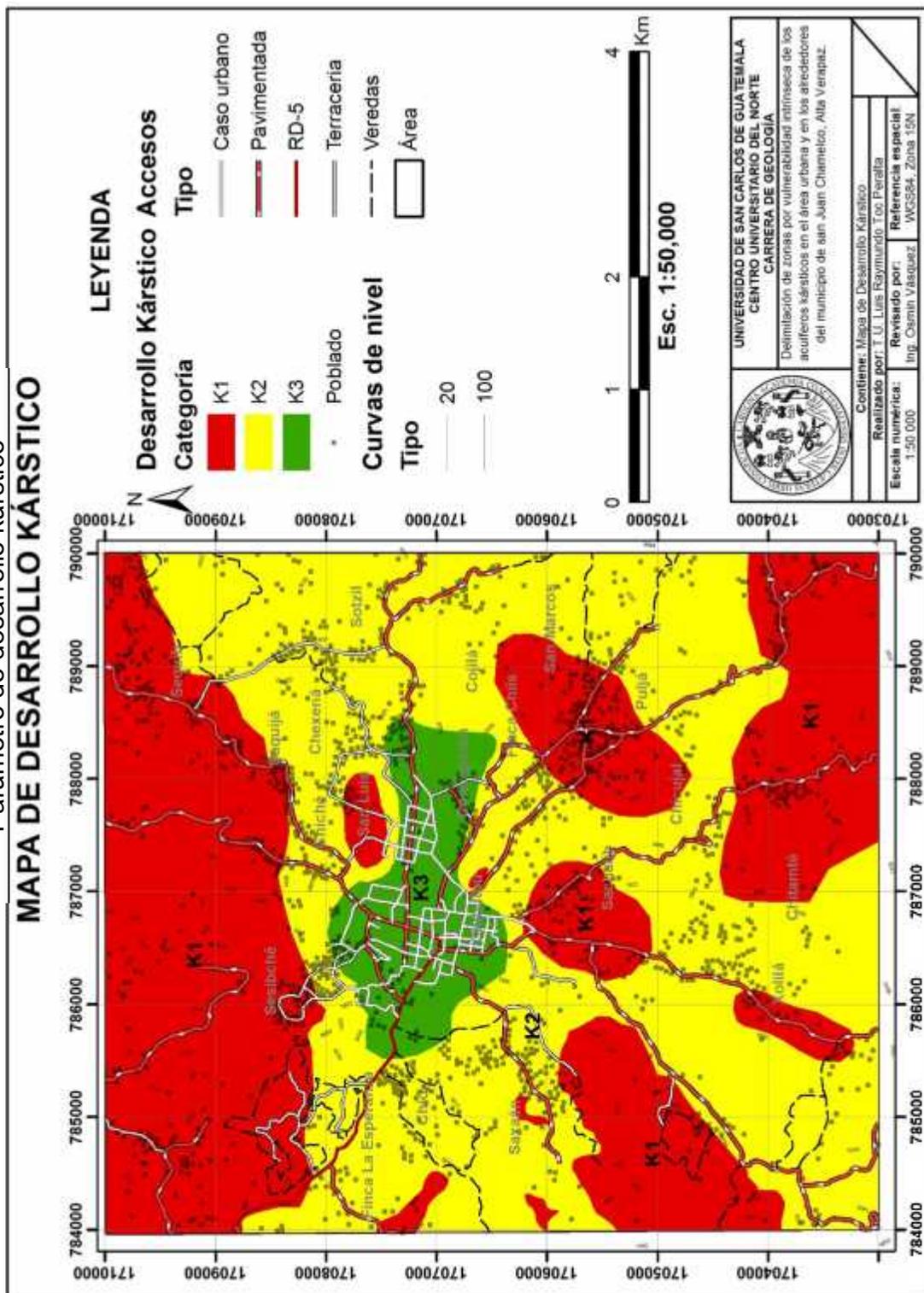
La primera categoría K1 contiene el 42,63 % del área; es la más propensa a una contaminación intrínseca por tener un buen desarrollo kárstico, la mayoría de las comunidades se encuentran en esta parte, como Chibulbub, Chivencab, Sesibché, la parte norte de Saquijá, Sequib, parte de San Luis, Sachalib, Chicujal, entre otras como se muestra en el mapa 7. Se encuentra al norte, sur y este del área, la mayoría de depresiones, dolinas, nacimientos de agua y cuevas como la llamada Ma XiWan en la comunidad de Chicujal, se encuentran en esta zona. (ver mapa 8)

La segunda categoría K2 tiene el 50,58 % del área al centro y sur; presenta una escasa cantidad de geoformas por desarrollo kárstico. Esta zona tiene menor probabilidad a ser contaminada como la K1, las comunidades de Chimoj, Chexená, Sotzil, Saxán, Puljá y Chiché son algunas que se encuentran en esta zona.

Y por último se tiene la categoría K3 con un 6,79 %, se encuentra en la parte central del área, en el casco urbano de San Juan Chamelco, con una ausencia de desarrollo sobre unidades del cuaternario y la Formación Cobán Inferior.

Un acuífero tiene relación con el grado de desarrollo que puede presentar en la superficie, por esta razón se puede delimitar la K1 como la zona más vulnerable a una contaminación, la cual se reflejara de igual manera en los factores de infiltración y capa protectora.

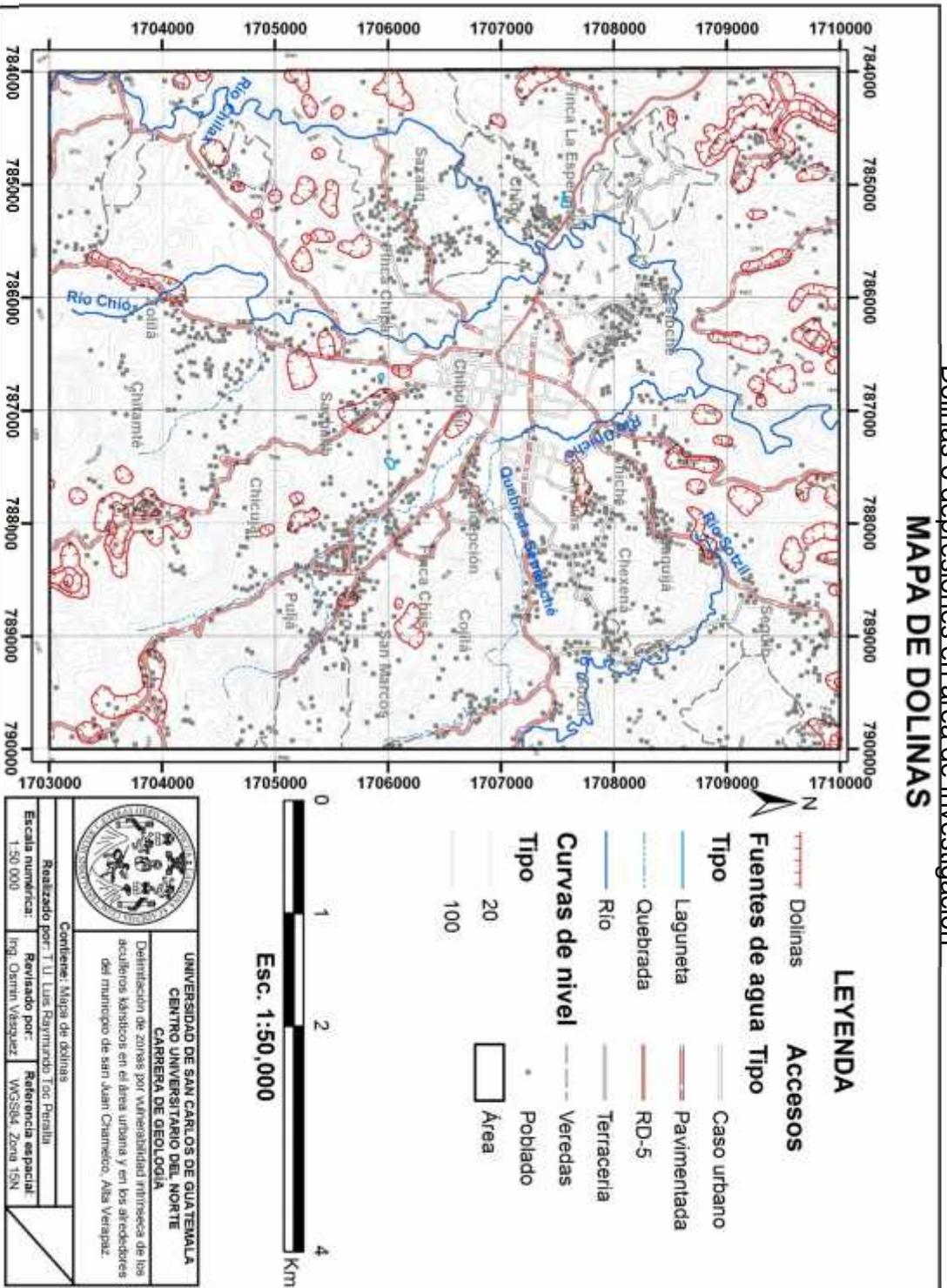
MAPA 7  
Parámetro de desarrollo kárstico



Fuente: Investigación de campo. 2016.

Dolinas o depresiones en área de investigación

MAPA DE DOLINAS



Fuente: Investigación de campo. 2016.

### 3.5 MAPA DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA

La aplicación de la metodología fue por medio del álgebra de mapas en tipo *Raster*, sumados o superpuestos por medio de la calculadora de mapas *Raster*, esto analizado por el programa *ArcGis*. Para comprobar y realizar correcciones a este mapa se calculó manualmente la vulnerabilidad de cada estación de muestra (ver anexo 4).

Con ambos resultados (manual y por *ArcGis*), se definen las zonas de la siguiente manera.

Muy alta (9-19), esta zona tiene el 20,67 % del área de investigación, se encuentran las comunidades o aldeas como Chibulbub, finca La Esperanza, parte de Sesibché, la parte norte de Sequib, sur del barrio San Luis, Sachalib, Chicujal y otras áreas que se pueden observar en el mapa 9.

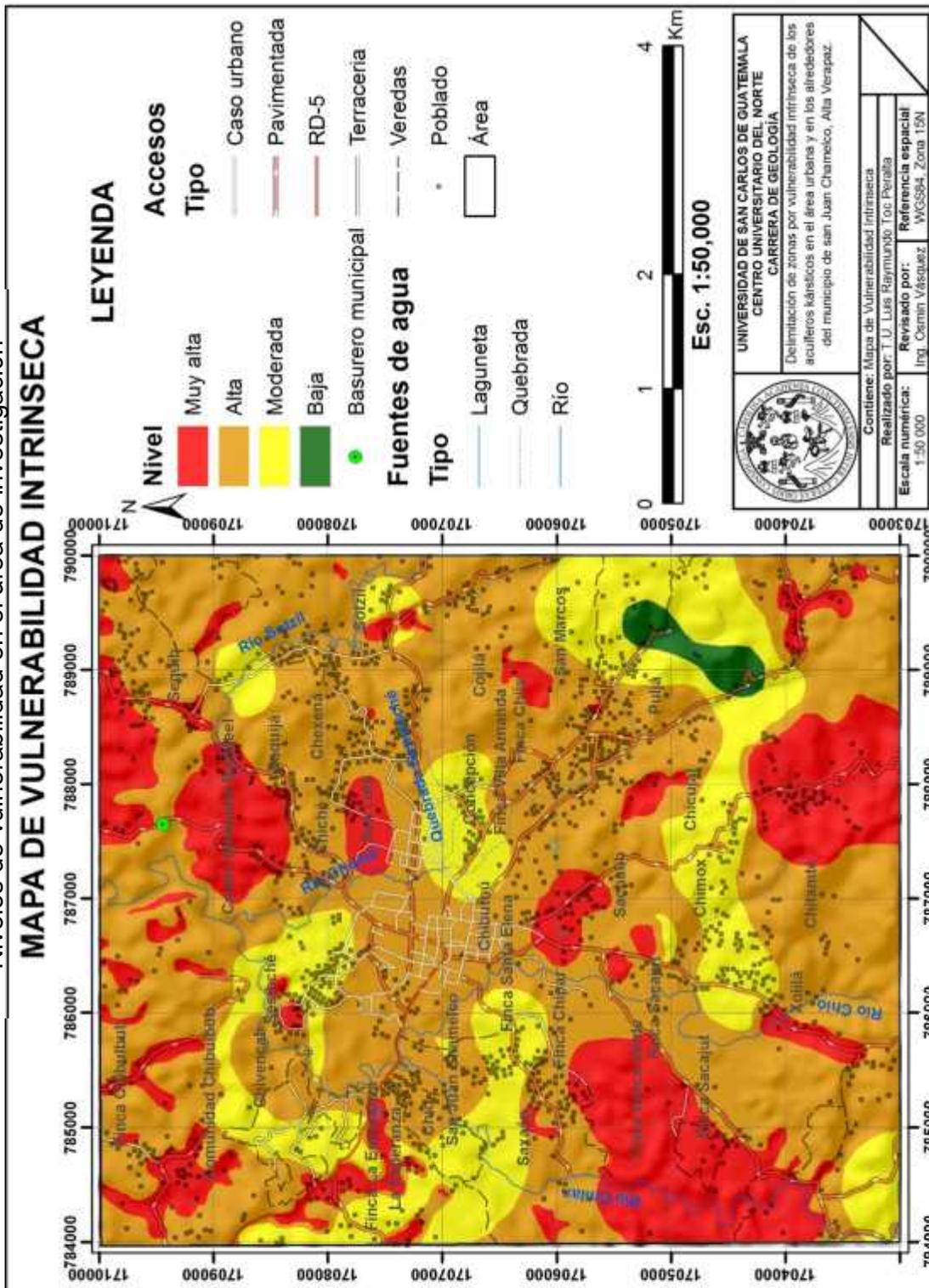
Esta zona es la más vulnerable a la mayoría de los contaminantes del agua y su impacto es bastante rápido en muchas situaciones de contaminación, además que se encuentra sobre la Formación Cobán, rocas que tienen una morfología de montañas kársticas altas y bajas, lo que indica que presentan un desarrollo alto, haciéndola vulnerable a una contaminación.

