

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

**TRABAJO DE GRADUACIÓN**



**TESIS**

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE LOS  
ACUIFEROS KÁRSTICOS EN EL ÁREA URBANA Y LOS  
ALREDEDORES DEL MUNICIPIO DE COBÁN, ALTA VERAPAZ**

**SERGIO ESTUARDO SOLARES GARCÍA**

**COBÁN, ALTA VERAPAZ, AGOSTO 2015**

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

**TRABAJO DE GRADUACIÓN**

**TESIS**

**EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE LOS  
ACUIFEROS KÁRSTICOS EN EL ÁREA URBANA Y LOS  
ALREDEDORES DEL MUNICIPIO DE COBÁN, ALTA VERAPAZ**

**PRESENTADO AL HONORABLE CONSEJO DIRECTIVO DEL  
CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE**

**POR**

**SERGIO ESTUARDO SOLARES GARCÍA  
200540077**

**COMO REQUISITO PREVIO A OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO GEÓLOGO**

**COBÁN, ALTA VERAPAZ, AGOSTO 2015**

## **AUTORIDADES UNIVERSITARIAS**

### **RECTOR MAGNÍFICO**

Dr. Carlos Guillermo Alvarado Cerezo

### **CONSEJO DIRECTIVO**

PRESIDENTE: Lic. Zoot. M.A. Fredy Giovani Macz Choc  
SECRETARIA: Licda. T.S. Floricelda Chiquín Yoj  
REPRESENTANTE DE DOCENTES: Ing. Geol. César Fernando Monterroso Rey  
REPRESENTANTE EGRESADOS: Ing. Agr. Julio Oswaldo Méndez Morales  
REPRESENTANTES ESTUDIANTILES: Br. Fredy Enrique Gereda Milián  
PEM. César Oswaldo Bol Cú

### **COORDINADOR ACADÉMICO**

Lic. Zoot. Erwin Gonzalo Eskenasy Morales

### **COORDINADOR DE LA CARRERA**

Ing. Geol. Sergio David Morán Ical

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

COORDINADOR: Ing. Geol. Bernie Gamaliel Castillo Moeschler  
SECRETARIA: Inga. Geol. Silvia Friné Cortéz Bendfeldt  
VOCAL: Ing. Geol. Osmín Jared Vásquez Hernández

### **REVISOR DE REDACCIÓN Y ESTILO**

Inga. Quim. Verónica Beatriz Juárez Jiménez

### **REVISOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Ing. Geol. Ricardo Enrique Milián De La Cruz

### **ASESOR**

Ing. Geol. Osmín Jared Vásquez Hernández

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



15 de abril de 2015

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

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

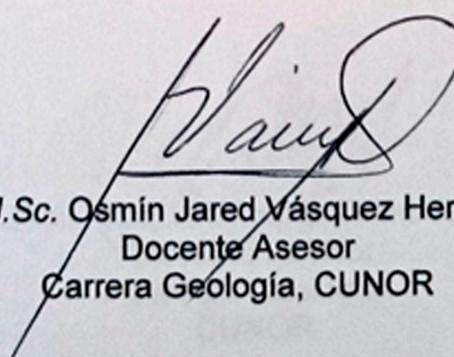
Señores  
Comisión Trabajos de Graduación  
Carrera Geología  
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **ASESORÍA** del informe final de Trabajo de Graduación del T.U. **GEOL. SERGIO ESTUARDO SOLARES GARCÍA**, carné No. **200540077**, titulado: **“EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE LOS ACUÍFEROS KÁRSTICOS EN EL ÁREA URBANA Y LOS ALREDEDORES DEL MUNICIPIO DE COBÁN, 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. Osmín 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

Telefax: 7952-1064 y 7956-6600 Ext. 209

Guatemala, C. A.

E-mail: [geologiausac@gmail.com](mailto:geologiausac@gmail.com)

Ref. 15-CG-223/2015  
23 de julio de 2015

Señores  
Comisión Trabajos de Graduación  
Carrera Geología  
CUNOR

Respetables Señores:

Por este medio informo a ustedes que he procedido a la **REVISIÓN** del informe final de Trabajo de Graduación del T.U. **GEOL. SERGIO ESTUARDO SOLARES GARCÍA**, carné No. **200540077**, titulado: **“EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE LOS ACUÍFEROS KÁRSTICOS EN EL ÁREA URBANA Y LOS ALREDEDORES DEL MUNICIPIO DE COBÁN, 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. Geol. Ricardo Enrique Milián de la Cruz  
Docente Revisor  
Carrera Geología  
CUNOR



c.c. archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



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

Código Postal 16001 – Cobán, Alta Verapaz  
Teléfono: 7952-1064 y 7956-6600 Ext. 209  
Guatemala, C. A.  
E-mail: [geologiausac@gmail.com](mailto:geologiausac@gmail.com)

Ref. 15-CG-248/2015  
05 de agosto de 2015.

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: **“EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE LOS ACUÍFEROS KÁRSTICOS EN EL ÁREA URBANA Y LOS ALREDEDORES DEL MUNICIPIO DE COBÁN, ALTA VERAPAZ”**, realizado por el (la) T.U. GEOL. SERGIO ESTUARDO SOLARES GARCÍA, carné No. **200540077**, el cual ya fue revisado por la **COMISIÓN DE REDACCIÓN Y ESTILO** de la Carrera de Geología, quienes consideramos llena los requisitos establecidos para su aprobación.

**“ID Y ENSEÑAD A TODOS”**

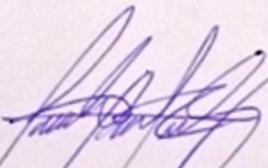
Inga. Química Verónica Beatriz Juárez Jiménez  
Comisión Redacción y Estilo  
Carrera Geología, CUNOR



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: "EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE LOS ACUIFEROS KÁRSTICOS EN EL ÁREA URBANA Y LOS ALREDEDORES DEL MUNICIPIO DE COBÁN, ALTA VERAPAZ", como requisito previo a optar al título profesional de Ingeniero Geólogo.



Sergio Estuardo Solares García  
Carné No. 200540077

## **RESPONSABILIDAD**

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

Aprobado en punto SEGUNDO, inciso 2.4, sub inciso 2.4.1 del Acta No. 17-2012 de Sesión extraordinaria de Consejo Directivo de fecha 18 de julio de 2012.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios mi Señor, sin Él nada soy, me trajo hasta acá, a Él debo todo y le agradezco por rodearme de muchas personas que han sido una bendición para mí.

A mis padres Sergio Danilo de Jesús Solares Morales y Ana María García Gámez, a quienes debo el haber llegado tan alto, el no desmayar cuando las cosas se ponen difíciles, a mi madre quién me enseñó la virtud de ser agradecido a Dios siempre y encomendarme a su protección y a mi padre quién me enseñó el valor de la perseverancia y a escalar gigantes montañas desde donde se ve un paisaje sin par. Este logro es de ellos.

A mi amada esposa, Jeanneth Roldán su amor y sus palabras de ánimo sin cesar me han traído también hasta aquí, siempre creyó en mí y soñamos con este día. Nuestras vidas juntos, cada día la disfruto tanto, es mi ayuda idónea. Este triunfo es nuestro.

A mi hermano Luis Fernando Solares García, quien siempre me dice que he sido un ejemplo para él, pero no sabe cuánto has sido un ejemplo para mí. Su dedicación y perseverancia, su fidelidad a Dios son cosas que siempre he admirado de él. Gracias por acompañarme siempre.

A mis familiares y amigos más cercanos con quienes siempre conté y quienes han contribuido en menor o mayor medida, todos han dejado huella en mí y les agradezco mucho.

A la Universidad de San Carlos y especialmente el Centro Universitario del Norte, me proveyó la oportunidad de estudiar una ciencia hermosa.

Al ingeniero Osmín Vásquez, mi asesor y padrino de graduación, pero más importante aún, mi amigo, por incentivar me siempre ha lograr mejores cosas, mejores conocimientos y mejores estudios.

A la ingeniera Verónica Juárez, por su valioso tiempo compartido en muchas horas en el laboratorio de química, que no fueron un trabajo, por su liderazgo el equipo llegó a ser como una familia.

A mis profesores de quienes siempre aprendí tanto y tuve la valiosa oportunidad de conocer aún más en el tiempo que he trabajado para este centro. Que Dios les dé sabiduría para seguir enseñando.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	ii
RESUMEN	iii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3

### CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes	5
1.2 Revisión de literatura	5
1.2.1 Definición de términos	6
1.3 Planteamiento del problema	7
1.4 Justificación	7
1.5 Alcances y límites	8
1.5.1 Alcances	8
1.5.2 Límites	8
1.6 Delimitación espacial	9
1.6.1 Localización y extensión del área	9

### CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA

2.1 Metodología para la elaboración del mapa de vulnerabilidad intrínseca	11
2.1.1 Clasificación de la variable E	14
2.1.2 Clasificación de la variable P	14
2.1.3 Clasificación de la variable I	16
2.1.4 Clasificación de la variable K	19
2.1.5 Cálculo del índice de vulnerabilidad intrínseca	19
2.2 Marco metodológico	21
2.2.1 Etapa de recopilación y análisis bibliográfico	21
2.2.2 Etapa de campo	21
2.2.3 Etapa de laboratorio	21
2.2.4 Etapa de gabinete	22

### CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Mapa de la variable E	23
3.2 Mapa de la variable P	26
3.3 Mapa de la variable I	29
3.4 Mapa de la variable K	33

3.5 Mapa de vulnerabilidad intrínseca	36
CONCLUSIONES	39
RECOMENDACIONES	41
BIBLIOGRAFÍA	43
ANEXO 1 Fotografías, diagramas ternarios y datos metodológicos completos del área de estudio	47
ANEXO 2 Gráficos y fotografías de las pruebas de infiltración del área	97

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Coordenadas de los vértices del área de estudio	9
Tabla 2 Clasificación del epikarst en mapa topográfico	15
Tabla 3 Clasificación de la variable P	16
Tabla 4 Clasificación de la variable I	18
Tabla 5 Clasificación de la variable K	20
Tabla 6 Fórmula y factores de ponderación del método EPIK	21
Tabla 7 Grados de vulnerabilidad intrínseca en el método EPIK	22
Tabla 8 Tipos de suelo determinados por los puntos de muestreo	26
Tabla 9 Velocidad de infiltración básica por punto de muestreo	30

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación del área del estudio	10
Figura 2 Diagrama ternario de las clases texturales básicas	17
Figura 3 Sistema de infiltración en el método Porchet	19
Figura 4 Mapa del Epikarst	25
Figura 5 Mapa de texturas de suelo reclasificado P1 – P4	28
Figura 6 Mapa de velocidad de infiltración I1 – I4	32
Figura 7 Mapa de desarrollo kárstico K1 – K4	35
Figura 8 Mapa de vulnerabilidad intrínseca	37

## RESUMEN

El presente estudio titulado Análisis de la Vulnerabilidad Intrínseca de los acuíferos kársticos en el área urbana y los alrededores del municipio de Cobán, A.V. Constituye el primer aporte de la carrera de Geología a un tema de mucha importancia, que es, el estudio y protección del agua subterránea.

La vulnerabilidad intrínseca es la susceptibilidad del agua subterránea a la contaminación generada por la actividad humana en función de las características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas de un área, independientemente de la naturaleza del contaminante. Acuíferos kársticos, desde el punto de vista hidrogeológico, son aquellas formaciones geológicas constituidas por rocas sedimentarias consolidadas cuyos poros y fisuras han sido ensanchadas por la acción disolvente del agua subterránea.

A través de esta tesis se logró delimitar las zonas de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos kársticos utilizando el método *EPIK* (*epikarst, protective cover, infiltration, karst development*). De los diversos métodos utilizados para elaborar estudios de este tipo, éste es el que más se adecúa a las características geológicas del municipio de Cobán, puesto que casi en su totalidad está dominada por rocas carbonatadas. Se clasificó el área en cuatro tipos de vulnerabilidad: baja, moderada, alta y muy alta.

*EPIK* se basa en la dinámica de las aguas subterráneas y conlleva la sumatoria de cuatro parámetros, de allí sus siglas: (1) El desarrollo del *epikarst* o *exokarst*, (2) la eficacia de la cubierta protectora es decir el suelo (3) la Infiltración y el (4) el desarrollo de la red de Kárstica.

La presente tesis se implementó en tres etapas, primero la obtención en campo y evaluación cuantitativa de valores de los cuatro parámetros mencionados. Segundo el cálculo de la vulnerabilidad intrínseca mediante la combinación y la ponderación de los valores de los cuatro parámetros por cada unidad de superficie. Y tercero la representación cartográfica de la distribución del índice de vulnerabilidad para la totalidad del área estudiada.

De acuerdo a lo anterior, se elaboró un mapa y se determinó que la vulnerabilidad muy alta se encuentra en los alrededores del Basurero municipal, comunidades: Chirremesché, Chichaic, Chirretzaaj, Chula Vista, Rubeljí, Chirrepec, Chibulbub, Chinimlajom, Finca Chajbaoj, Siguanhá, Chicantzún, Chimax, Chajxucub, Lamná y la fracción sur del Parque Nacional Las Victorias.

## INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos subterráneos, principalmente los kársticos, son importantes reservas de agua para el municipio de Cobán. Actividades agrícolas y forestales son comunes en ésta región. Desde la perspectiva de la calidad del agua, los acuíferos kársticos generalmente no plantean grandes problemas porque a menudo los procesos de tratamiento de agua tales como la floculación, sedimentación, filtración y desinfección son suficientes para el abastecimiento de agua potable. Sin embargo, la calidad del agua puede ser alterada después de largos períodos de descarga de contaminantes, por un aumento en la turbidez o el contenido de materia orgánica y contaminantes determinados. El agua subterránea en regiones kársticas, como el de la ciudad de Cobán, es a menudo sensible a impactos antropogénicos y en consecuencia, pueden ser generalmente considerados vulnerables.

Esta vulnerabilidad se explica principalmente como resultado de la estructura heterogénea de los sistemas kársticos, que por un lado tienen recarga difusa y centrada, y por otra tienen alta permeabilidad en conductos subterráneos. Esta doble característica le da un peculiar comportamiento hidrodinámico; altas recargas por infiltración concentrada en zonas muy permeables ocurren rápidamente. Los procesos de filtración y purificación natural, no tienen suficiente tiempo para tener un efecto, como en los acuíferos de porosidad primaria.

Dado su comportamiento específico los acuíferos kársticos requieren medidas de protección muy particulares. Para poner en perspectiva a Guatemala comparemos el caso de Suiza. En el artículo 20 de la Ley Federal Suiza de Protección de Aguas del 24 de enero de 1991 se requiere la determinación de las zonas de vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas. Las restricciones

más importantes en las zonas de alta vulnerabilidad son las limitaciones en el desarrollo industrial y la prohibición de las actividades extractivas. La aplicación de la ley es competencia de los municipios en base a ordenanzas federales.

En Guatemala actualmente no existe una ley de protección de aguas, lo que dificulta la labor de protección, puesto que estudios como el de la presente tesis debieran ser obligatorios para cada municipio. Según la Política Nacional del Agua de Guatemala y Su Estrategia emitida en mayo de 2011, dentro de la primera línea estratégica incluye “Vigilancia, monitoreo y mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano y saneamiento”. Esta tesis constituye una propuesta de estudio de protección del agua subterránea, que resulte en un buen manejo del recurso hídrico y todos los aspectos que conlleve para el país.

## OBJETIVOS

### GENERAL

- Definir las zonas de muy alta, alta, moderada y baja vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos kársticos en el área urbana y los alrededores de la ciudad de Cobán, Alta Verapaz a través de la elaboración de un mapa de 49 km<sup>2</sup>.

### ESPECÍFICOS

- Aplicar el método *EPIK* para la determinación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de los acuíferos por ser la metodología adecuada para regiones de abundantes rocas carbonáticas y relieve kárstico.
- Analizar los suelos del área con el fin de elaborar un mapa textural que permita clasificar los suelos de acuerdo a la metodología *EPIK*.
- Elaborar un mapa de velocidad de infiltración a partir de los datos de campo, para determinar zonas de mayor permeabilidad.



# CAPÍTULO 1

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 ANTECEDENTES

Trabajos sobre hidrogeología son escasos en el departamento de Alta Verapaz, a excepción de algunos trabajos sobre manejo de cuencas y recarga hídrica, en este caso investigaciones sobre vulnerabilidad intrínseca de acuíferos aún no han sido realizadas en nuestro país; la principal razón de ser de este trabajo es ayudar con la delimitación de las áreas más vulnerables en la ciudad de Cobán, para encaminar la generación futura de planes de mitigación en las zonas que así ameriten.

Como parte de las actividades académicas de la Carrera de Geología, del Centro Universitario del Norte, se realizan estudios preliminares en donde surge la necesidad de poder aplicar y adaptar una metodología de este tipo en el área de estudio. A través de esta tesis se elaboró una herramienta que permite a las autoridades y público en general una mejor protección de las zonas vulnerables de acuerdo a sus características geológicas e hidrogeológicas.

### 1.2 REVISIÓN DE LITERATURA

En la actualidad, la Unión Europea está financiando el proyecto *COST 620 "Vulnerability and Risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers"*. Este proyecto promueve la cartografía de la vulnerabilidad de los acuíferos en los países miembro de la Unión Europea.

Dentro del área de la hidrogeología, el interés es aumentar los conocimientos y el número de investigaciones que permitan comprender la dinámica del agua en un entorno geológico dado.

### 1.2.1 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

En el marco de este proyecto de cartografía europeo, Daly et al. (2002) se establece la diferencia entre vulnerabilidad intrínseca y vulnerabilidad específica.

La vulnerabilidad intrínseca es la susceptibilidad del agua subterránea a la contaminación generada por la actividad humana en función de las características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas de un área, independientemente de la naturaleza del contaminante. La vulnerabilidad específica es la susceptibilidad del agua subterránea a un contaminante o grupo de contaminantes determinado, en función de las propiedades de éstos y sus relaciones con los componentes de la vulnerabilidad intrínseca.<sup>1</sup>

Otro de los términos es acuífero kárstico, desde el punto de vista hidrogeológico, se conoce como acuífero kárstico a aquellas formaciones geológicas constituidas por rocas sedimentarias consolidadas cuyos poros y fisuras han sido ensanchados por la acción disolvente del agua subterránea.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>Andreo, B. *et al.* Ensayo Metodológico para la Protección de Aguas Subterráneas En Acuíferos Kársticos. Aplicación al Sistema Torremolinos. Departamento de Geología Universidad de Málaga.

<sup>2</sup>Custodio y Llamas. 1993. <http://blog.pucp.edu.pe/media/3815/20110520-Tipos%20de%20acuiferos.pdf>. (12-10-02).

### **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

¿Cuáles son los sectores con alto grado de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos kársticos, en el área urbana y los alrededores del municipio de Cobán, Alta Verapaz?

La vulnerabilidad intrínseca representa las características geológicas e hidrogeológicas inherentes al medio, que determinan la sensibilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por actividades humanas o a un contaminante “x” en un momento dado.

Los trabajos de vulnerabilidad intrínseca tienen gran utilidad en los trabajos de planificación de uso del territorio y del agua, particularmente en lo que respecta a la preservación de la calidad del recurso, en los sitios donde no está afectado, ni se realizan prácticas como fertilización, aplicación de plaguicidas, riego, concentración de ganado, actividades domésticas, urbanas o industriales, que por su intensidad pudieran afectarlo.

Desde hace más de veinte años, en varios países se han desarrollado metodologías que permiten un mejor análisis y prevención de las áreas en que pudieran verse afectados los acuíferos por la contaminación, debido a actividades de todo tipo; una de estas metodologías es la que se ha aplicado en este estudio.

### **1.4 JUSTIFICACIÓN**

Las aguas subterráneas son una de las principales fuentes de suministro para uso doméstico y para el riego, lo cual hace que una mala ubicación de sitios de desechos, como basureros, pozos ciegos y acumulaciones de purines procedentes de las fincas, se infiltren en el terreno, haciendo que los mantos freáticos puedan contaminarse.

Las aguas subterráneas en medios kársticos tienden a contaminarse de manera más rápida, puesto que los acuíferos de este tipo presentan heterogeneidad, porosidad y permeabilidad mucho mayor, por cual es muy importante conocer cuáles son las áreas de mayor vulnerabilidad intrínseca, o sea, la capacidad para que un determinado contaminante llegue al agua subterránea, de allí nace la necesidad de tener mapas de este tipo.

El área de estudio por ser una zona kárstica, es mucho más sensible a la contaminación. El mejor método de protección de los acuíferos es la prevención, no contaminar y controlar los focos de contaminación.

Con este trabajo se beneficiarán las autoridades encargadas de velar por el ordenamiento territorial y el cuidado del medio ambiente, como la municipalidad de Cobán y el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, entre otros.

## **1.5 ALCANCES Y LÍMITES**

### **1.5.1 ALCANCES**

La investigación tuvo un alcance exploratorio y descriptivo, puesto que podrá ser utilizado como base para un análisis de vulnerabilidad específica a un contaminante en particular y pretende ser un aporte que incentive las investigaciones hidrogeológicas en otros municipios y complementarias con las que se sigan realizando en Cobán, A.V. por estudiantes y profesionales de la Carrera de Geología.

### **1.5.2 LÍMITES**

La investigación se centra en parámetros que forman parte de la historia geológica reciente.

## 1.6 DELIMITACIÓN ESPACIAL

### 1.6.1 LOCALIZACIÓN Y EXTENSIÓN DEL ÁREA

El área en estudio se encuentra ubicada en la zona urbana del municipio Cobán, A.V.

Se propuso para la investigación una extensión de 49 km<sup>2</sup>, dentro de la Hoja Cobán, las coordenadas de los vértices del área se observan en la tabla 1.

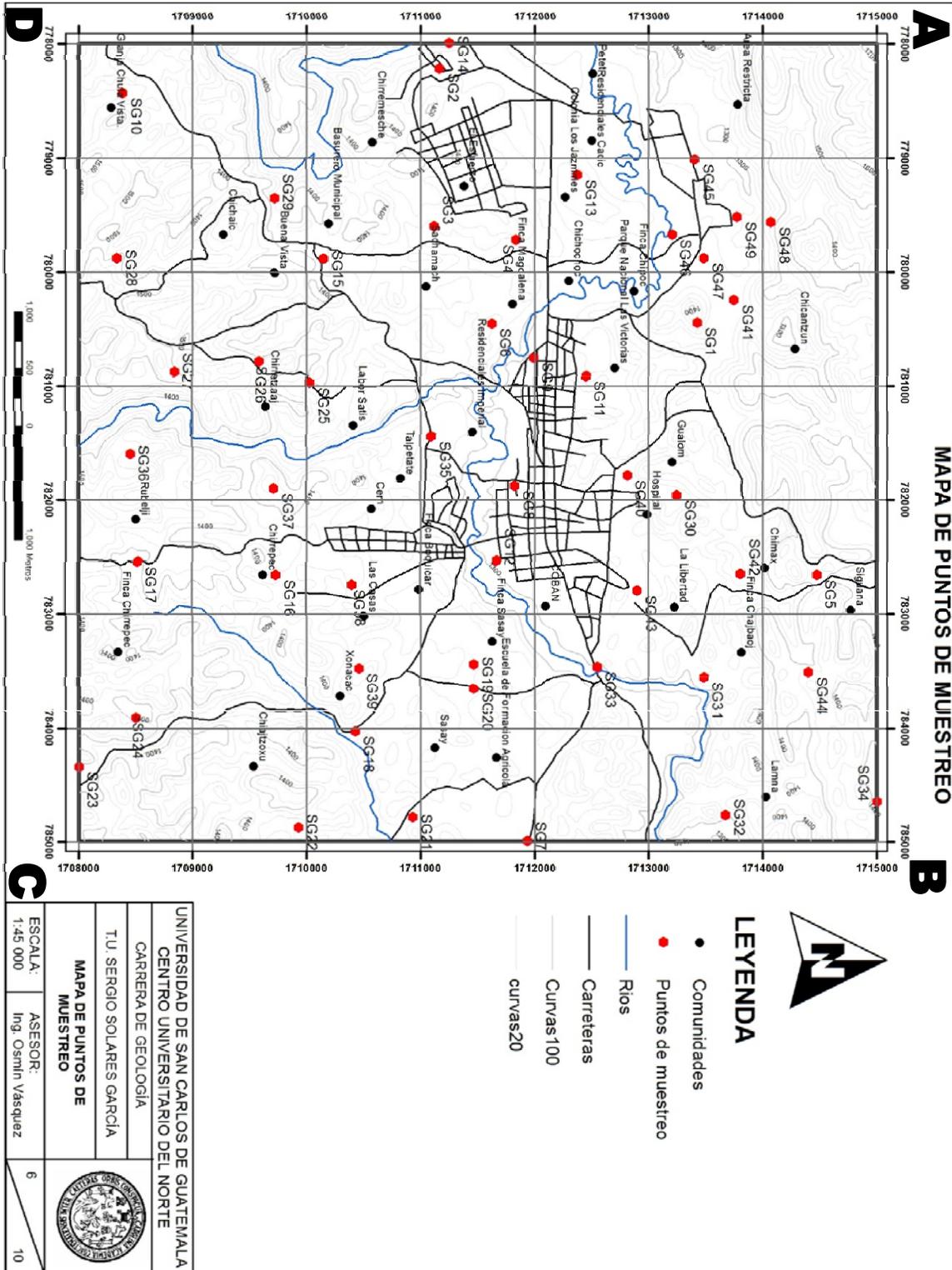
**TABLA 1**  
**COORDENADAS *UTM WGS84* ZONA 15N DE LOS**  
**VÉRTICES DEL ÁREA EN ESTUDIO**

<b>VERTICE</b>	<b>ESTE</b>	<b>NORTE</b>
A	778000	1715000
B	785000	1715000
C	785000	1708000
D	778000	1708000

**Fuente:** Modificado de Mapa Topográfico de la hoja Cobán 2162III, IGN.

La ubicación del área y los puntos de muestreo de suelos y velocidad de infiltración se observan en la figura 1.

**FIGURA 1**  
**UBICACIÓN Y PUNTOS DE MUESTREO DEL ÁREA DE ESTUDIO**



**Fuente:** Investigación de campo, 2014. Modificado de Mapa Topográfico de la hoja Cobán 2162 III. IGN.

## **CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA**

Para la realización de la presente tesis fue necesaria la evaluación de las metodologías existentes para la determinación de la vulnerabilidad intrínseca de acuíferos y de esta manera elegir la adecuada para la consecución de los objetivos. Dicha metodología conlleva a su vez el estudio y aplicación de métodos específicos para determinar cada una de las variables y tener los resultados más confiables.

### **2.1 MARCO METODOLÓGICO**

Para el desarrollo de la investigación se llevaron a cabo las siguientes etapas: Análisis bibliográfico, reconocimiento del área, fase de campo, laboratorio y gabinete; los que se describen a continuación:

#### **2.1.1 ETAPA DE RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO**

En esta etapa se consultaron diversos materiales bibliográficos, revistas, páginas web, informes, mapas, libros de texto sobre vulnerabilidad de acuíferos, específicamente los relacionados a zonas kársticas.

#### **2.1.2 ETAPA DE CAMPO**

Consistió en la realización de las pruebas de infiltración. También se extrajeron muestras de suelo, para su tratamiento en el laboratorio y obtener de esta manera todos los parámetros relacionados al mismo, con especial énfasis en la textura.

### **2.2.3 ETAPA DE LABORATORIO**

Se analizaron las muestras de suelo por el método de bouyucos y se determinó, su textura; además se elaboraron mapas con características del suelo adicionales, aunque no relevantes para el trabajo de tesis, sí como medio de consulta para otros, como porosidad, humedad, densidad relativa, los cuales están disponibles en los anexos.

### **2.2.4 ETAPA DE GABINETE**

En esta etapa se relacionó e interpretó los datos obtenidos en campo y laboratorio, además se realizó una delimitación de las dolinas, con el fin de elaborar los mapas temáticos del área de acuerdo a la metodología y se obtuvo como producto final el mapa de vulnerabilidad intrínseca.

## **2.2 METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA**

*EPIK* es un método multiparamétrico que fue desarrollado como una ayuda en el mapeo de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas en las regiones kársticas, con especial respeto a las áreas de influencia de las fuentes. Los mapas de la vulnerabilidad intrínseca basados en este método son una herramienta indispensable para el establecimiento de zonas de protección de aguas subterráneas.

Esta metodología se basa en la dinámica de las aguas subterráneas específicas en acuíferos kársticos. Cuatro parámetros son los que se toman en cuenta y de allí sus siglas: (1) El desarrollo del *epikarst* o *exokarst*, (2) la eficacia de la cubierta protectora es decir el suelo (3) la Infiltración (4) el desarrollo de la red de Kárstica.

Después de haber establecido un rango con un índice de vulnerabilidad para cada uno de los cuatro parámetros, se asigna a cada punto de muestreo a largo del área de estudio una valoración que estime su condición intrínseca y su relación con la dinámica de aguas subterráneas.

Después de ello un coeficiente de ponderación, cuyo valor ya ha sido probado, se atribuye a cada uno de los cuatro parámetros, de acuerdo a la capacidad de protección que proveen al acuífero.

Todos estos parámetros con sus respectivos valores y ponderaciones se describen detalladamente a lo largo de esta sección y de esta manera se obtiene para cada parte del área de estudio un índice de vulnerabilidad intrínseca que permite producir un mapa de vulnerabilidad de las aguas subterráneas, que representa la distribución espacial de la misma por medio de un SIG (sistema de información geográfica) donde se visualizan las zonas que necesitan mayor protección.

Foster e Hirita (1991) definen vulnerabilidad intrínseca como la sensibilidad del acuífero para ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta.<sup>3</sup>

En resumen los cuatro parámetros son:

- E: *epikarst (exokarst)*. Zona de intensa karstificación.
- P: *Protective cover*. Cobertura de protección o suelo.
- I: *infiltration*. Infiltración.
- K: *karst network development*. Red kárstica.

---

<sup>3</sup>Foster et.al. *Vulnerability*, 2000.<http://www.miliarium.com/prontuario/MedioAmbiente/Aguas/VulnerabilidadAcuiferos.htm#EPIK> (2010-03-11).

Los parámetros son ponderados con cuatro factores de ponderación y sumados entre sí para obtener finalmente lo que se conoce como índice de vulnerabilidad intrínseca o factor de protección. La expresión es:  $V = (a \cdot E) + (b \cdot P) + (g \cdot I) + (d \cdot K)$ . En donde V es el índice de vulnerabilidad; E, P, I, K son los mencionados; a, b, g, d son los factores de ponderación.

El método *EPIK* se implementa en tres etapas:

Primero, evaluación semi cuantitativa y asignación de campos de los cuatro parámetros mencionados. Segundo, cálculo de un índice de protección mediante la combinación y la ponderación de los valores de los cuatro parámetros de cada unidad de superficie en el área. Tercero la representación cartográfica de la distribución del índice de vulnerabilidad para la totalidad del área de estudio.

La contaminación del acuífero kárstico no ocurre por casualidad. Las zonas de alta vulnerabilidad que están delineadas con la consideración apropiada, debido a las características hidrogeológicas de las regiones kársticas, combinados con una adecuada gestión en la protección y la toma de medidas oportunas pueden reducir el riesgo de contaminación considerablemente.<sup>4</sup>

La aplicación de este método, basado en parámetros hidrogeológicos específicos deben permitir una mejor protección del agua potable producido por manantiales y pozos en ambientes kársticos.

La descripción de cada parámetro, así como la puntuación que se les asigna y el valor de los factores de ponderación se presentan a continuación:

---

<sup>4</sup>Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (*EPIK*). Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL). 1998. Pág. 9

### 2.2.1 CLASIFICACIÓN DE LA VARIABLE E (*EPIKARST* Ó *EXOKARST*).

Representa la zona de intensa karstificación y elevada permeabilidad en la superficie o cercana de ella; está constituido de un modelado característico, en el municipio de Cobán dominan a gran escala dolinas de diferentes dimensiones. En la tabla 2 se muestran los valores asignados para el análisis en el mapa topográfico a escala 1: 50 000.

**TABLA 2**  
**CLASIFICACIÓN DEL *EPIKARST* EN**  
**MAPA TOPOGRÁFICO**

NOTACIÓN	DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
E1	Dolinas (morfología kárstica típica)	1
E2	Alineación de dolinas (superficies de debilidad en la zona matricial que generan alineamientos)	3
E3	Ausencia de morfología <i>epikárstica</i>	4

**Fuente:** *Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK)*, 1998.

### 2.2.2 CLASIFICACIÓN DE LA VARIABLE P (*PROTECTIVE COVER*).

Está formado por el suelo, que constituye el material principal de cobertura, cada suelo tiene como parámetro a evaluar, la textura, que es en principio la que provee mayor o menor permeabilidad, es decir el grado de protección.

Se le asignan cuatro valores, como se observa en la tabla 3.

**TABLA 3**  
**CLASIFICACIÓN DE LA VARIABLE P**

NOTACIÓN	DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
P1	Suelos con textura de arena, arenoso-franco, franco-arenoso	1
P2	Suelos tipo franco, franco limoso, franco- arcilloso-arenoso, areno-arcilloso, limo	2
P3	Suelos franco arcillosos, franco-limoso-arcilloso, limoso-arcilloso	3
P4	Suelos arcillosos	4

**Fuente:** Modificado de *Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK)*, 1998.

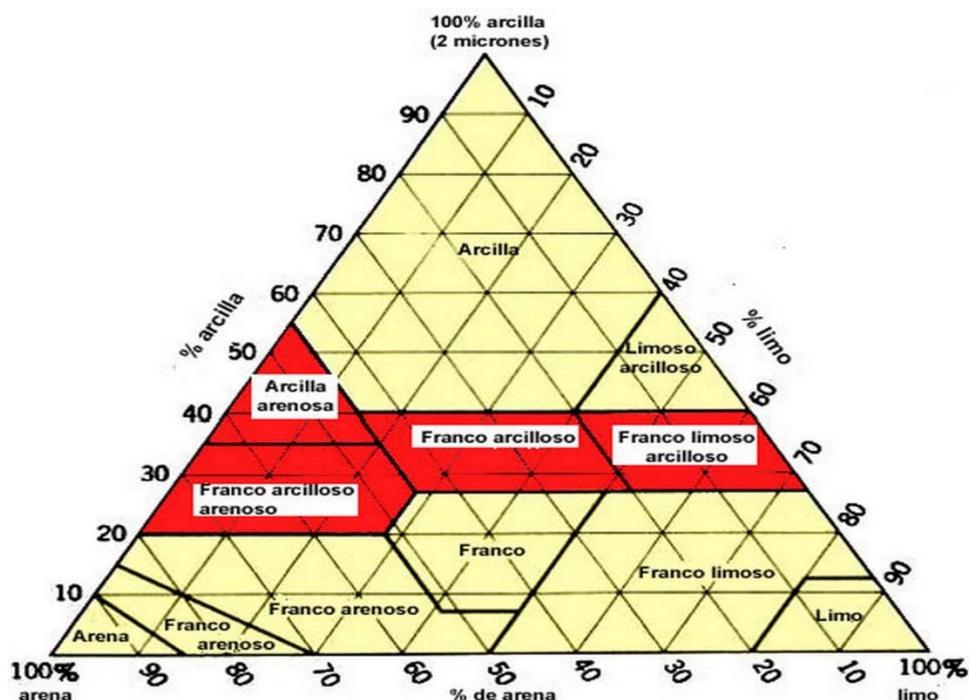
#### a. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE TEXTURA

Para determinar la textura se utilizó la metodología de *bouyoucos*, con esta metodología se aplica el principio que dice que las partículas suspendidas en el agua se asientan diferencialmente dependiendo de 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>5</sup>

<sup>5</sup>Adán Cano. *Manual de prácticas de la materia de edafología*, 2013. <http://www.utselva.edu.mx/pai/8/7/25.1.pdf> (15/10/2013).

Al aplicar esta metodología se obtienen los diferentes porcentajes de arena, limo y arcilla y se colocan en la gráfica ternaria para determinar el nombre textural. Ver figura 2.

**FIGURA 2**  
**DIAGRAMA TERNARIO DE LAS CLASES**  
**TEXTURALES BÁSICAS**



**Fuente:** Gisbert Blanquer, J. Textura del suelo. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/7775/Textura.pdf?sequence1> (2014-01-05).

### 2.2.3 CLASIFICACIÓN DE LA VARIABLE I (*INFILTRATION CONDITIONS*).

El parámetro correspondiente a la infiltración es el más difícil de estimar, puesto que la metodología para determinar la velocidad conlleva más tiempo, de acuerdo con los 49 puntos de muestreo se realizaron pruebas de infiltración asignando un valor de acuerdo a dicha velocidad según aparece en la tabla 4.

**TABLA 4**  
**CLASIFICACIÓN DE LA VARIABLE I**  
**DE ACUERDO A LAS VELOCIDADES DE INFILTRACIÓN**

NOTACIÓN	DESCRIPCIÓN Velocidad de infiltración (cm/h)	VALORACIÓN
I1	2,0 >	1
I2	0,50 – 2,0	2
I3	0,10 – 0,50	3
I4	< 0,10	4

**Fuente:** Modificado de: Propiedades físicas de los suelos, 1990. Y *Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK)*, 1998.

**a. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN DEL SUELO**

La velocidad de infiltración del agua en el suelo depende de las características físicas del suelo, tales como la 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 cuánto tarda en llegar un contaminante al acuífero.

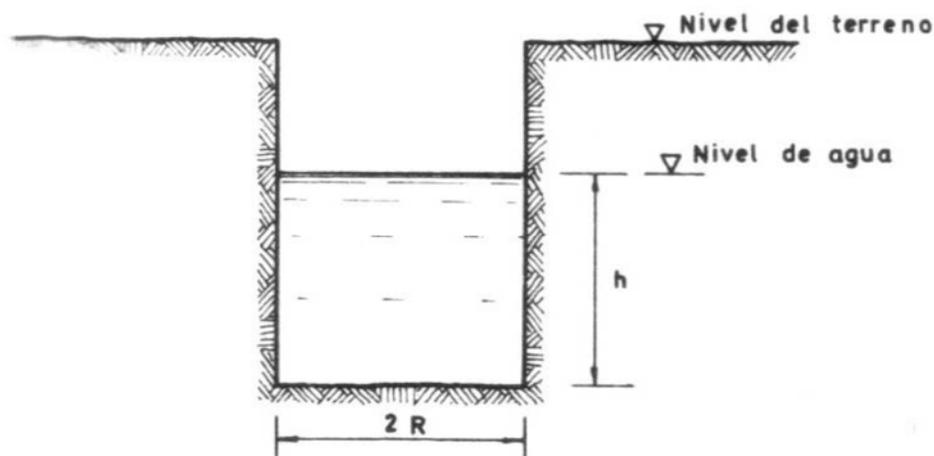
Para la estimación de la velocidad de infiltración en el área se utilizó el método de *Porchet*, de acuerdo a Espinosa (2004) es:

“Consiste en excavar un cilindro de radio R y llenarlo con agua hasta una altura h (ver Figura 3). La superficie a través de la cual se infiltra agua es:  $S = \pi \cdot R(2h+R)$ . Para un tiempo, dt, suficientemente pequeño para que pueda suponerse que la capacidad de infiltración, f, es constante, se verificará la igualdad:  $\pi \cdot R(2h+R)f = -\pi \cdot R^2 (dh/dt)$ . Simplificando y separando

variables obtenemos:  $f(dt) = -R(dh/2h+R)$ ; Integrando la ecuación anterior se tiene finalmente:  $f = (R/(2(t_2-t_1)) \cdot \ln((2h_1+R)/(2h_2+R))$ . Así pues, para determinar  $f$ , basta con medir pares de valores  $(h_1, t_1)$  y  $(h_2, t_2)$ , de forma que  $t_2$  y  $t_1$  no difieran demasiado y luego evaluarlo en la expresión anterior.”<sup>6</sup>

En la figura 3 se muestra un esquema del método de infiltración de *Porchet*.

**FIGURA 3**  
**SISTEMA DE INFILTRACIÓN EN EL MÉTODO**  
**PORCHET**



**Fuente:** González Sarmiento. Apuntes de Hidrología. Disponible en: <http://es.slideshare.net/carlosgamboalopez9/apuntes-de-hidrologa-gonzales> (2014-01-05).

<sup>6</sup>Espinoza, C. Hidráulica de agua subterránea y su aprovechamiento. <http://www.cec.uchile.cl/~ci51j/txt/Apuntes/Tema03.pdf> (07/02/2014)

#### 2.2.4 CLASIFICACIÓN DE LA VARIABLE K (*KARST NETWORK DEVELOPMENT*).

A la red kárstica se le asignan tres valores de acuerdo al grado de desarrollo que tenga en cualquier zona del área de estudio, está relacionada con la variable E. En la tabla 5 se describen los tipos de valoraciones utilizados.

**TABLA 5  
CLASIFICACIÓN DE LA VARIABLE K  
DE ACUERDO AL DESARROLLO KÁRSTICO**

NOTACIÓN	DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN
K1	Red kárstica bien desarrollada	1
K2	Zonas pobremente karstificadas	2
K3	Ausencia de karstificación	3

**Fuente:** *Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK)*, 1998.

#### 2.2.5 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA

Los cuatro parámetros considerados anteriormente determinan el índice de vulnerabilidad intrínseca, para calcular dicho índice en toda el área se utiliza la fórmula:  $V = (a \cdot E) + (b \cdot P) + (g \cdot I) + (d \cdot K)$ , en donde V es el índice de vulnerabilidad; a, b, c, d, son los coeficientes de ponderación para cada parámetro y E, P, I, K son las categorías de cada parámetro.

Fueron asignados coeficientes de ponderación en el método *EPIK* desde que fuera desarrollado, después de ser evaluado en distintas regiones en Suiza, de acuerdo a la incidencia de cada variable como determinantes de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero. En la tabla 6 observamos la fórmula de vulnerabilidad intrínseca y los coeficientes

de ponderación de cada variable propuestos por los científicos *Doerfliger y Zwahlen*.

**TABLA 6**  
**FÓRMULA Y FACTORES DE PONDERACIÓN DEL**  
**MÉTODO EPIK**

$V = (a \cdot E) + (b \cdot P) + (g \cdot I) + (d \cdot K)$			
a	b	g	d
3	1	3	2

**Fuente:** *Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK)*, 1998.

De acuerdo a esto, las variables E (*epikarst*) é I (*infiltration*) reciben factores de ponderación más altos, porque su implicación en la vulnerabilidad de un acuífero es elevada, por ejemplo, si una zona tiene altas velocidades de infiltración un contaminante llegará más rápido al acuífero y por consiguiente la carga contaminante será mayor.

Al realizar los cálculos correspondientes con los valores relativos y los factores de ponderación, se tiene que el índice de vulnerabilidad o factor de protección de un acuífero en medio kárstico puede variar entre 9 (máxima vulnerabilidad) y 34 (mínima vulnerabilidad). En la tabla 7 se observan los distintos grados de vulnerabilidad.

**TABLA 7**  
**GRADOS DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA EN EL**  
**METODO *EPIK***

<b>Grado de vulnerabilidad</b>	<b>Valor <i>EPIK</i></b>
Muy alto	9-19
Alto	20-24
Medio	25-30
Bajo	31-34

**Fuente:** *Groundwater Vulnerability Mapping in Karstic Regions (EPIK)*, 1998.

El método *EPIK* utiliza un índice inverso, es decir que se obtienen valores más bajos mientras más vulnerable es el área y valores más altos mientras menos vulnerable sea. Dicho de otro modo, un área tiene mayor protección cuanto más alto sea el valor *EPIK*.

## **CAPÍTULO 3**

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

En el siguiente apartado se presentan de manera concisa los resultados obtenidos de acuerdo a la metodología utilizada.

#### **3.1 MAPA DE LA VARIABLE *E* (EPIKARST)**

De acuerdo a la valoración planteada en el capítulo anterior, se elaboró un mapa de dolinas (figura 4) del área y se agruparon las que se encontraron alineadas de acuerdo a la metodología resumida en la tabla 2, encontrándose que la mayor densidad de las mismas, se encuentra al norte y al sur de la ciudad de Cobán.

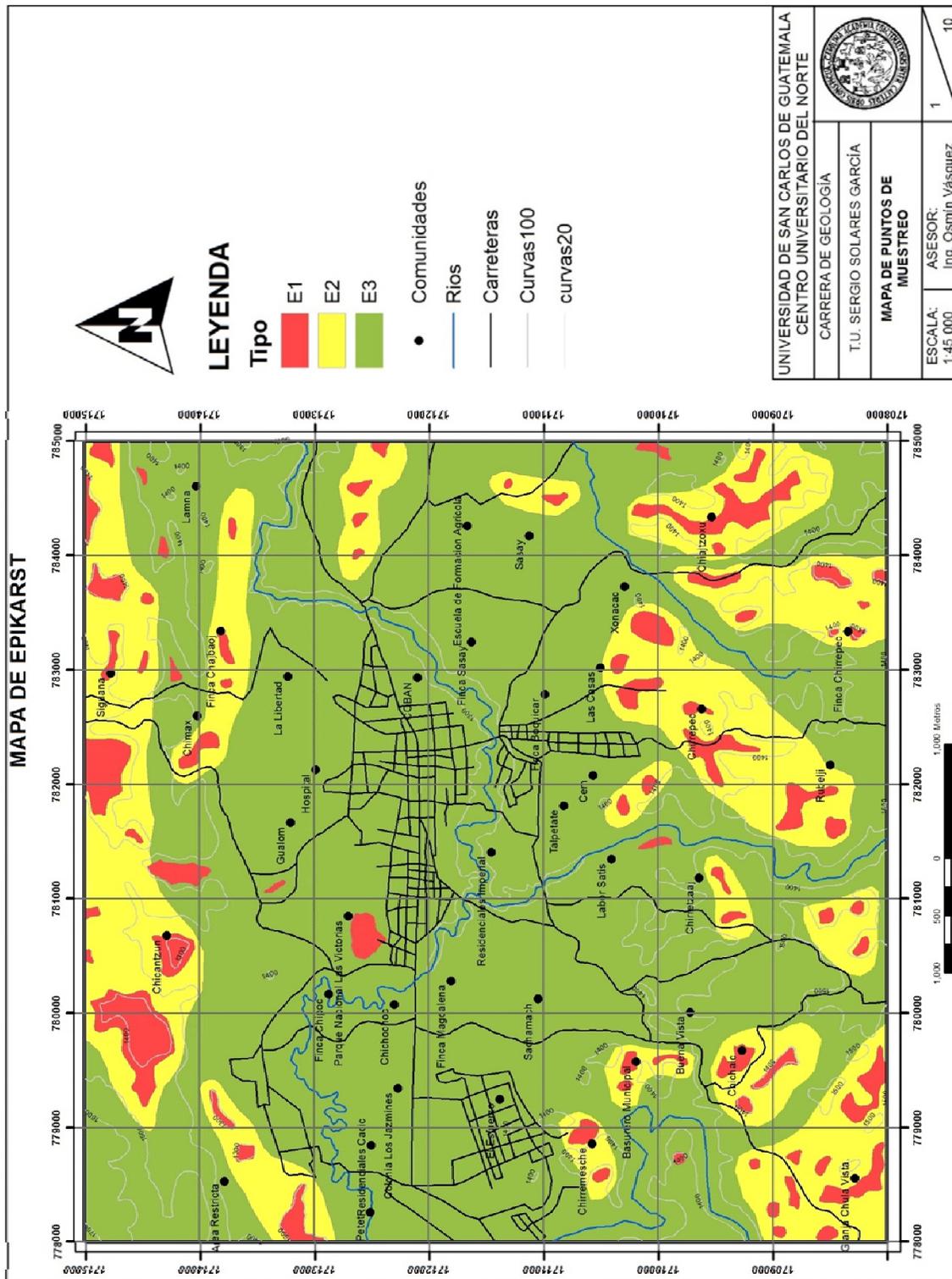
En el norte se observa una alta densidad de dolinas, en especial al noreste en los alrededores del lugar conocido como *siguanjá*, donde se aprecia una alineación de varias dolinas con rumbo aproximado *N85E*. Al norte de la colonia La Libertad otra alineación marca un rumbo *N75W*. Por otro lado en el noroeste se observan tres dolinas formando una alineación con rumbo *N45E*.

Al sur de la ciudad como se observa en la figura 4, vemos que la densidad de dolinas es aún mayor que en el norte, con especial atención al suroeste, alrededores de la granja Chula Vista y Chichaic. En la parte sur franco del área de estudio, conocido como Chirretzaaj, también hay varias dolinas que fueron delimitadas.

En la ruta al municipio de San Juan Chamelco es posible observar una fuerte cantidad de dolinas, especialmente en los alrededores de Chirrepec y Chiatzoxu.

Las alineaciones preferentes de las dolinas al sur del área son: *N35W* y *N30W* en la zona suroeste; *N30E*, *N05E* y *N10W* en la zona sureste.

**FIGURA 4**  
**MAPA DEL EPIKARST**



Fuente: Investigación de campo, 2014.

### 3.2 MAPA DE LA VARIABLE P (*TEXTURA DEL SUELO*)

El mapa de la variable P se definió de acuerdo al tipo de suelo encontrado, para ello se realizaron 49 puntos de muestreo en el área estudiada y de esa forma obtener un mapa confiable que en el que se pudieran diferenciar claramente de P1 a P4, de los suelos más arenosos a los más arcillosos, las coordenadas y el tipo de suelo se observan en muestran en la tabla 8.

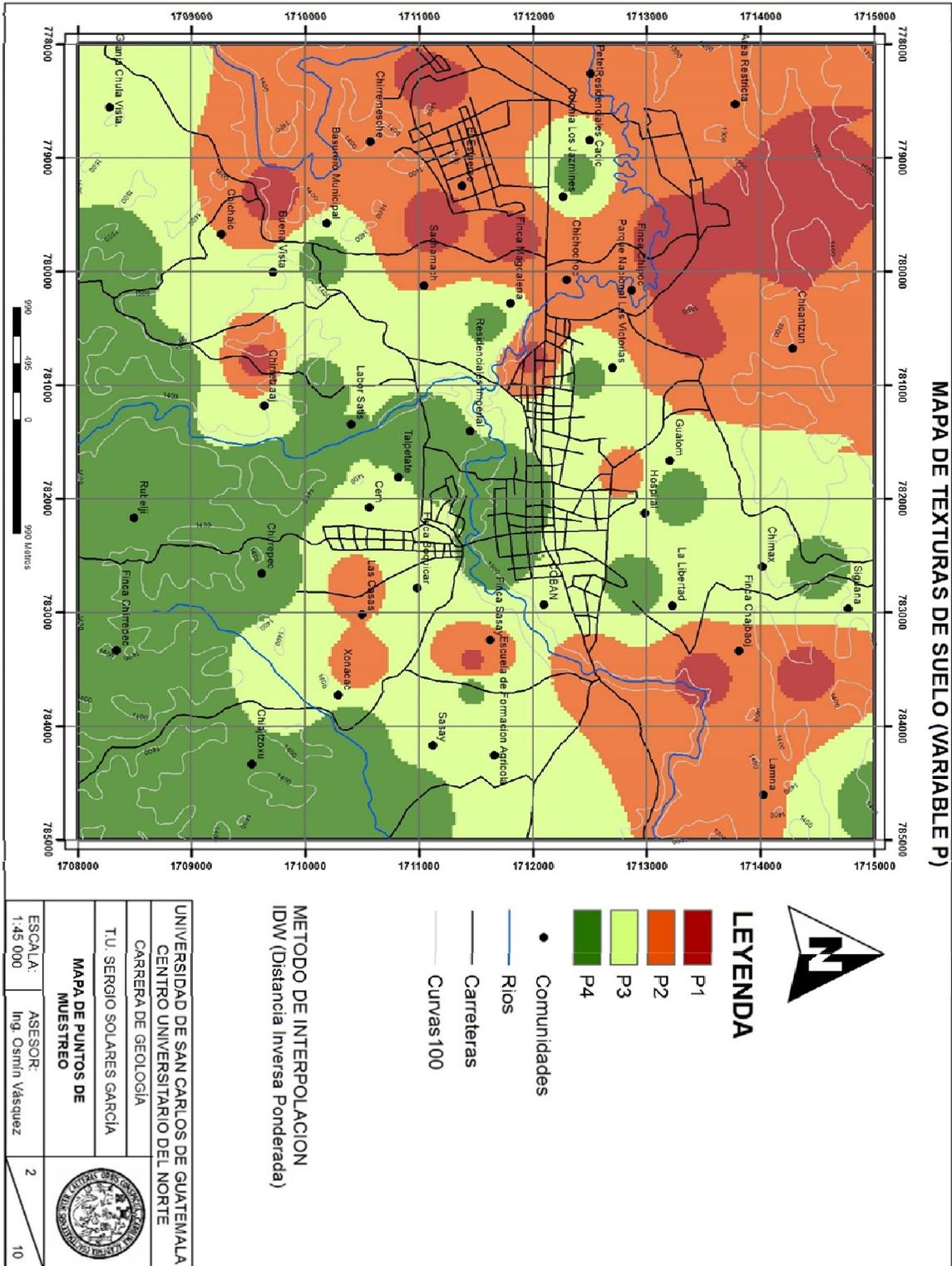
**TABLA 8**  
**TIPOS DE SUELO DETERMINADOS POR LOS PUNTOS DE MUESTREO**

Orden SG	COORDENADAS <i>UTM WGS84</i>		TIPO DE SUELO	VALOR P
	ESTE	NORTE		
1	780450	1713422	Franco Arenoso	1
2	778023	1711160	Franco Arenoso	1
3	779602	1711115	Franco Arenoso	1
4	779720	1711832	Franco Arenoso	1
5	782663	1714473	Arcilla	4
6	780457	1711621	Arcilla	4
7	784997	1711939	Franco Arcilloso	3
8	781879	1711825	Arcilla	4
9	780762	1711989	Franco Arenoso	1
10	778433	1708382	Franco Arcilloso	3
11	780922	1712448	Arcilla	4
12	782540	1711662	Arcilla	4
13	779151	1712370	Arcilla	4
14	777852	1711240	Franco Limoso	2
15	779885	1710151	Arcilla	4
16	782661	1709730	Arcilla	4
17	782547	1708515	Arcilla	4
18	784028	1710423	Arcilla	4
19	783662	1711464	Franco Arenoso	1
20	783662	1711464	Arcilla	4

21	784789	1710928	Arcilla	4
22	784995	1709924	Arcilla	4
23	784345	1708218	Arcilla	4
24	783912	1708500	Arcilla	4
25	780977	1710027	Arcilla	4
26	780794	1709578	Franco Arenoso	1
27	780883	1708837	Arcilla	4
28	779882	1708339	Arcilla	4
29	779355	1709714	Franco Arenoso	1
30	781961	1713243	Arcilla	4
31	783563	1713482	Franco Arenoso	1
32	784770	1713671	Franco	2
33	783470	1712544	Franco Limoso	2
34	784650	1714716	Arcilla	4
35	781448	1711093	Arcilla	4
36	781596	1708447	Arcilla	4
37	781903	1709711	Arcilla	4
38	782750	1710398	Franco Limoso	2
39	783485	1710455	Franco Limoso	2
40	781788	1712810	Franco	2
41	780246	1713657	Franco	2
42	782655	1713803	Franco Arcilloso	3
43	782801	1712898	Arcilla	4
44	783519	1714399	Franco Arenoso	1
45	779249	1713402	Franco	2
46	779660	1713379	Franco Arenoso	1
47	779884	1713483	Franco Arenoso	1
48	779566	1713827	Franco Arenoso	1
49	779521	1713772	Franco Arenoso	1

Fuente: Investigación de campo, 2014.

**FIGURA 5**  
**MAPA DE TEXTURAS DE SUELO RECLASIFICADO P1-P4**



Fuente: Investigación de campo, 2014.

Luego de obtener los datos en los 49 puntos que fueron muestreado, se procedió a interpolarlos espacialmente, en el programa *Arcgis* utilizando el método conocido como *IDW* o distancia inversa ponderada, puesto que se obtienen mejores resultados de interpolación cuando se tiene un muestreo denso y la ponderación de los puntos reales no se ve afectada.

En la figura 5, se observa que los suelos con granulometría más grande, es decir los más arenosos se encuentran principalmente en el noroeste, en los alrededores de la Fábrica de municiones se obtuvo una clasificación P1. También se encuentran estos suelos al oeste del área de estudio. Cerca del vértice noreste, carretera a San Pedro Carchá, también se identificaron suelos clasificados P1.

Los suelos clasificados P4, es decir Arcillosos, se encuentran predominantemente al sureste del área. Del centro al este y de norte a suroeste se observa una franja con suelos predominantemente Franco arcillosos, estos suelos dotan a esas zonas de mayor protección debido a su comportamiento impermeable.

Los datos detallados de los 49 puntos del muestreo de suelos se pueden consultar en el anexo 1.

### **3.3 MAPA DE LA VARIABLE I (INFILTRACIÓN)**

Este mapa se construyó a partir de la velocidad de infiltración básica, según la metodología propuesta en la tabla 4, es decir, la velocidad que permanece relativamente constante al llegar al punto de saturación del suelo, que representa la capacidad real del suelo a la conducción del agua. Se pueden consultar las gráficas individuales de infiltración en el anexo 2.

Para ello también se utilizaron los 49 puntos de muestreo definidos en el área y se utilizó la metodología descrita en el capítulo 2. De esta manera

observamos los resultados en el siguiente mapa de infiltración, figura 6. De acuerdo a la metodología propuesta se distinguieron 4 tipos de infiltración I1, mayor velocidad de infiltración a I4, menor velocidad de infiltración en el punto de muestreo. La velocidad de infiltración básica para cada punto se resume en la tabla 9.

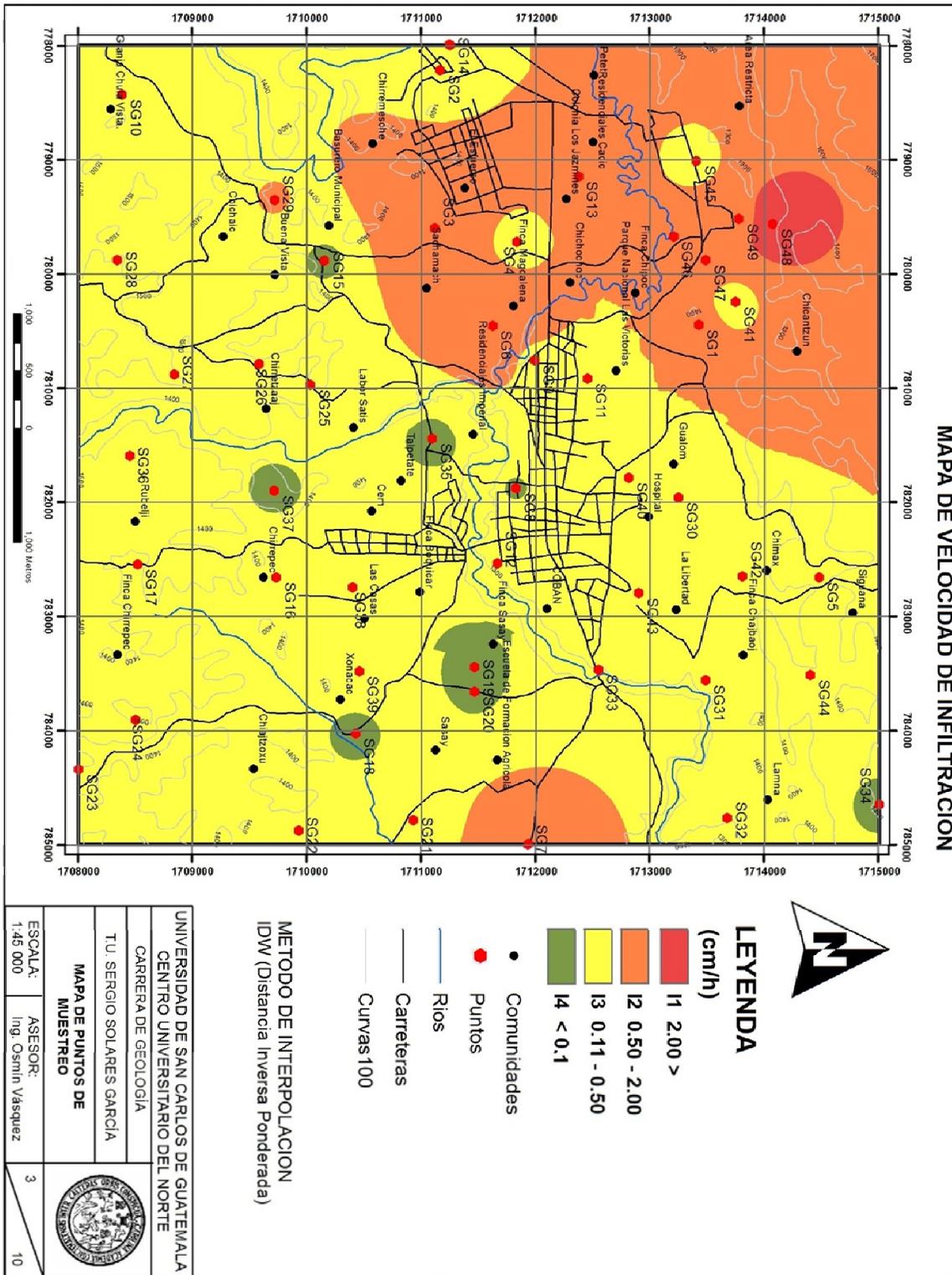
**TABLA 9**  
**VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN BÁSICA POR PUNTO DE MUESTREO**

ORDEN SG	COORDENADAS UTM WGS84		INFILTRACIÓN BÁSICA (cm/h)	VALOR I
	ESTE	NORTE		
1	780450	1713422	0,7	2
2	778023	1711160	0,31	3
3	779602	1711115	1,44	2
4	779720	1711832	0,31	3
5	782663	1714473	0,44	3
6	780457	1711621	1,22	2
7	784997	1711939	1,62	2
8	781879	1711825	0,09	4
9	780762	1711989	0,41	3
10	778433	1708382	0,16	3
11	780922	1712448	0,2	3
12	782540	1711662	0,18	3
13	779151	1712370	0,62	2
14	777852	1711240	0,44	3
15	779885	1710151	0,03	4
16	782661	1709730	0,46	3
17	782547	1708515	0,42	3
18	784028	1710423	0,05	4
19	783662	1711464	0,04	4
20	783662	1711464	0,07	4

21	784789	1710928	0,1	4
22	784995	1709924	0,11	3
23	784345	1708218	0,15	3
24	783912	1708500	0,35	3
25	780977	1710027	0,27	3
26	780794	1709578	0,24	3
27	780883	1708837	0,11	3
28	779882	1708339	0,16	3
29	779355	1709714	0,51	2
30	781961	1713243	0,2	3
31	783563	1713482	0,16	3
32	784770	1713671	0,13	3
33	783470	1712544	0,11	3
34	784650	1714716	0,08	4
35	781448	1711093	0,03	4
36	781596	1708447	0,22	3
37	781903	1709711	0,04	4
38	782750	1710398	0,12	3
39	783485	1710455	0,22	3
40	781788	1712810	0,18	3
41	780246	1713657	0,13	3
42	782655	1713803	0,2	3
43	782801	1712898	0,18	3
44	783519	1714399	0,13	3
45	779249	1713402	0,1	4
46	779660	1713379	0,5	2
47	779884	1713483	0,58	2
48	779566	1713827	4,75	1
49	779521	1713772	0,64	2

Fuente: Investigación de campo, 2014.

**FIGURA 6**  
**MAPA DE VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN I1 – I4**



Fuente: Investigación de campo, 2014.

Luego de obtener los datos de velocidad de infiltración básica en los 49 puntos que fueron muestreados, se procedió a interpolarlos espacialmente, utilizando, de igual forma que con la textura del suelo, el método conocido como *IDW* o distancia inversa ponderada, por ser ésta la más adecuada para el tipo de muestreo.

En el mapa de velocidad de infiltración se observa que las más altas velocidades de infiltración se encuentran en la región noroeste del área de estudio, con clasificación I1 e I2 y un segmento en el extremo este. Dichas velocidades se relacionan con la textura del suelo que predomina en esas zonas, tipo franco arenoso, franco y franco limoso.

Sin embargo la velocidad de infiltración no se debe sólo a la textura, sino también están relacionados factores como el espesor y la compactación del suelo. Por otro lado, el rango de velocidad de infiltración que es más recurrente en el área es la clasificación I3 (0,11 cm/h – 0,50 cm/h) que se extiende como franja en la parte sur y abarca también de centro a noreste, asociados generalmente a los suelos arcillosos y franco arcillosos.

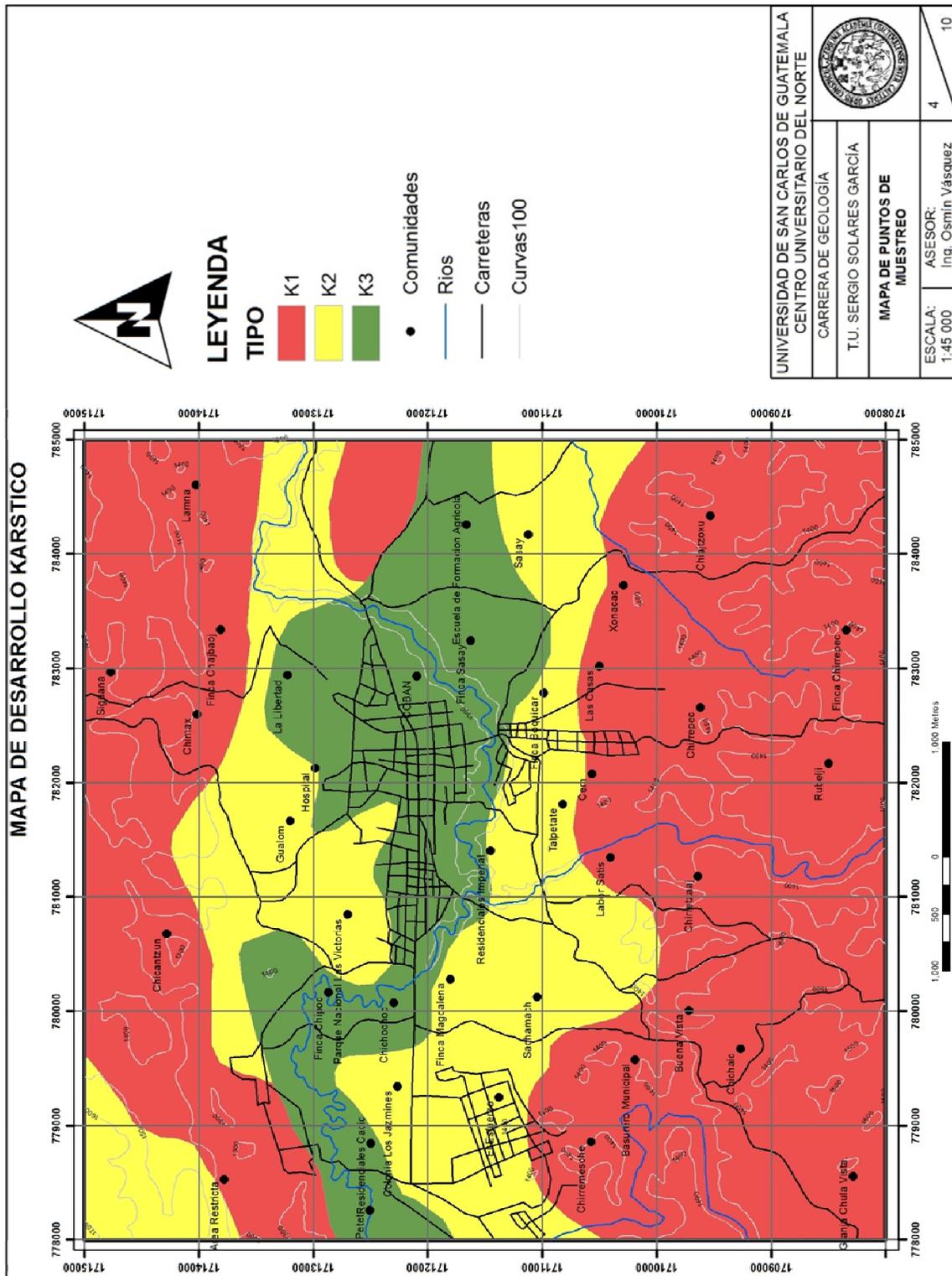
### **3.4 MAPA DE LA VARIABLE K (KARSTIFICACIÓN)**

Se encuentra íntimamente relacionado con el *epikarst* sin embargo, esta variable muestra la vulnerabilidad que puede representar un área en el que predominen desarrollos kársticos, debido a la geomorfología propia de los ambientes de disolución.

En el área de estudio se observa un evidente desarrollo kárstico tanto al norte como al sur de la zona urbana. Se pueden observar zonas depresivas y topografía kárstica predominante. Dichas irregularidades son indicadoras de alto desarrollo kárstico subterráneo e interconectividad que evidencia campos de dolinas al norte y sur. Ver figura 7.

La vulnerabilidad de un acuífero es directamente proporcional a su desarrollo kárstico de tal manera que es evidente que en las zonas delimitadas como K1 tenderán a ser más vulnerables. Sin embargo esto no es definitivo puesto que los otros factores tienen un peso que es necesario sumar porque hay muchas combinaciones que se pueden dar y de esta manera es posible que se provea al acuífero de protección con la suma de la variable I o P.

**FIGURA 7**  
**MAPA DE DESARROLLO KÁRSTICO K1 - K3**



Fuente: Investigación de campo, 2014.

### 3.5 MAPA DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA

La vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos kársticos a la contaminación es el resultado, según el método *EPIK*, de la suma de los cuatro factores con sus respectivos coeficientes de ponderación:  $V = (a \cdot E) + (b \cdot P) + (g \cdot I) + (d \cdot K)$ .

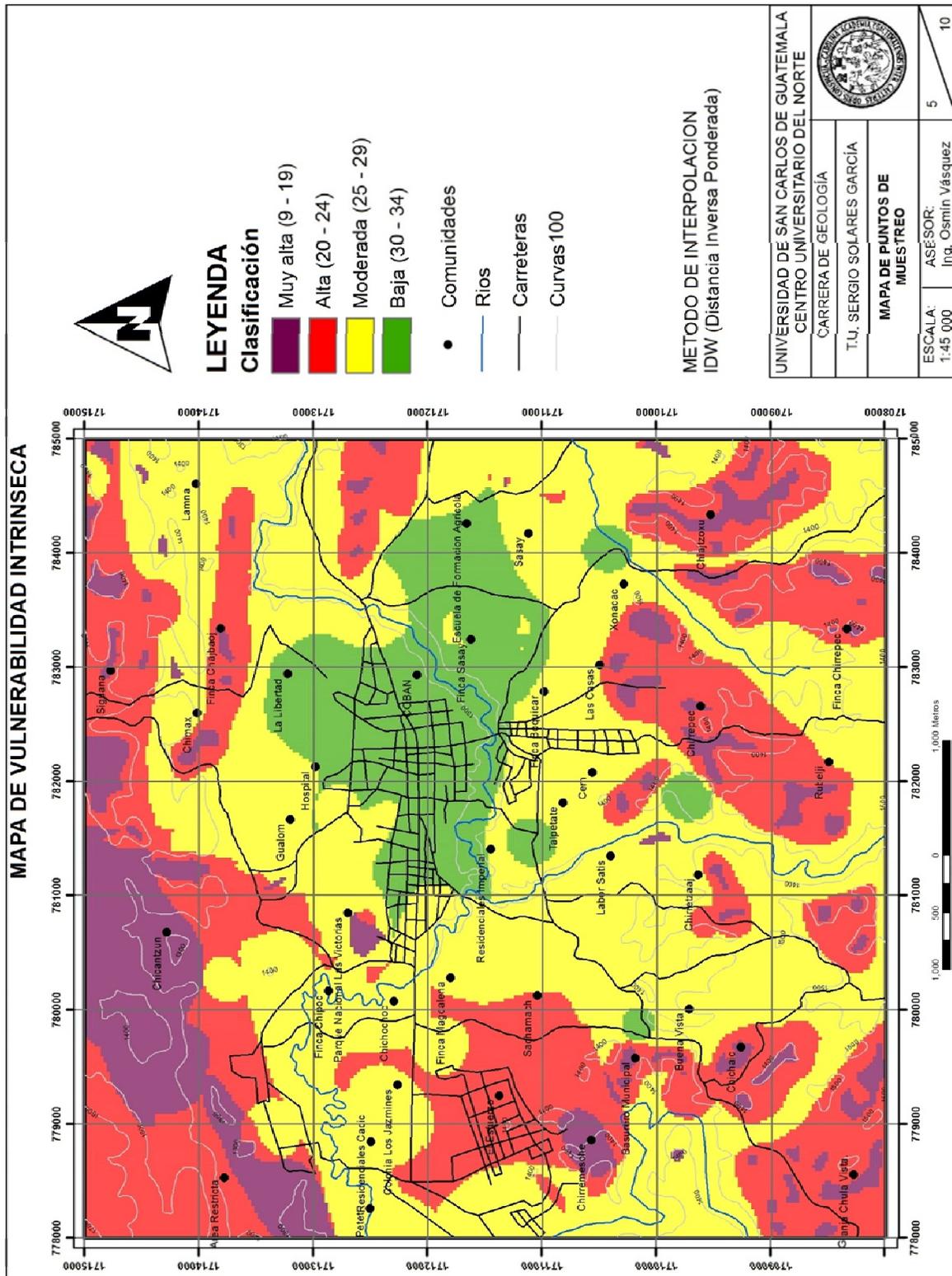
De tal manera que como producto final, por medio del álgebra de mapas, en el programa *Arcgis*, y usando el método de interpolación *IDW* se obtuvo un mapa de suma utilidad pues delimita con precisión las zonas que presentan más vulnerabilidad intrínseca a la contaminación en los 49 km<sup>2</sup> analizados.

Las zonas en donde se observa una vulnerabilidad intrínseca muy alta, representadas en color morado en el mapa de la figura 8, representan aproximadamente un 15% del área de estudio, en estas zonas se debe prestar especial atención con el uso del suelo, puesto que focos de contaminación en esas zonas representaría que los contaminantes llegaran más rápido a los acuíferos.

Con especial atención se observa que el lugar en donde se encuentra actualmente el basurero municipal de la ciudad de Cobán, está en una zona que arrojó una vulnerabilidad intrínseca muy alta. De igual manera entre las demás zonas en que se observan vulnerabilidades marcadas como muy alta son los alrededores de las siguientes comunidades: Chirremesché, Chichaic, Chirretzaaj, Chula Vista, Rubeljé, Chirrepec, Chibulbub, Chinimlajom, finca chajbaoj, Siguanhá, Chicantzún, Chimax, Chajxucub, Lamná, entre otras y dentro del área urbana la parte sur del Parque Nacional Las Victorias.

Con vulnerabilidad intrínseca alta, se encuentran dentro de la zona urbana, El Esfuerzo I y II, parte de Sachamach y la finca magdalena. Con vulnerabilidad baja se observa parte del casco urbano más antiguo de la ciudad, zonas 2, 3 y 4, parte de la zona 1, además la finca Sasay y parte colonia la Libertad. Con vulnerabilidad moderada, el resto del área de estudio.

**FIGURA 8**  
**MAPA DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA**



Fuente: Investigación de campo, 2014



## CONCLUSIONES

### GENERAL

- A través de la aplicación del método *EPIK* se delimitaron zonas con baja, moderada, alta y muy alta vulnerabilidad.

La vulnerabilidad muy alta representa un 15% del área de estudio y se encuentra en los alrededores de las siguientes lugares: Basurero municipal, comunidades: Chirremesché, Chichaic, Chirretzaaj, Chula Vista, Rubeljí, Chirrepec, Chibulbub, Chinimlajom, Finca Chajbaoj, Siguanhá, Chicantzún, Chimax, Chajxucub, Lamná; y dentro del área urbana una fracción del parque nacional Las Victorias.

30% del área estudiada tiene vulnerabilidad intrínseca alta y entre ella destacan las zonas urbanas: El Esfuerzo 1 y 2, parte de la Finca Sachamach y la Finca Magdalena.

Vulnerabilidad baja se presenta en parte del casco urbano más antiguo de la ciudad, zonas 2, 3, 4 y parte de la zona 1, además la Finca Sasay y una fracción de la colonia La Libertad representando un 10% del área total y con vulnerabilidad moderada, el resto del área de estudio.

## ESPECÍFICAS

- La utilización del método EPIK permitió la obtención de datos confiables a partir de los cuatro parámetros estudiados: exokarst, textura de suelos, velocidad de infiltración y delimitación de las zonas con mayor desarrollo kárstico.
- Según la textura de los suelos, 29 % son franco arenosos y franco limosos, los que afloran principalmente al noroeste, en los alrededores de la Fábrica de Municiones y se extienden hacia el sur formando una franja que llega hasta los alrededores de la comunidad Chichaic. Los suelos francos representan el 2% y los suelos con textura franco arcillosa y arcillosa constituyen 69% extendiéndose del norte hacia el suroeste, dominando la mayor parte del área.
- Con base en el análisis de la velocidad de infiltración el rango dominante fue el intervalo que va de 0,11 cm/h a 0,50 cm/h localizado hacia el noreste y sur, representando 73% del área; los valores altos se encuentran en el noroeste (mayores de 0,51 cm/h) con 23% y las velocidades más bajas (menores de 0,10 cm/h) en pequeñas porciones predominantemente esparcidas en la región central con 4%.

## RECOMENDACIONES

- Desarrollar estrategias de protección de acuíferos que incluyan un conjunto de actividades y disposiciones para conservar tanto la cantidad como la calidad del recurso hídrico. Las estrategias de protección deben contener como mínimo la planificación del ordenamiento territorial utilizando como herramienta la correlación con la clasificación del mapa de vulnerabilidad intrínseca que se ha generado en esta investigación junto con otros complementarios que puedan sucederse.
- Incluir en los currículos de estudio desde los niveles de primaria, el tema del agua subterránea para lograr una difusión del conocimiento del recurso y su preservación. Pensando que el agua será el recurso estratégico del siglo, es necesario que las futuras generaciones estén concientizadas de su importancia y mejor preparadas para ser más eficientes en su conservación.
- Actualmente, de acuerdo a este estudio, el basurero municipal se encuentra en un lugar con alta vulnerabilidad intrínseca a la contaminación, por lo tanto se deben hacer estudios adicionales para determinar el área más adecuada para ubicarlo usando como base éste mapa de vulnerabilidad, además, que cumpla con las características y requisitos mínimos de construcción que debe tener un relleno sanitario.
- Realizar un estudio de impacto ambiental para determinar el grado de contaminación que el basurero municipal ha hecho sobre el agua subterránea.



## BIBLIOGRAFÍA

Andreo, B. Et Al. *Ensayo metodológico para la protección de aguas subterráneas en acuíferos kársticos. Aplicación al Sistema Torremolinos*. Asociación internacional de hidrogeólogos. España: Grupo Español, 2 002.

*Apuntes de hidrología*. <http://es.slideshare.net/carlosgamboalopez9/apuntes-de-hidrologa-gonzles> (05 de enero de 2 014).

*Conceptos de geomorfología*. <http://60gp.ovh.net/~ramales/cuademol/geomor.htm> (02 de mayo de 2 014).

Doerfliger, Nathalie y François Zwalhen. *Groundwater vulnerability mapping in karstic regions (EPIK), Practical Guide*. Suiza: Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, 1 998.

Instituto Geográfico Nacional –IGN– *Hoja Topográfica Cobán (No. 2163-II)*. Escala 1:50 000, Color, 1 976.

Matus, O. Faustino y J. Jiménez, F. *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica: Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua*. Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza División de Investigación y Desarrollo Turrialba, 2 009.

*Tipos de acuíferos*. <http://blog.pucp.edu.pe/media/3815/20110520-Tipos%20de%20acuíferos.pdf> (06 de febrero de 2 014).

*Textura del suelo*. <http://es.slideshare.net/carlosgamboalopez9/Apuntes-de-hidrologa-gonzles> (05 de enero de 2 014).

*Vulnerabilidad de acuíferos*. <http://www.miliarium.com/prontuario/MedioAmbient/e/aguas/VulnerabilidadAcuíferos.htm#EPIK> (14 de marzo de 2 014).