Alta (20-25), tiene el 59,63 % del área, esta zona se encuentra en todas las direcciones, las comunidades Chió, parte de Chivencab, parte de Saquijá, al sur de Sequib, barrio San Luis, San Marcos y el casco urbano de San Juan Chamelco. (Ver mapa 9)

En los 42 km<sup>2</sup> del área de interés, esta zona es la más grande en extensión, tiene el basurero municipal que se encuentra al norte en dirección a San Pedro Carcha, esta ubicación es un foco de contaminación, ya que esta zona es definida por ser muy vulnerable a muchos contaminantes.

Moderada (>25) y baja (>25, P4 + I3, 4), estas zonas cubren el resto del área, la moderada se encuentra en la parte central, noroeste y sureste, en zonas donde existe población. Esta zona es vulnerable a algunos contaminantes, pero solo cuando se vierten directamente o se lixivian.

MAPA 9  
Niveles de vulnerabilidad en el área de investigación



Fuente: Investigación de campo. 2016.



## CONCLUSIONES

### General

En el área de investigación se determinaron 4 zonas vulnerables a contaminación siendo las principales la muy alta con el 20,67 % de área, alta con un 59,63 %; es la más grande e incluye comunidades como Chió, Chivencab, Saquijá, barrio San Luis y el basurero municipal.

### Específicas

- a. Con base a las 42 muestras de suelo, se determinaron arcillas al *NW* y *SE* con un 29,55 % del área de investigación, franco arenoso en la parte central y *SW* con un 33,29 %, franco arcillo arenosa en forma de franja con dirección *NE-SW* con el 36,91 % y por último con un 0,25 % del área suelos de 25 % a 40 % de arcilla (franco arcilloso).
- b. La infiltración predominante del área es de 0,50 cm/h a 2 cm/h con un 53,5 %, encontrándose en suelo franco arcillo arenoso principalmente, de 0,10 cm/h a 0,50 cm/h el 23,3 % son suelos arcillosos al *NW-SE* y el 21,5 % mayor a 2 cm/h son suelo franco arenoso en la parte *NE*.
- c. Las zonas de muy alta vulnerabilidad a una contaminación intrínseca se encuentran al norte y sur del área, donde existe un mayor desarrollo kárstico, en esta zona la contaminación puede ser de manera rápida por las condiciones que presenta y en menor velocidad en zona alta que posee similitud de condiciones.

- d. El casco urbano de San Juan Chamelco presenta una vulnerabilidad alta a moderada, esto indica que puede ser contaminada de manera rápida, directa o por lixiviación.
- e. El basurero municipal se encuentra en una zona de vulnerabilidad alta de una contaminación intrínseca, lo cual hace que este sea un foco de contaminación directa al agua subterránea.

## RECOMENDACIONES

1. Promover y apoyar medidas de prevención a la contaminación del recurso hídrico, así como establecer jornadas de capacitación a las autoridades comunitarias (COCODES), municipales, organizaciones gubernamentales, escuelas, institutos y a la población en general con relación al cuidado que se debe de tener al agua subterránea.
2. A partir del mapa realizado, implementar planes estratégicos para un mejor ordenamiento territorial, al considerar parámetros geológicos e hidrológicos.
3. Realizar un estudio de impacto ambiental en el basurero municipal, para determinar el grado de contaminación que este ha ocasionado, específicamente al recurso agua subterránea.



## BIBLIOGRAFÍA

- Auge, Miguel. *Vulnerabilidad de acuíferos, conceptos y métodos*. Buenos Aires, Argentina: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas., 2004.
- Chiquín Marroquín, Luis G. *Caracterización Geológica del Karst del cuadrángulo Cobán escala 1: 50 000*. Tesis de Ingeniero Geólogo. Centro Universitario del Norte. Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán, Alta Verapaz. Guatemala: Carrera de Geología., 2003.
- Chiquín Yoj, Mauricio (Comp.) *Norte y Centro América: Bloque Maya y Chortís*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Dirección General de Investigación., 2000.
- Doerfliger N. Et.al *Practical Guide. Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK)*. Suiza: Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape., 1998.
- Duque Escobar, Gonzalo. *Manual de Geología para Ingenieros, Aguas Subterráneas*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia., 2014.
- Hammouri, N. Et.al *GIS based Hydrogeological Vulnerability Mapping of Groundwater Resources in Jerash Area – Jordan*. Jordania: Department of Earth and Environmental Sciences., 2007.
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España –ITGE-. *Vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, importancia de la protección de las aguas subterráneas*. España: ITGE., 1995.
- . *Protección de las captaciones de abastecimientos urbano de medios kársticos. Métodos y consideraciones específicas*. España: ITGE., 2014.
- Machorro Sagastume, Rudy. Et Al. *Evaluación hidrogeológica de Alta Verapaz*. Guatemala: Secretaria Nacional de Ciencia y Tecnología., 2005.
- Margat J. *Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine á la pollution. Bases de sa cartographie*. Orléans, France: Bureau de Recherches Géologiques et Minières., 1968.

- Martínez Navarrete, Carlos. Et al. *Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio*. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España. 2003.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales –MARN-. *Documento base del pacto ambiental en Guatemala 2016-2020*. Guatemala: MARN., 2016.
- Reiche de la Cruz, Andrea María. *Análisis e identificación de zonas vulnerables a la contaminación intrínseca de acuíferos cársticos, por medio del método EPIK, en el municipio de Santa Cruz Verapaz, A.V.* Tesis de Ingeniero Geólogo. Centro Universitario del Norte. Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán, Alta Verapaz. Guatemala: Carrera de Geología., 2015.
- Solares García, Sergio Estuardo. *Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos Kársticos en el área urbana y los alrededores del municipio de Cobán, Alta Verapaz*. Tesis de Ingeniero Geólogo. Centro Universitario del Norte. Universidad de San Carlos de Guatemala. Cobán, Alta Verapaz. Guatemala: Carrera de Geología., 2015.
- Vías, J.M. Et.al *A comparative study of four schemes for groundwater vulnerability mapping in a diffuse flow carbonate aquifer under Mediterranean climatic conditions*. Málaga, España: Department of Geography, University of Málaga., 2004.

V.ºB.º



---

Adán García Móliz  
Licenciado en Pedagogía e Investigación Educativa  
Bibliotecario

## **ANEXOS**



**ANEXO 1**  
Puntos de muestras de suelo e infiltración en coordenadas *UTM*

| <b>X</b>      | <b>Y</b> | <b>Muestra de suelo e Infiltración</b> |
|---------------|----------|--|
| <b>784503</b> | 1703161  | MS1                                    |
| <b>784565</b> | 1704010  | MS2                                    |
| <b>785748</b> | 1703615  | MS3                                    |
| <b>785633</b> | 1705042  | MS4                                    |
| <b>786198</b> | 1704450  | MS5                                    |
| <b>786633</b> | 1705200  | MS6                                    |
| <b>788271</b> | 1703349  | MS7                                    |
| <b>787635</b> | 1703891  | MS8                                    |
| <b>787510</b> | 1704607  | MS9                                    |
| <b>787388</b> | 1705296  | MS10                                   |
| <b>789660</b> | 1703744  | MS11                                   |
| <b>789753</b> | 1704038  | MS12                                   |
| <b>788709</b> | 1704880  | MS13                                   |
| <b>789315</b> | 1705198  | MS14                                   |
| <b>788362</b> | 1705307  | MS15                                   |
| <b>789939</b> | 1706570  | MS16                                   |
| <b>789468</b> | 1707417  | MS17                                   |
| <b>789004</b> | 1709962  | MS18                                   |
| <b>789093</b> | 1708164  | MS19                                   |
| <b>788902</b> | 1708719  | MS20                                   |
| <b>788667</b> | 1707808  | MS21                                   |
| <b>787498</b> | 1709749  | MS22                                   |
| <b>787603</b> | 1708873  | MS23                                   |
| <b>787424</b> | 1707675  | MS24                                   |
| <b>787317</b> | 1706729  | MS25                                   |
| <b>786690</b> | 1706088  | MS26                                   |
| <b>786127</b> | 1707570  | MS27                                   |
| <b>784517</b> | 1705794  | MS28                                   |
| <b>785925</b> | 1706395  | MS29                                   |
| <b>785967</b> | 1705370  | MS30                                   |
| <b>784726</b> | 1706666  | MS31                                   |
| <b>785497</b> | 1707271  | MS32                                   |
| <b>784758</b> | 1707765  | MS33                                   |
| <b>784286</b> | 1708489  | MS34                                   |
| <b>785727</b> | 1709254  | MS35                                   |
| <b>784920</b> | 1709077  | MS36                                   |
| <b>786268</b> | 1708392  | MS37                                   |
| <b>785672</b> | 1708481  | MS38                                   |
| <b>788766</b> | 1709093  | MS39                                   |
| <b>789089</b> | 1706965  | MS40                                   |
| <b>788933</b> | 1704302  | MS41                                   |
| <b>788549</b> | 1706110  | MS42                                   |

**Fuente:** Investigación de campo, 2016.



## ANEXO 2

## Datos de laboratorio y diagrama ternario de las muestras recolectadas

| DATOS DE MUESTRA MS1            |       |                       |    |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 64 |                       |    |
| Peso suelo seco (g)             | 40    | Porcentaje de limo    | 9  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 32    | Porcentaje de arena   | 27 |                       |    |
| Temperatura 40" (°C)            | 22    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3,5   |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 23    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 29,22 |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 26,5  |                       |    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 24    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 2,5   |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 23    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 25,44 |                       |    |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 25,44 |                       |    |                       |    |
| Gramos de limo                  | 3,78  |                       |    |                       |    |
| Gramos de arena                 | 10,78 |                       |    |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA MS2            |       |                       |    |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 100   |                       |    | Porcentaje de arcilla | 19 |
| Peso suelo seco (g)             | 80    | Porcentaje de limo    | 17 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 31    | Porcentaje de arena   | 64 |                       |    |
| Temperatura 40" (°C)            | 22    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 21    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 28,72 |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 16,5  |                       |    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 23,5  |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,26  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 2,5   |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 23    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 15,26 |                       |    |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 15,26 |                       |    |                       |    |
| Gramos de limo                  | 13,46 |                       |    |                       |    |
| Gramos de arena                 | 51,28 |                       |    |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA<br>MS3         |       |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 28 |
| Peso suelo seco (g)             | 25    | Porcentaje de limo    | 14 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 12    | Porcentaje de arena   | 58 |
| Temperatura 40" (°C)            | 24    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 22    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 10,44 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 8     |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 24    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 2,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 24    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 6,94  |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 6,94  |                       |    |
| Gramos de limo                  | 3,5   |                       |    |
| Gramos de arena                 | 14,56 |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA<br>MS4         |       |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 4  |
| Peso suelo seco (g)             | 20    | Porcentaje de limo    | 13 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 6     | Porcentaje de arena   | 83 |
| Temperatura 40" (°C)            | 22,5  |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,9   |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 22    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 3,4   |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 4     |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 22    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 4     |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 22    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 0,72  |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 0,72  |                       |    |
| Gramos de limo                  | 2,68  |                       |    |
| Gramos de arena                 | 16,6  |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA MS5            |       |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 5  |
| Peso suelo seco (g)             | 20    | Porcentaje de limo    | 13 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 6     | Porcentaje de arena   | 82 |
| Temperatura 40" (°C)            | 23    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 22    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 3,58  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 3,5   |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 23    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 22    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 1,08  |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 1,08  |                       |    |
| Gramos de limo                  | 2,5   |                       |    |
| Gramos de arena                 | 16,42 |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA MS6            |       |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 46 |
| Peso suelo seco (g)             | 35    | Porcentaje de limo    | 10 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 21    | Porcentaje de arena   | 44 |
| Temperatura 40" (°C)            | 24    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 22    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 19,44 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 17    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 24    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 2,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 24    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 15,94 |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 15,94 |                       |    |
| Gramos de limo                  | 3,5   |                       |    |
| Gramos de arena                 | 15,56 |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA<br>MS7         |       |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 29 |
| Peso suelo seco (g)             | 40    | Porcentaje de limo    | 11 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 18    | Porcentaje de arena   | 60 |
| Temperatura 40" (°C)            | 24    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 22    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 15,94 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 12    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 24    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 2     |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 24    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 11,44 |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 11,44 |                       |    |
| Gramos de limo                  | 4,5   |                       |    |
| Gramos de arena                 | 24,06 |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA<br>MS8         |       |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 30 |
| Peso suelo seco (g)             | 35    | Porcentaje de limo    | 24 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 20    | Porcentaje de arena   | 46 |
| Temperatura 40" (°C)            | 24    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 2,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 22,05 |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 18,94 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 11,5  |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 24,5  |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,62  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 2,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 24    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 10,62 |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 10,62 |                       |    |
| Gramos de limo                  | 8,32  |                       |    |
| Gramos de arena                 | 16,06 |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA<br>MS9         |       |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 100   | Porcentaje de arcilla | 19 |
| Peso suelo seco (g)             | 85    | Porcentaje de limo    | 11 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 26    | Porcentaje de arena   | 71 |
| Temperatura 40" (°C)            | 24    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 2,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 23    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 24,94 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 16,5  |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 24    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 2     |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 24    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 15,94 |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 15,94 |                       |    |
| Gramos de limo                  | 9     |                       |    |
| Gramos de arena                 | 60,06 |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA<br>MS10        |       |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 30 |
| Peso suelo seco (g)             | 30    | Porcentaje de limo    | 23 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 17    | Porcentaje de arena   | 47 |
| Temperatura 40" (°C)            | 24    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 2,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 23    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 15,94 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 9,5   |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 24,5  |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,62  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 2     |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 24    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 9,12  |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 9,12  |                       |    |
| Gramos de limo                  | 6,82  |                       |    |
| Gramos de arena                 | 14,06 |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA<br>MS11        |       |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 20 |
| Peso suelo seco (g)             | 25    | Porcentaje de limo    | 17 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 12    | Porcentaje de arena   | 63 |
| Temperatura 40" (°C)            | 22    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 20    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 9,22  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 7     |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 23    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 22    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 5,08  |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 5,08  |                       |    |
| Gramos de limo                  | 4,14  |                       |    |
| Gramos de arena                 | 15,78 |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA<br>MS12        |       |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 13 |
| Peso suelo seco (g)             | 35    | Porcentaje de limo    | 16 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 13    | Porcentaje de arena   | 71 |
| Temperatura 40" (°C)            | 22    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 20    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 10,22 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 7     |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 22    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 22    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 4,72  |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 4,72  |                       |    |
| Gramos de limo                  | 5,5   |                       |    |
| Gramos de arena                 | 24,78 |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA<br>MS13        |       |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 100   | Porcentaje de arcilla | 51 |
| Peso suelo seco (g)             | 90    | Porcentaje de limo    | 16 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 62    | Porcentaje de arena   | 33 |
| Temperatura 40" (°C)            | 23    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 22    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 60,08 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 48    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 23    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 22,5  |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 46,08 |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 46,08 |                       |    |
| Gramos de limo                  | 14    |                       |    |
| Gramos de arena                 | 29,92 |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA<br>MS14        |       |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 65 |
| Peso suelo seco (g)             | 35    | Porcentaje de limo    | 30 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 36    | Porcentaje de arena   | 5  |
| Temperatura 40" (°C)            | 22    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 21    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 33,22 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 25    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 23    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 22    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 22,58 |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 22,58 |                       |    |
| Gramos de limo                  | 10,64 |                       |    |
| Gramos de arena                 | 1,78  |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA<br>MS15        |       |                       |    |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 100   | Porcentaje de arcilla | 21 |                       |    |
| Peso suelo seco (g)             | 85    | Porcentaje de limo    | 25 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 41,5  | Porcentaje de arena   | 54 |                       |    |
| Temperatura 40" (°C)            | 22    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 22    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 39,22 |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 20    |                       |    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 22    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 23    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 17,72 |                       |    |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 17,72 |                       |    |                       |    |
| Gramos de limo                  | 21,5  |                       |    |                       |    |
| Gramos de arena                 | 45,78 |                       |    |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA<br>MS16        |       |                       |    |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    |                       |    | Porcentaje de arcilla | 31 |
| Peso suelo seco (g)             | 35    | Porcentaje de limo    | 25 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 22    | Porcentaje de arena   | 44 |                       |    |
| Temperatura 40" (°C)            | 23    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3,5   |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 22    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 19,58 |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 13    |                       |    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 22,5  |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,9   |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 22    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 10,9  |                       |    |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 10,9  |                       |    |                       |    |
| Gramos de limo                  | 8,68  |                       |    |                       |    |
| Gramos de arena                 | 15,42 |                       |    |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA MS17           |       |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 100   | Porcentaje de arcilla | 15 |
| Peso suelo seco (g)             | 80    | Porcentaje de limo    | 15 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 26    | Porcentaje de arena   | 70 |
| Temperatura 40" (°C)            | 22    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 22    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 23,72 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 14    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 22    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 23    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 11,72 |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 11,72 |                       |    |
| Gramos de limo                  | 12    |                       |    |
| Gramos de arena                 | 56,28 |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA MS18           |       |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 23 |
| Peso suelo seco (g)             | 35    | Porcentaje de limo    | 9  |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 13    | Porcentaje de arena   | 68 |
| Temperatura 40" (°C)            | 23    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 22    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 11,08 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 10    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 23    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 22    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 8,08  |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 8,08  |                       |    |
| Gramos de limo                  | 3     |                       |    |
| Gramos de arena                 | 23,92 |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA<br>MS19        |       |                       |    |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 100   | Porcentaje de arcilla | 27 |                       |    |
| Peso suelo seco (g)             | 70    | Porcentaje de limo    | 10 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 28    | Porcentaje de arena   | 63 |                       |    |
| Temperatura 40" (°C)            | 23    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 22    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 26,08 |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 21    |                       |    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 23    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 22    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 19,08 |                       |    |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 19,08 |                       |    |                       |    |
| Gramos de limo                  | 7     |                       |    |                       |    |
| Gramos de arena                 | 43,92 |                       |    |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA<br>MS20        |       |                       |    |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 100   |                       |    | Porcentaje de arcilla | 15 |
| Peso suelo seco (g)             | 60    | Porcentaje de limo    | 22 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 24    | Porcentaje de arena   | 64 |                       |    |
| Temperatura 40" (°C)            | 22,5  |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,9   |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 22    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 21,9  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 11    |                       |    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 22    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 22,5  |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 8,72  |                       |    |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 8,72  |                       |    |                       |    |
| Gramos de limo                  | 13,18 |                       |    |                       |    |
| Gramos de arena                 | 38,1  |                       |    |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA<br>MS21        |       |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 12 |
| Peso suelo seco (g)             | 25    | Porcentaje de limo    | 19 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 10    | Porcentaje de arena   | 69 |
| Temperatura 40" (°C)            | 22    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 20    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 7,72  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 5     |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 22,5  |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,9   |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 22    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 2,9   |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 2,9   |                       |    |
| Gramos de limo                  | 4,82  |                       |    |
| Gramos de arena                 | 17,28 |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA<br>MS22        |       |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 100   | Porcentaje de arcilla | 65 |
| Peso suelo seco (g)             | 75    | Porcentaje de limo    | 8  |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 57    | Porcentaje de arena   | 27 |
| Temperatura 40" (°C)            | 21    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,36  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 20    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 54,36 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 51    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 22    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 23    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 48,72 |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 48,72 |                       |    |
| Gramos de limo                  | 5,64  |                       |    |
| Gramos de arena                 | 20,64 |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA<br>MS23        |       |                       |    |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 100   | Porcentaje de arcilla | 59 |                       |    |
| Peso suelo seco (g)             | 80    | Porcentaje de limo    | 1  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 51    | Porcentaje de arena   | 40 |                       |    |
| Temperatura 40" (°C)            | 22    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 20    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 48,72 |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 49,5  |                       |    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 23    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 23    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 47,58 |                       |    |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 47,58 |                       |    |                       |    |
| Gramos de limo                  | 1,14  |                       |    |                       |    |
| Gramos de arena                 | 31,28 |                       |    |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA<br>MS24        |       |                       |    |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    |                       |    | Porcentaje de arcilla | 15 |
| Peso suelo seco (g)             | 30    | Porcentaje de limo    | 9  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 10    | Porcentaje de arena   | 77 |                       |    |
| Temperatura 40" (°C)            | 20    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0     |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 21    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 7     |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 6     |                       |    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 24    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 23    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 4,44  |                       |    |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 4,44  |                       |    |                       |    |
| Gramos de limo                  | 2,56  |                       |    |                       |    |
| Gramos de arena                 | 23    |                       |    |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA<br>MS25        |       |                       |    |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 18 |                       |    |
| Peso suelo seco (g)             | 35    | Porcentaje de limo    | 13 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 13    | Porcentaje de arena   | 68 |                       |    |
| Temperatura 40" (°C)            | 23    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 23    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 11,08 |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 7,5   |                       |    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 24    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 2,5   |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 24,5  |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 6,44  |                       |    |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 6,44  |                       |    |                       |    |
| Gramos de limo                  | 4,64  |                       |    |                       |    |
| Gramos de arena                 | 23,92 |                       |    |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA<br>MS26        |       |                       |    |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    |                       |    | Porcentaje de arcilla | 18 |
| Peso suelo seco (g)             | 25    | Porcentaje de limo    | 19 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 12    | Porcentaje de arena   | 63 |                       |    |
| Temperatura 40" (°C)            | 22    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3,5   |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 22    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 9,22  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 6     |                       |    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 24    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 23    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 4,44  |                       |    |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 4,44  |                       |    |                       |    |
| Gramos de limo                  | 4,78  |                       |    |                       |    |
| Gramos de arena                 | 15,78 |                       |    |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA<br>MS27        |       |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 17 |
| Peso suelo seco (g)             | 35    | Porcentaje de limo    | 14 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 13    | Porcentaje de arena   | 68 |
| Temperatura 40" (°C)            | 23    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 22    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 11,08 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 6,5   |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 24,5  |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,62  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 2     |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 24    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 6,12  |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 6,12  |                       |    |
| Gramos de limo                  | 4,96  |                       |    |
| Gramos de arena                 | 23,92 |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA<br>MS28        |       |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 24 |
| Peso suelo seco (g)             | 30    | Porcentaje de limo    | 20 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 15    | Porcentaje de arena   | 55 |
| Temperatura 40" (°C)            | 24    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 23    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 13,44 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 8     |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 25    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,8   |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 2,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 25    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 7,3   |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 7,3   |                       |    |
| Gramos de limo                  | 6,14  |                       |    |
| Gramos de arena                 | 16,56 |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA<br>MS29        |       |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 19 |
| Peso suelo seco (g)             | 30    | Porcentaje de limo    | 12 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 11    | Porcentaje de arena   | 69 |
| Temperatura 40" (°C)            | 24    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 23    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 9,44  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 6,5   |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 25    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,8   |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 2,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 25    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 5,8   |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 5,8   |                       |    |
| Gramos de limo                  | 3,64  |                       |    |
| Gramos de arena                 | 20,56 |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA<br>MS30        |       |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 100   | Porcentaje de arcilla | 24 |
| Peso suelo seco (g)             | 85    | Porcentaje de limo    | 19 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 40    | Porcentaje de arena   | 57 |
| Temperatura 40" (°C)            | 21    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,36  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 20    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 36,86 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 23    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 23    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 22    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 20,58 |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 20,58 |                       |    |
| Gramos de limo                  | 16,28 |                       |    |
| Gramos de arena                 | 48,14 |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA<br>MS31        |       |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 100   | Porcentaje de arcilla | 40 |
| Peso suelo seco (g)             | 85    | Porcentaje de limo    | 20 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 55    | Porcentaje de arena   | 40 |
| Temperatura 40" (°C)            | 21    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,36  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 4     |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 20    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 51,36 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 36,5  |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 23    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 23    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 34,58 |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 34,58 |                       |    |
| Gramos de limo                  | 16,78 |                       |    |
| Gramos de arena                 | 33,64 |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA<br>MS32        |       |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 100   | Porcentaje de arcilla | 23 |
| Peso suelo seco (g)             | 60    | Porcentaje de limo    | 18 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 28    | Porcentaje de arena   | 59 |
| Temperatura 40" (°C)            | 22    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 4     |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 20    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 24,72 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 16    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 23    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 23    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 14,08 |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 14,08 |                       |    |
| Gramos de limo                  | 10,64 |                       |    |
| Gramos de arena                 | 35,28 |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA MS33           |       |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 17 |
| Peso suelo seco (g)             | 35    | Porcentaje de limo    | 8  |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 12    | Porcentaje de arena   | 75 |
| Temperatura 40" (°C)            | 22    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 4     |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 21    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 8,72  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 8     |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 23    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 24    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 6,08  |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 6,08  |                       |    |
| Gramos de limo                  | 2,64  |                       |    |
| Gramos de arena                 | 26,28 |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA MS34           |       |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 100   | Porcentaje de arcilla | 70 |
| Peso suelo seco (g)             | 40    | Porcentaje de limo    | 3  |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 32    | Porcentaje de arena   | 27 |
| Temperatura 40" (°C)            | 22    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3,5   |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 21    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 29,22 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 30    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 23    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 23    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 28,08 |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 28,08 |                       |    |
| Gramos de limo                  | 1,14  |                       |    |
| Gramos de arena                 | 10,78 |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA<br>MS35        |       |                       |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 61                    |    |
| Peso suelo seco (g)             | 45    | Porcentaje de limo    | 5                     |    |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 32    | Porcentaje de arena   | 34                    |    |
| Temperatura 40" (°C)            | 22    |                       |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 21,5  |                       |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 29,72 |                       |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 29    |                       |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 24    |                       |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 24    |                       |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 27,44 |                       |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 27,44 |                       |                       |    |
| Gramos de limo                  | 2,28  |                       |                       |    |
| Gramos de arena                 | 15,28 |                       |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA<br>MS36        |       |                       |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    |                       | Porcentaje de arcilla | 67 |
| Peso suelo seco (g)             | 35    | Porcentaje de limo    | 3                     |    |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 26,5  | Porcentaje de arena   | 30                    |    |
| Temperatura 40" (°C)            | 24    |                       |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3,5   |                       |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 22    |                       |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 24,44 |                       |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 25    |                       |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 24    |                       |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 24    |                       |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 23,44 |                       |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 23,44 |                       |                       |    |
| Gramos de limo                  | 1     |                       |                       |    |
| Gramos de arena                 | 10,56 |                       |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA<br>MS37        |       |                       |    |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 56 |                       |    |
| Peso suelo seco (g)             | 40    | Porcentaje de limo    | 6  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 27    | Porcentaje de arena   | 38 |                       |    |
| Temperatura 40" (°C)            | 22    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 22    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 24,72 |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 24    |                       |    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 24    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 24    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 22,44 |                       |    |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 22,44 |                       |    |                       |    |
| Gramos de limo                  | 2,28  |                       |    |                       |    |
| Gramos de arena                 | 15,28 |                       |    |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA<br>MS38        |       |                       |    |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    |                       |    | Porcentaje de arcilla | 67 |
| Peso suelo seco (g)             | 35    | Porcentaje de limo    | 6  |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 28    | Porcentaje de arena   | 27 |                       |    |
| Temperatura 40" (°C)            | 23    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3,5   |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 20    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 25,58 |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 25    |                       |    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 24    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 24    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 23,44 |                       |    |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 23,44 |                       |    |                       |    |
| Gramos de limo                  | 2,14  |                       |    |                       |    |
| Gramos de arena                 | 9,42  |                       |    |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