V.B.º

Adán García Véliz  
 Licenciado en Pedagogía e Investigación Educativa  
 Bibliotecario



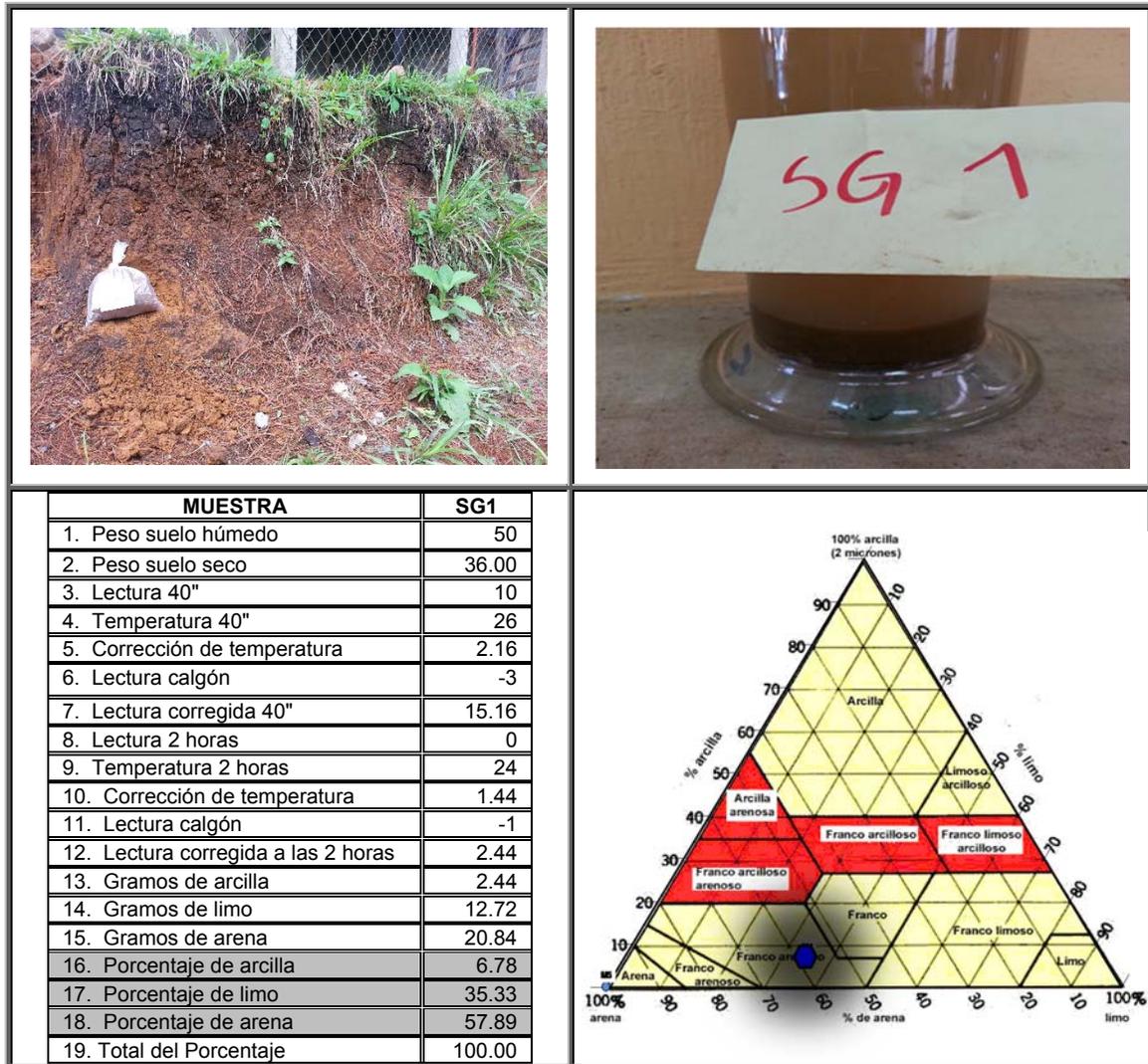
# **ANEXOS**



## ANEXO 1

### FOTOGRAFÍAS, DIAGRAMAS TERNARIOS Y DATOS METODOLÓGICOS COMPLETOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

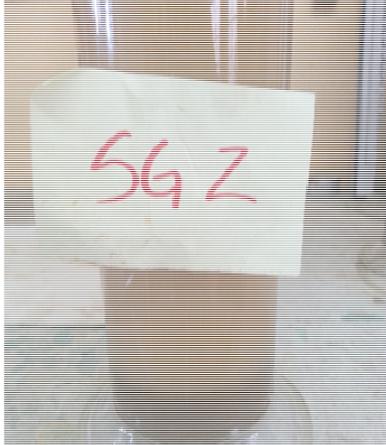
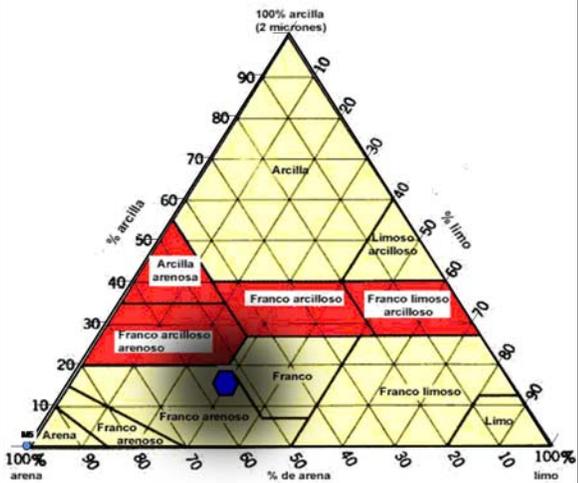
#### PUNTO SG1



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

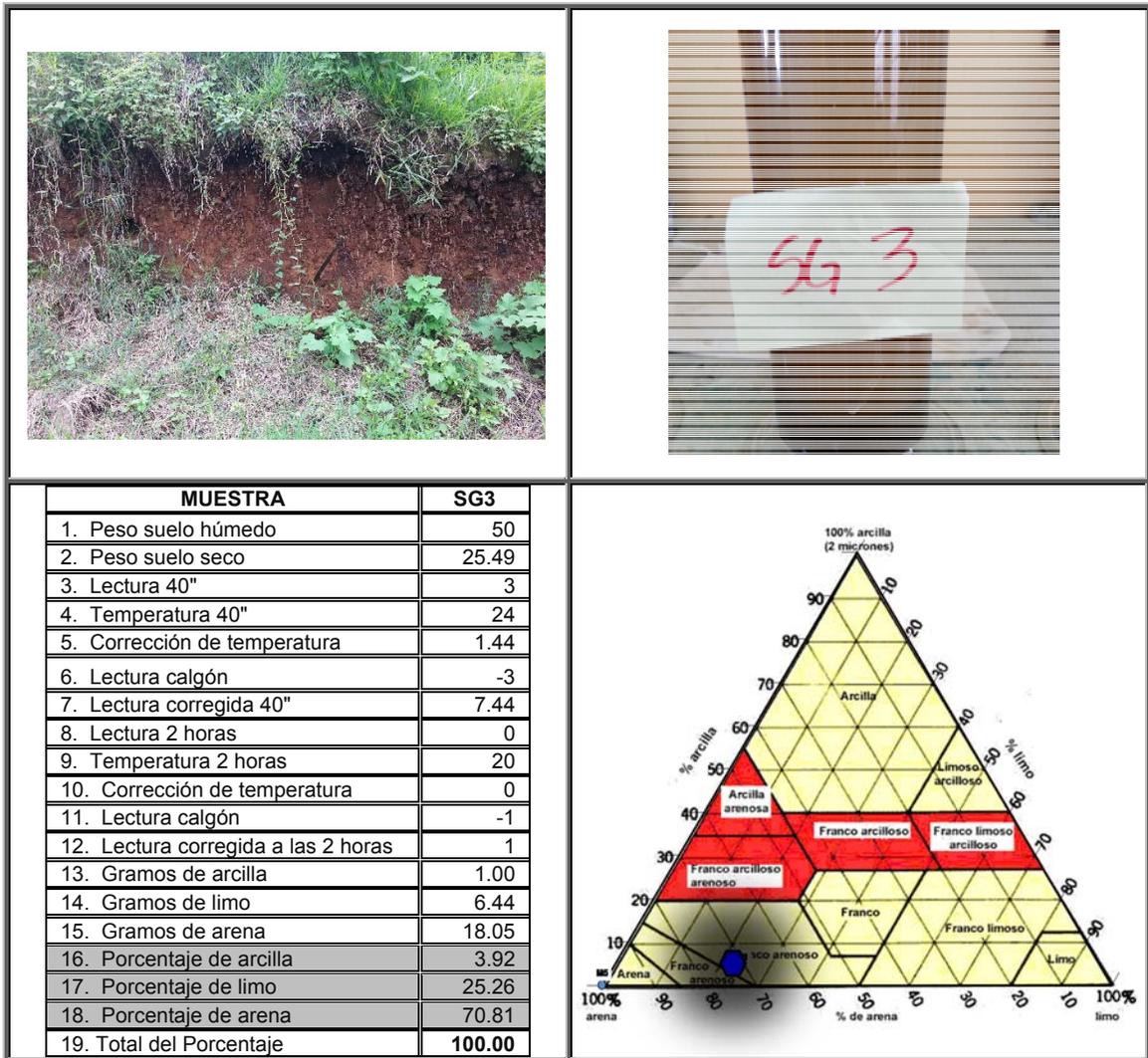
**PUNTO SG2**

																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 70%;">MUESTRA</th> <th style="width: 30%;">SG2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1. Peso suelo húmedo</td><td style="text-align: center;">50</td></tr> <tr><td>2. Peso suelo seco</td><td style="text-align: center;">29.66</td></tr> <tr><td>3. Lectura 40"</td><td style="text-align: center;">9</td></tr> <tr><td>4. Temperatura 40"</td><td style="text-align: center;">24</td></tr> <tr><td>5. Corrección de temperatura</td><td style="text-align: center;">1.44</td></tr> <tr><td>6. Lectura calgón</td><td style="text-align: center;">-3</td></tr> <tr><td>7. Lectura corregida 40"</td><td style="text-align: center;">13.44</td></tr> <tr><td>8. Lectura 2 horas</td><td style="text-align: center;">2</td></tr> <tr><td>9. Temperatura 2 horas</td><td style="text-align: center;">24</td></tr> <tr><td>10. Corrección de temperatura</td><td style="text-align: center;">1.44</td></tr> <tr><td>11. Lectura calgón</td><td style="text-align: center;">-1</td></tr> <tr><td>12. Lectura corregida a las 2 horas</td><td style="text-align: center;">4.44</td></tr> <tr><td>13. Gramos de arcilla</td><td style="text-align: center;">4.44</td></tr> <tr><td>14. Gramos de limo</td><td style="text-align: center;">9.00</td></tr> <tr><td>15. Gramos de arena</td><td style="text-align: center;">16.22</td></tr> <tr><td>16. Porcentaje de arcilla</td><td style="text-align: center;">14.97</td></tr> <tr><td>17. Porcentaje de limo</td><td style="text-align: center;">30.34</td></tr> <tr><td>18. Porcentaje de arena</td><td style="text-align: center;">54.69</td></tr> <tr><td>19. Total del Porcentaje</td><td style="text-align: center;"><b>100.00</b></td></tr> </tbody> </table>	MUESTRA	SG2	1. Peso suelo húmedo	50	2. Peso suelo seco	29.66	3. Lectura 40"	9	4. Temperatura 40"	24	5. Corrección de temperatura	1.44	6. Lectura calgón	-3	7. Lectura corregida 40"	13.44	8. Lectura 2 horas	2	9. Temperatura 2 horas	24	10. Corrección de temperatura	1.44	11. Lectura calgón	-1	12. Lectura corregida a las 2 horas	4.44	13. Gramos de arcilla	4.44	14. Gramos de limo	9.00	15. Gramos de arena	16.22	16. Porcentaje de arcilla	14.97	17. Porcentaje de limo	30.34	18. Porcentaje de arena	54.69	19. Total del Porcentaje	<b>100.00</b>	
MUESTRA	SG2																																								
1. Peso suelo húmedo	50																																								
2. Peso suelo seco	29.66																																								
3. Lectura 40"	9																																								
4. Temperatura 40"	24																																								
5. Corrección de temperatura	1.44																																								
6. Lectura calgón	-3																																								
7. Lectura corregida 40"	13.44																																								
8. Lectura 2 horas	2																																								
9. Temperatura 2 horas	24																																								
10. Corrección de temperatura	1.44																																								
11. Lectura calgón	-1																																								
12. Lectura corregida a las 2 horas	4.44																																								
13. Gramos de arcilla	4.44																																								
14. Gramos de limo	9.00																																								
15. Gramos de arena	16.22																																								
16. Porcentaje de arcilla	14.97																																								
17. Porcentaje de limo	30.34																																								
18. Porcentaje de arena	54.69																																								
19. Total del Porcentaje	<b>100.00</b>																																								