| DATOS DE MUESTRA<br>MS39        |       |                       |    |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 100   | Porcentaje de arcilla | 47 |                       |    |
| Peso suelo seco (g)             | 75    | Porcentaje de limo    | 15 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 49    | Porcentaje de arena   | 38 |                       |    |
| Temperatura 40" (°C)            | 23    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3,5   |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 21    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 46,58 |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 37,5  |                       |    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 23    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 23    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 35,58 |                       |    |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 35,58 |                       |    |                       |    |
| Gramos de limo                  | 11    |                       |    |                       |    |
| Gramos de arena                 | 28,42 |                       |    |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA<br>MS40        |       |                       |    |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    |                       |    | Porcentaje de arcilla | 46 |
| Peso suelo seco (g)             | 40    |                       |    | Porcentaje de limo    | 19 |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 29    |                       |    | Porcentaje de arena   | 34 |
| Temperatura 40" (°C)            | 22    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 0,72  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3,5   |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 22    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 26,22 |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 20    |                       |    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 24    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,44  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 22    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 18,44 |                       |    |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 18,44 |                       |    |                       |    |
| Gramos de limo                  | 7,78  |                       |    |                       |    |
| Gramos de arena                 | 13,78 |                       |    |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

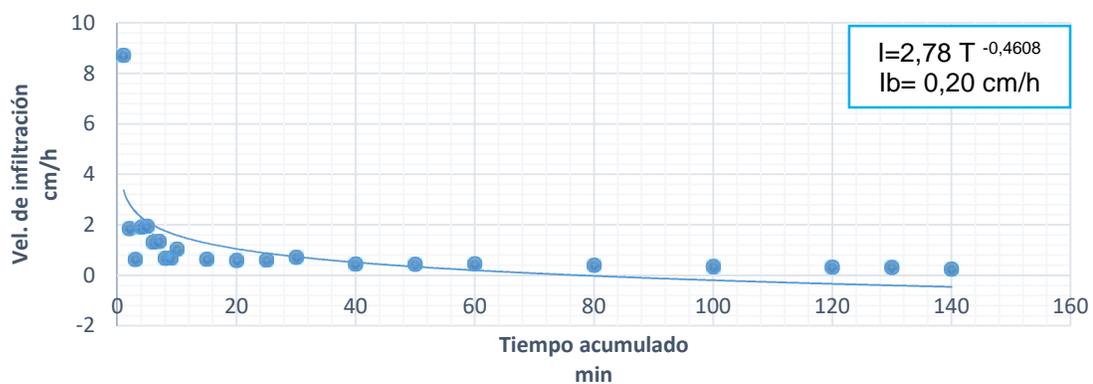
| DATOS DE MUESTRA<br>MS41        |       |                       |    |                       |    |
|---------------------------------|-------|-----------------------|----|-----------------------|----|
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    | Porcentaje de arcilla | 60 |                       |    |
| Peso suelo seco (g)             | 40    | Porcentaje de limo    | 16 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 33    | Porcentaje de arena   | 24 |                       |    |
| Temperatura 40" (°C)            | 23    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3,5   |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 21,5  |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 30,58 |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 26    |                       |    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 23    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 23    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 24,08 |                       |    |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 24,08 |                       |    |                       |    |
| Gramos de limo                  | 6,5   |                       |    |                       |    |
| Gramos de arena                 | 9,42  |                       |    |                       |    |
| DATOS DE MUESTRA<br>MS42        |       |                       |    |                       |    |
| Peso suelo húmedo (g)           | 50    |                       |    | Porcentaje de arcilla | 66 |
| Peso suelo seco (g)             | 40    | Porcentaje de limo    | 16 |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 40" (g)      | 35    | Porcentaje de arena   | 19 |                       |    |
| Temperatura 40" (°C)            | 23    |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,08  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 40" (g) | 3,5   |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 40" (°C)       | 21,5  |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida 40"           | 32,58 |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro 2 h (g)      | 28    |                       |    |                       |    |
| Temperatura 2 h (°C)            | 23,5  |                       |    |                       |    |
| Corrección de temperatura       | 1,26  |                       |    |                       |    |
| Lectura Hidrómetro NaOH 2 h (g) | 3     |                       |    |                       |    |
| Temperatura NaOH 2 h (°C)       | 23    |                       |    |                       |    |
| Lectura corregida a las 2 h     | 26,26 |                       |    |                       |    |
| Gramos de arcilla               | 26,26 |                       |    |                       |    |
| Gramos de limo                  | 6,32  |                       |    |                       |    |
| Gramos de arena                 | 7,42  |                       |    |                       |    |

Fuente: Investigación de campo. 2016.

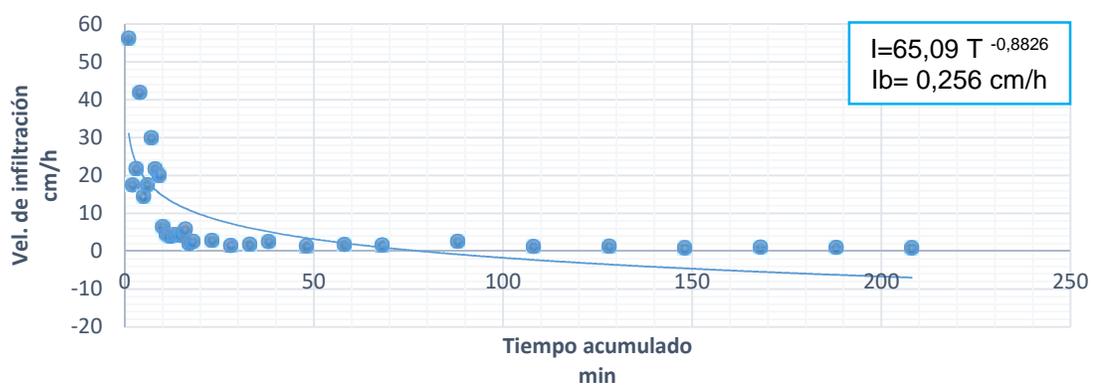


ANEXO 3  
Gráficas de infiltración básica

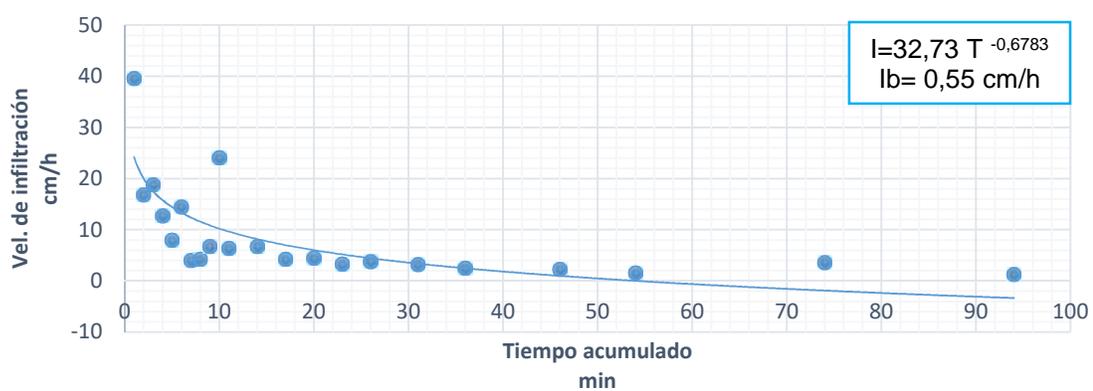
Muestra MI01



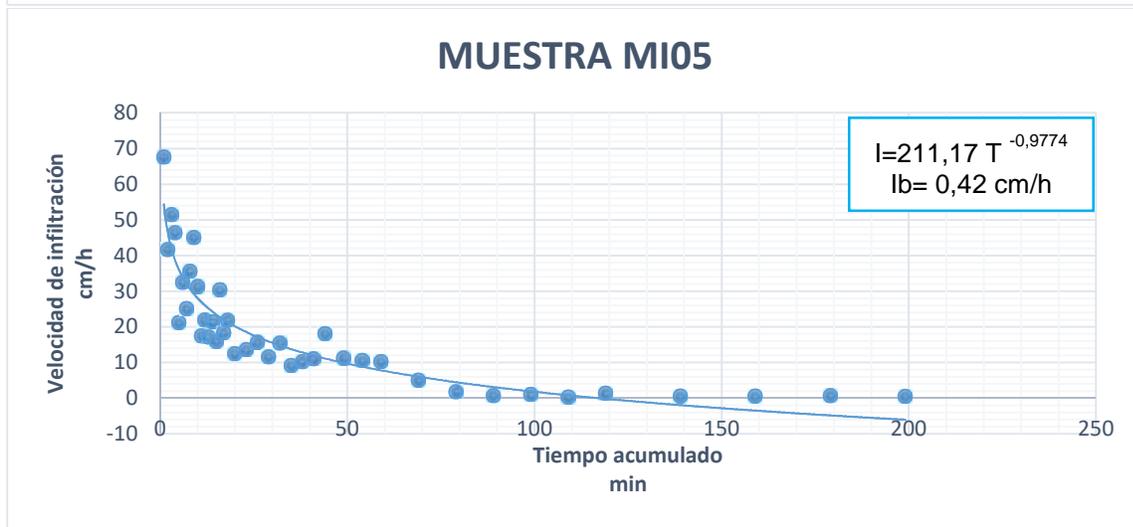
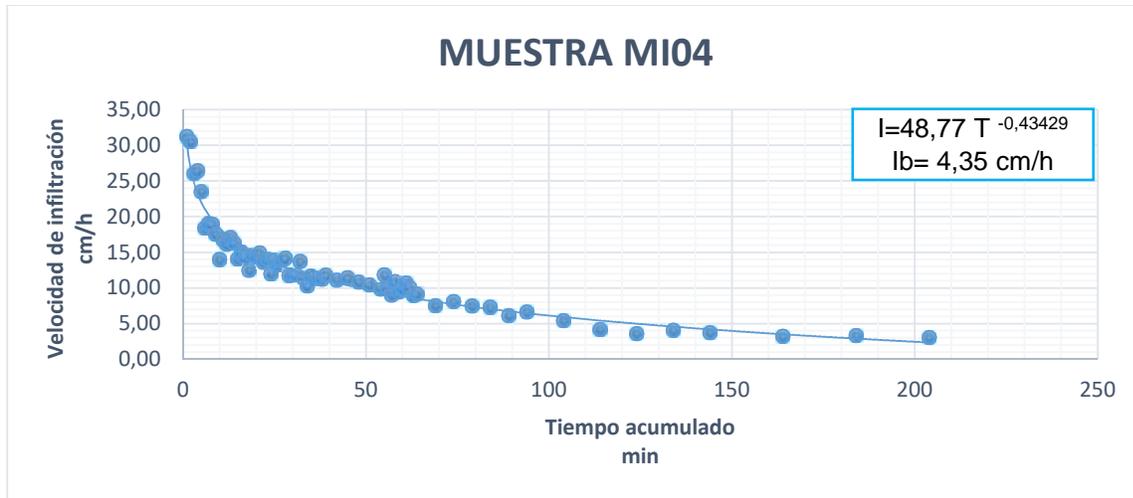
Muestra MI02



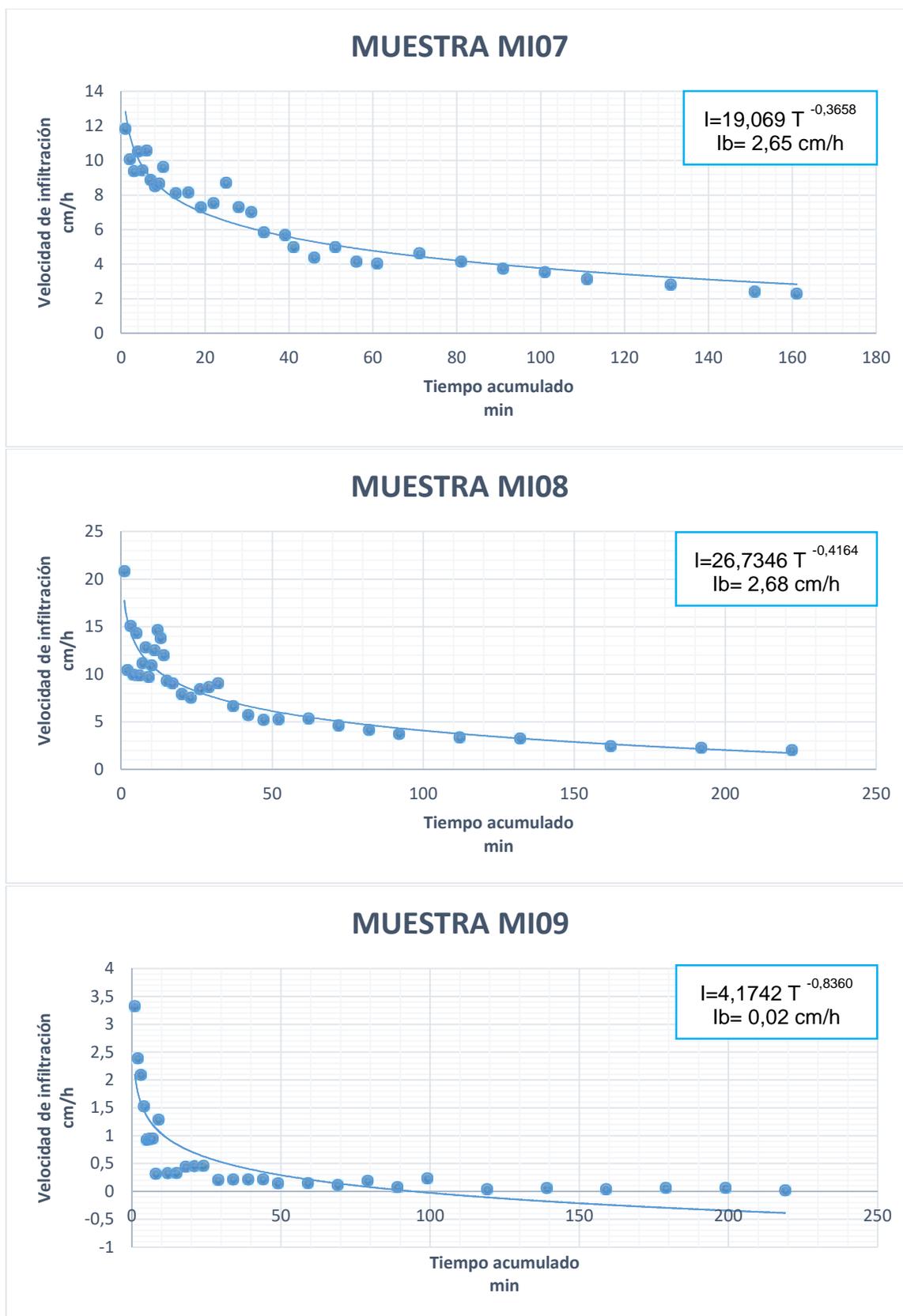
Muestra MI03

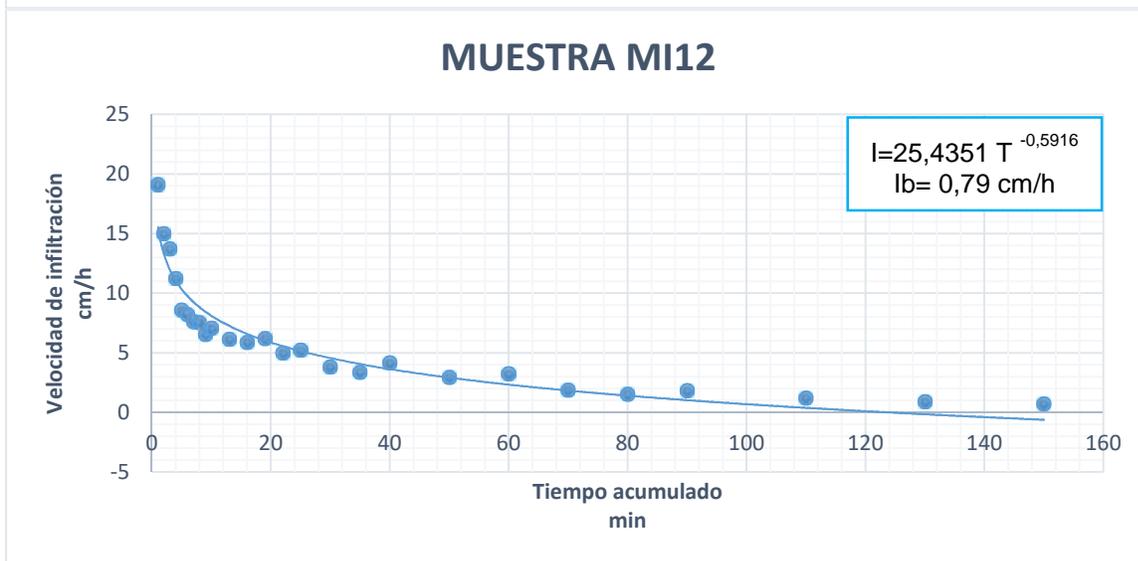
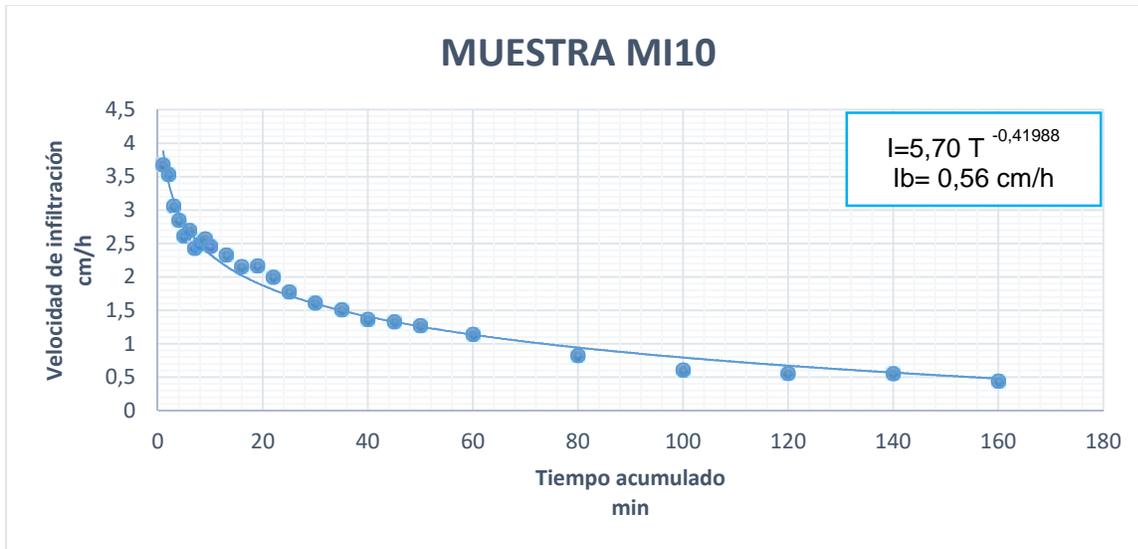


Fuente: Investigación de campo. 2016.