**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

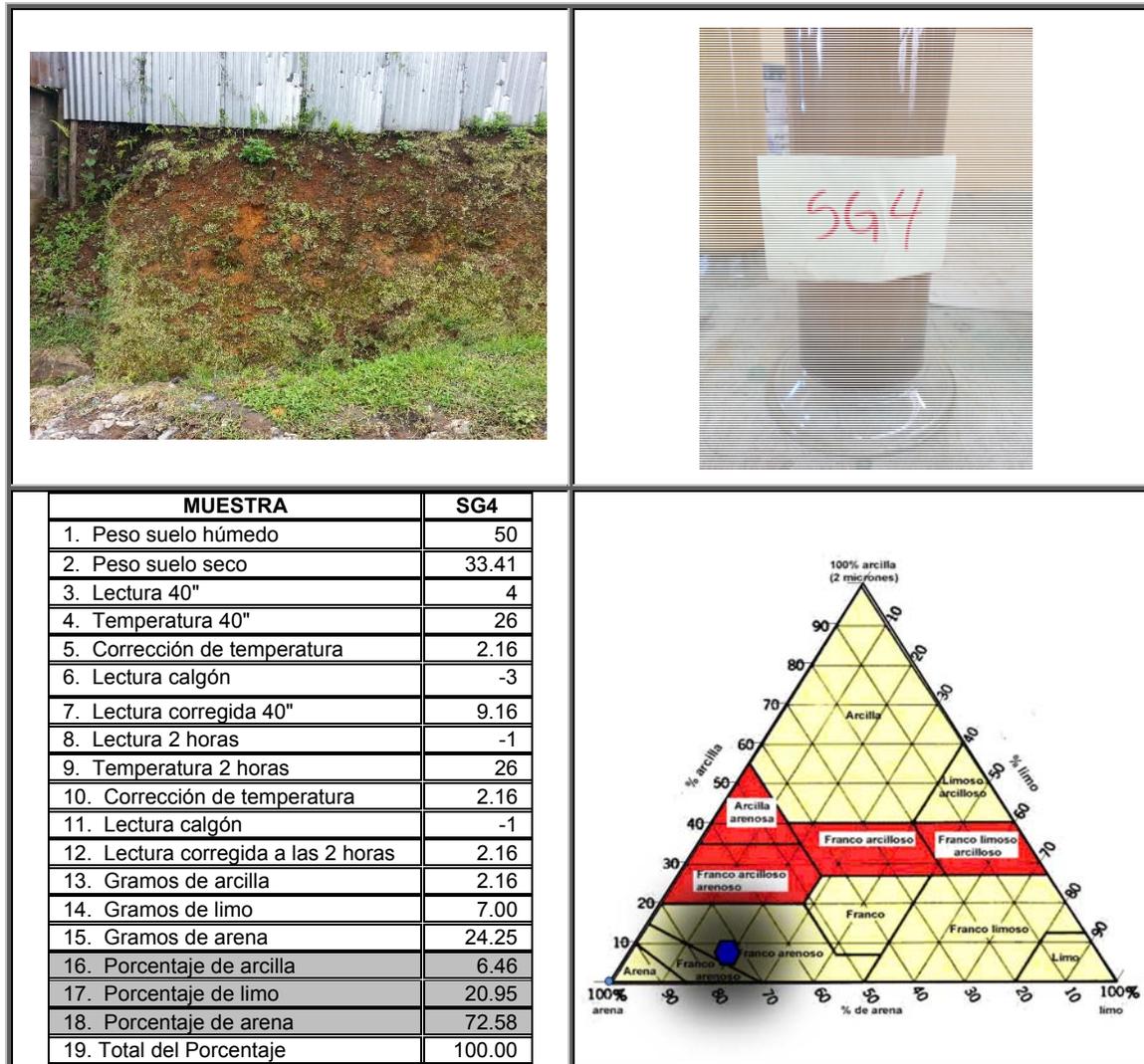
## PUNTO SG3



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

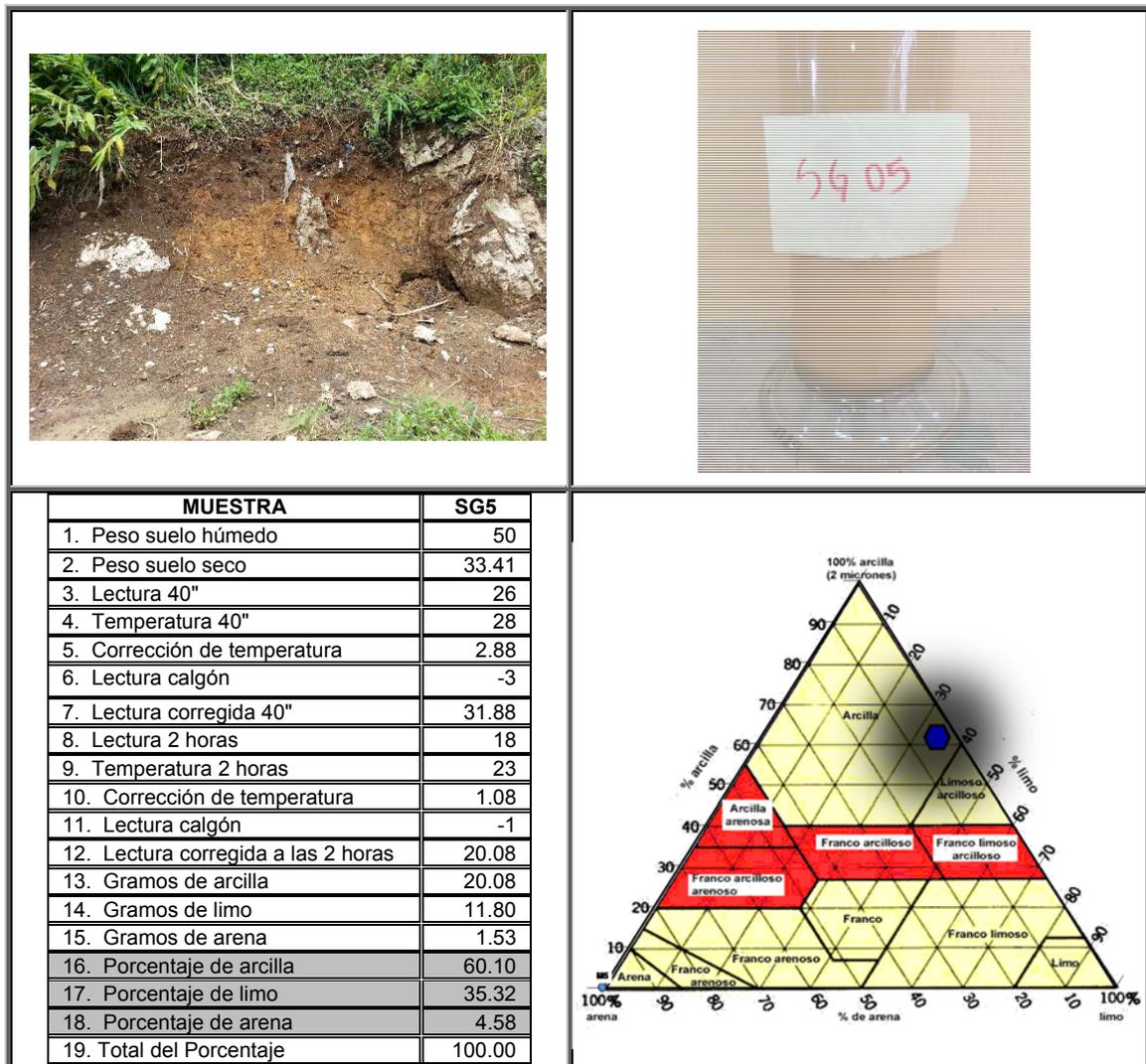
## PUNTO SG4



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

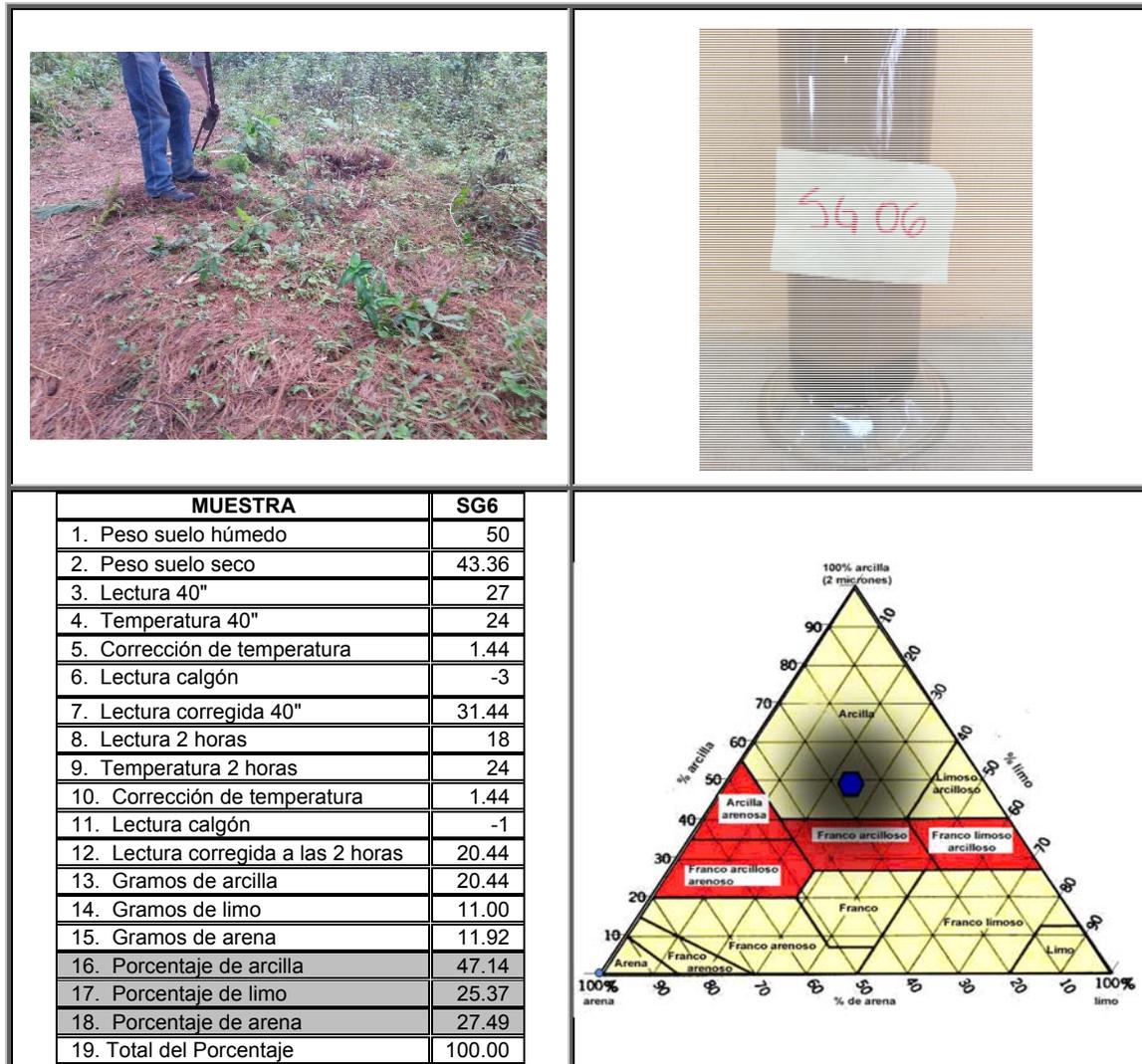
## PUNTO SG5



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

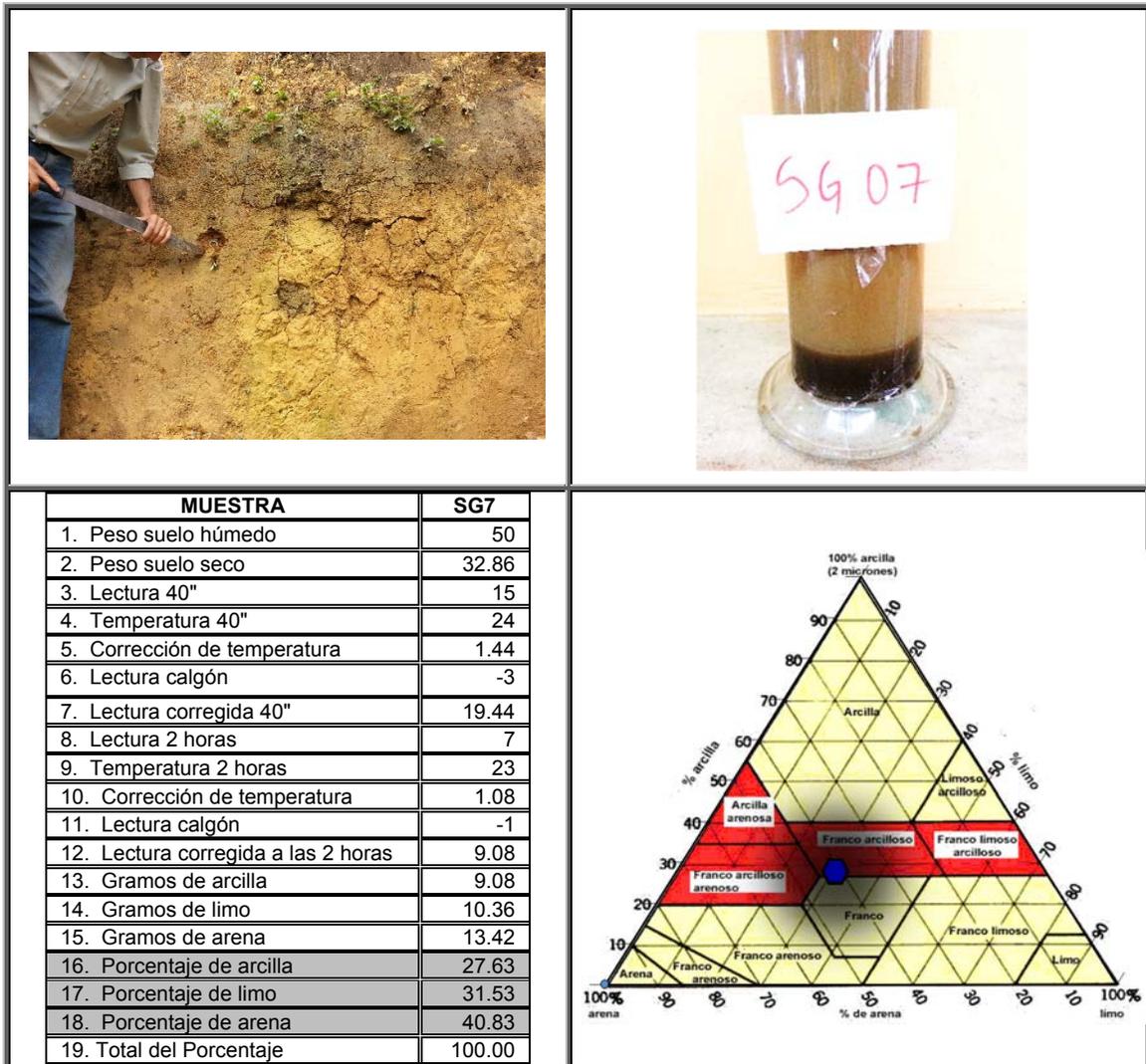
## PUNTO SG6



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

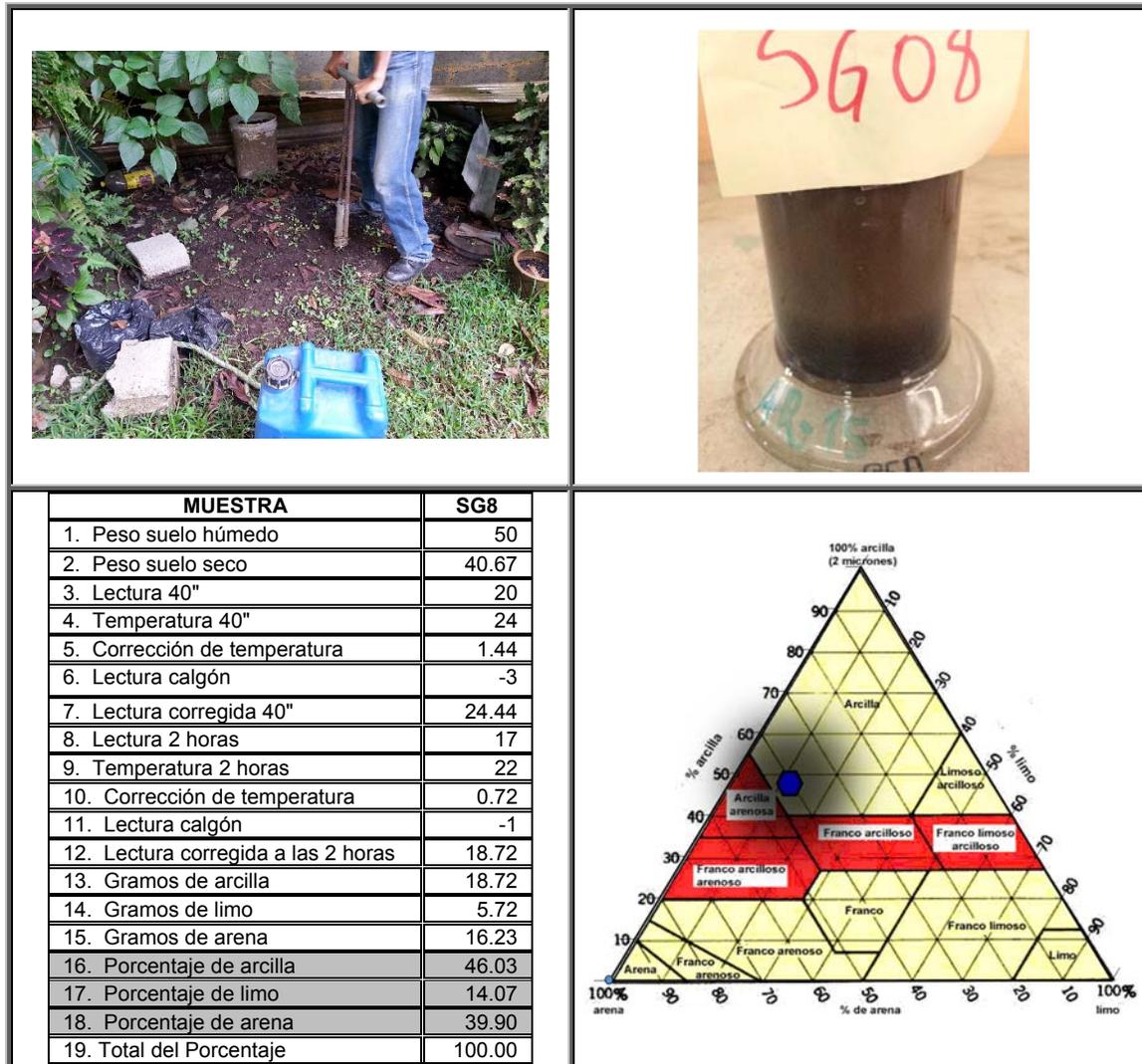
## PUNTO SG7



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

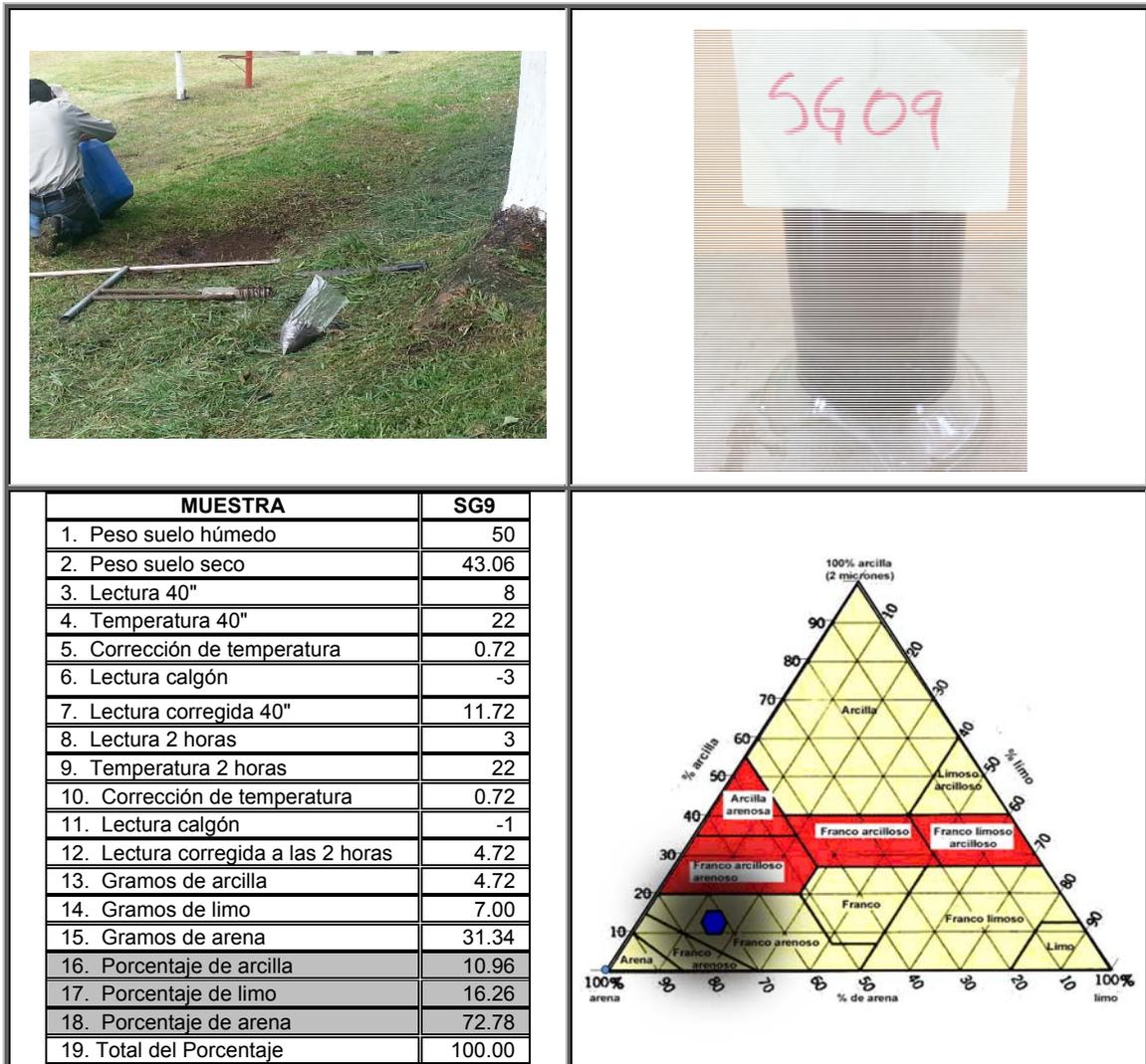
## PUNTO SG8



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

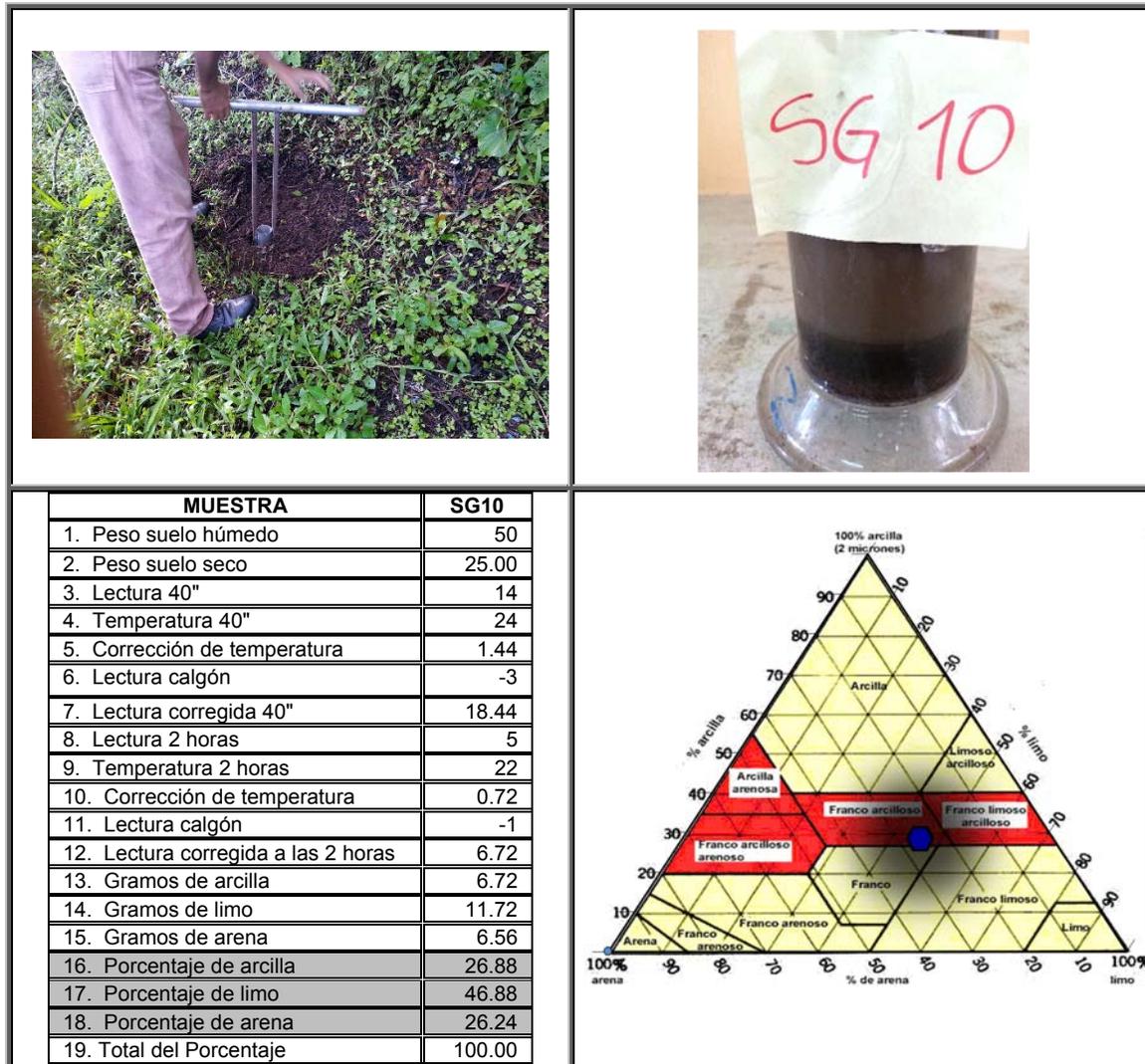
## PUNTO SG9



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

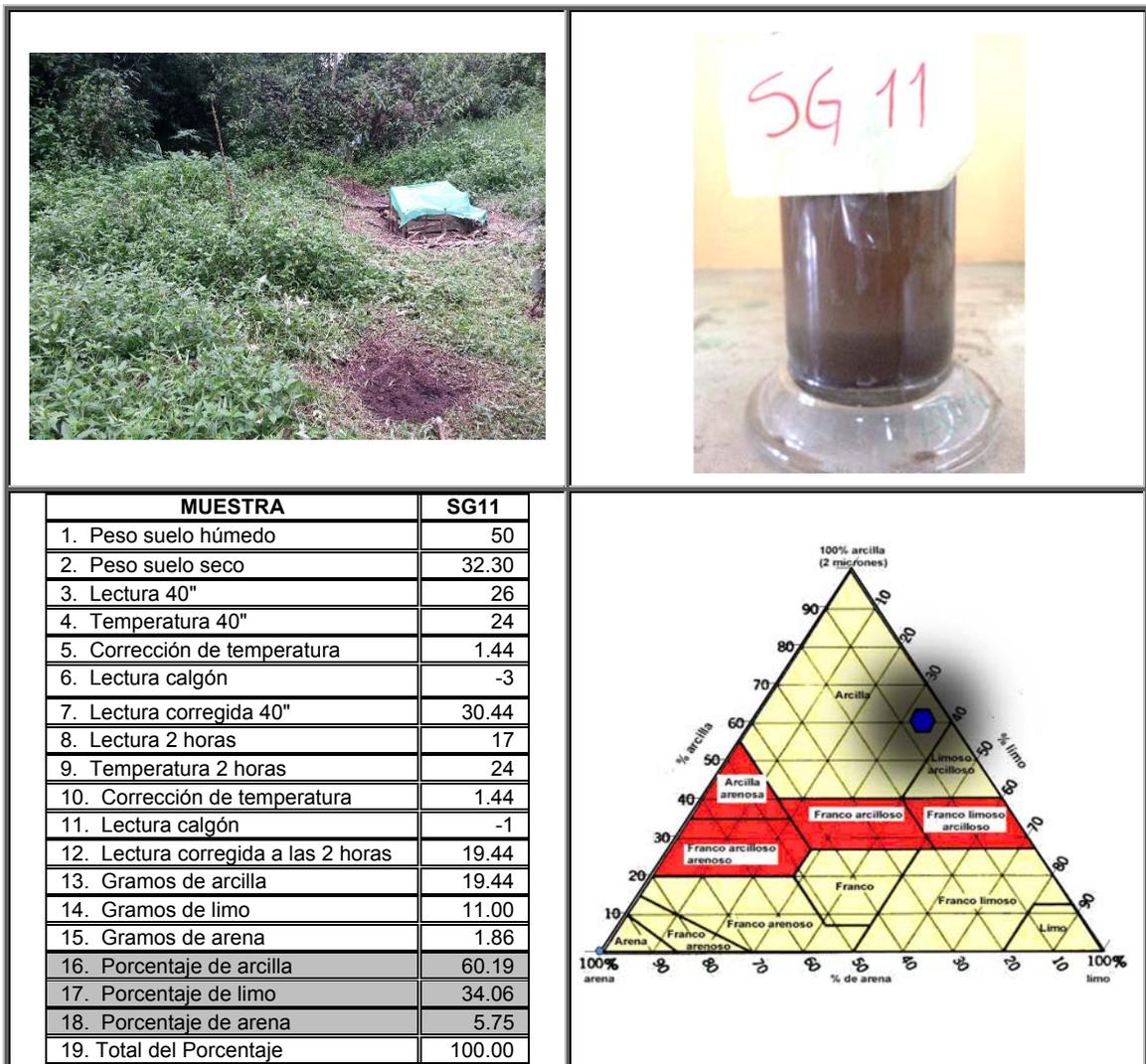
## PUNTO SG10



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

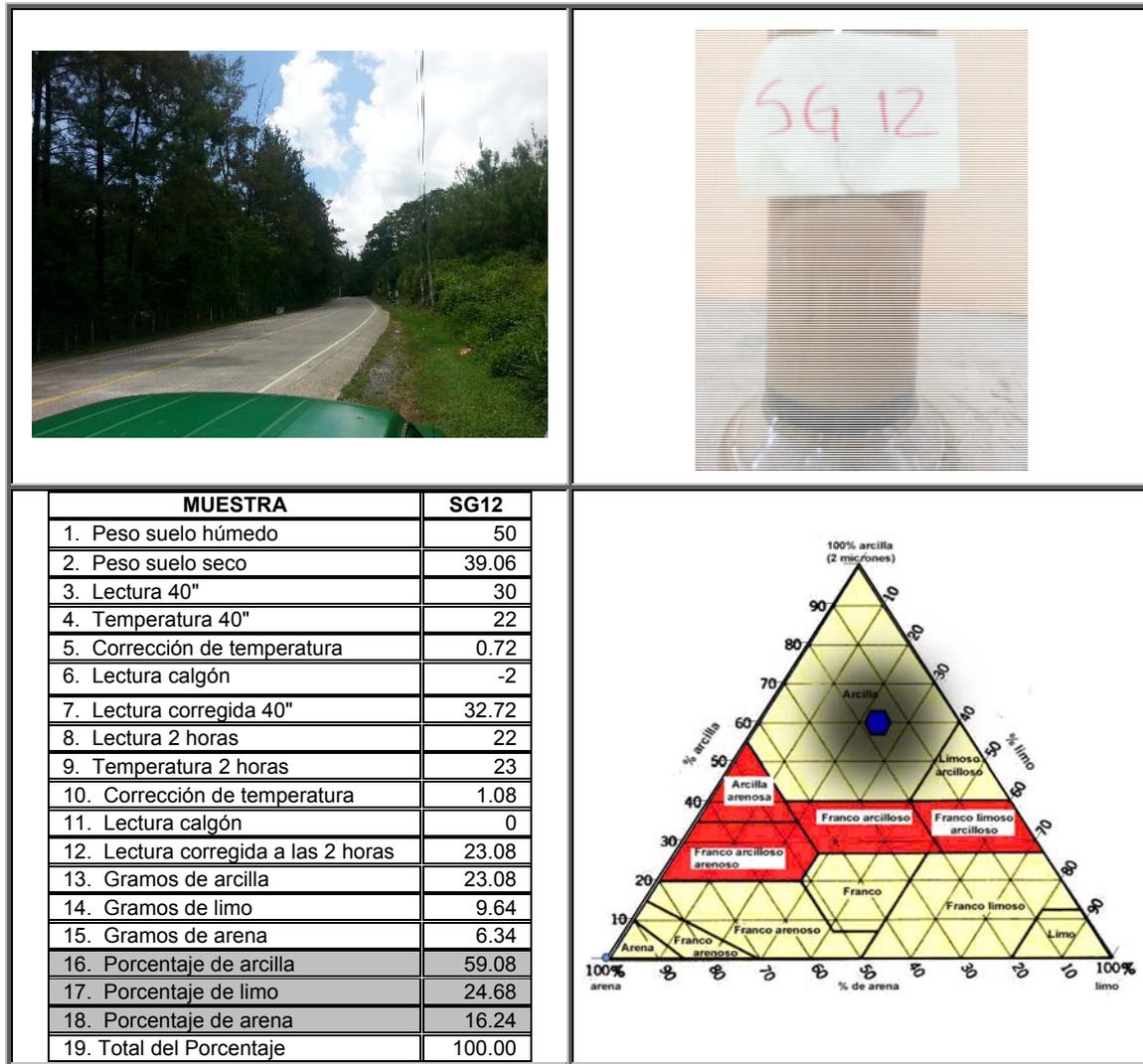
## PUNTO SG11



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

**PUNTO SG12**



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

## PUNTO SG13



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

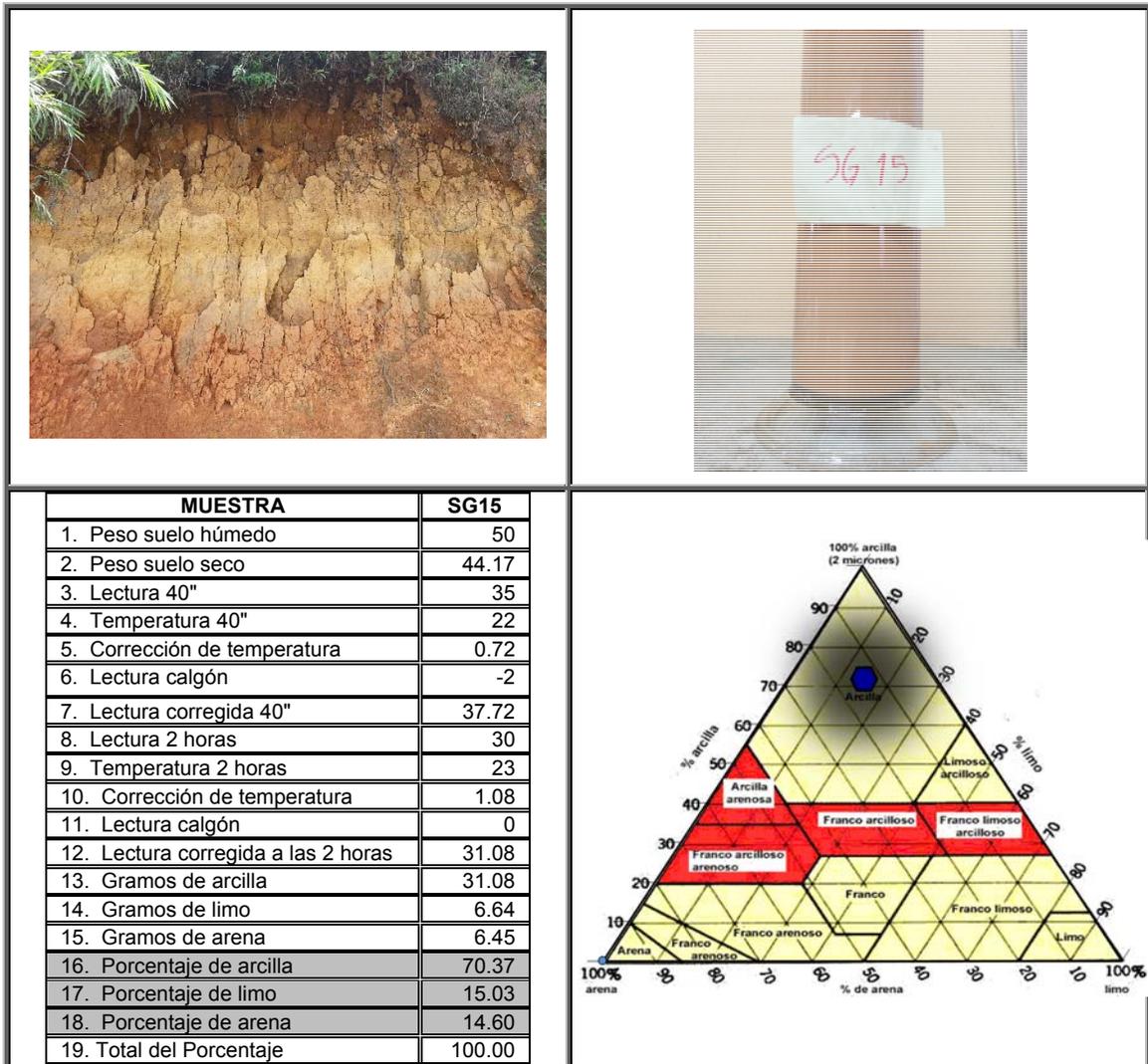
## PUNTO SG14



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

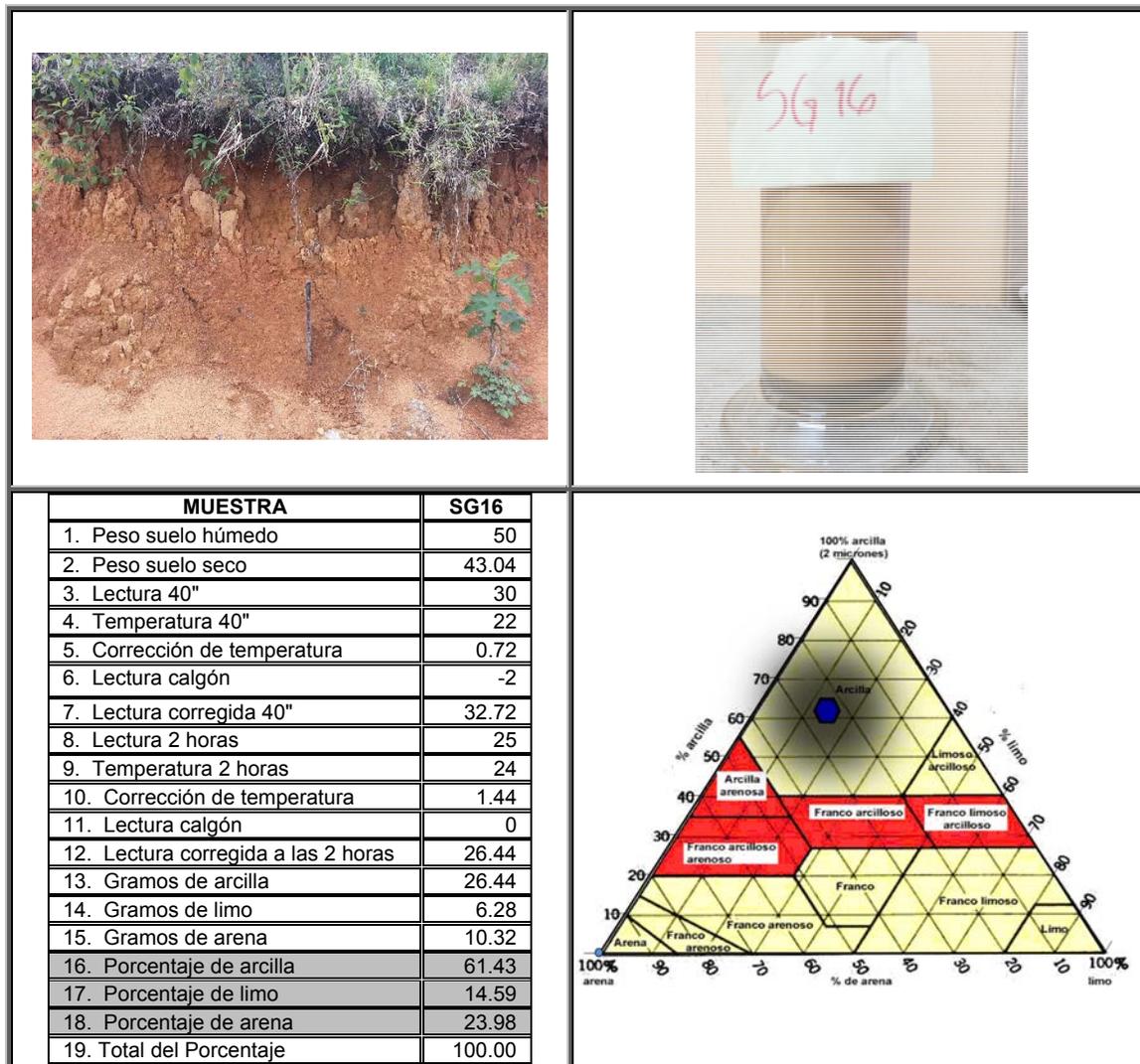
## PUNTO SG15



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

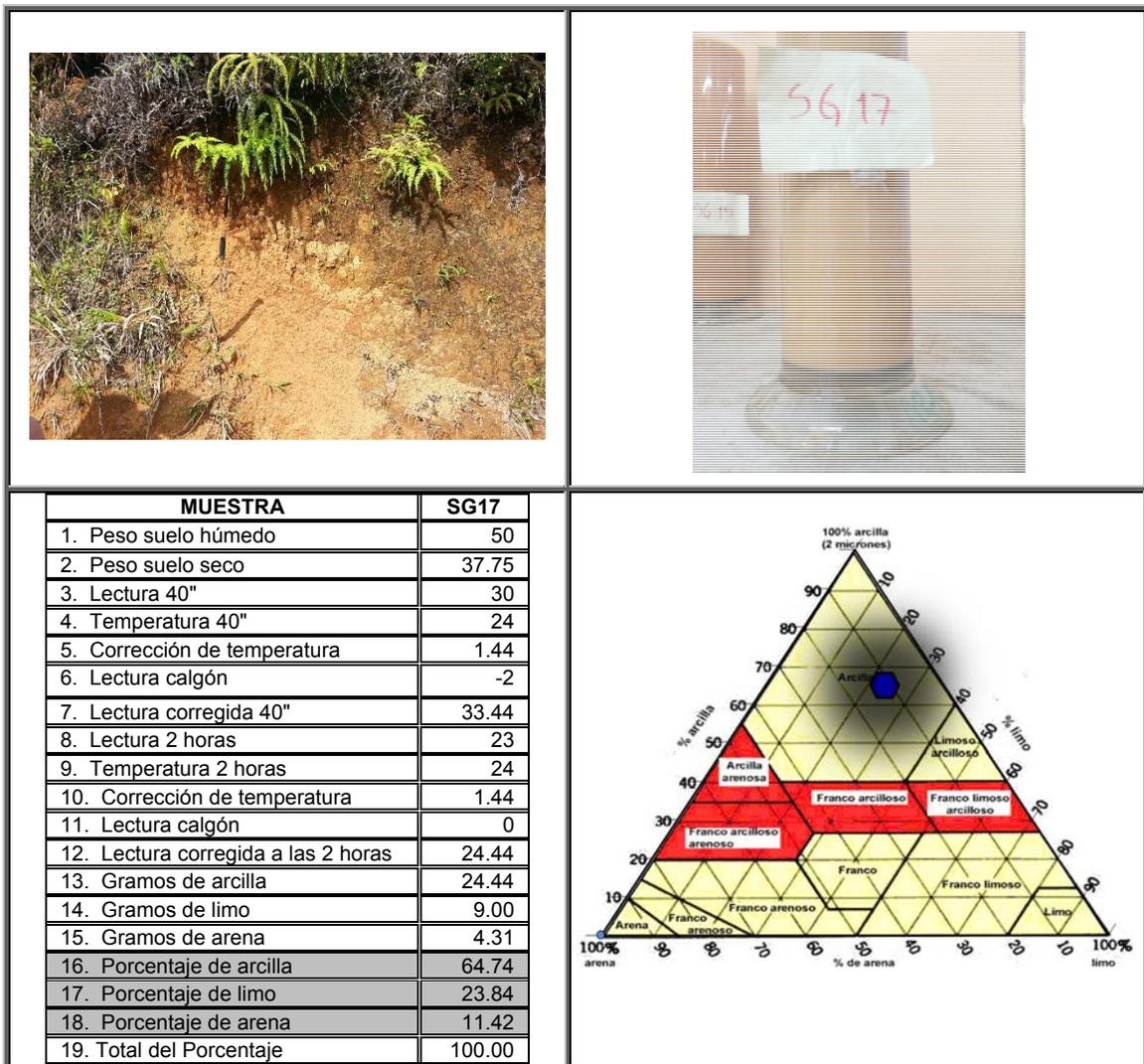
## PUNTO SG16



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

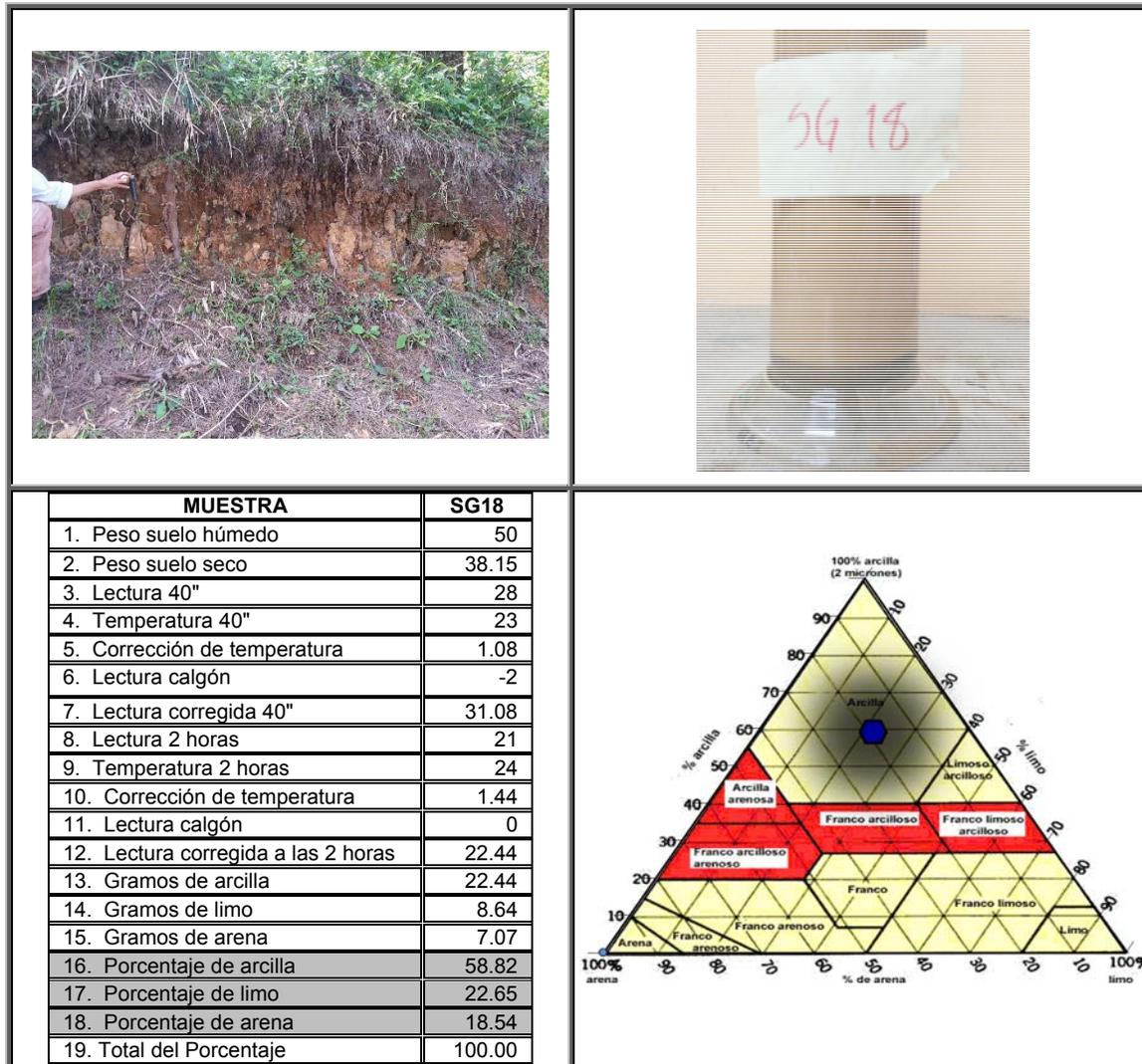
## PUNTO SG17



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

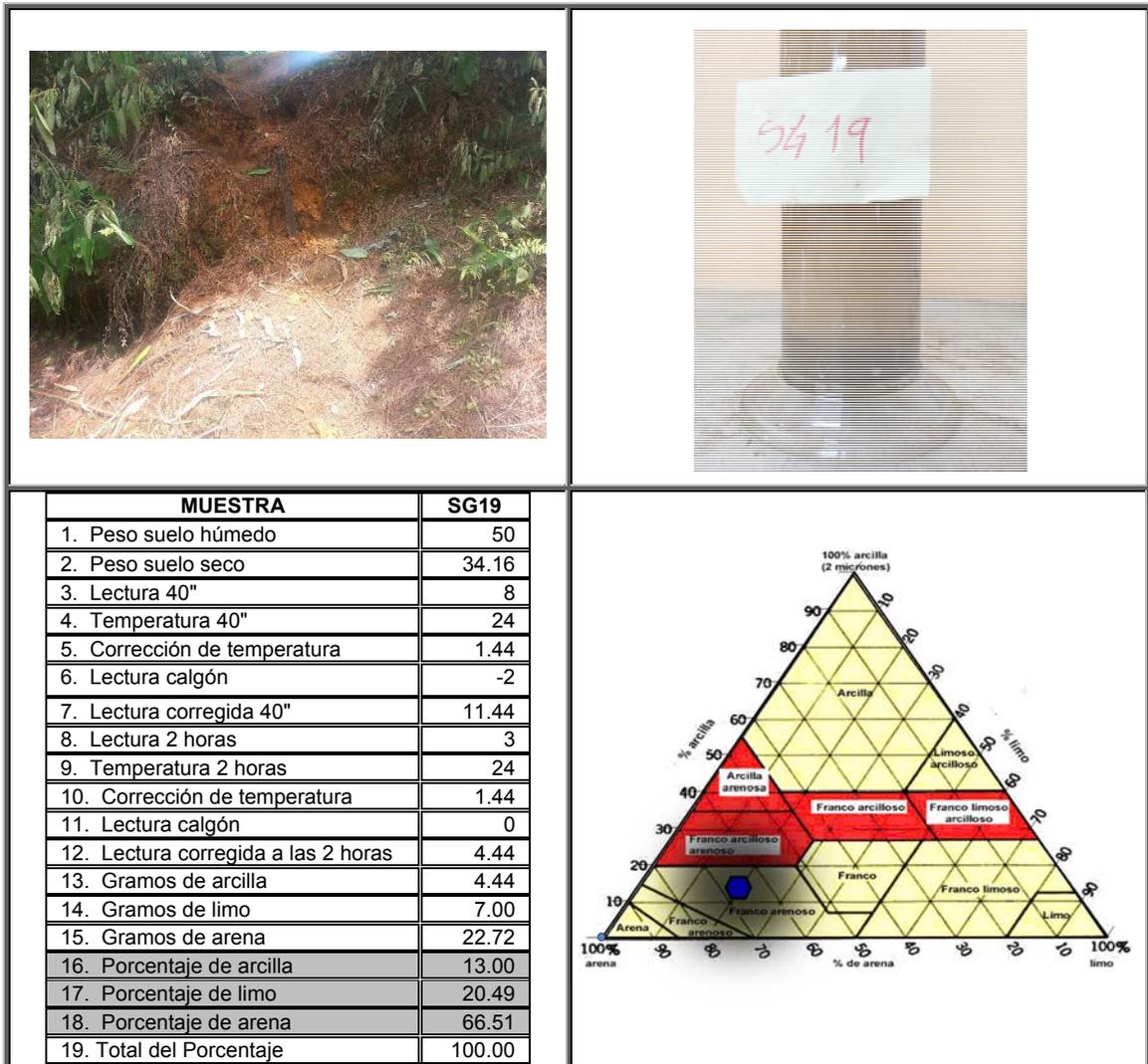
## PUNTO SG18



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

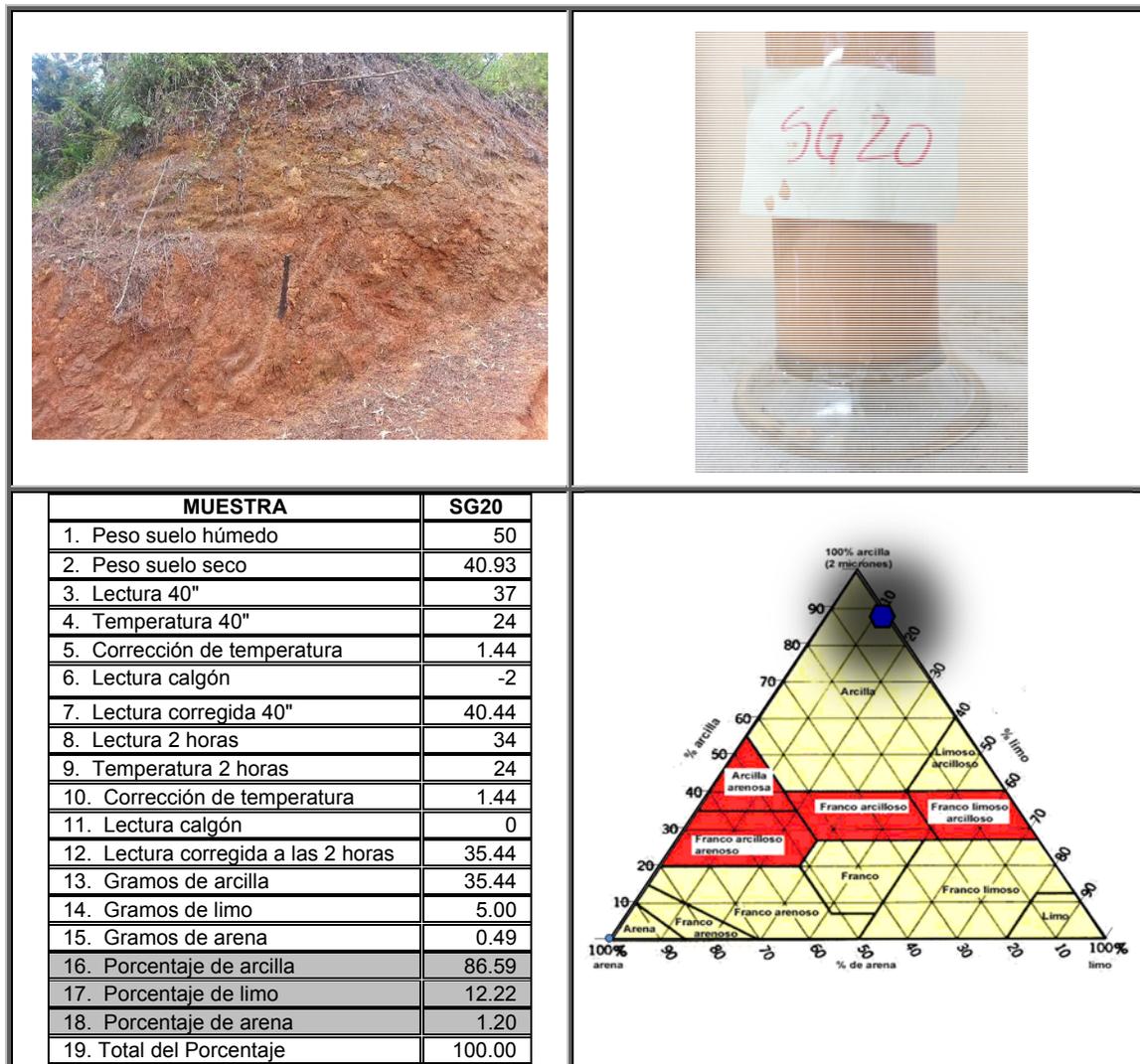
## PUNTO SG19



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

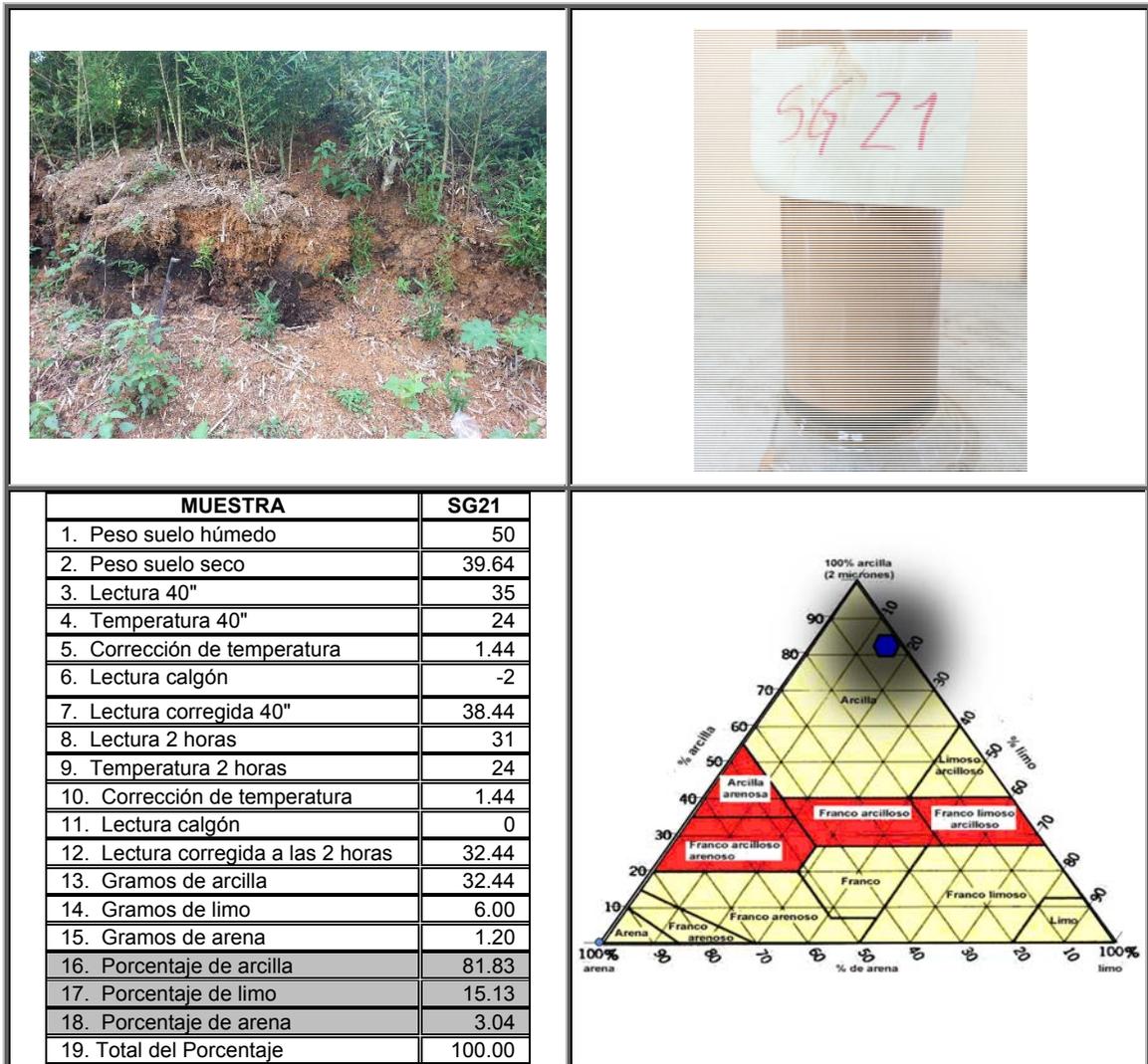
## PUNTO SG20



Fuente: Investigación de campo. 2015.

Fotografías tomadas por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.

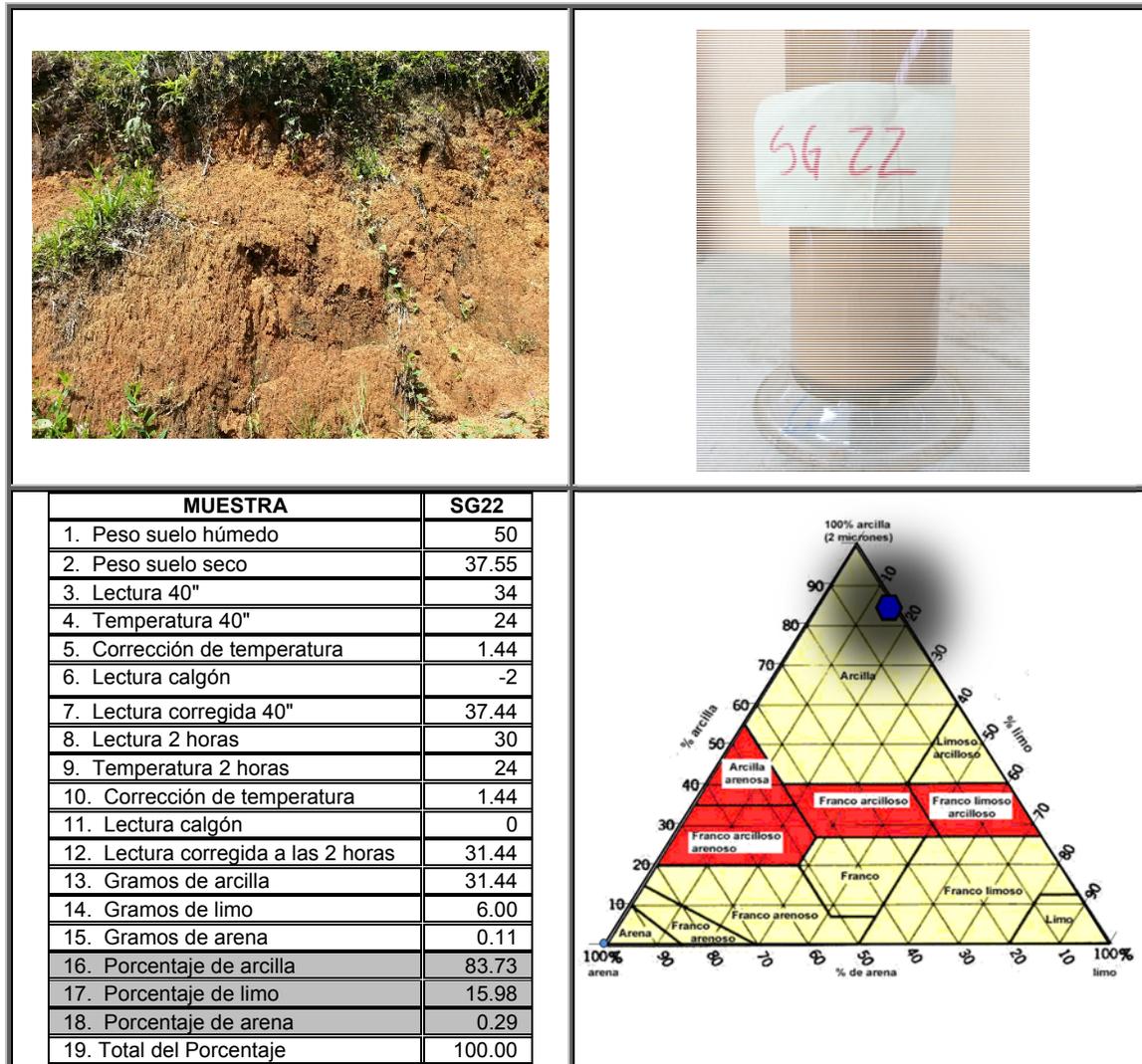
## PUNTO SG21



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

## PUNTO SG22



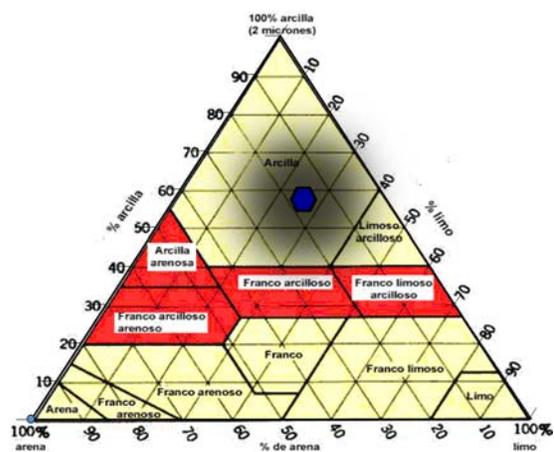
**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

## PUNTO SG23



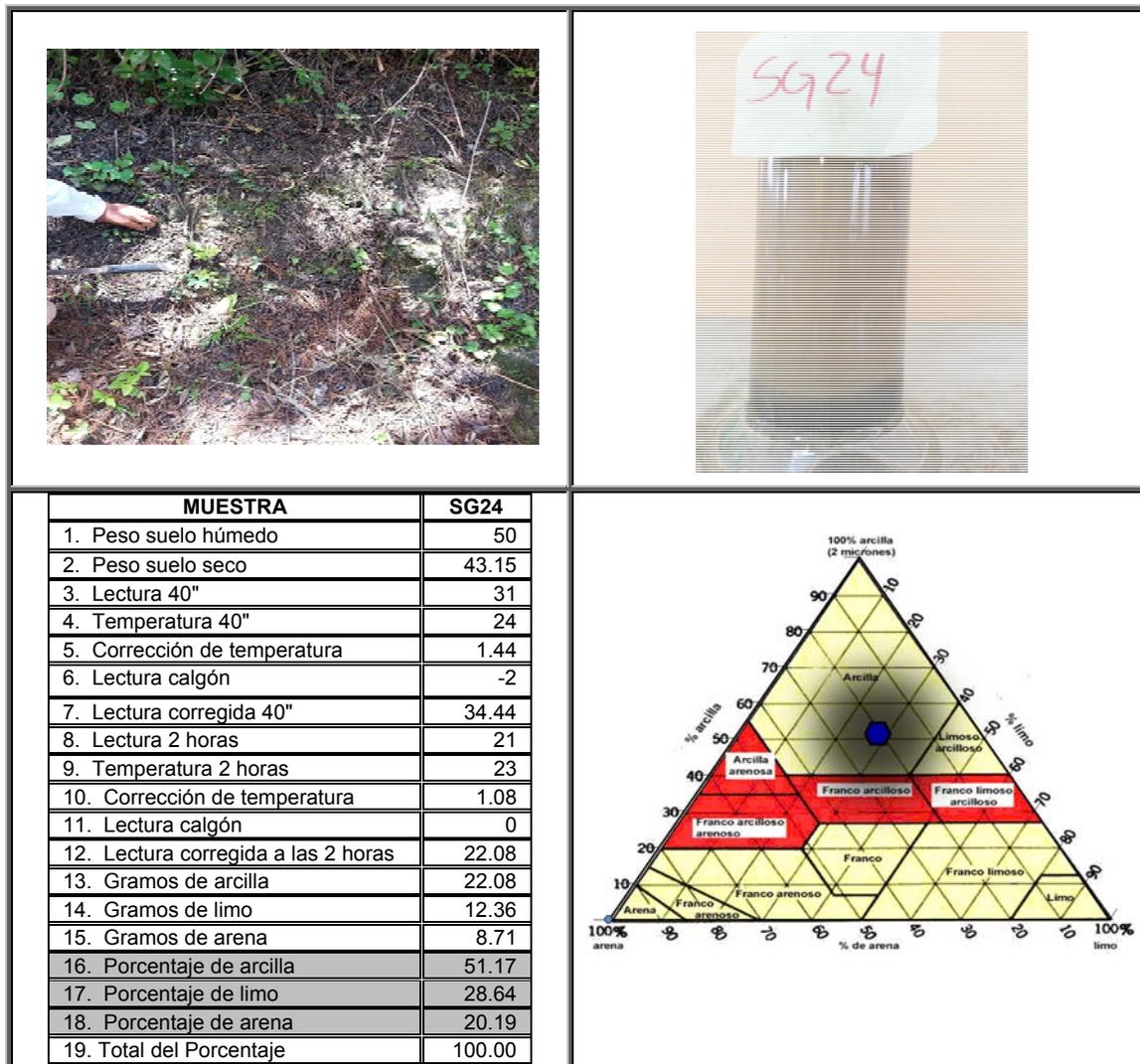
MUESTRA	SG23
1. Peso suelo húmedo	50
2. Peso suelo seco	46.36
3. Lectura 40"	35
4. Temperatura 40"	24
5. Corrección de temperatura	1.44
6. Lectura calgón	-2
7. Lectura corregida 40"	38.44
8. Lectura 2 horas	25
9. Temperatura 2 horas	23
10. Corrección de temperatura	1.08
11. Lectura calgón	0
12. Lectura corregida a las 2 horas	26.08
13. Gramos de arcilla	26.08
14. Gramos de limo	12.36
15. Gramos de arena	7.92
16. Porcentaje de arcilla	56.25
17. Porcentaje de limo	26.66
18. Porcentaje de arena	17.09
19. Total del Porcentaje	100.00



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

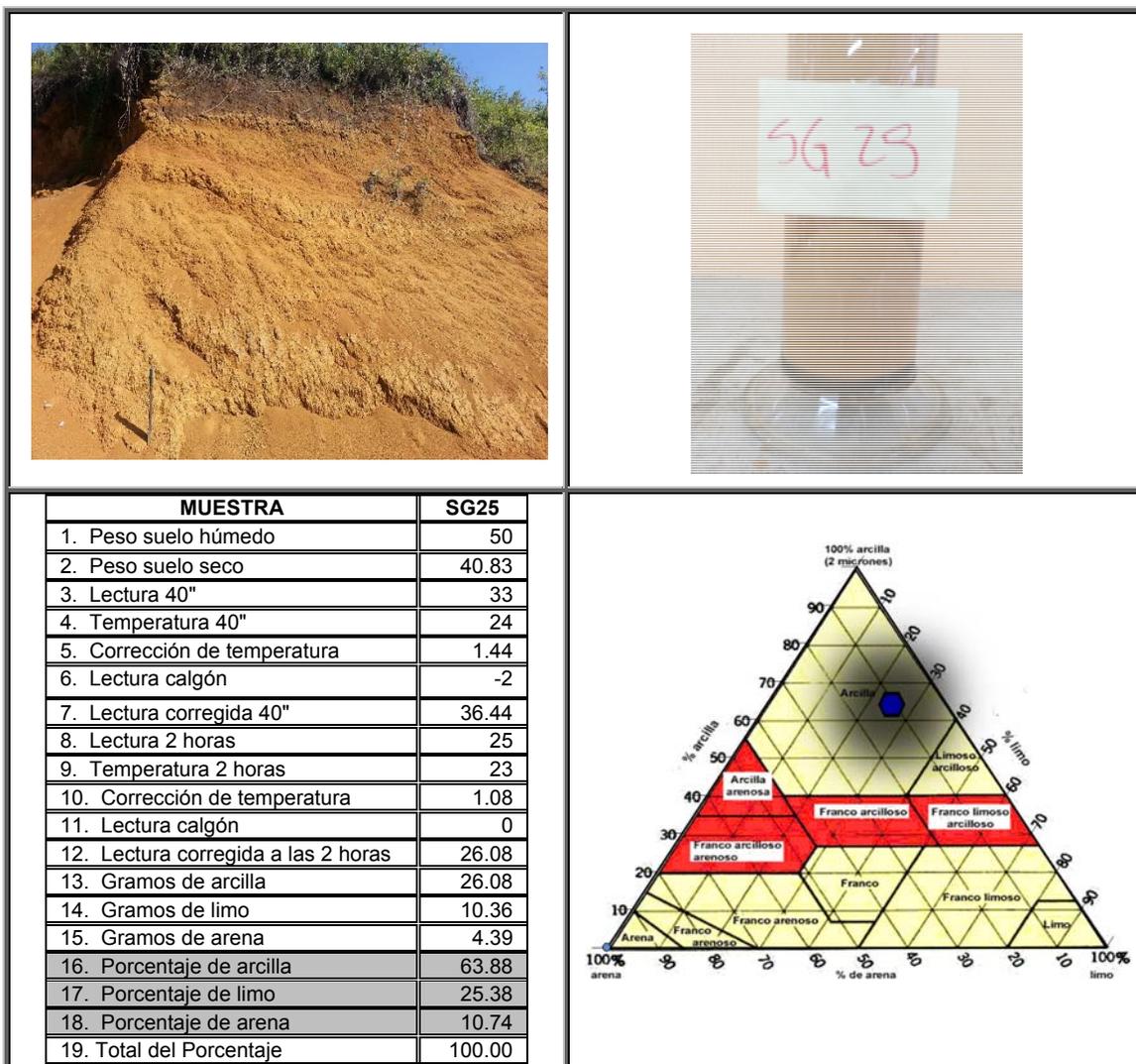
## PUNTO SG24



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

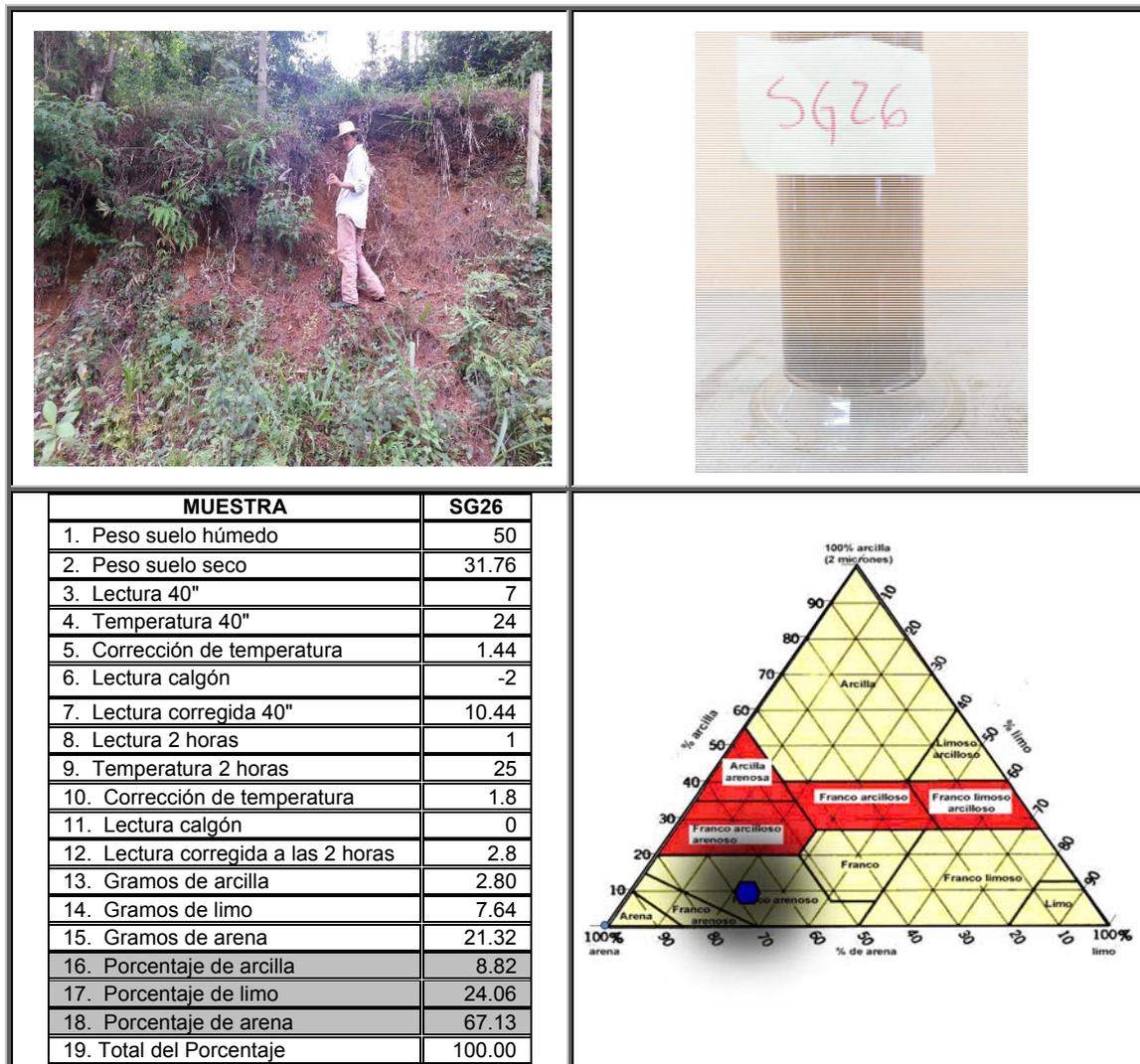
## PUNTO SG25



Fuente: Investigación de campo. 2015.

Fotografías tomadas por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.

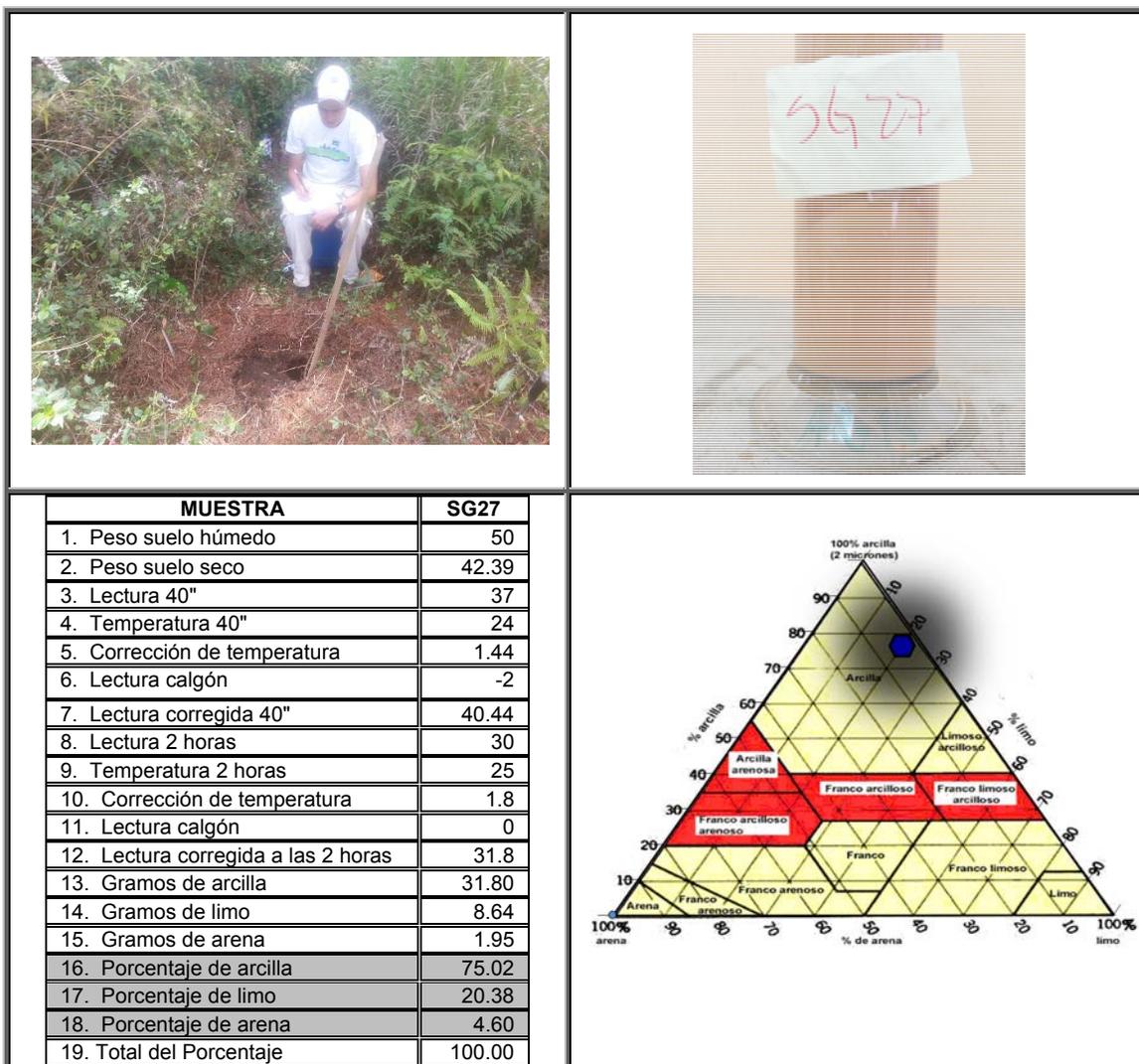
## PUNTO SG26



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

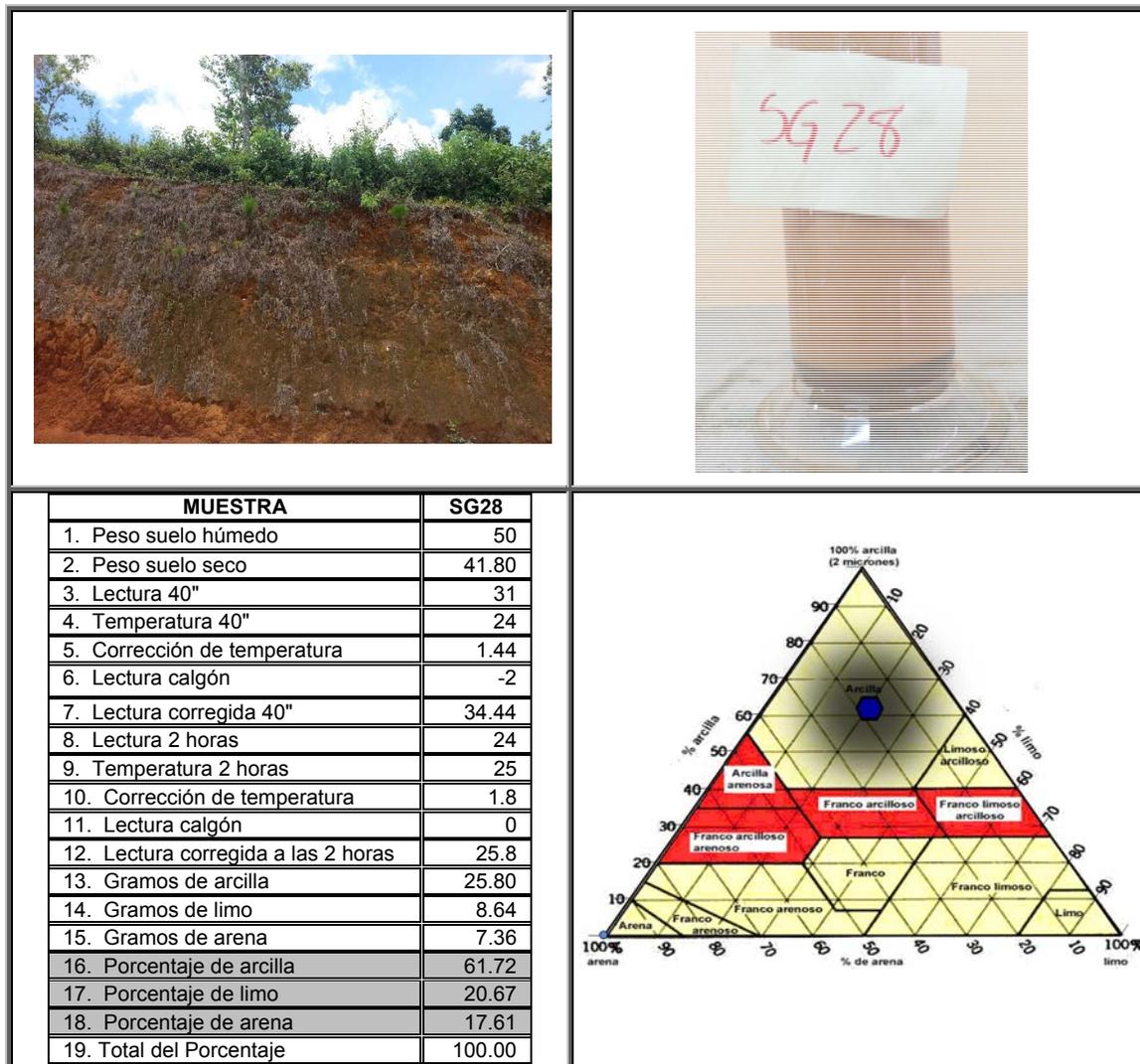
## PUNTO SG27



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

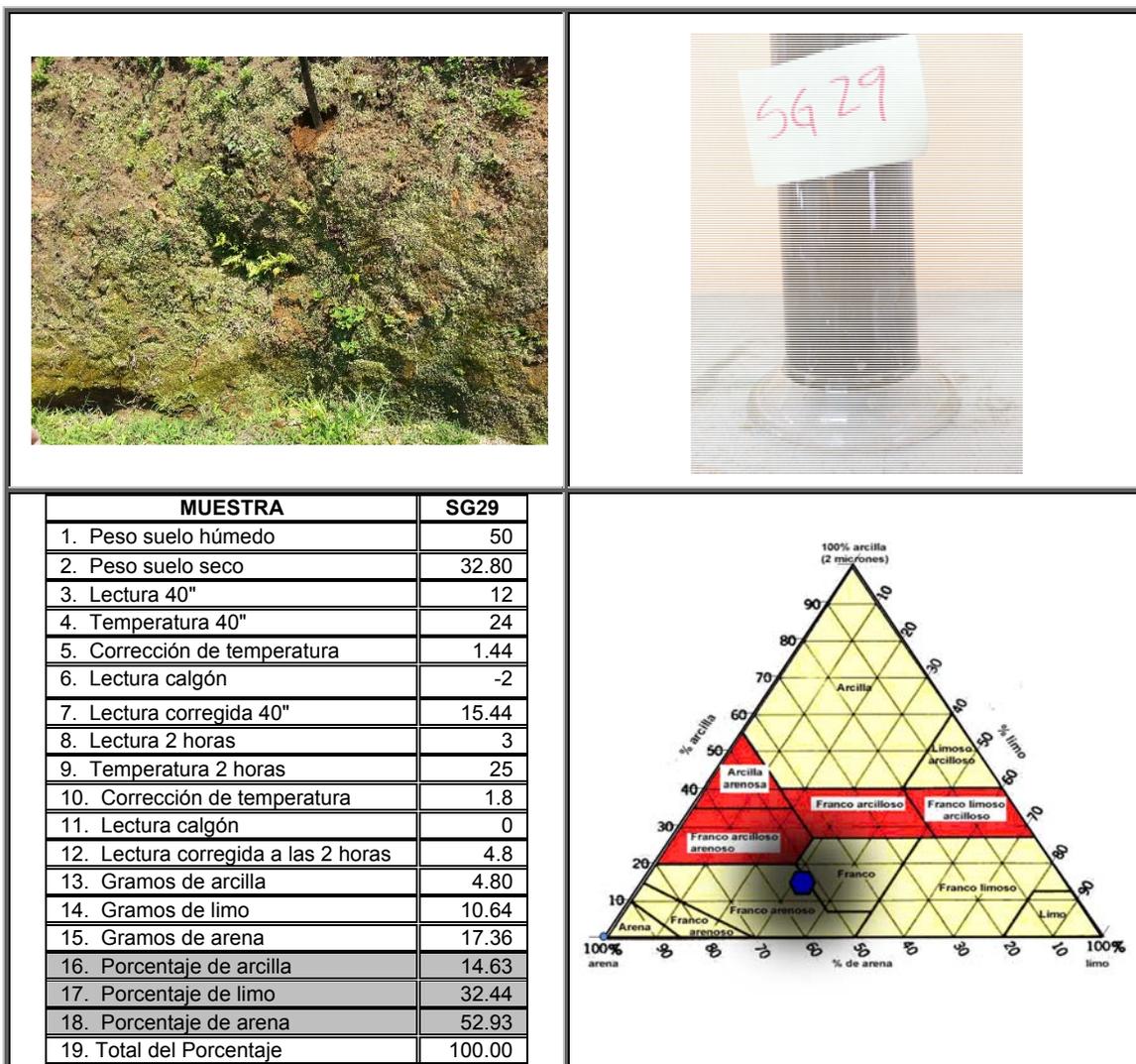
## PUNTO SG28



Fuente: Investigación de campo. 2015.

Fotografías tomadas por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.

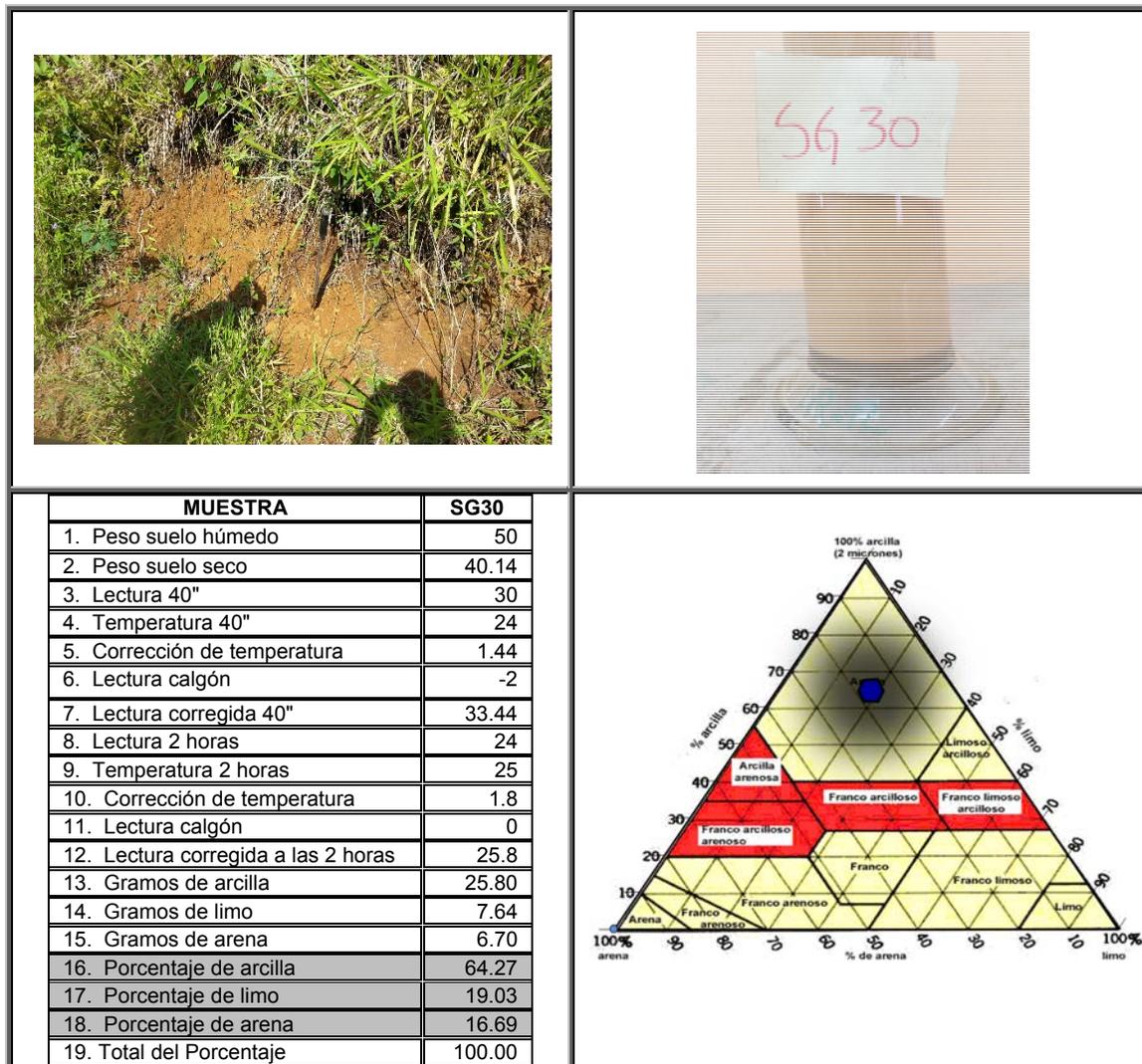
## PUNTO SG29



Fuente: Investigación de campo. 2015.

Fotografías tomadas por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.