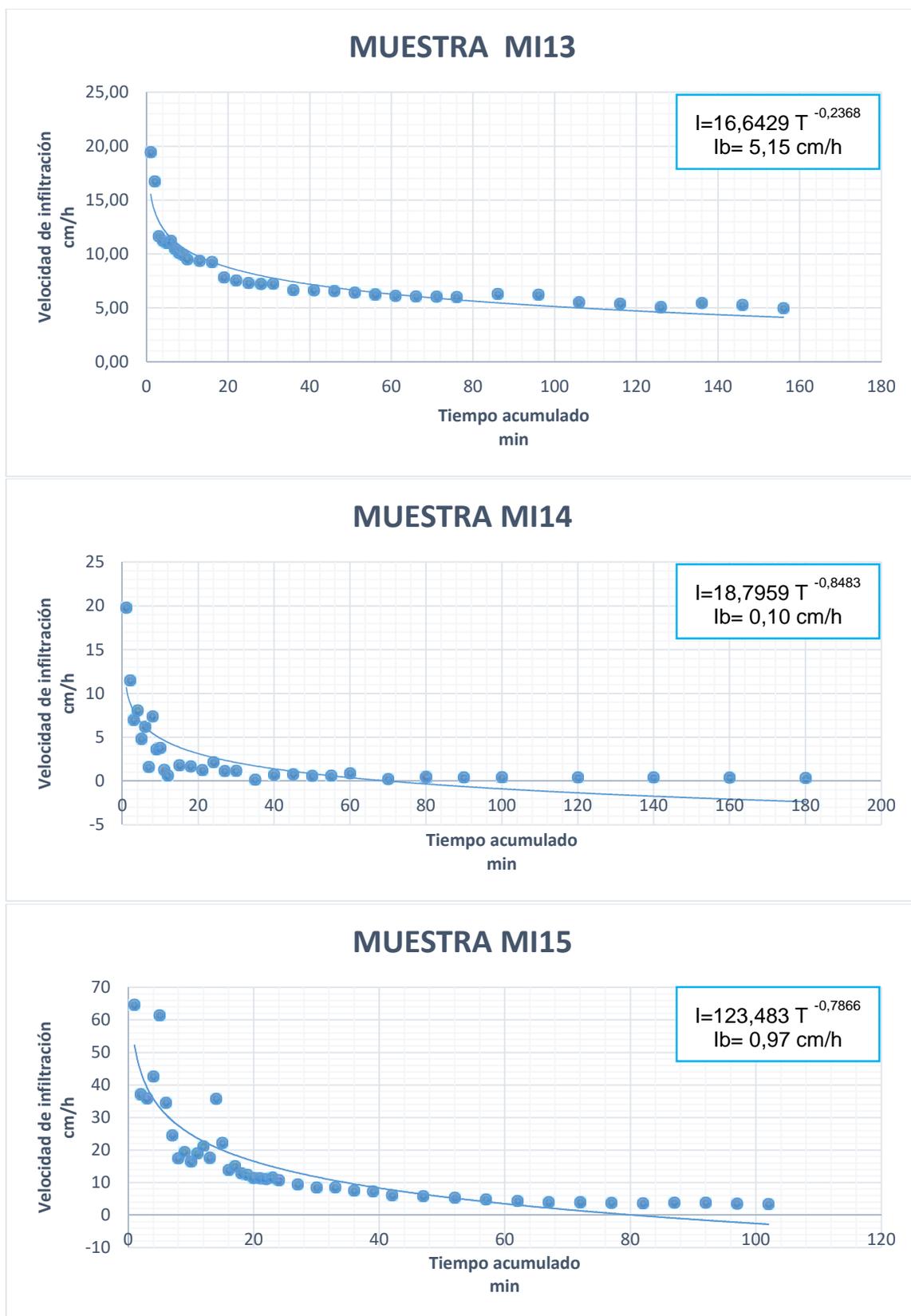


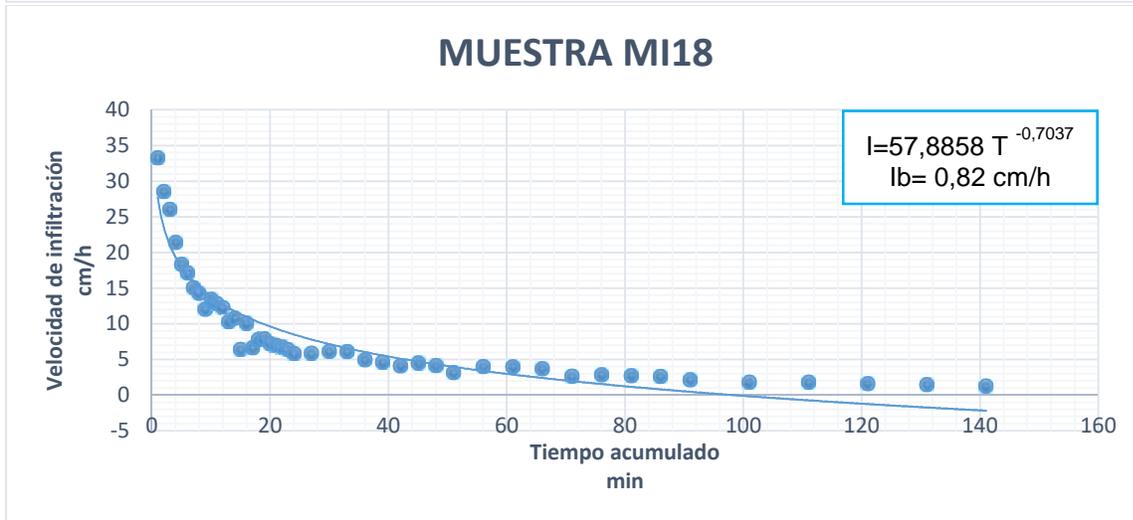
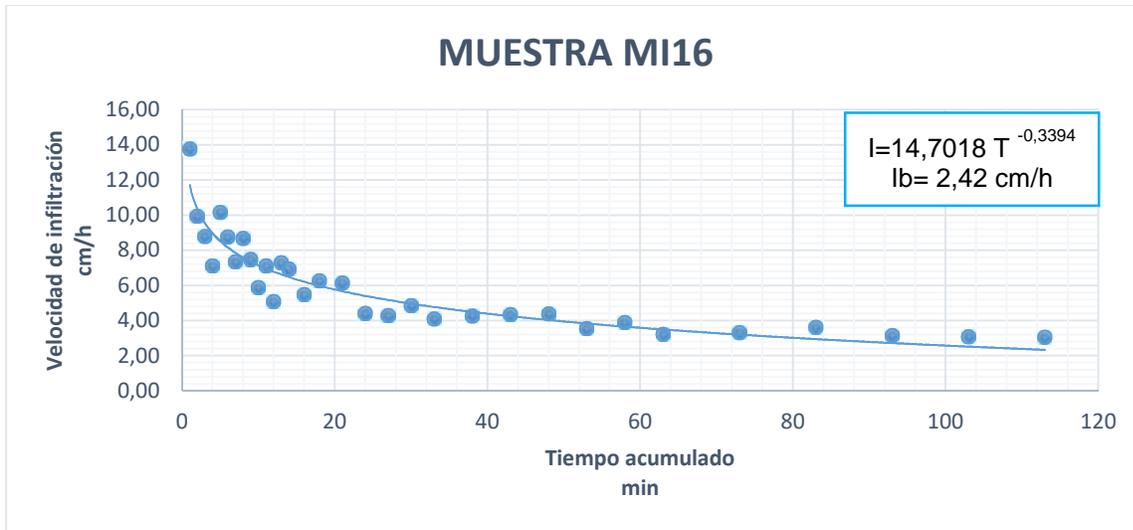
**Fuente:** Investigación de campo. 2016.



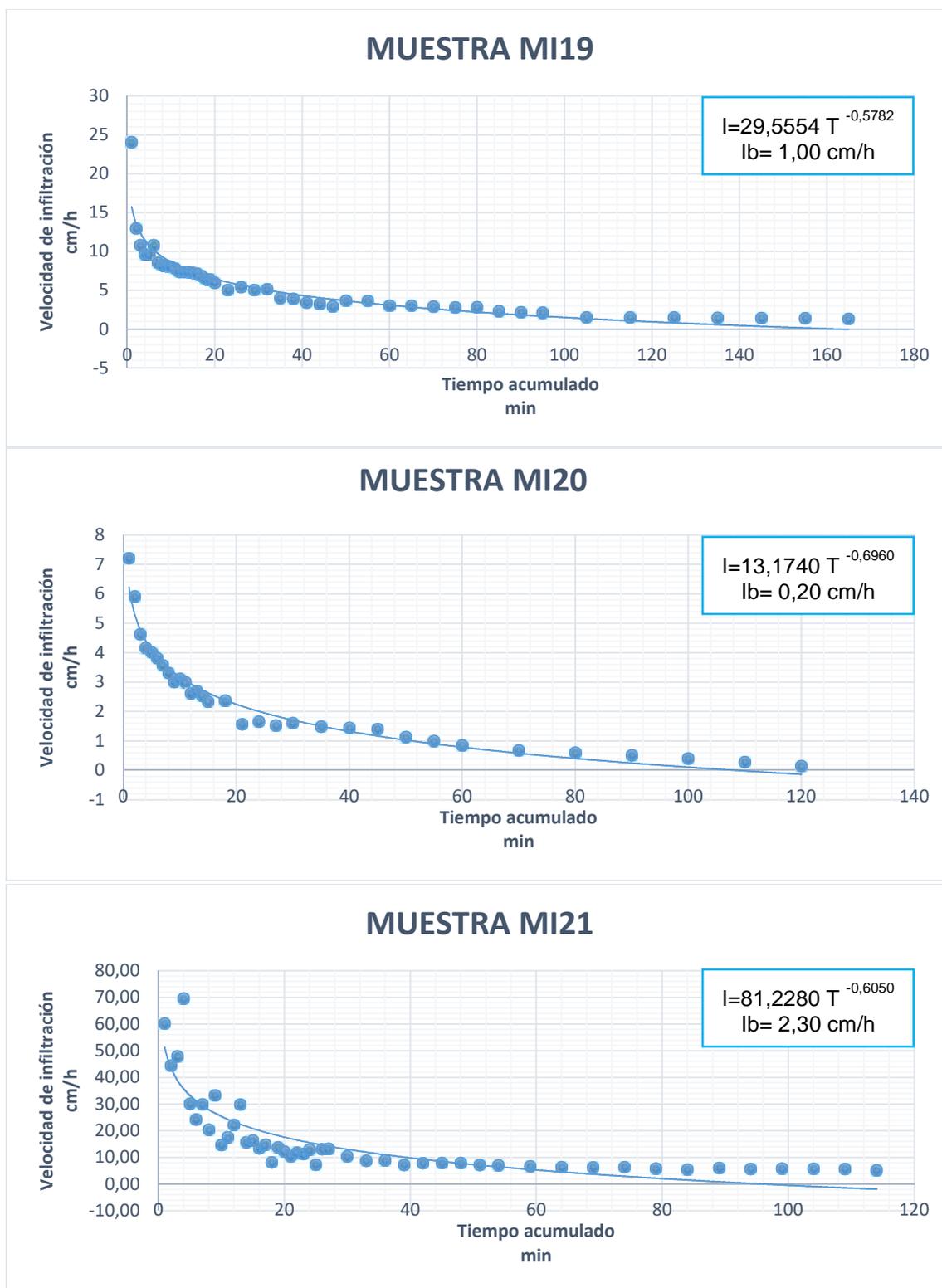


Fuente: Investigación de campo. 2016.