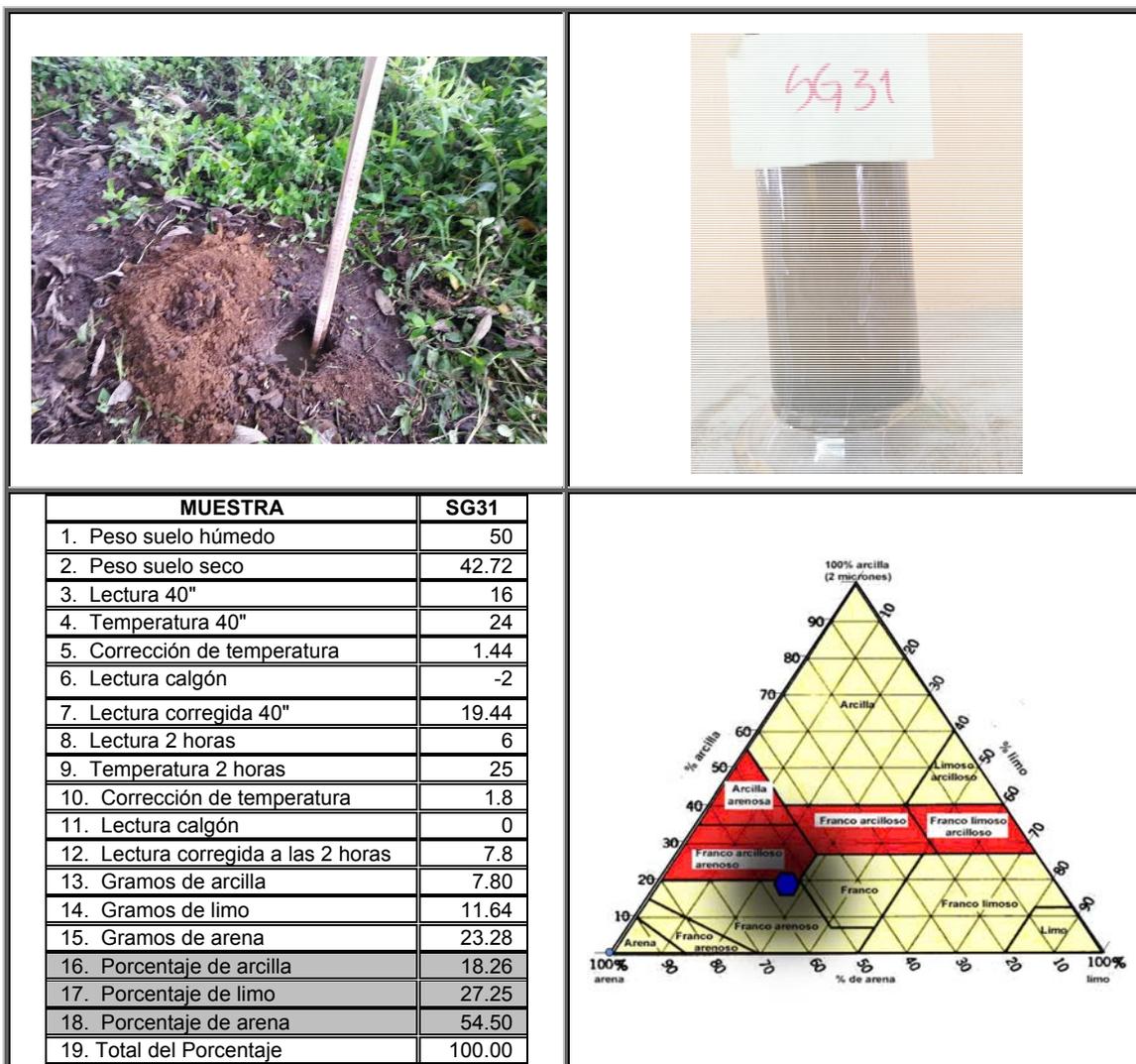
## PUNTO SG30



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

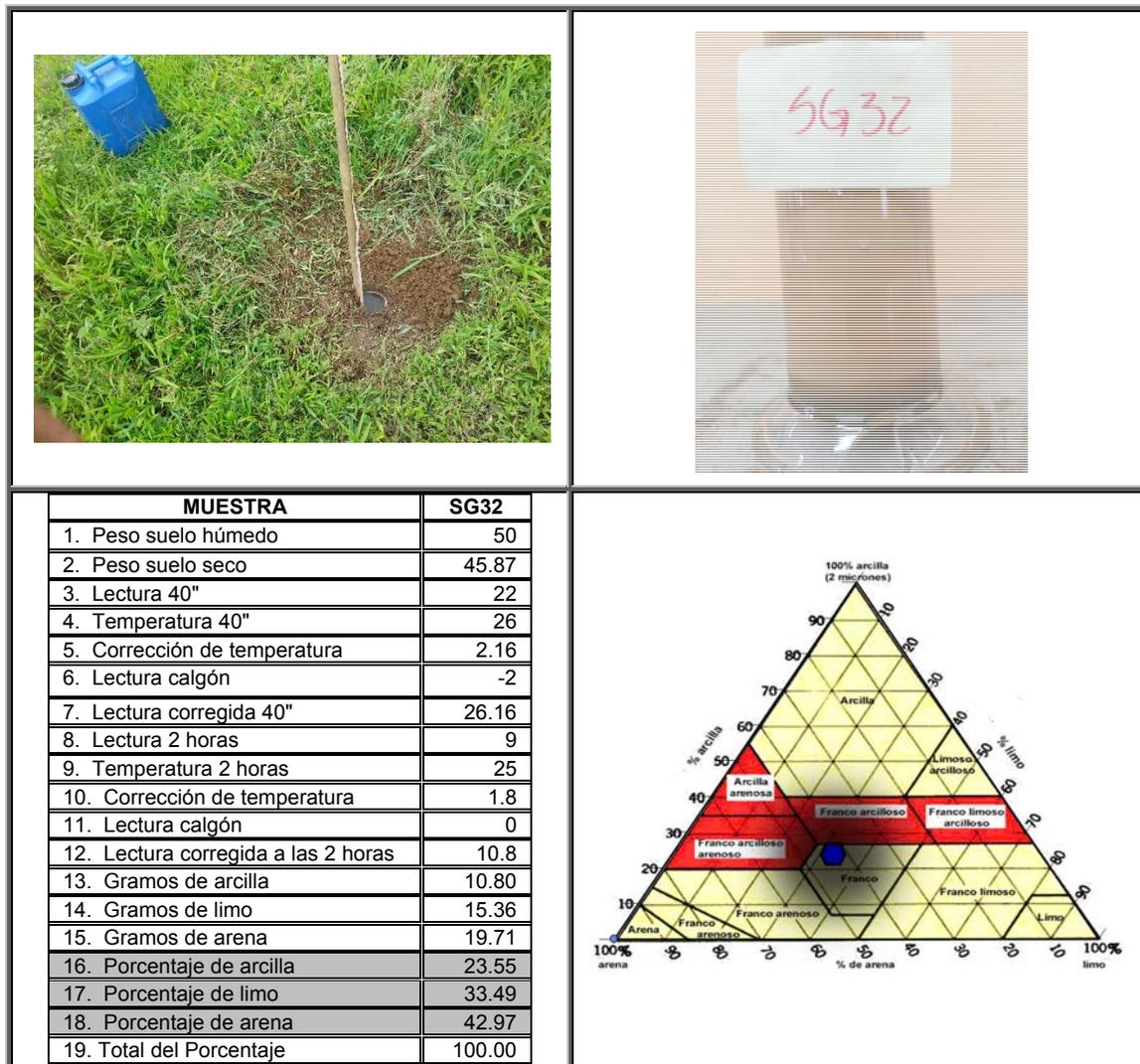
## PUNTO SG31



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

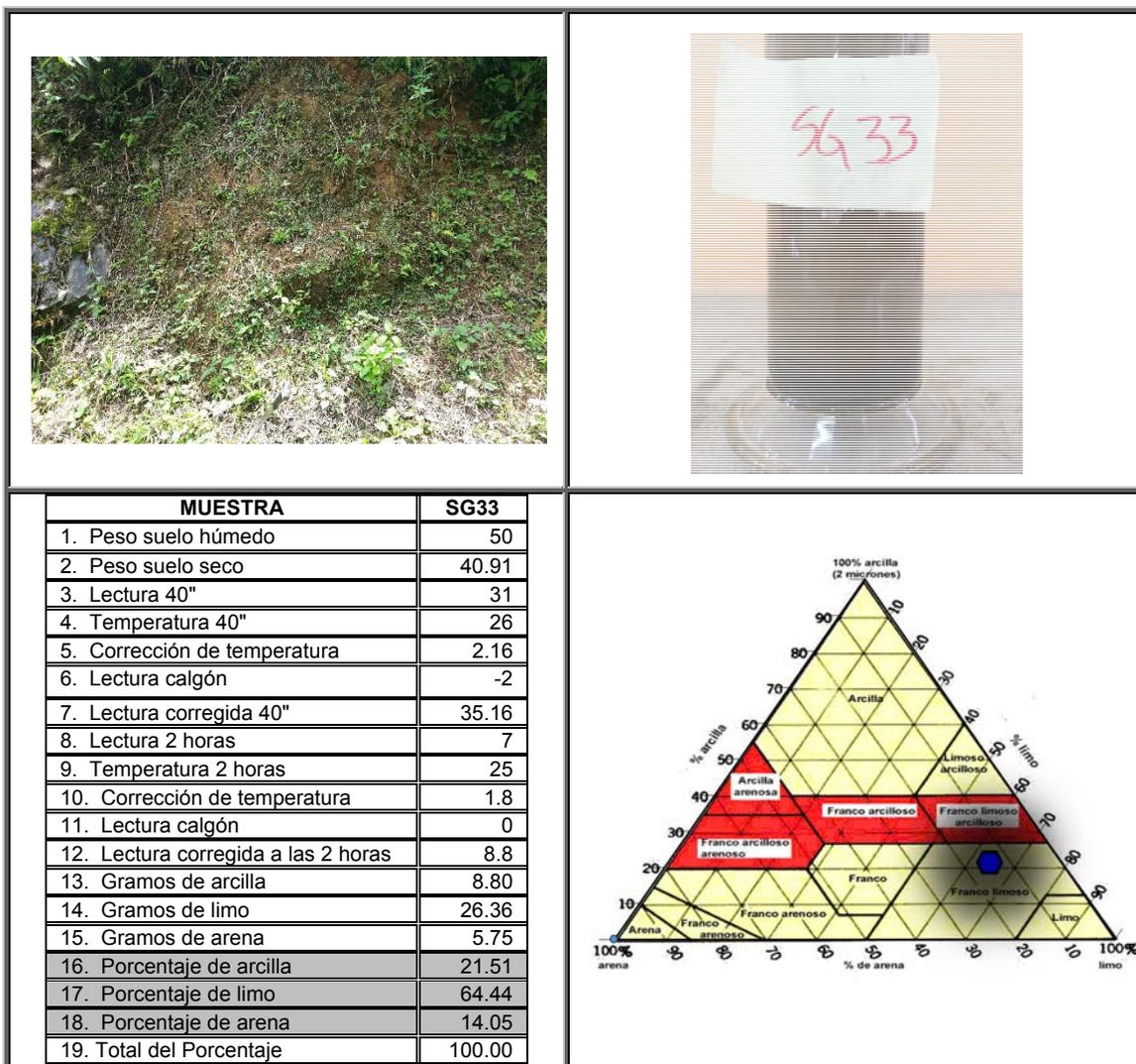
## PUNTO SG32



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

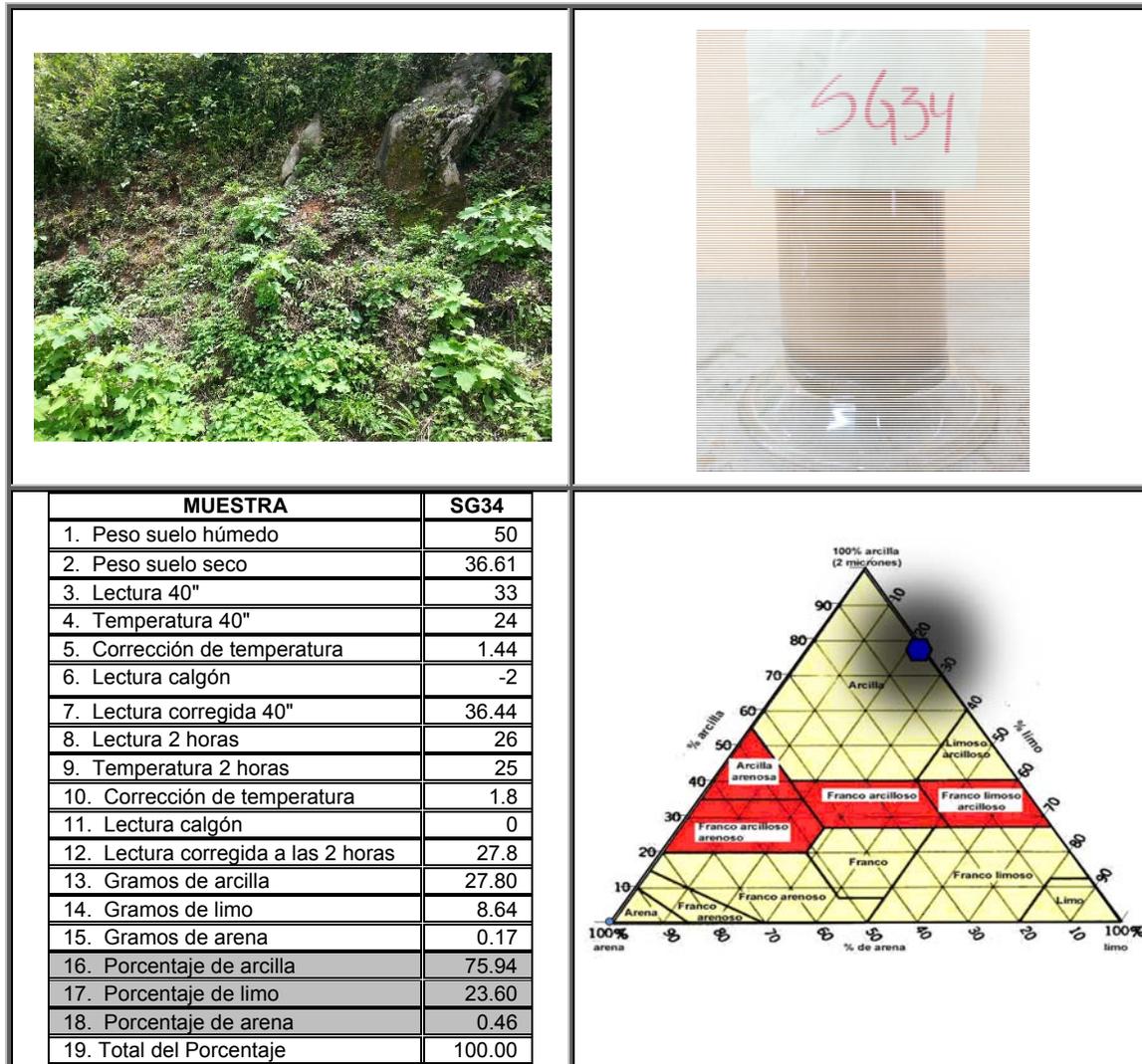
## PUNTO SG33



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

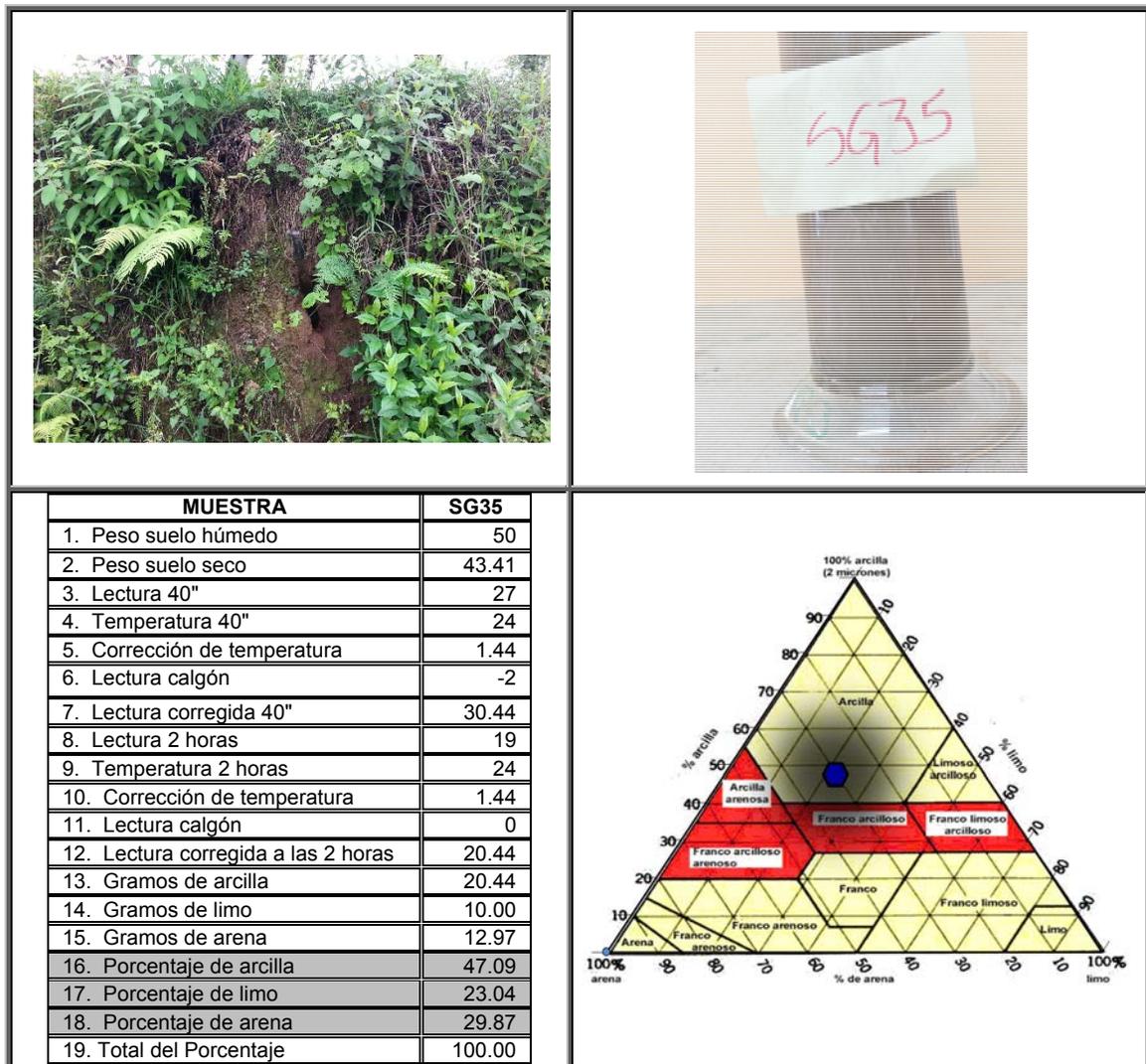
## PUNTO SG34



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

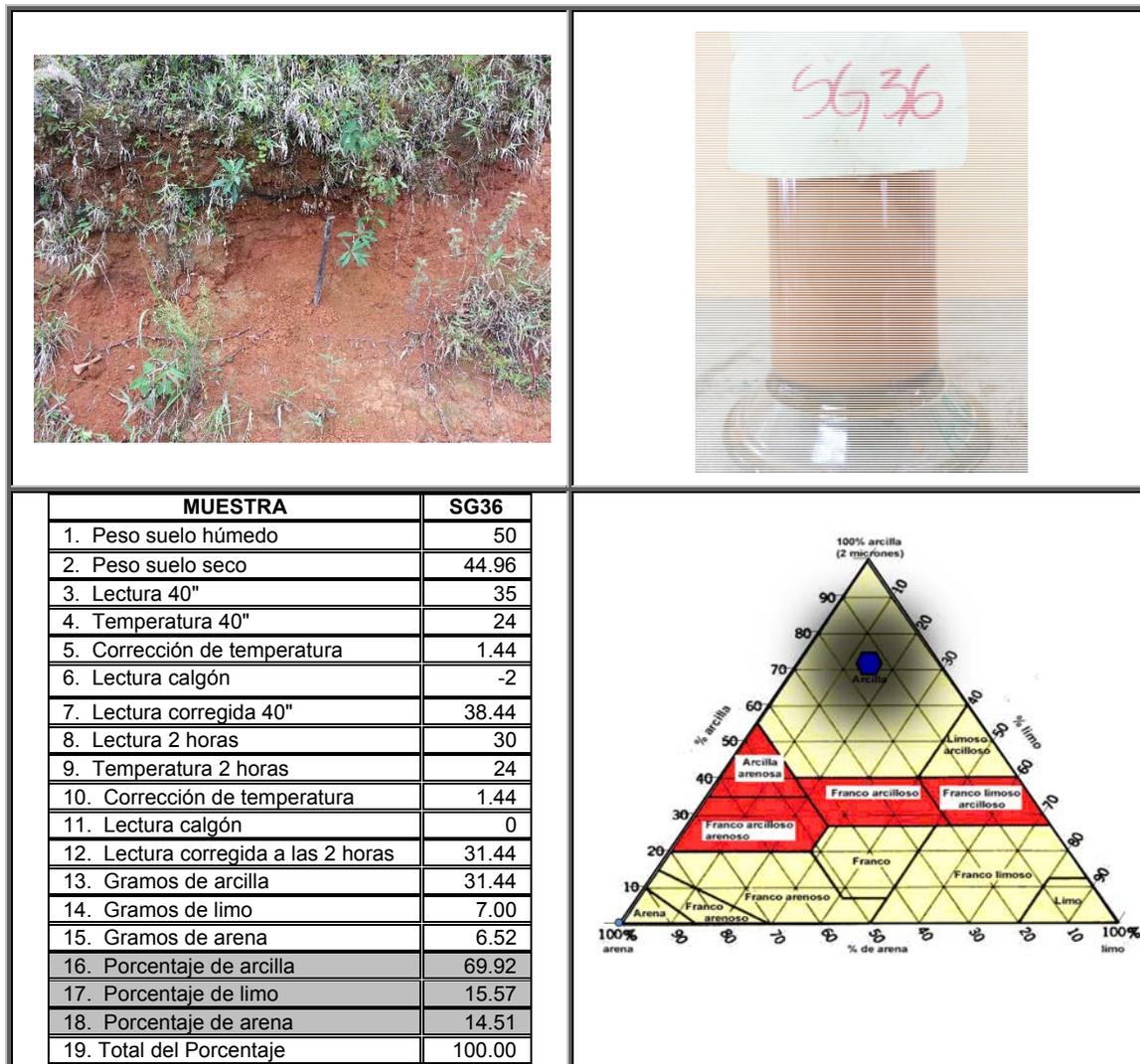
## PUNTO SG35



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

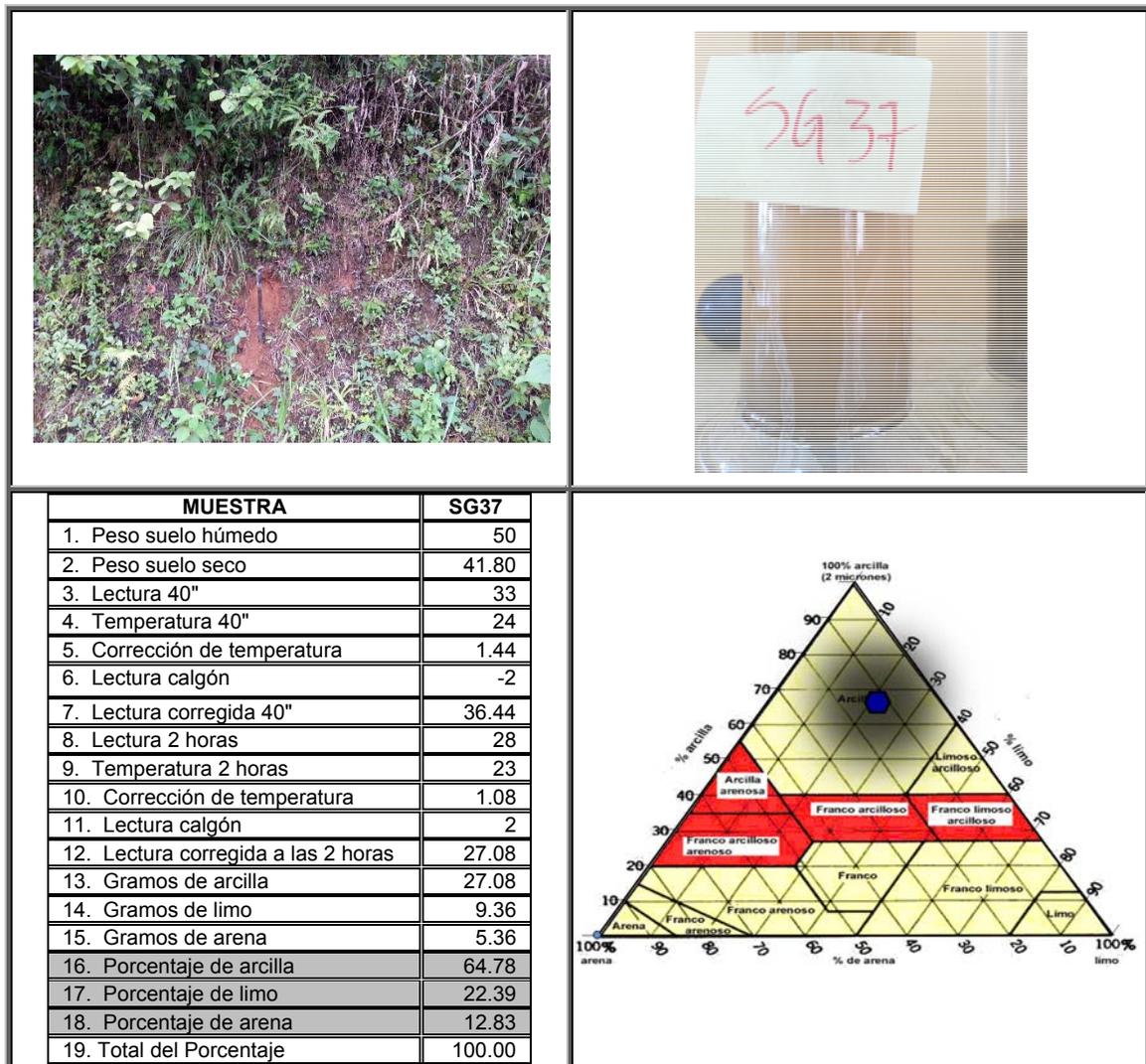
## PUNTO SG36



Fuente: Investigación de campo. 2015.

Fotografías tomadas por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.

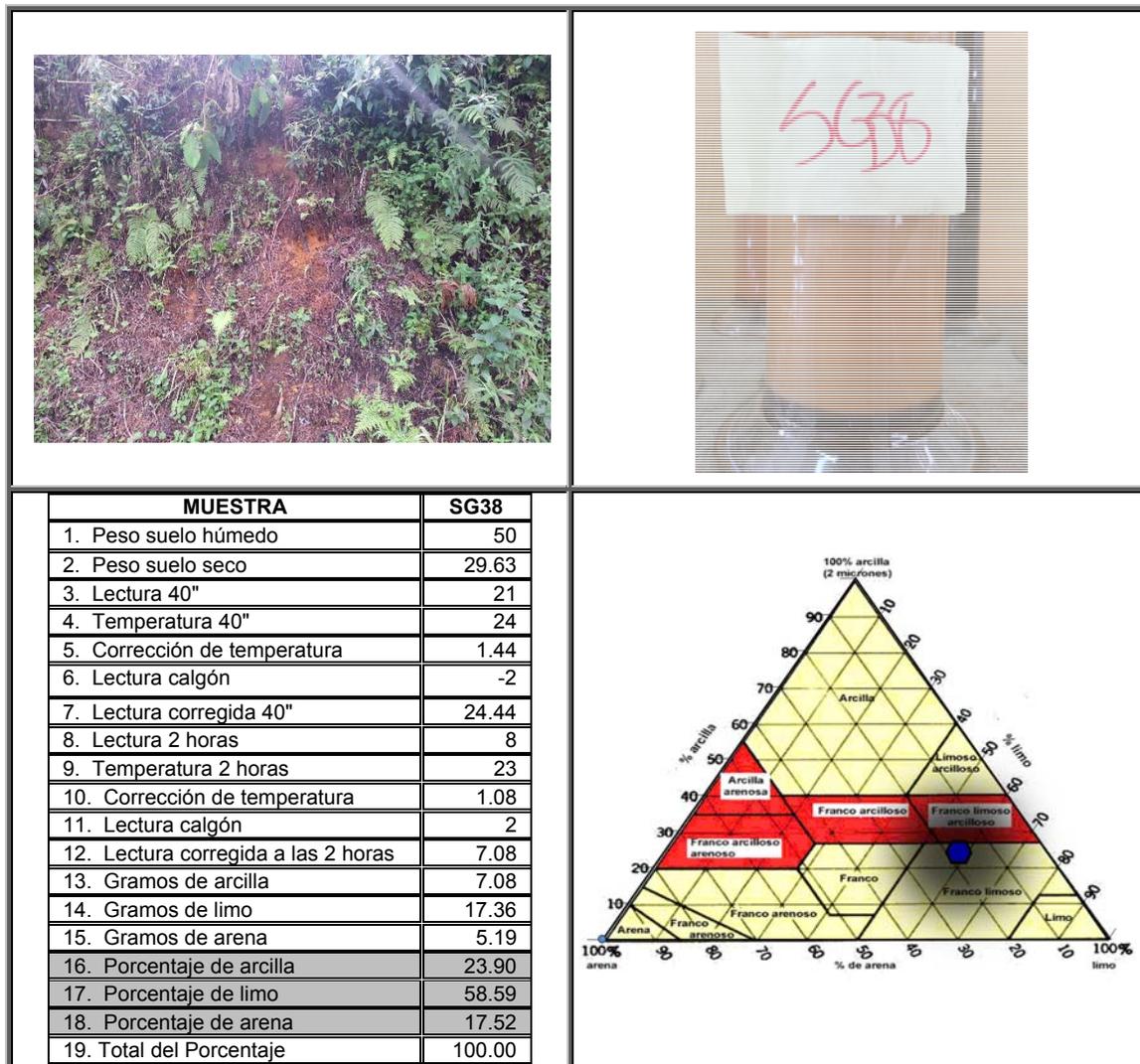
## PUNTO SG37



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

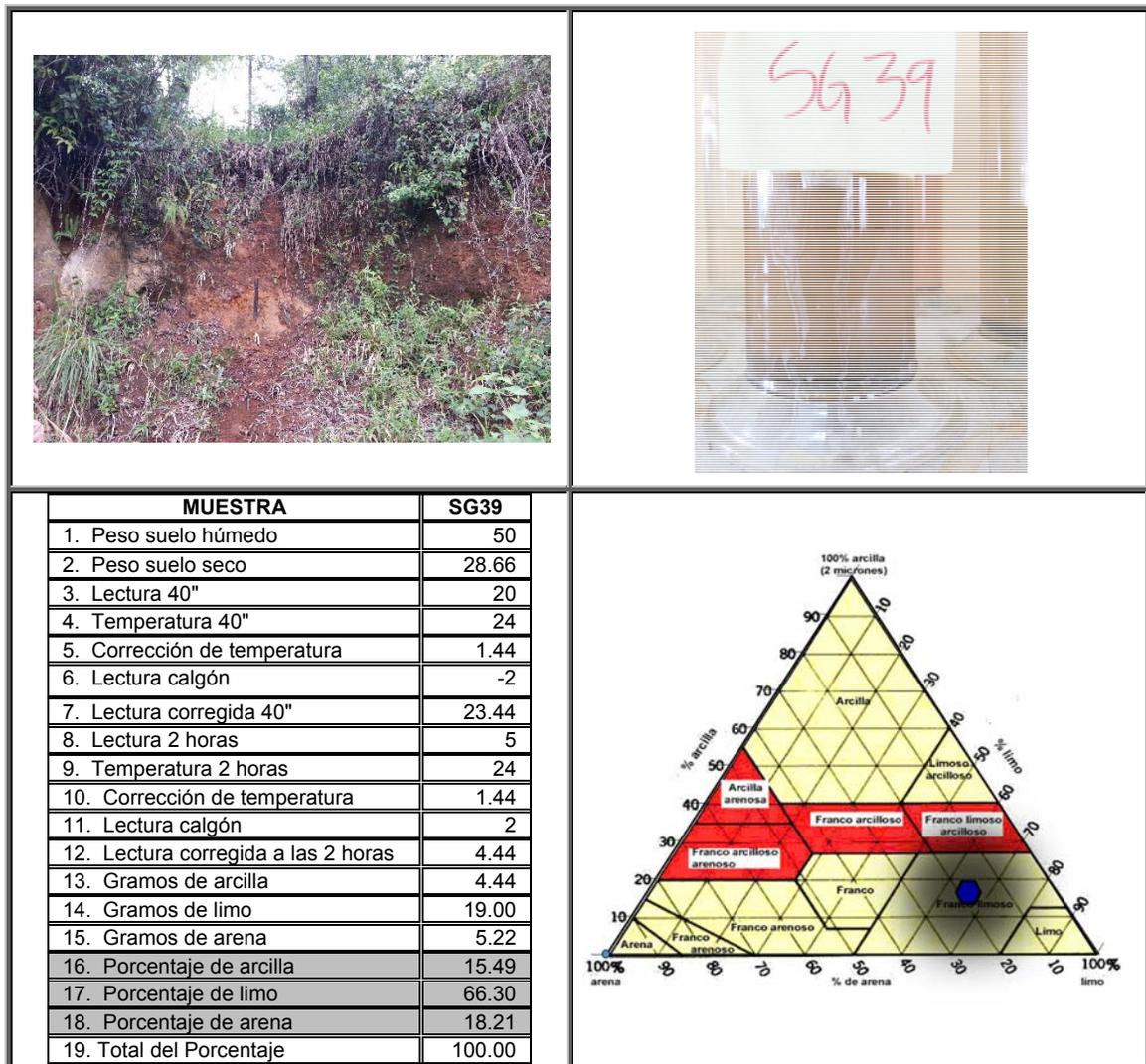
## PUNTO SG38



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

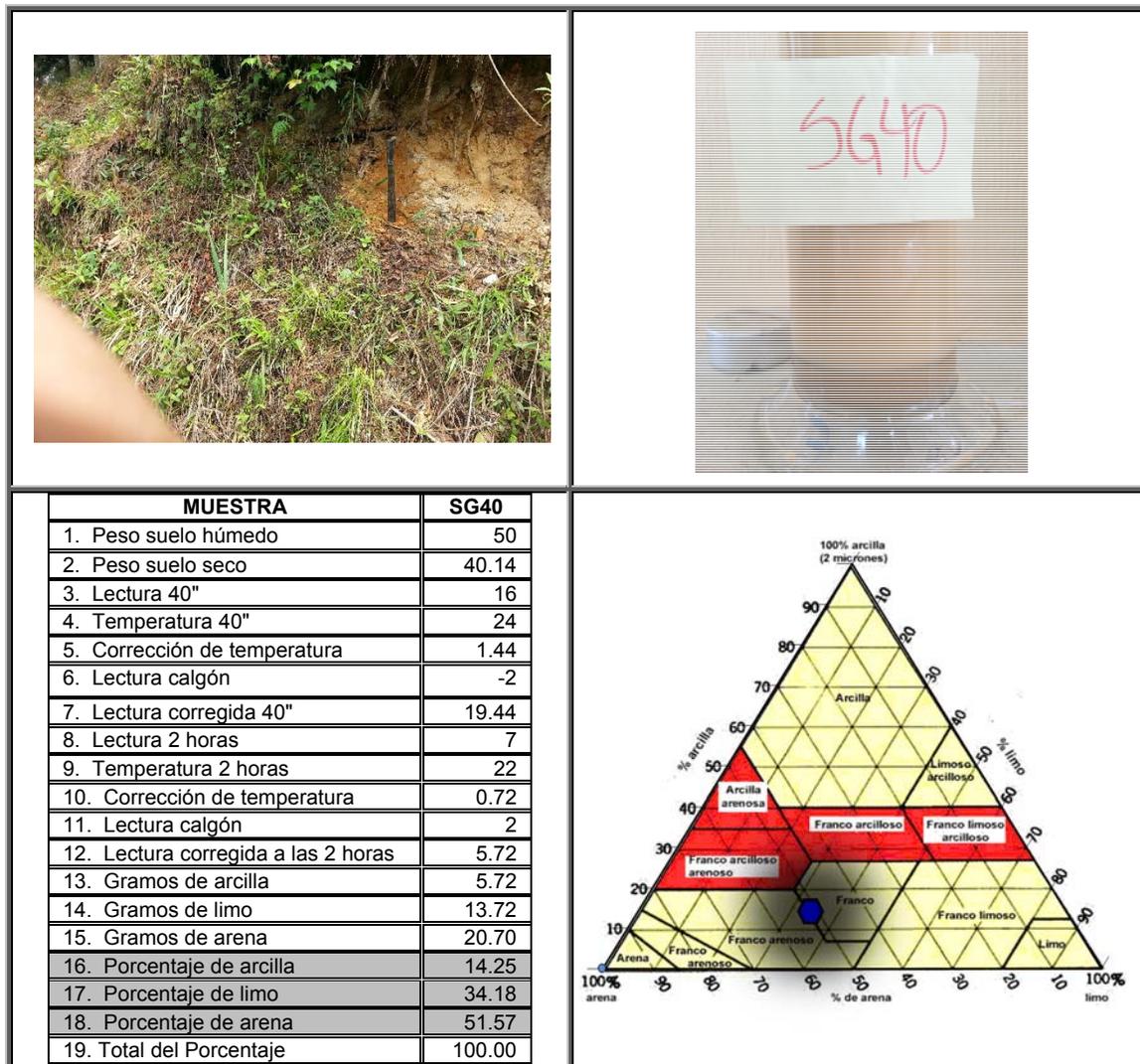
## PUNTO SG39



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

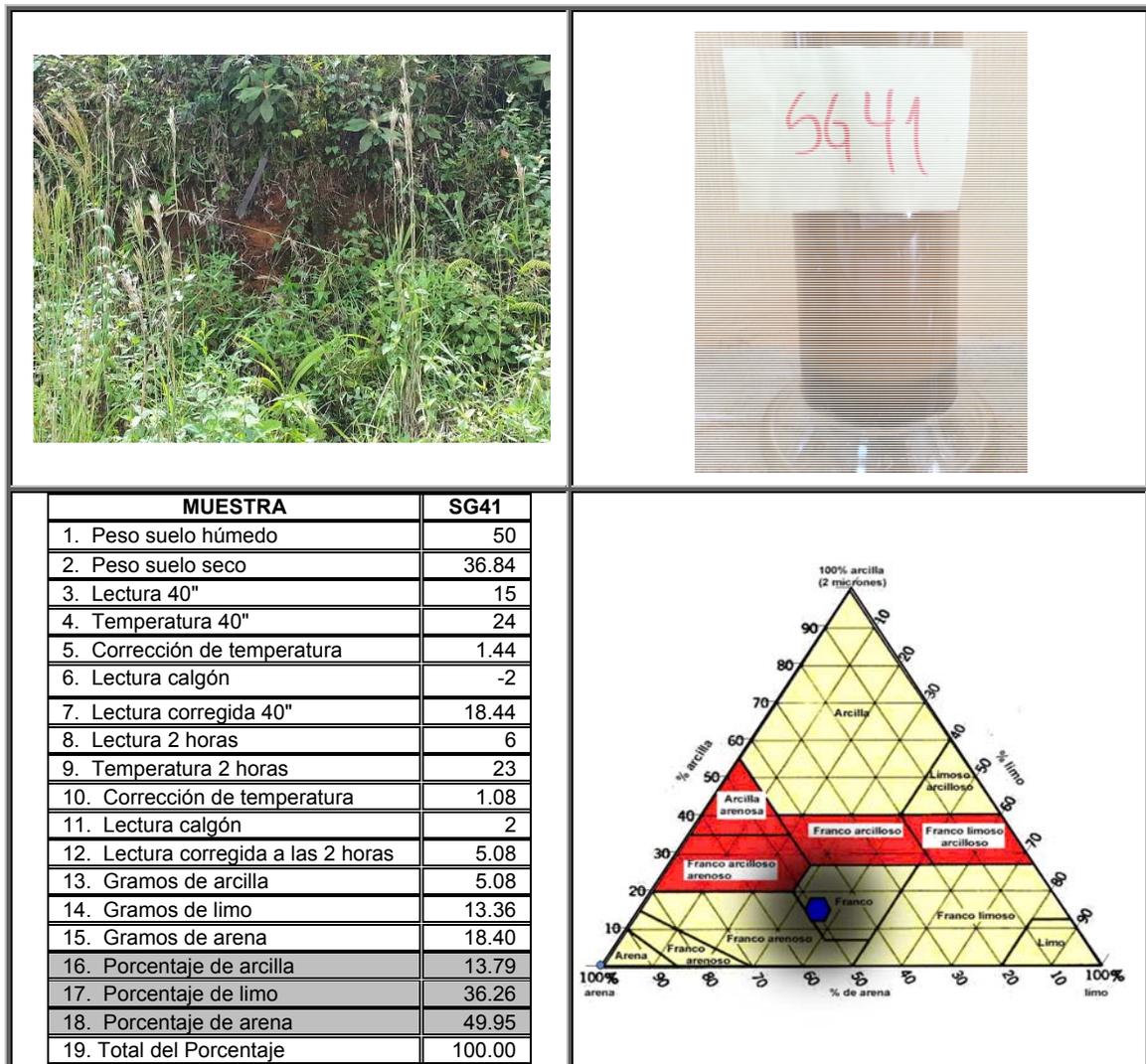
## PUNTO SG40



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

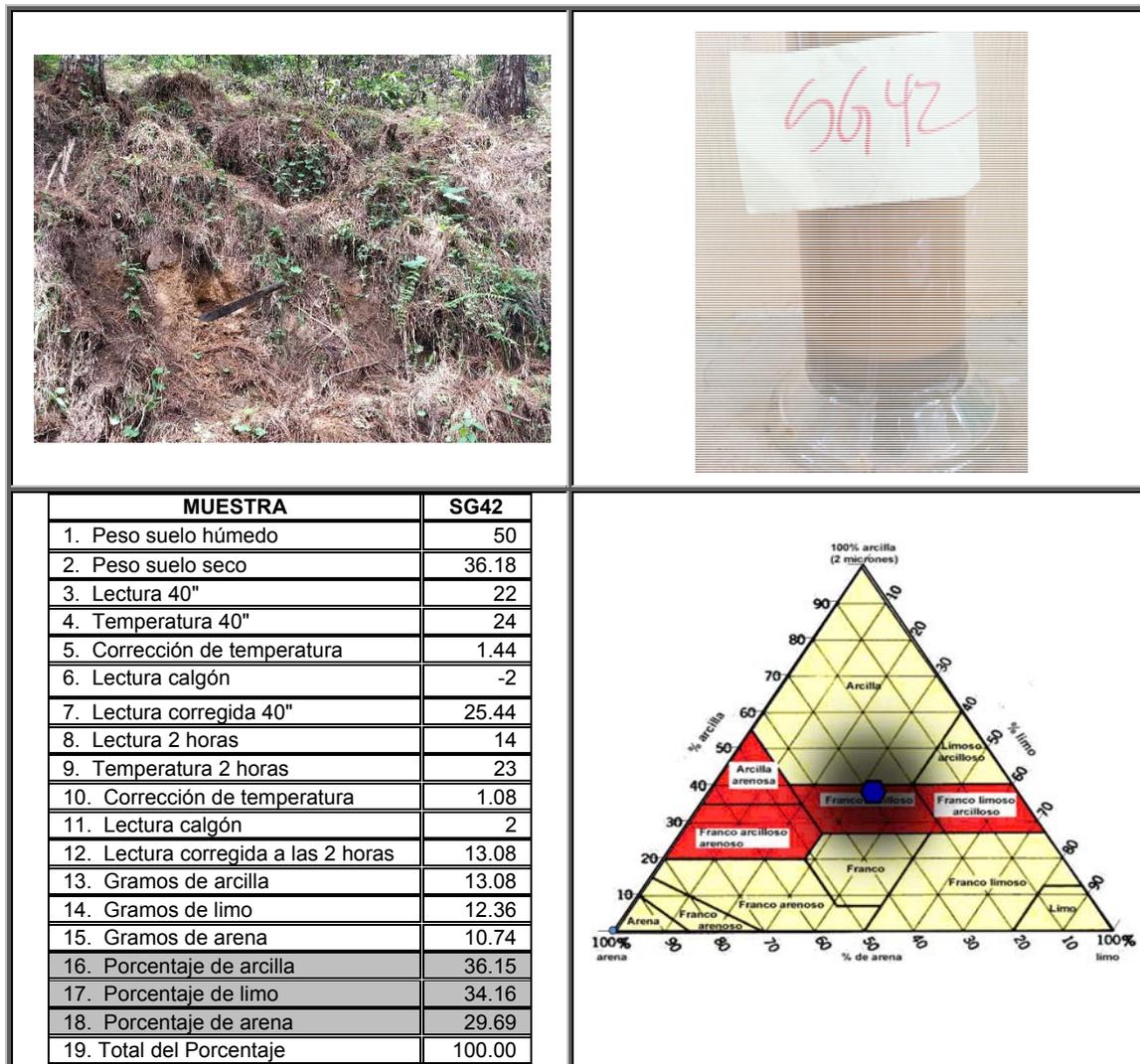
## PUNTO SG41



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

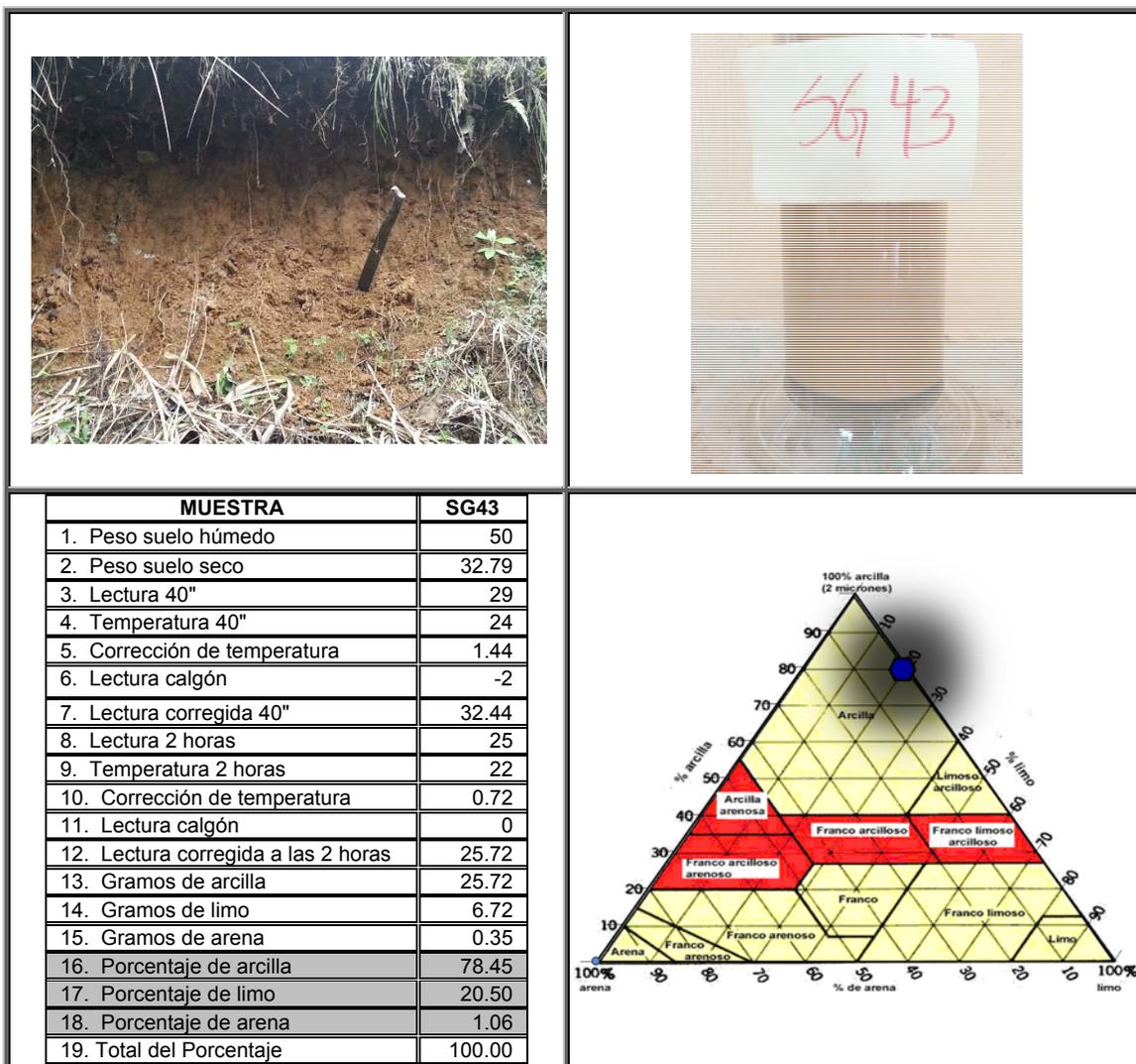
## PUNTO SG42



Fuente: Investigación de campo. 2015.

Fotografías tomadas por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.