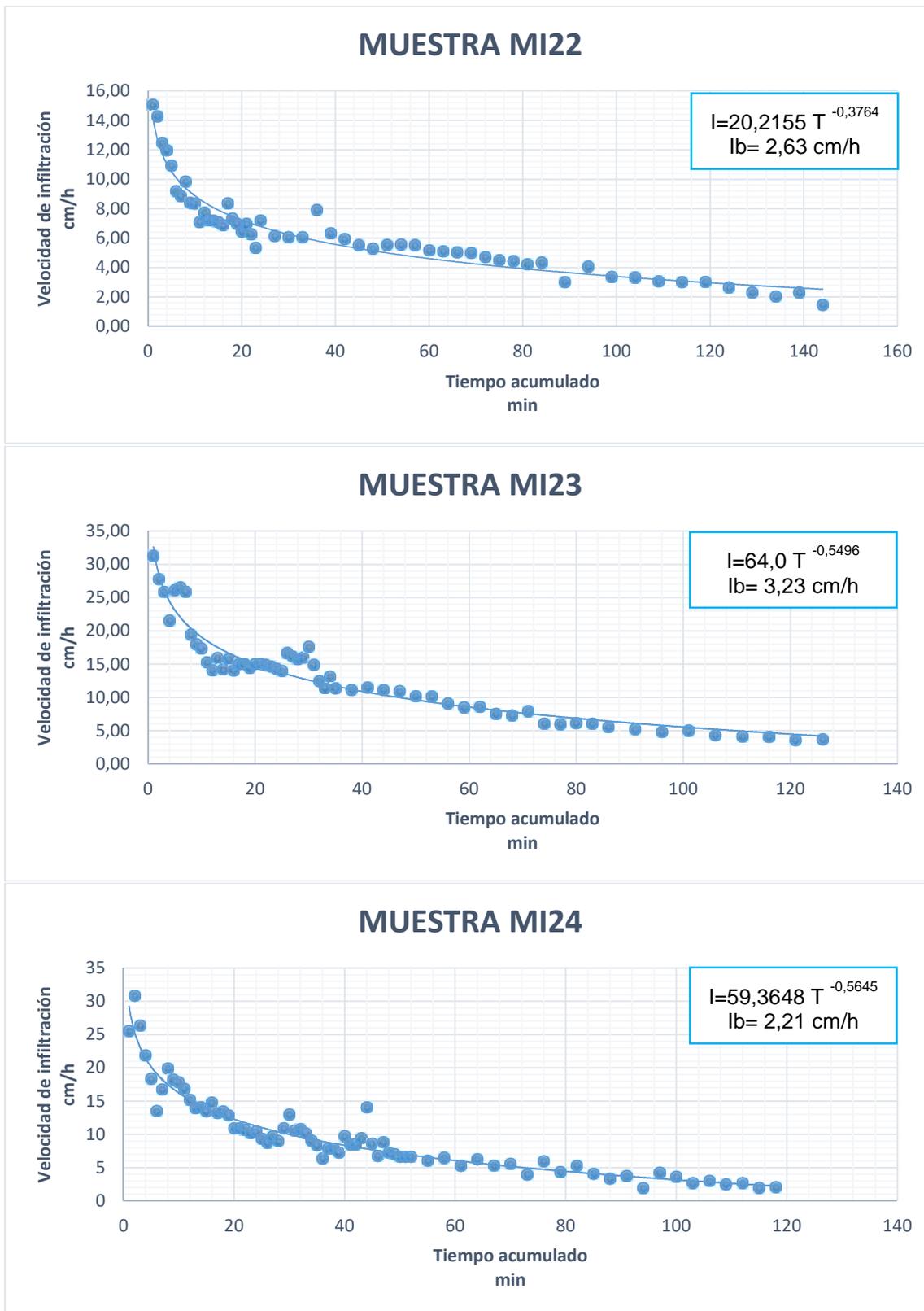




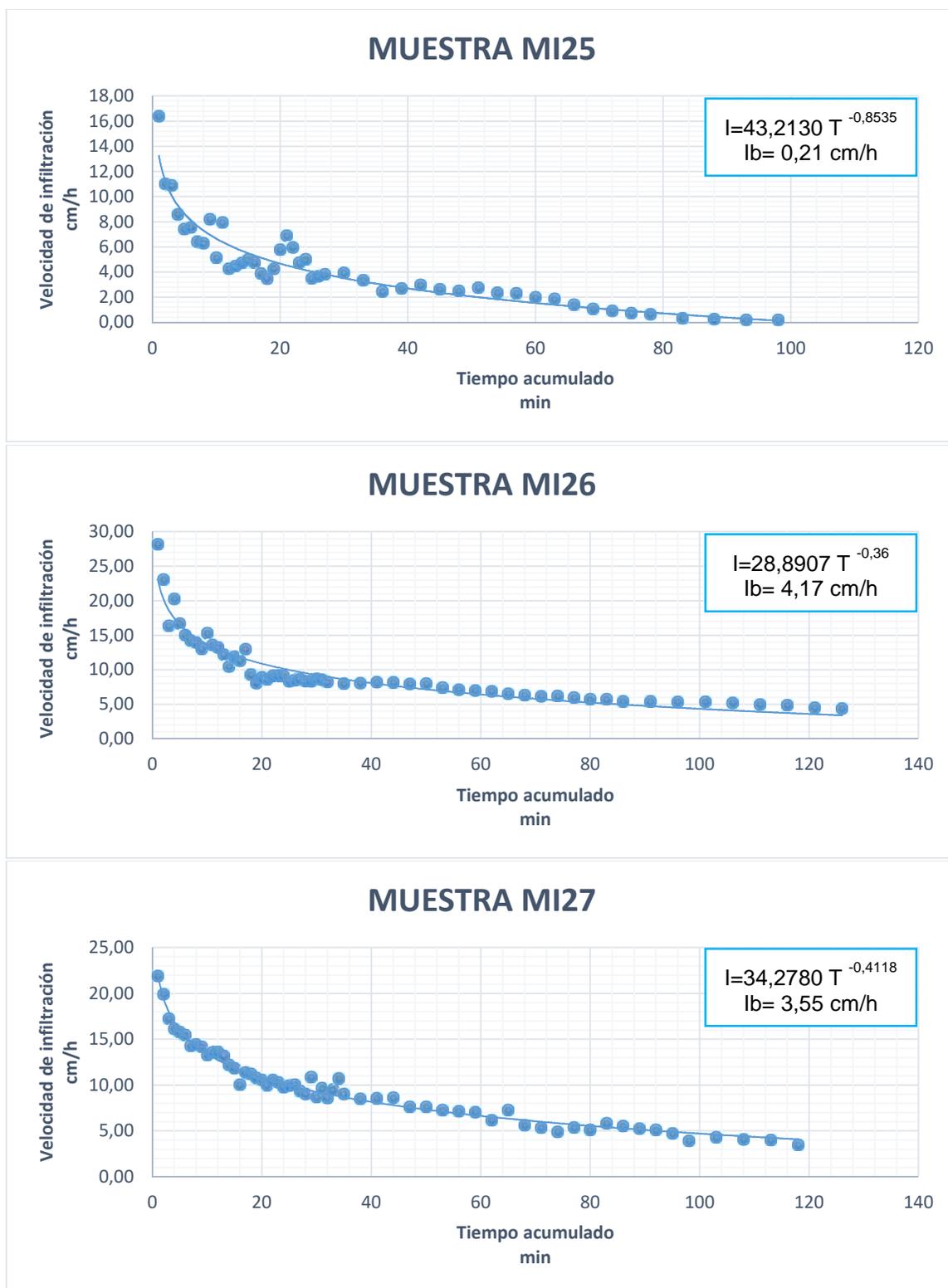
Fuente: Investigación de campo. 2016.



Fuente: Investigación de campo. 2016.



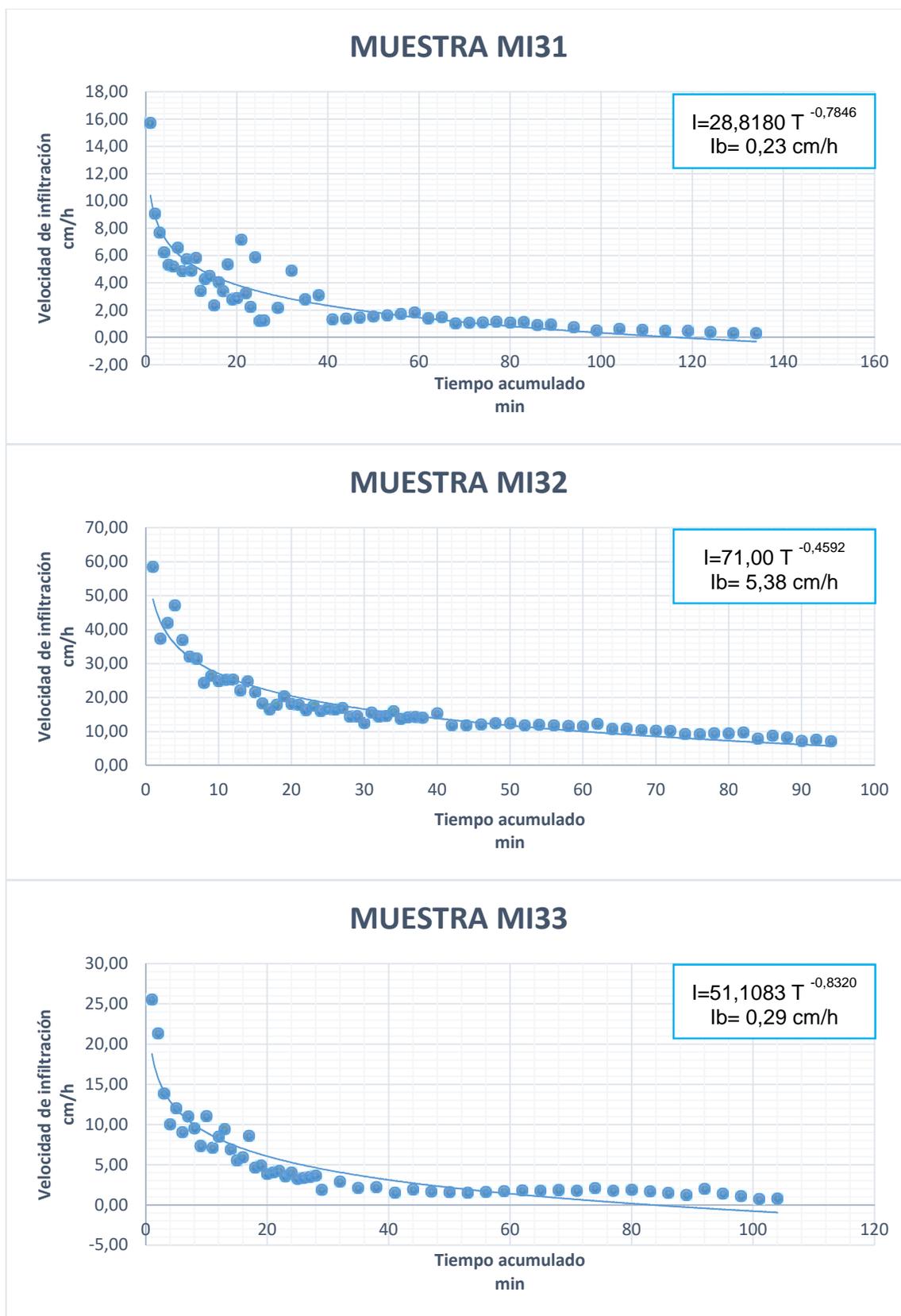
**Fuente:** Investigación de campo. 2016.