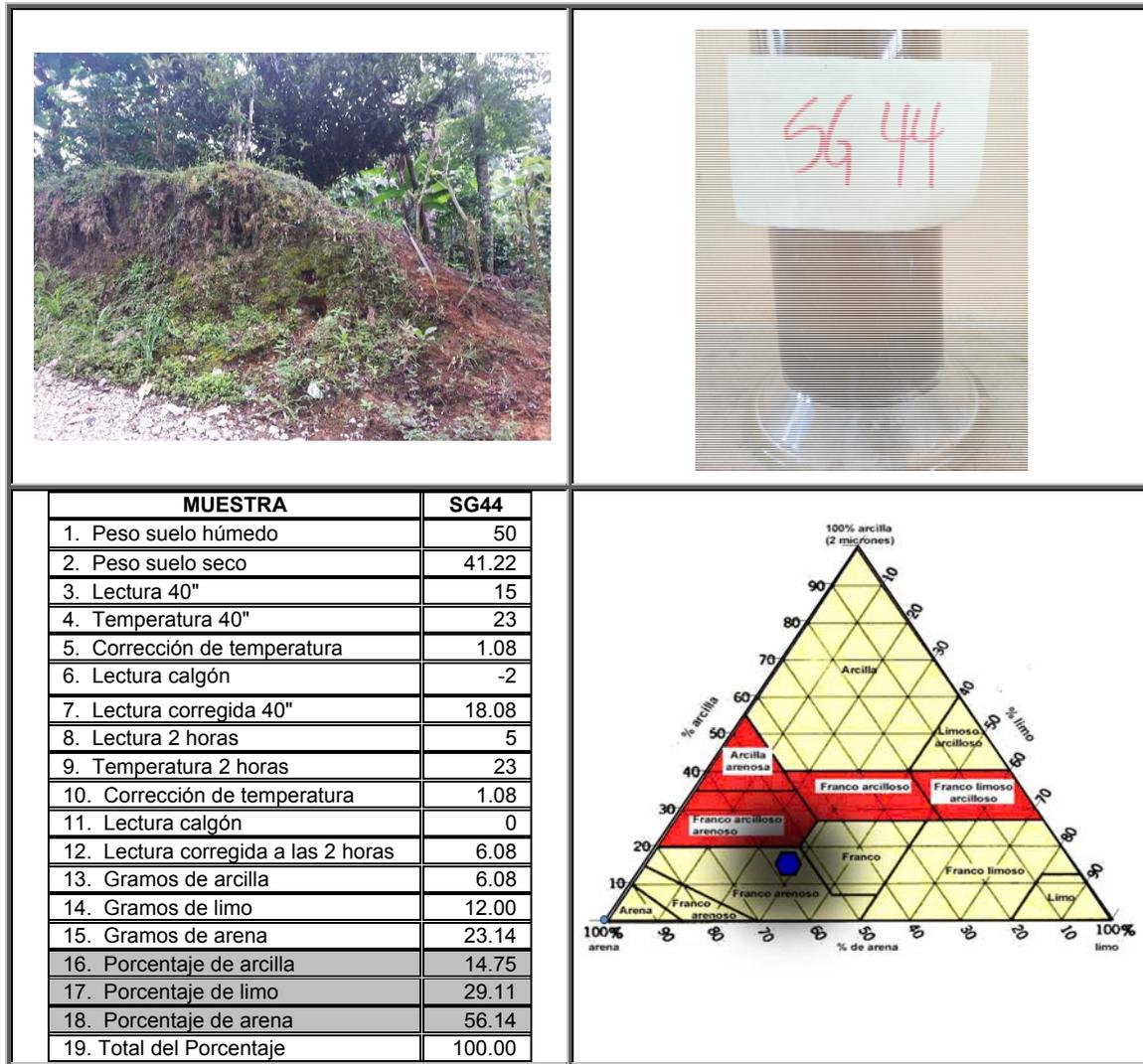
## PUNTO SG43



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

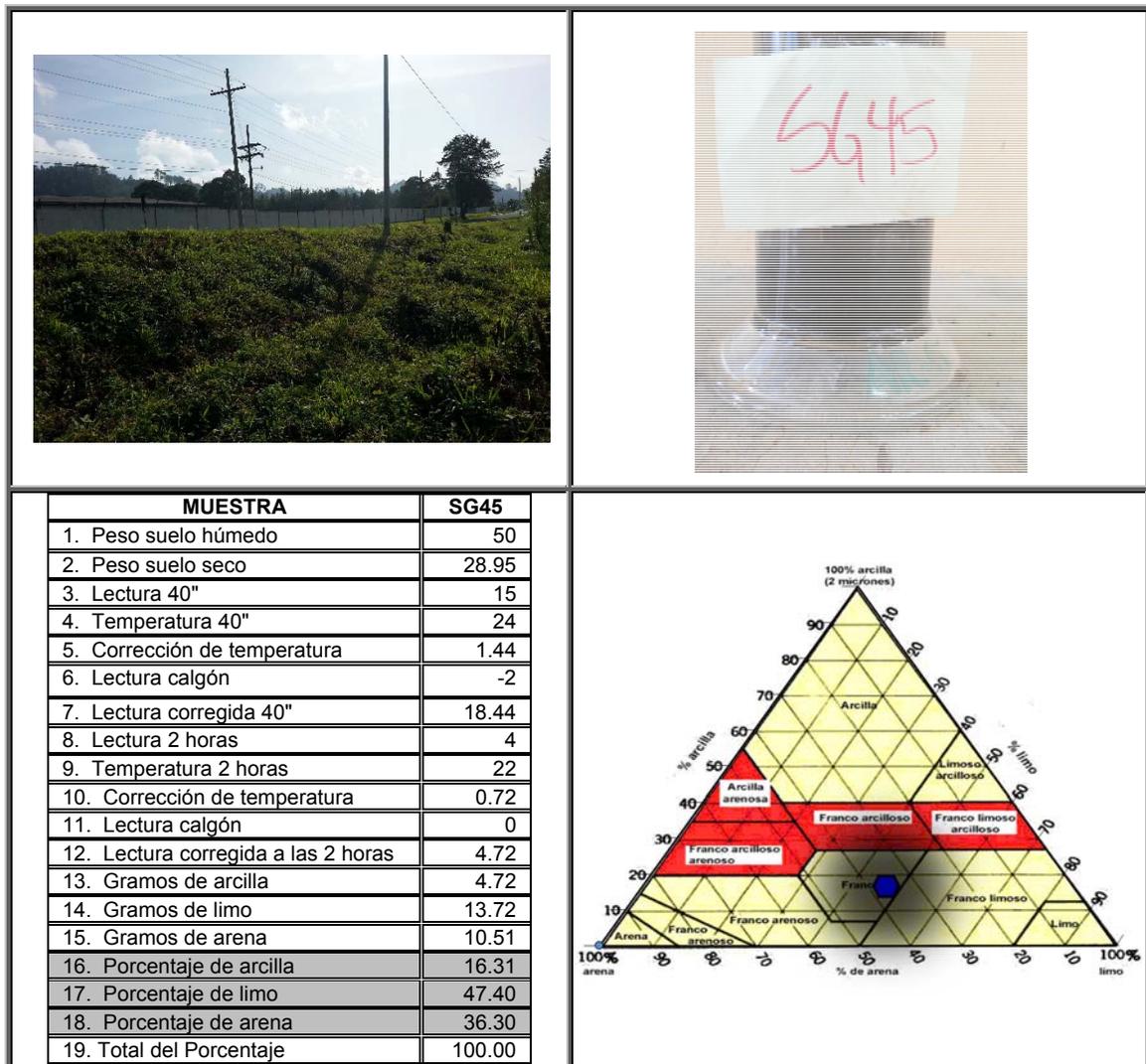
**PUNTO SG44**



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

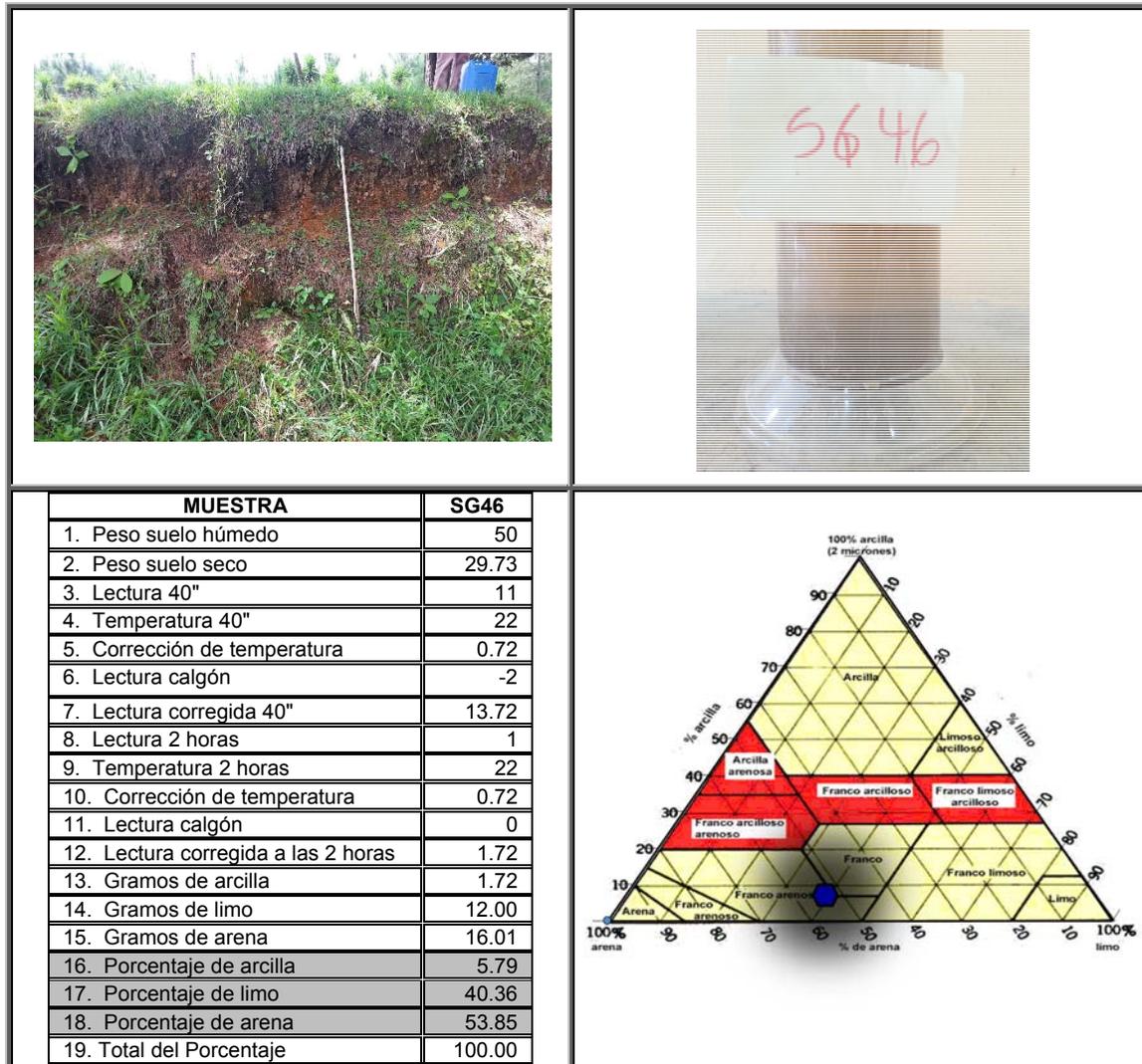
## PUNTO SG45



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

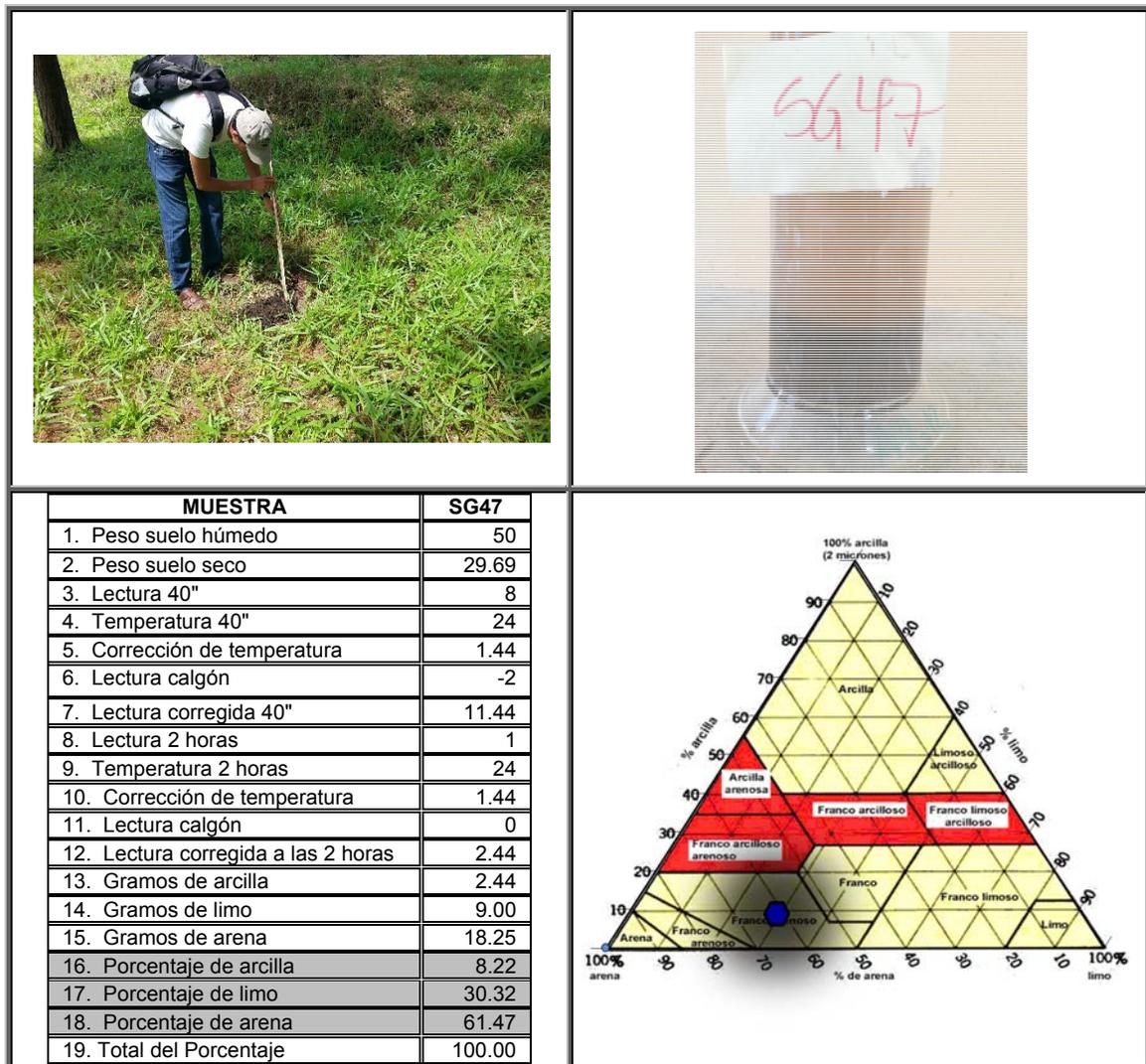
## PUNTO SG46



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

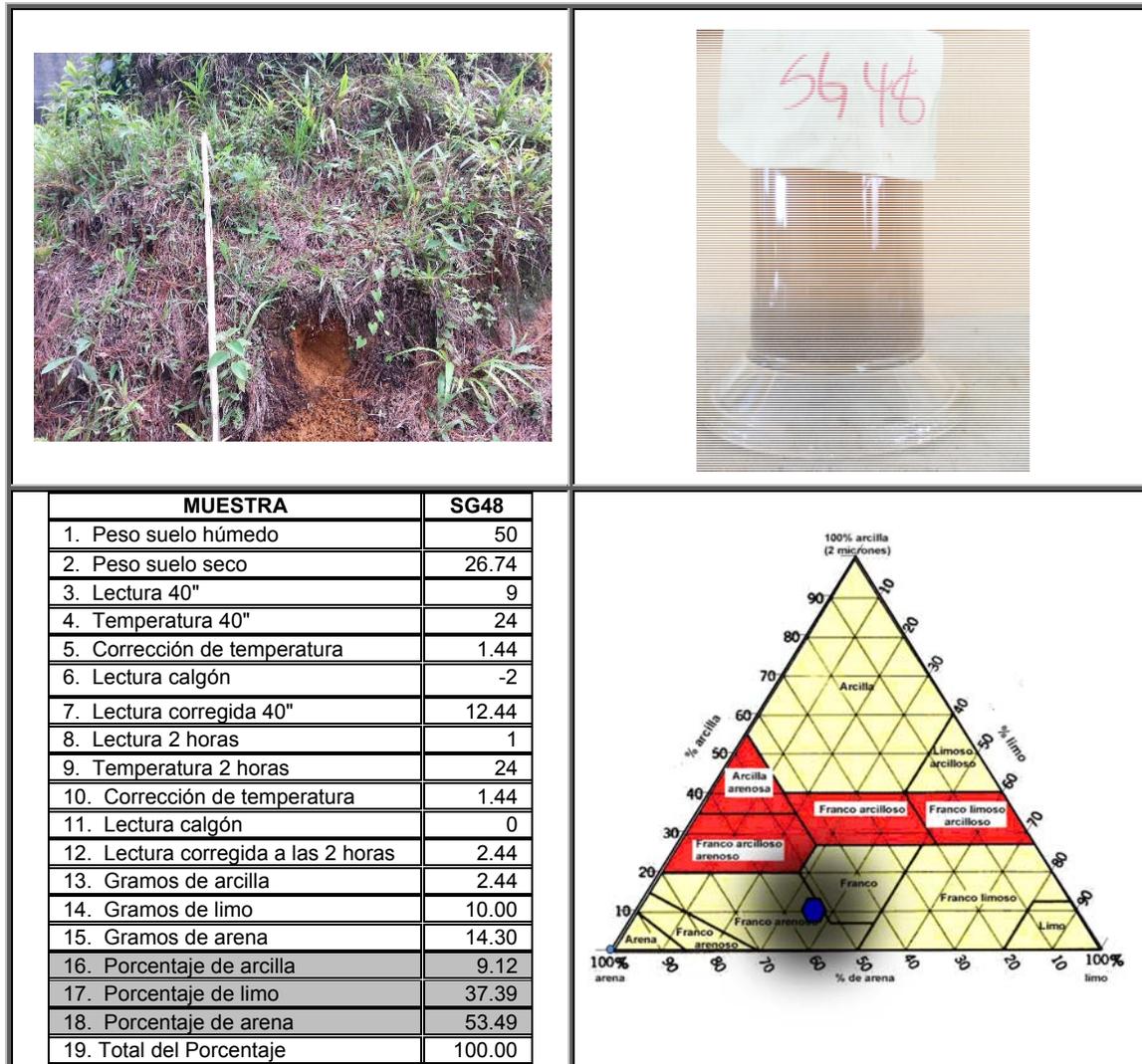
## PUNTO SG47



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

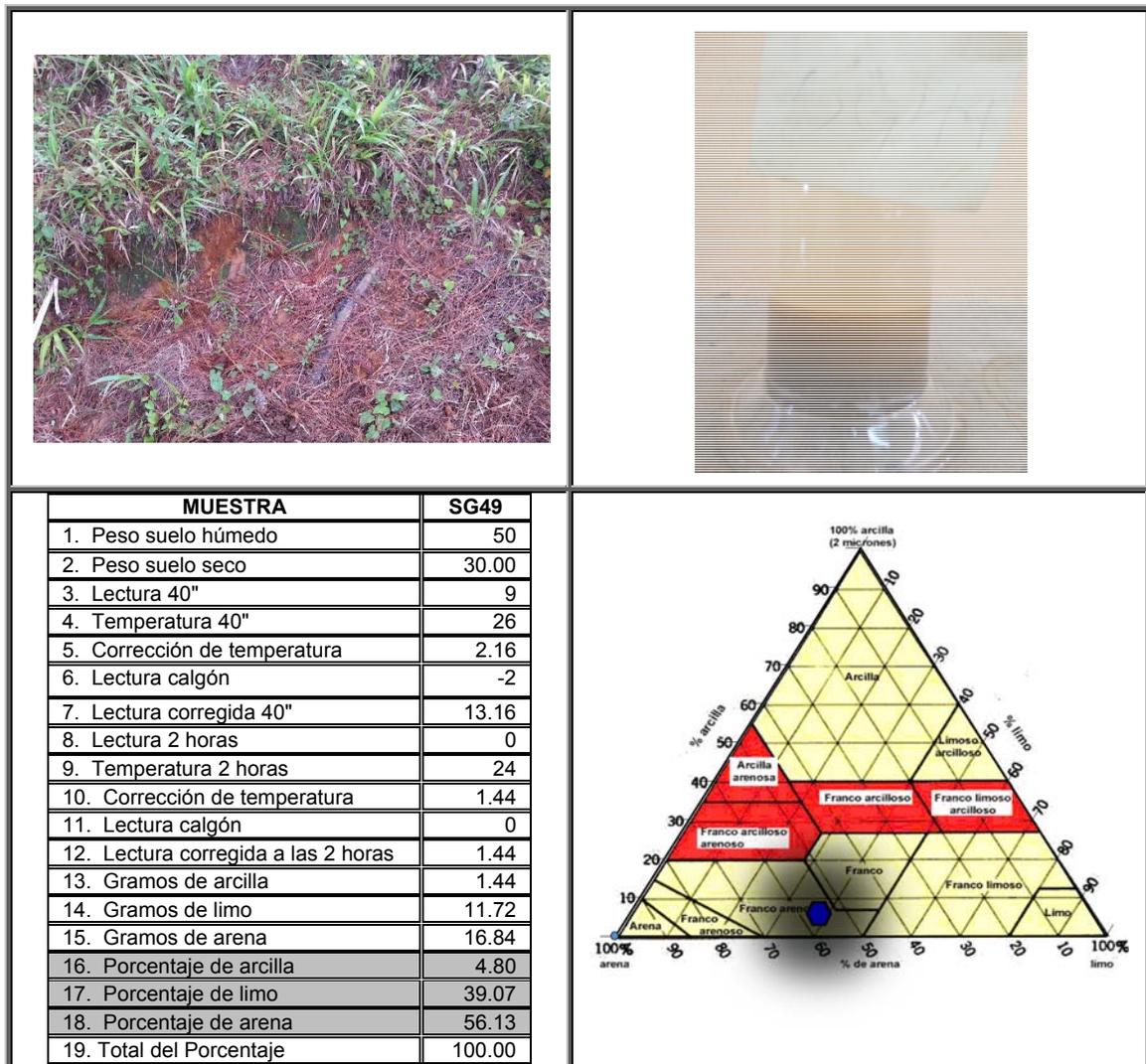
## PUNTO SG48



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

## PUNTO SG49

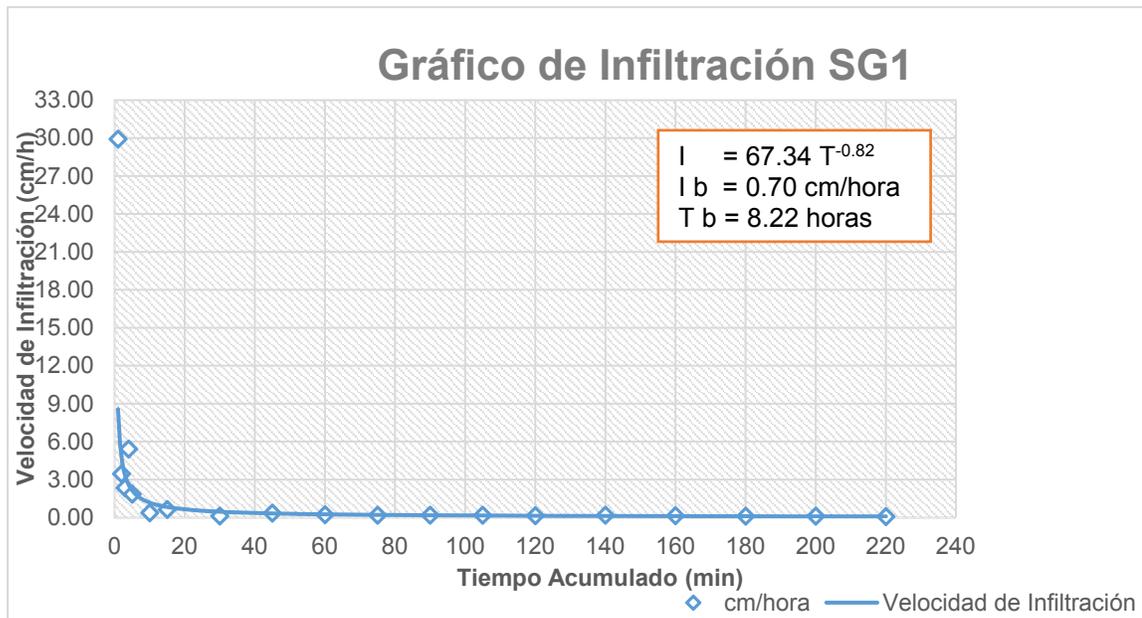


**Fuente:** Investigación de campo. 2015.

**Fotografías tomadas por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.

## ANEXO 2

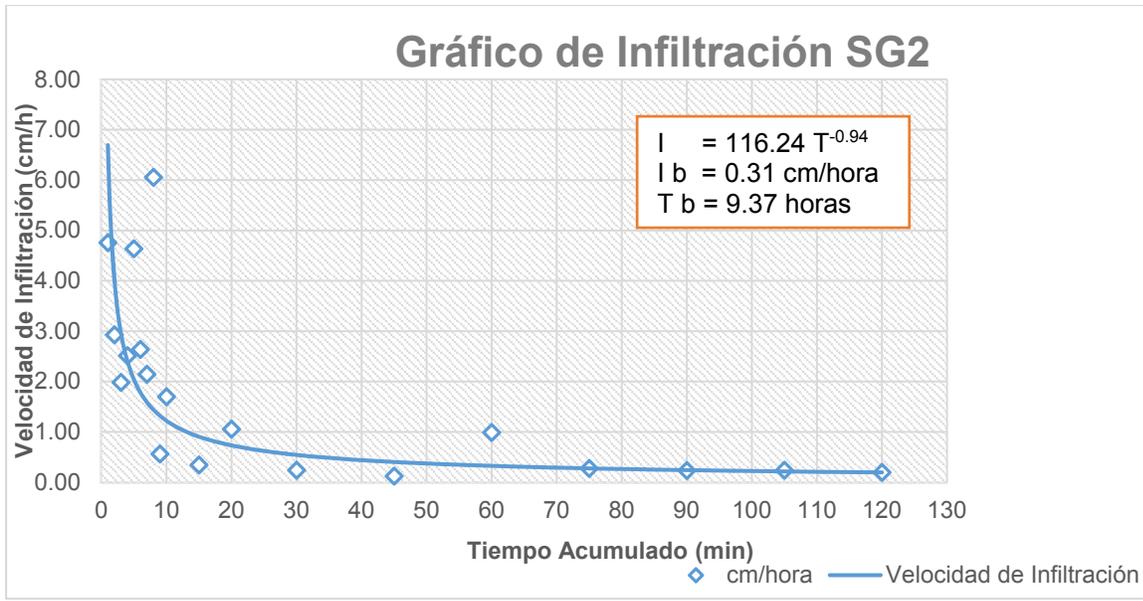
### GRÁFICOS Y FOTOGRAFÍAS DE LAS PRUEBAS DE INFILTRACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



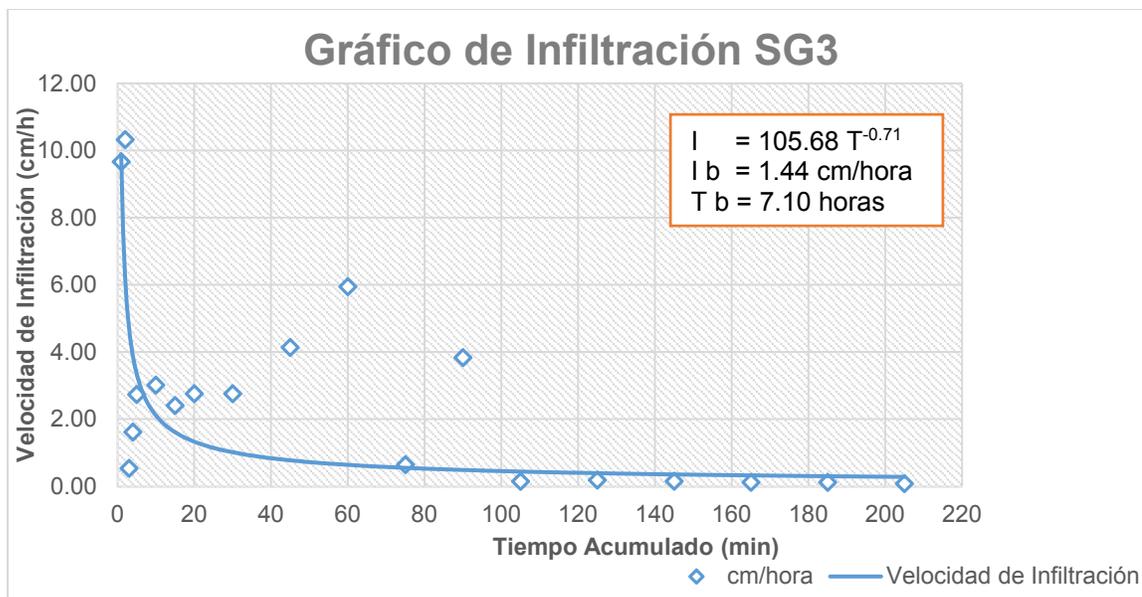
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



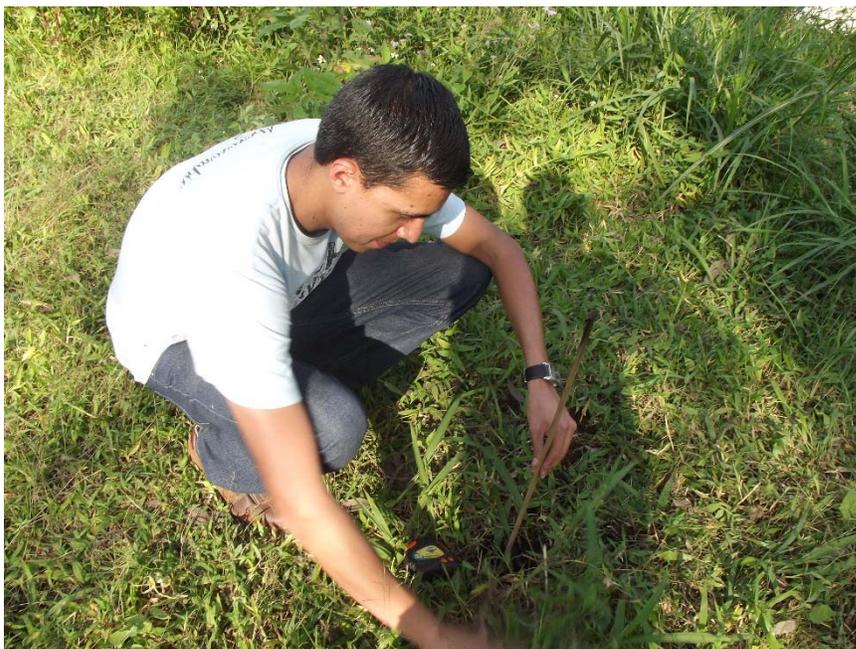
**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



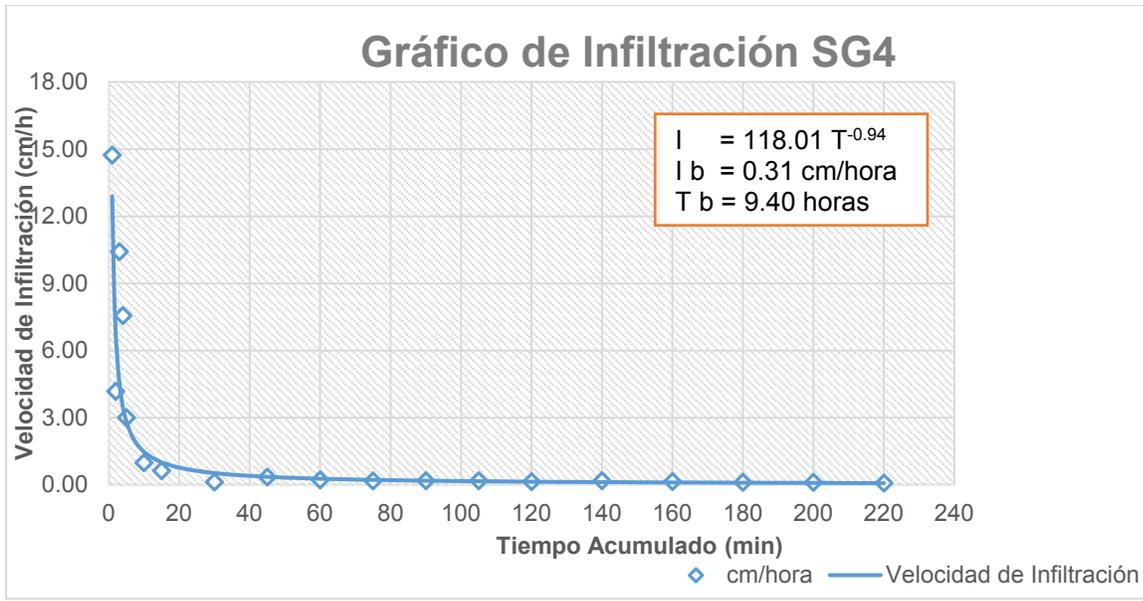
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



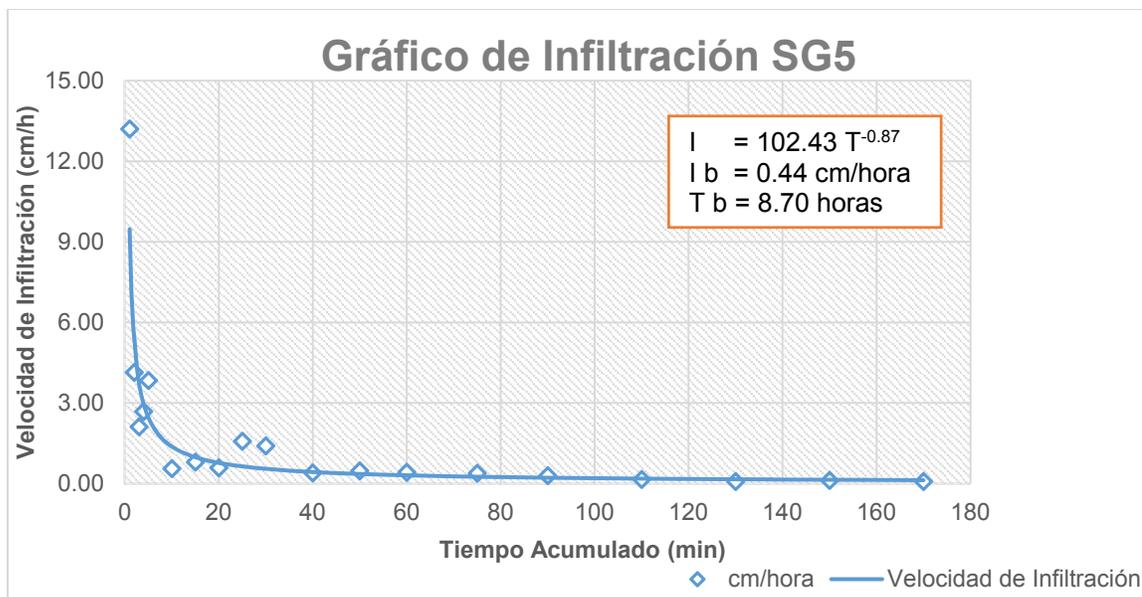
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



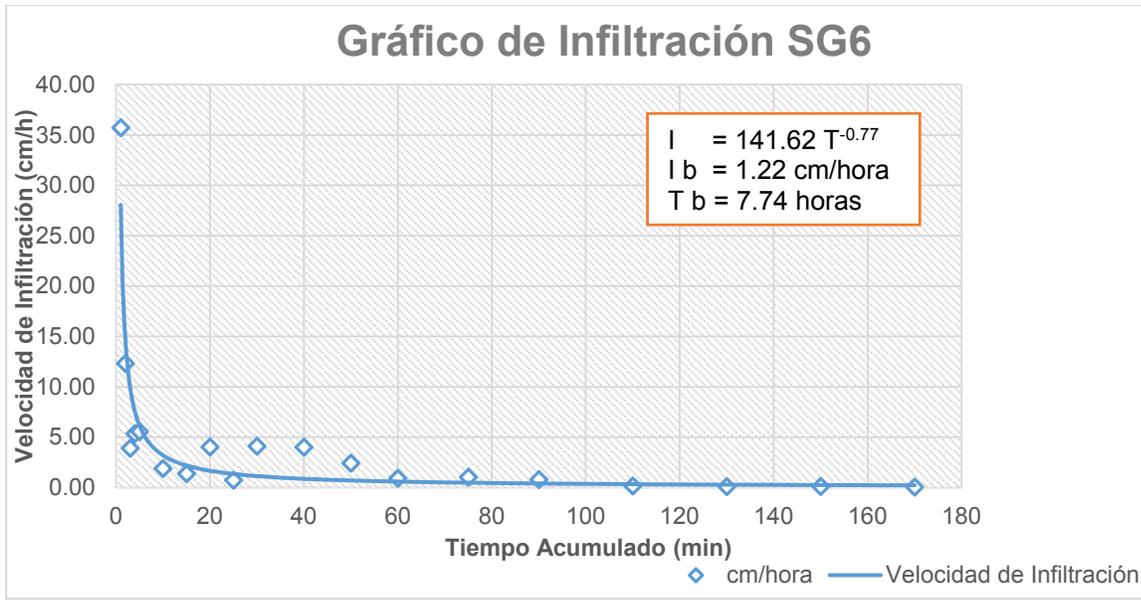
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



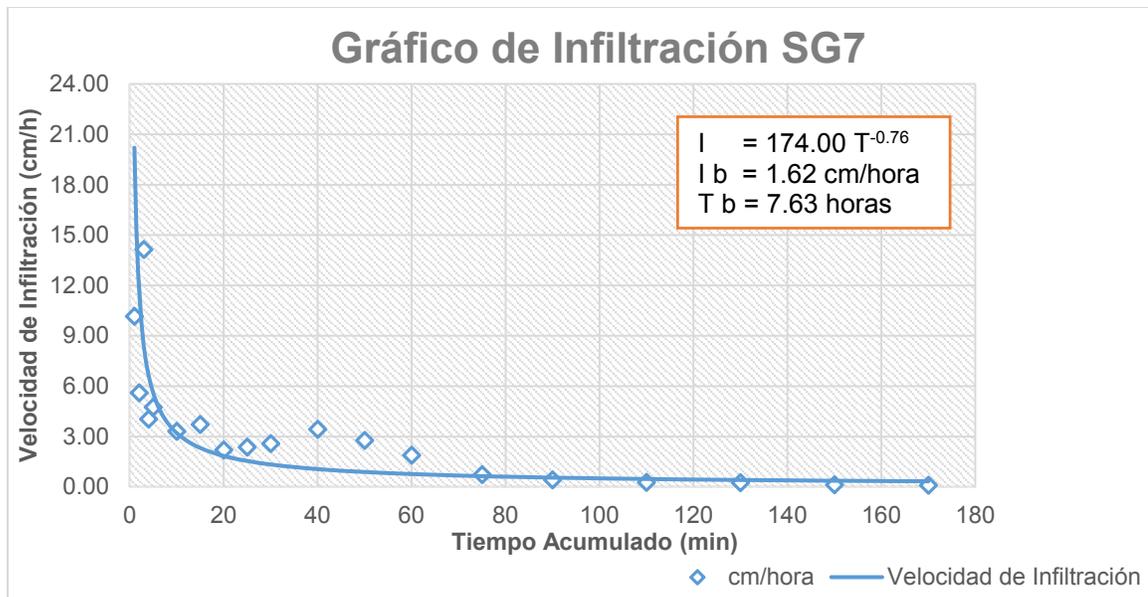
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



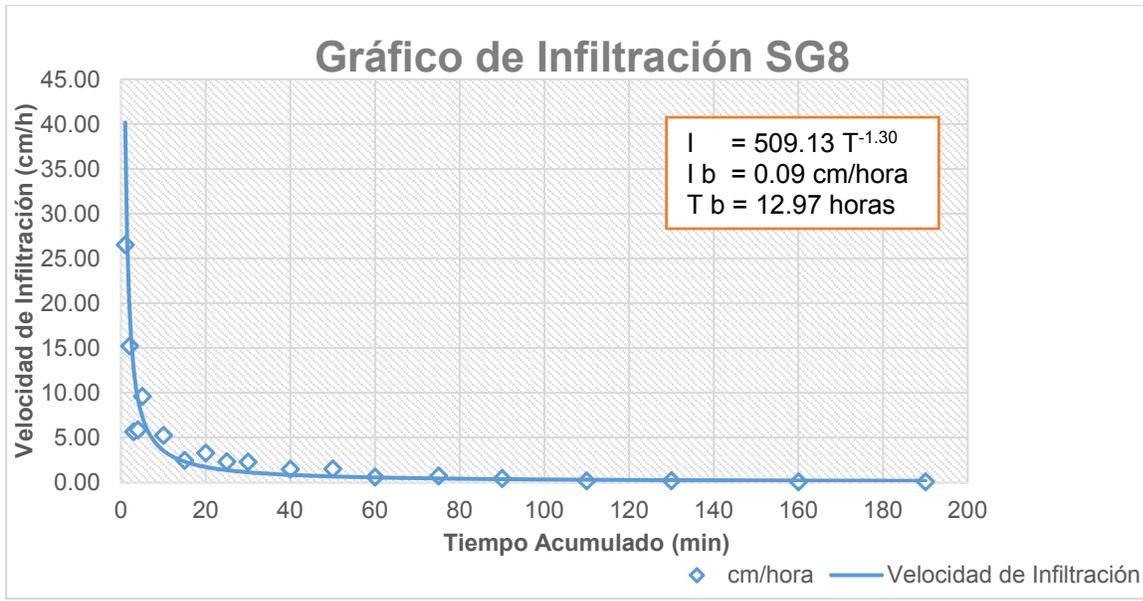
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



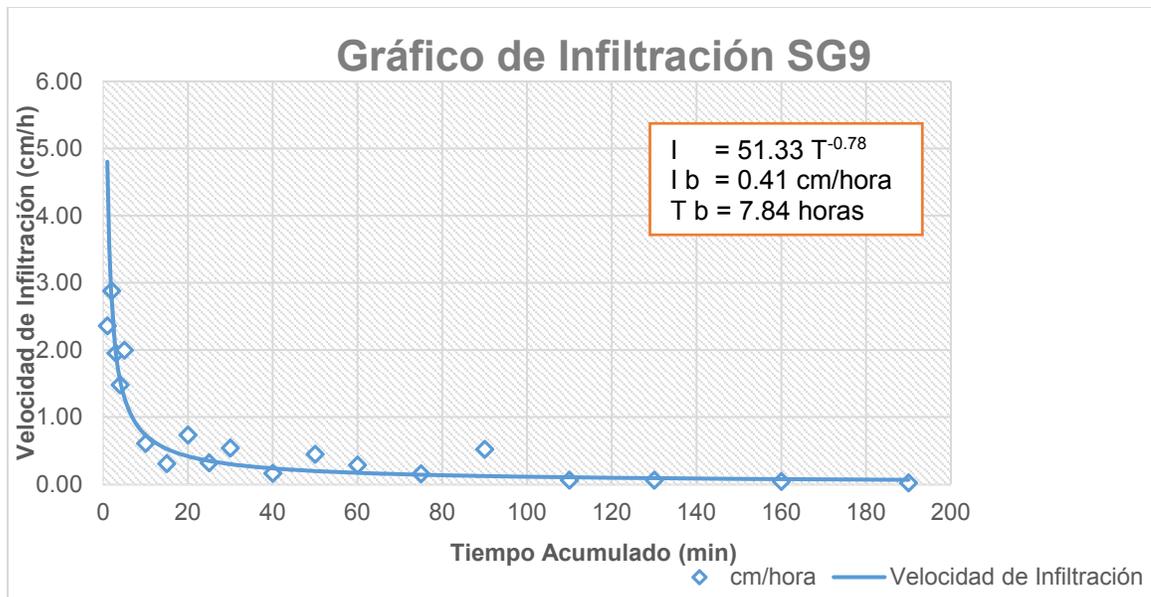
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



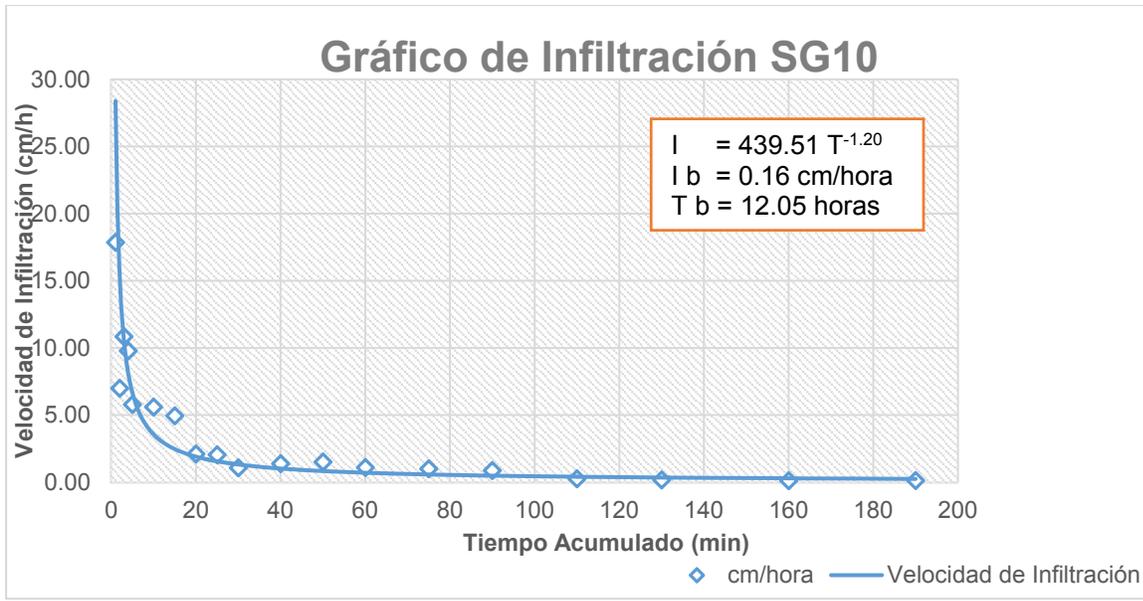
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



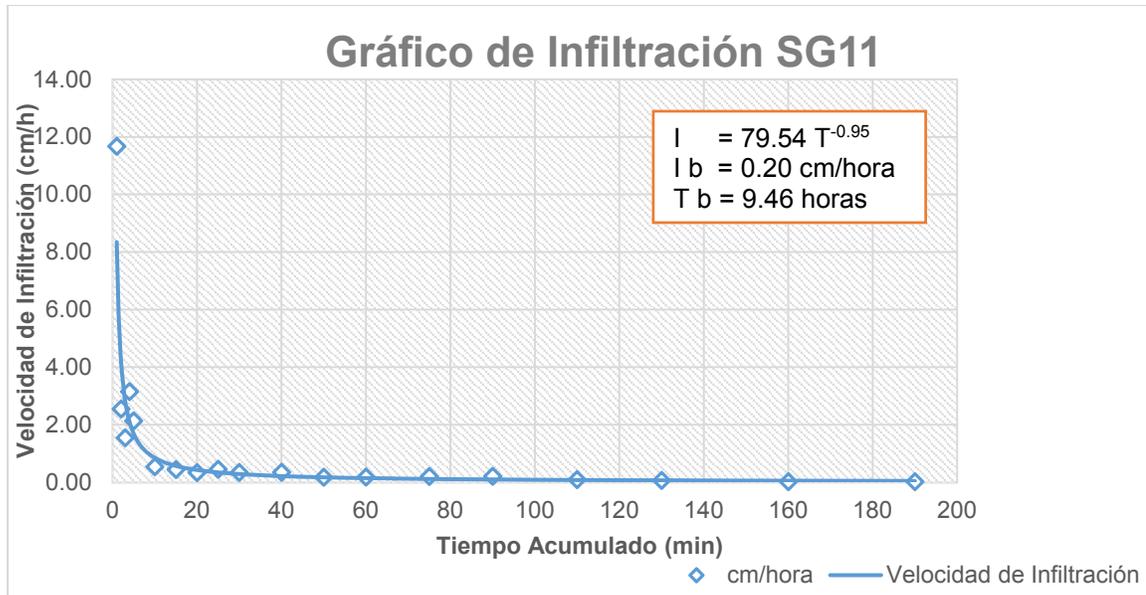
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



Fuente: Investigación de campo. 2015.