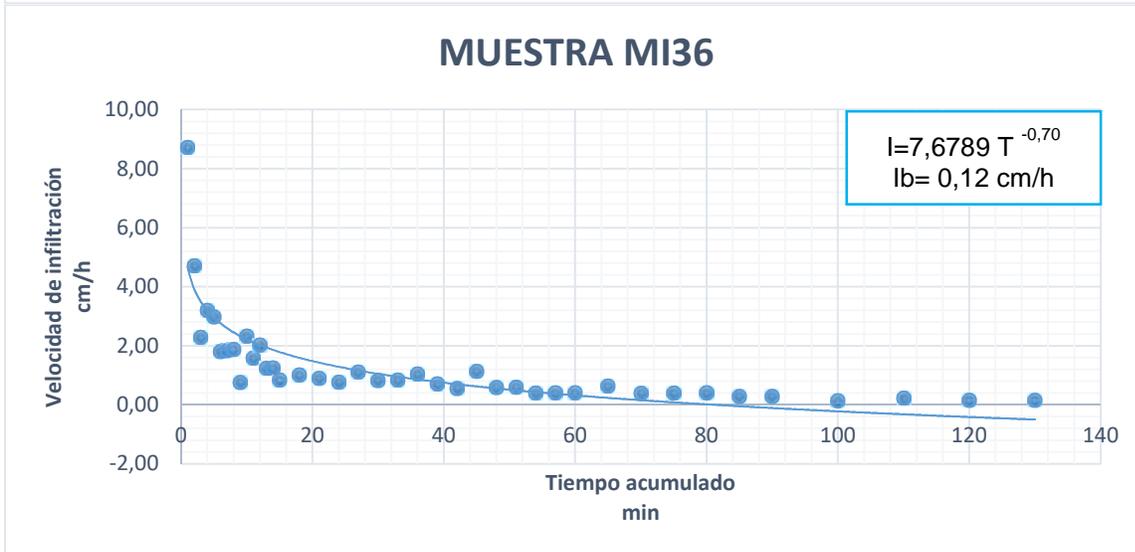
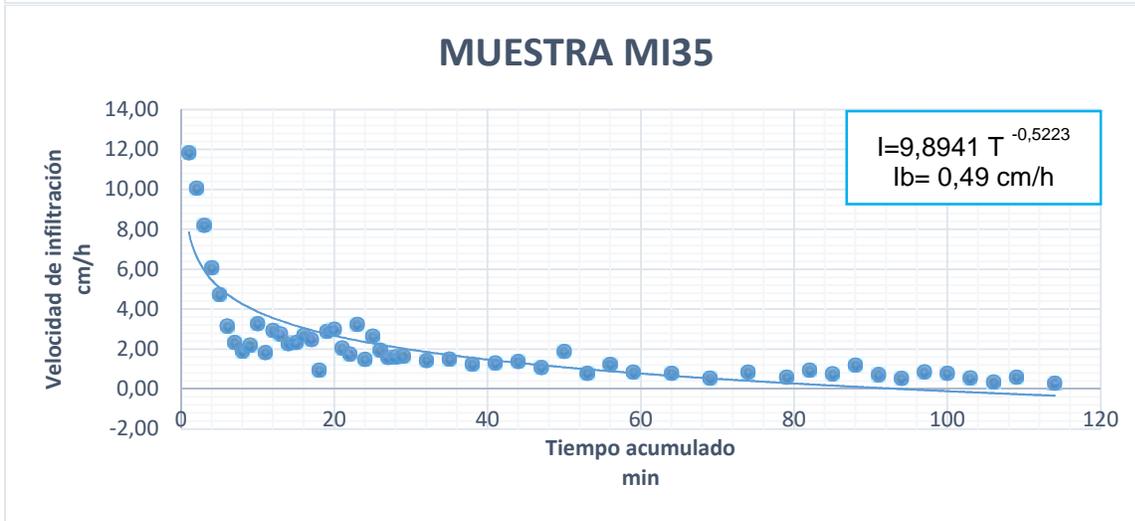
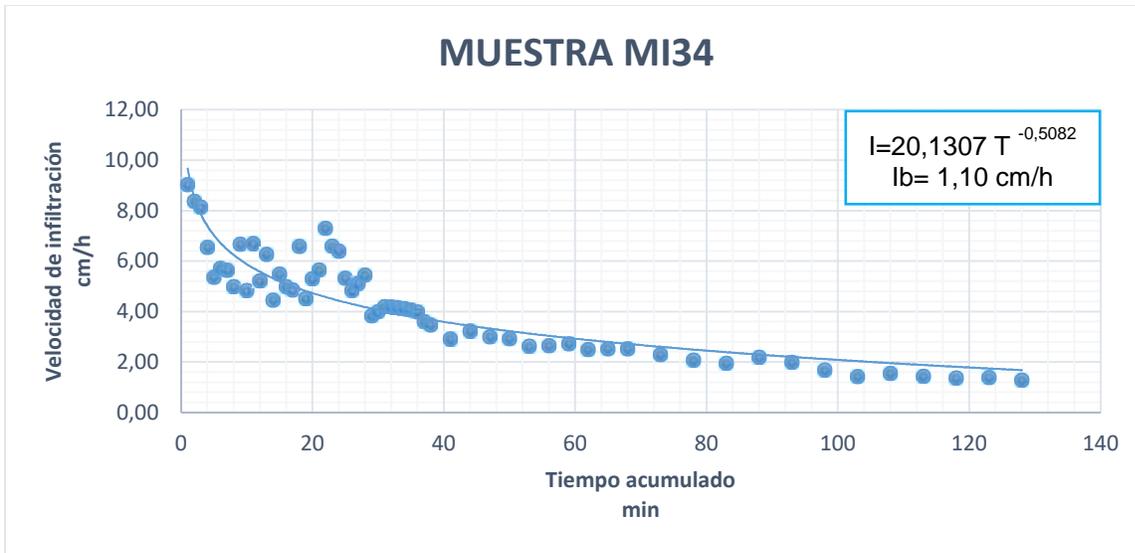
**Fuente:** Investigación de campo. 2016.



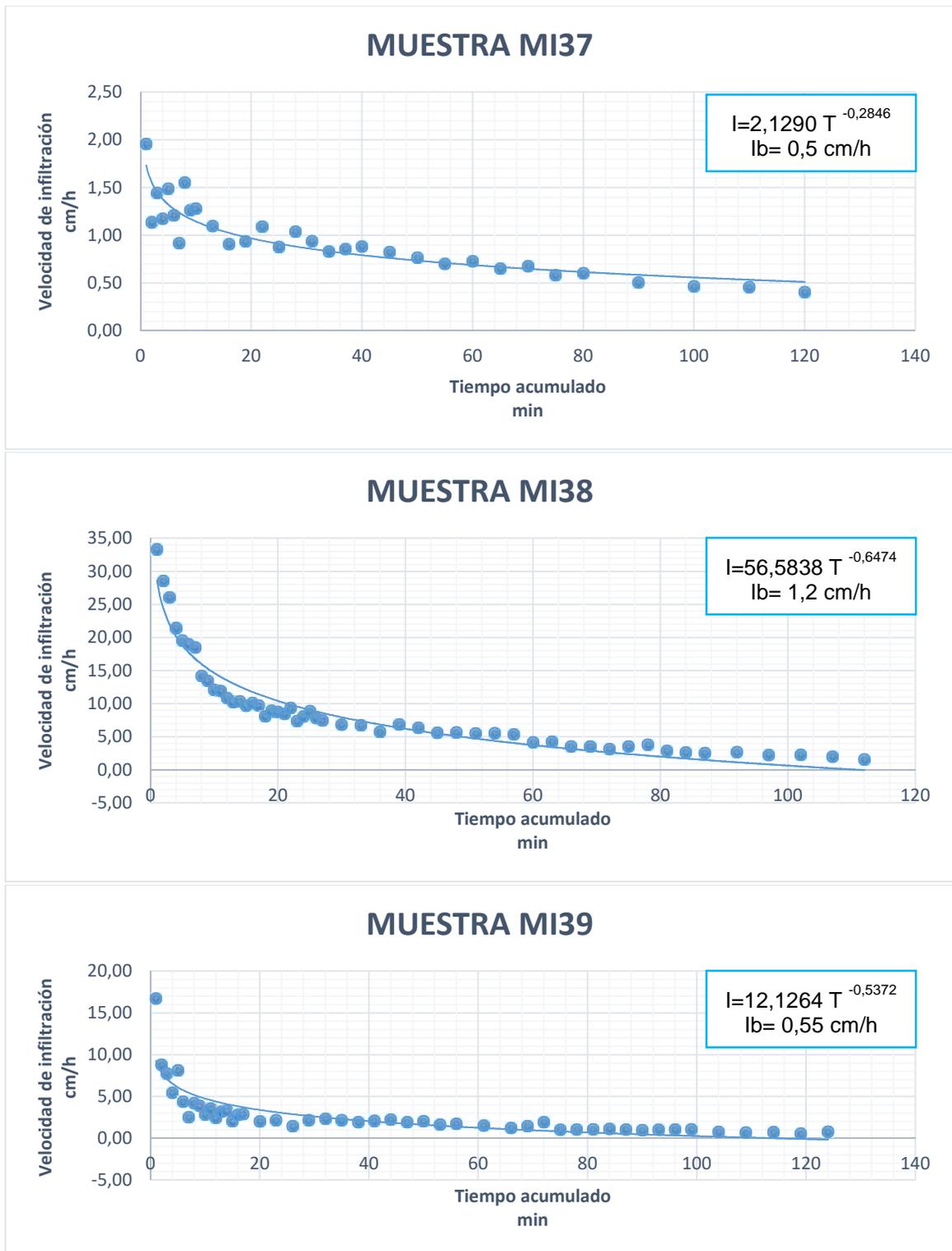
Fuente: Investigación de campo. 2016.



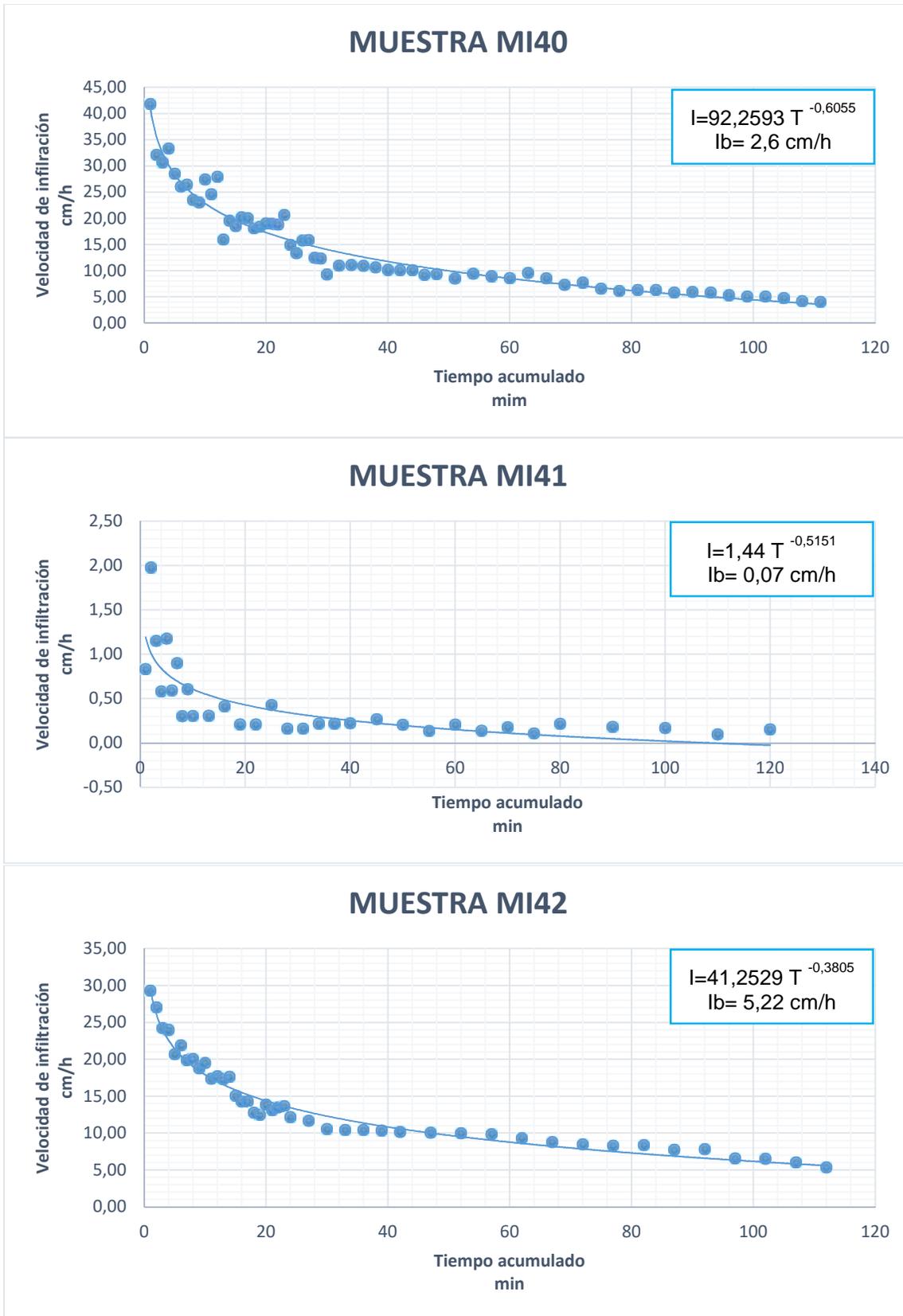
**Fuente:** Investigación de campo. 2016.



Fuente: Investigación de campo. 2016.



**Fuente:** Investigación de campo. 2016.



Fuente: Investigación de campo. 2016.

No. 052-2017

**USAC  
CUNOR**

Universidad de San Carlos de Guatemala  
Centro Universitario del Norte



El Director del Centro Universitario del Norte de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer los dictámenes de la Comisión de Trabajos de Graduación de la carrera de:

**INGENIERO GEOLOGO**

Al trabajo titulado:

**TESIS**

**DELIMITACIÓN DE ZONAS DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE LOS ACUIFEROS KARSTICOS EN EL AREA URBANA Y EN LOS ALREDEDORES DEL MUNICIPIO DE SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ**

Presentado por el (la) estudiante:

**LUIS RAYMUNDO TOC PERALTA**

Autoriza el

**IMPRIMASE**

Cobán, Alta Verapaz 15 de Marzo de 2017.

Lic. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales  
DIRECTOR