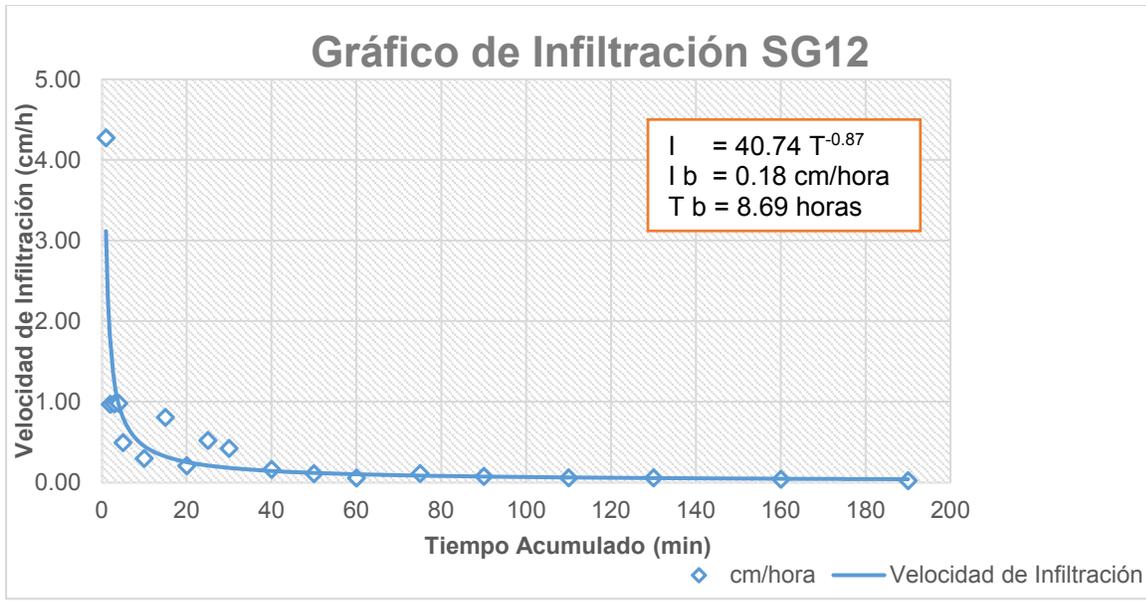
Tomada por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



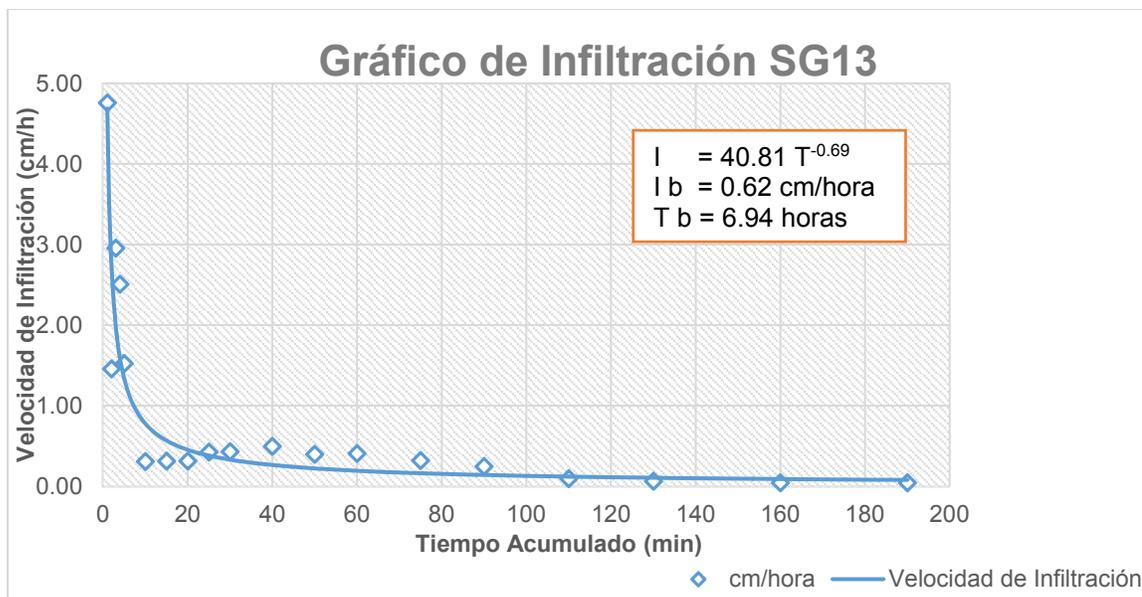
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



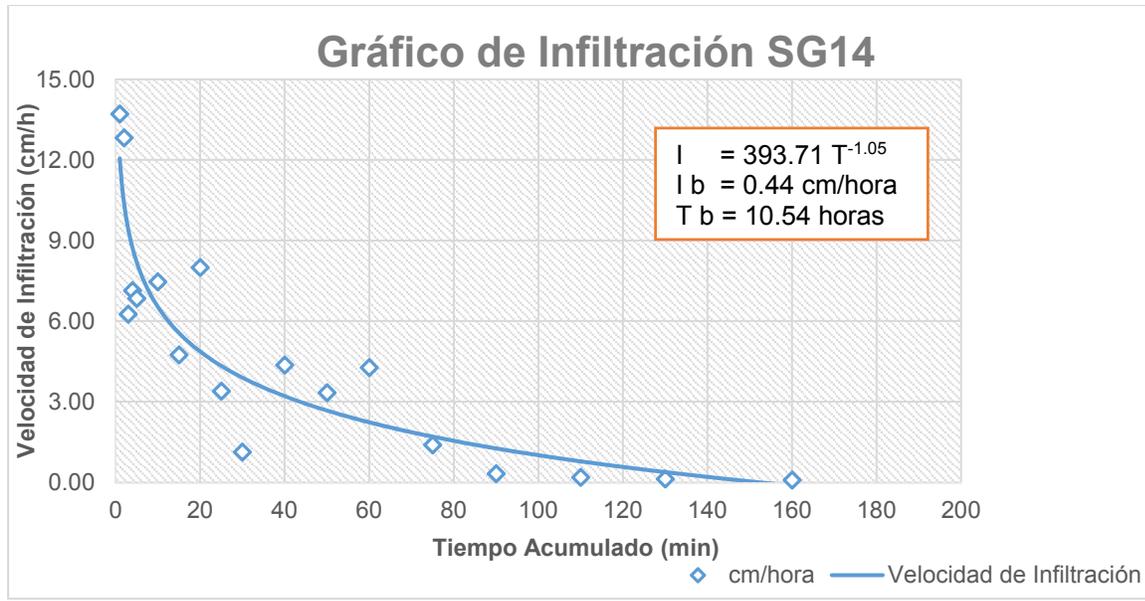
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



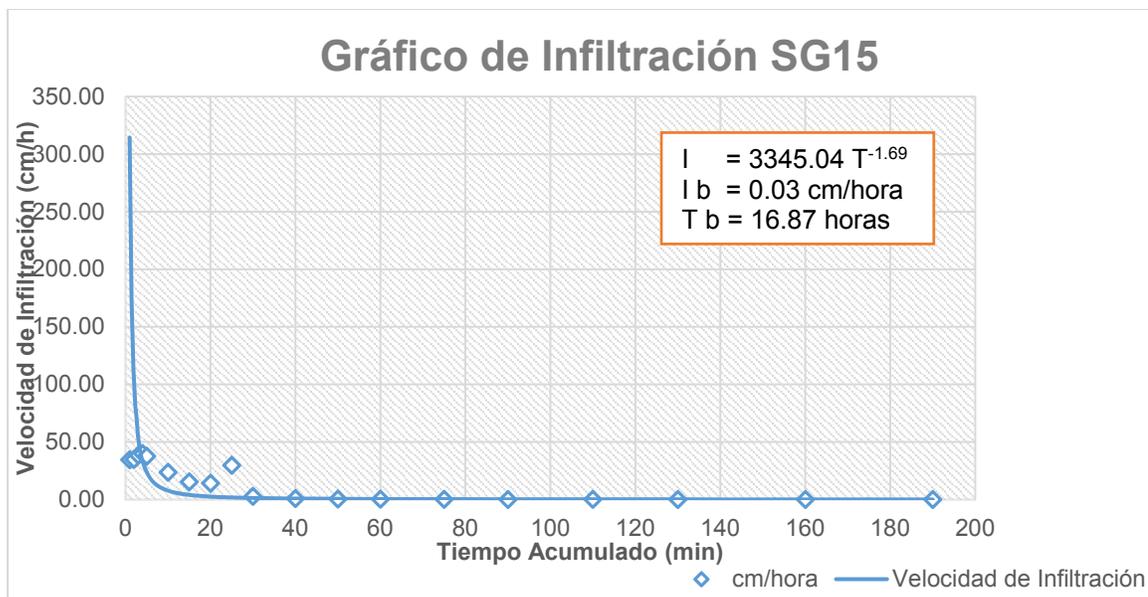
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015. **Fuente:** Investigación de campo. 2015.



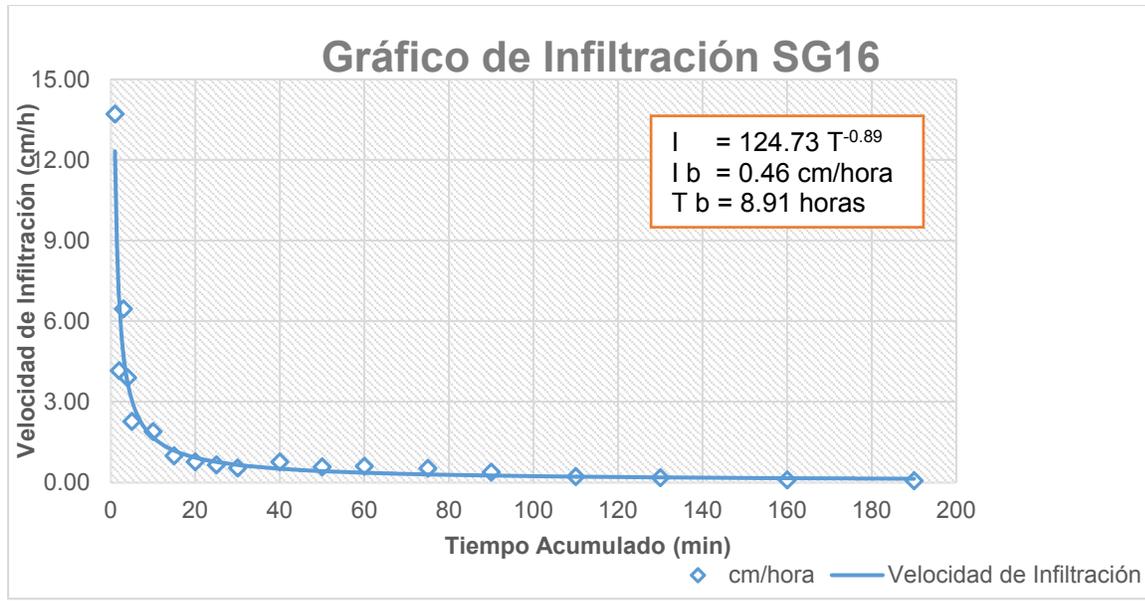
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



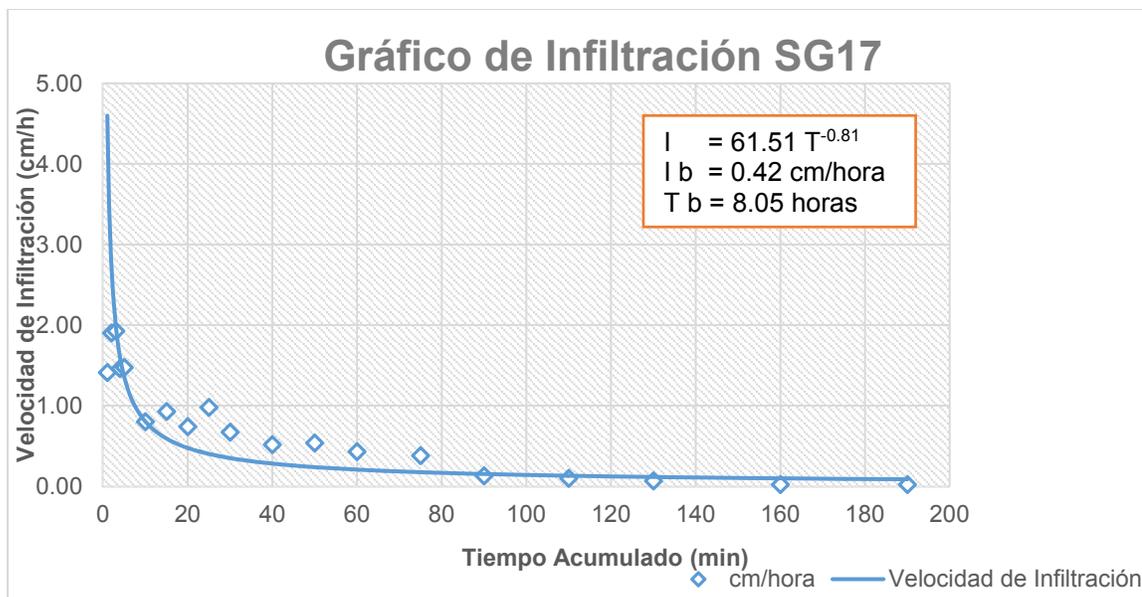
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



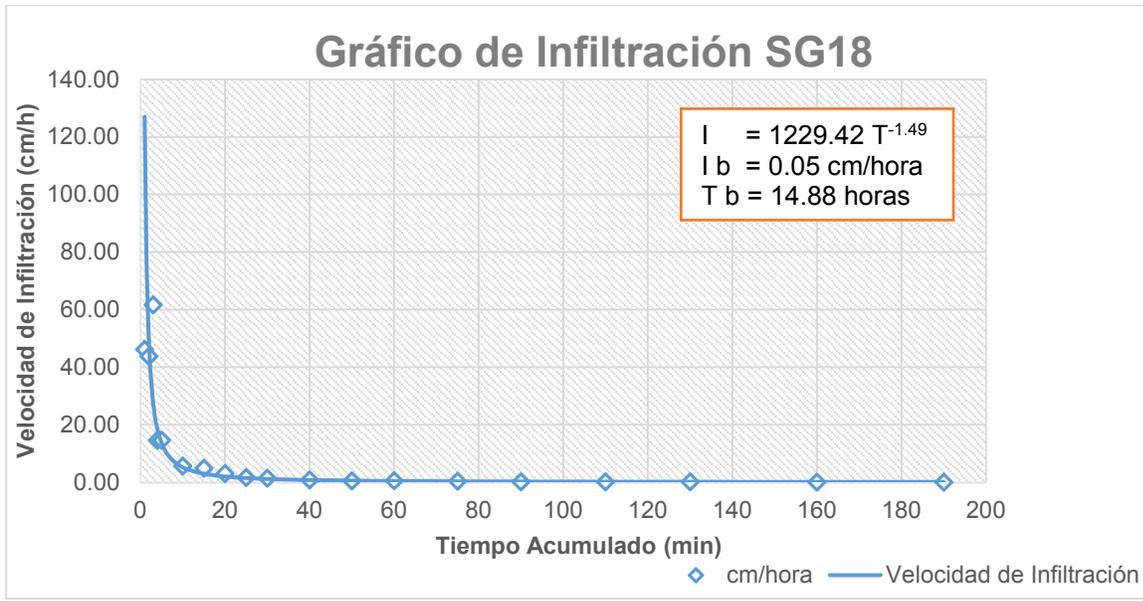
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



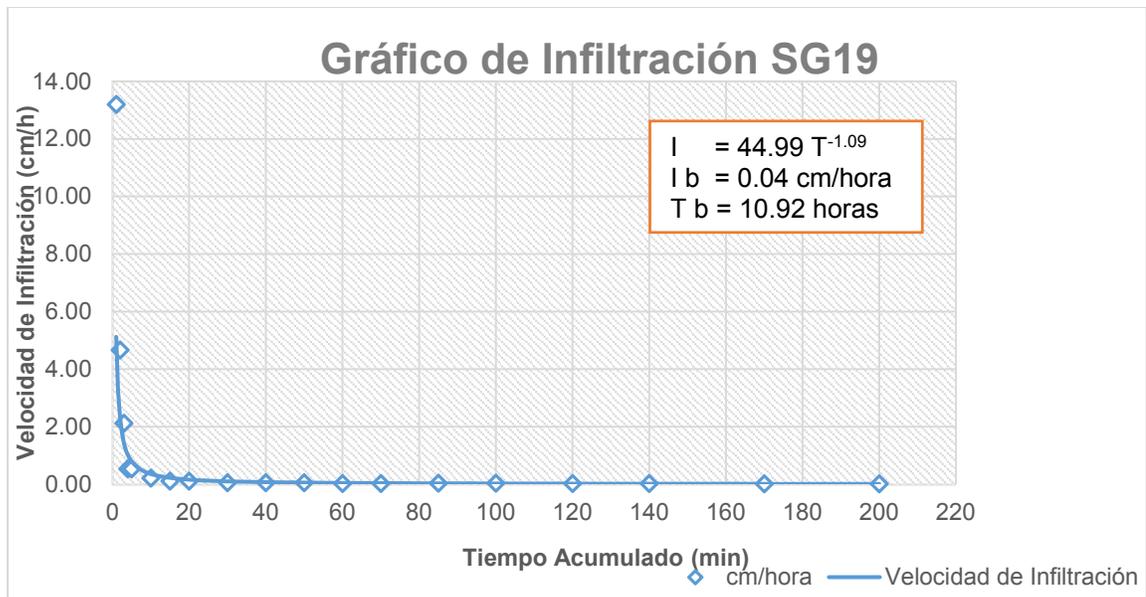
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



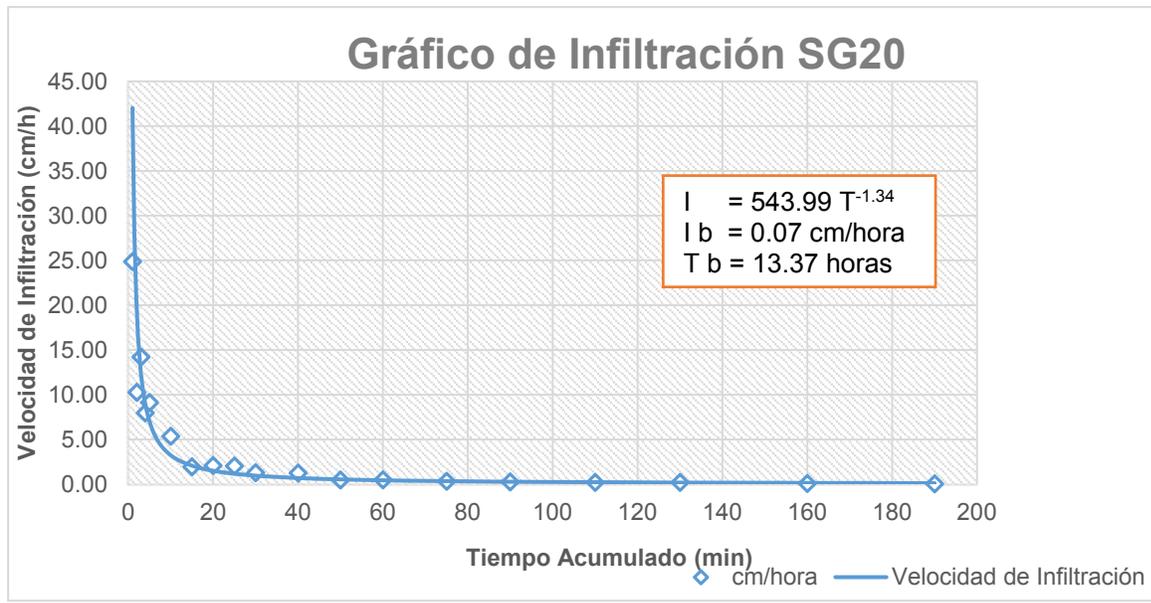
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



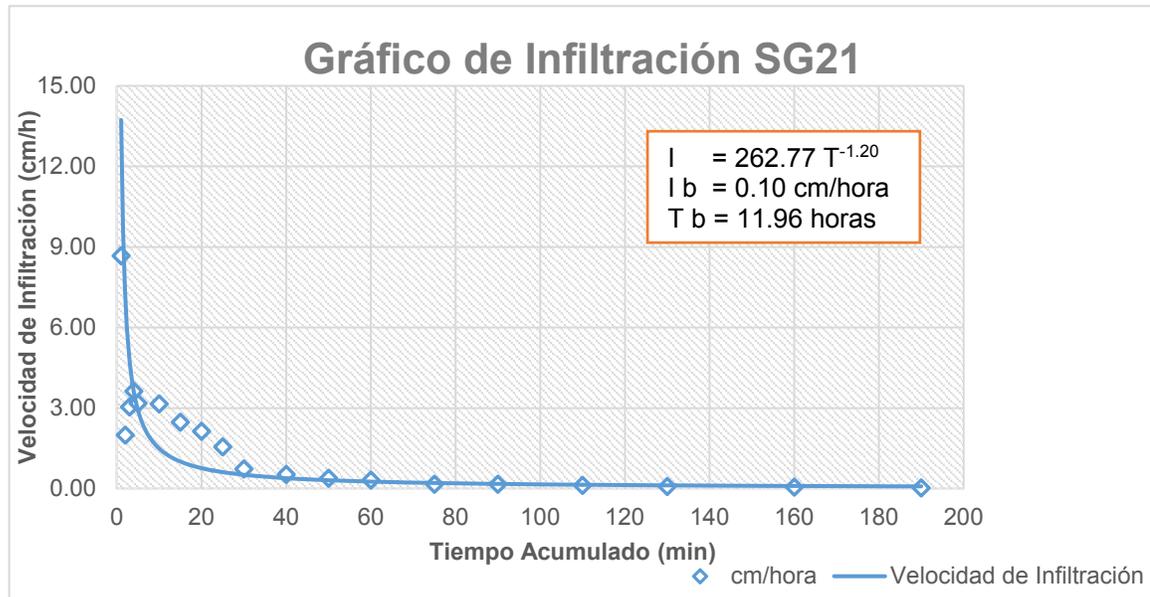
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



Fuente: Investigación de campo. 2015.



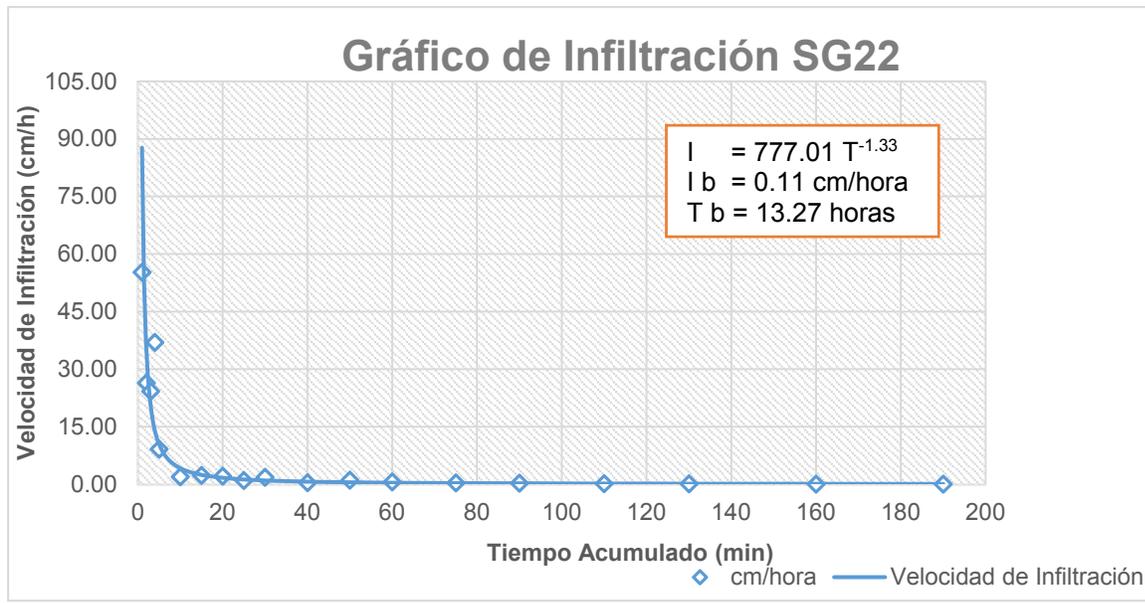
Tomada por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



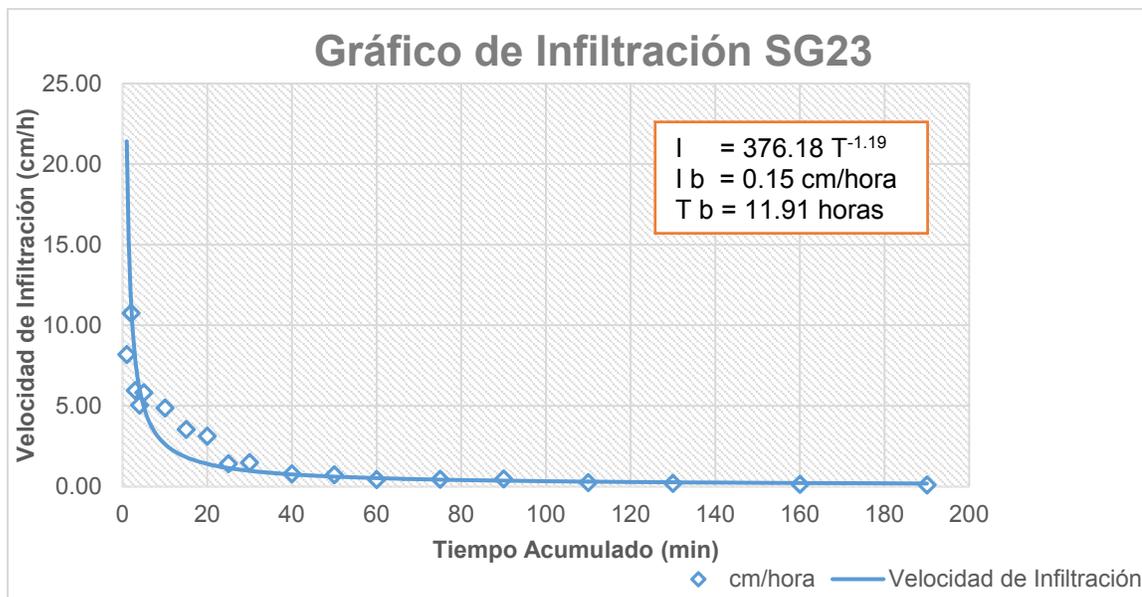
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



Fuente: Investigación de campo. 2015.



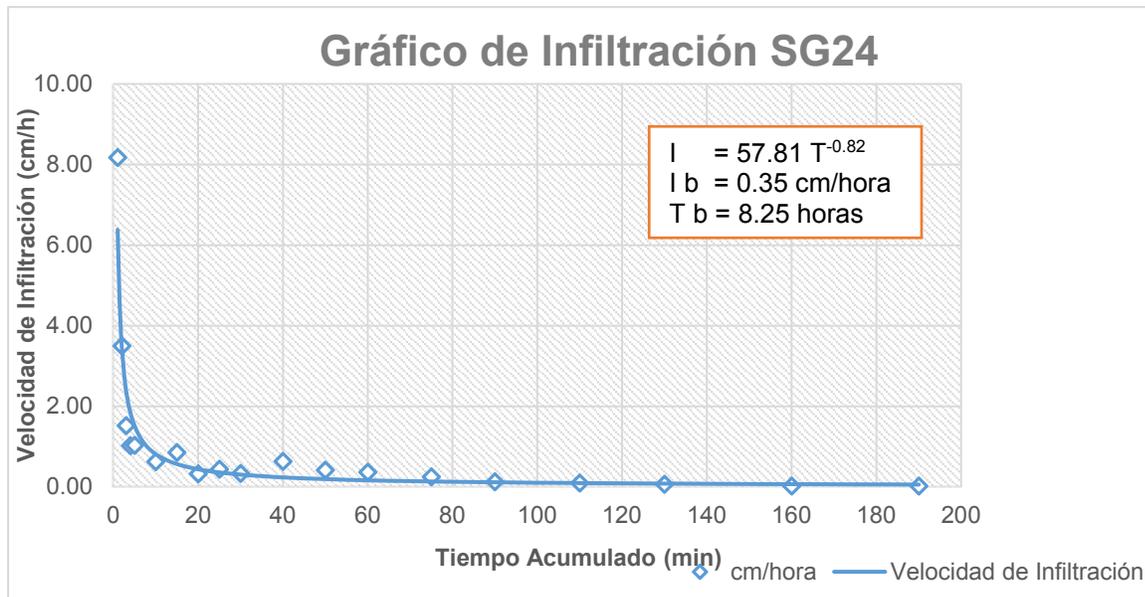
Tomada por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.



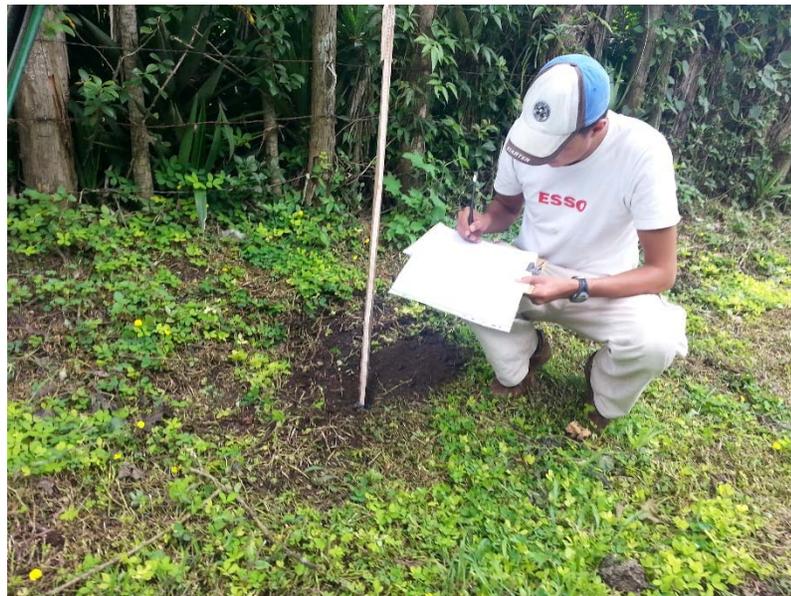
**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



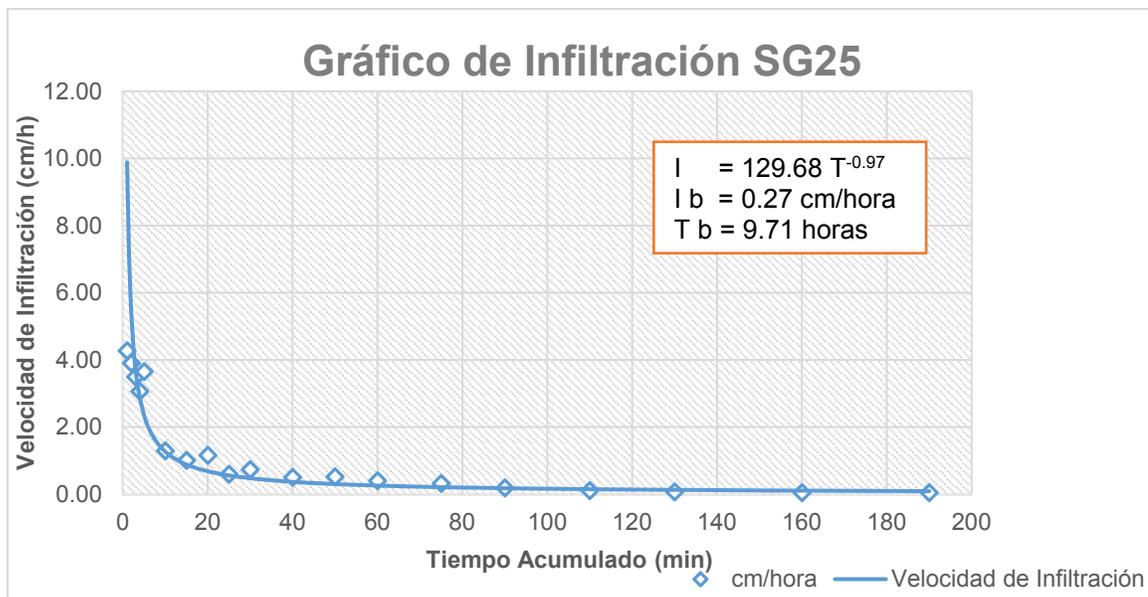
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



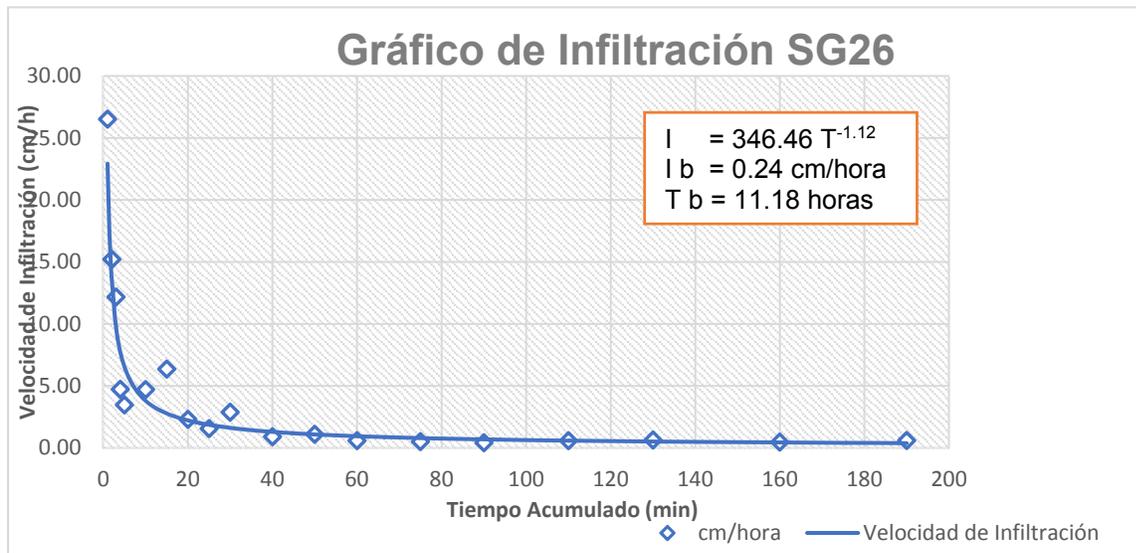
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



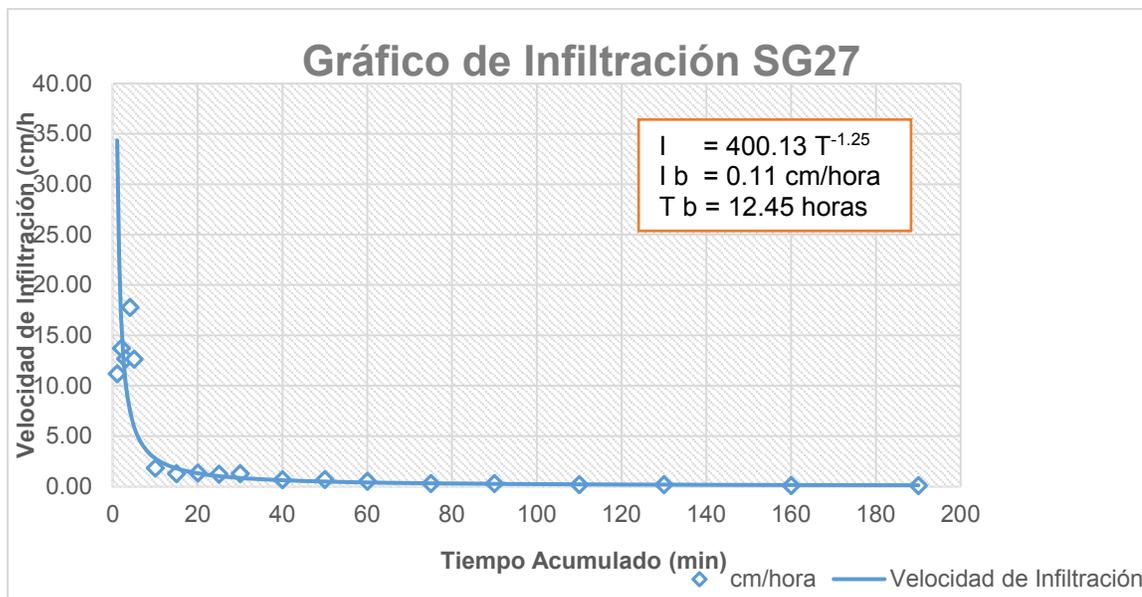
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



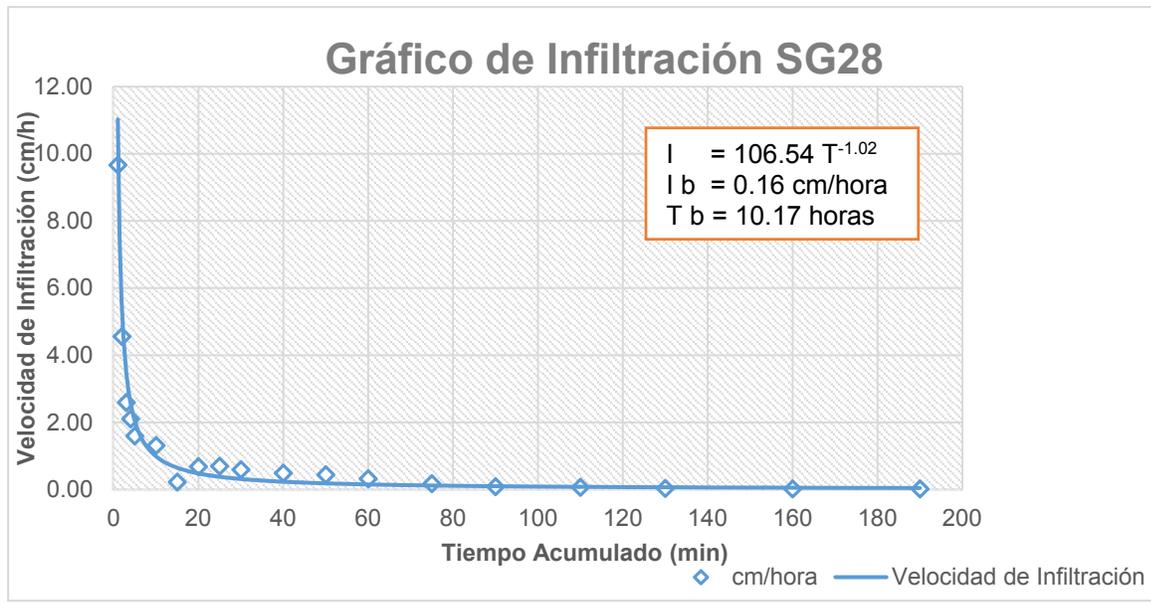
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



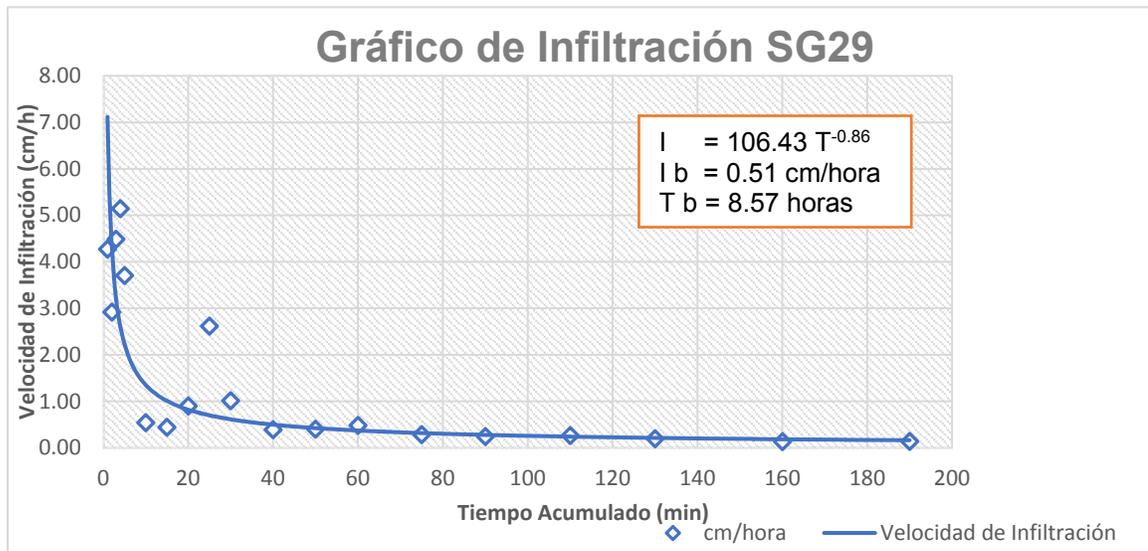
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



Fuente: Investigación de campo. 2015.



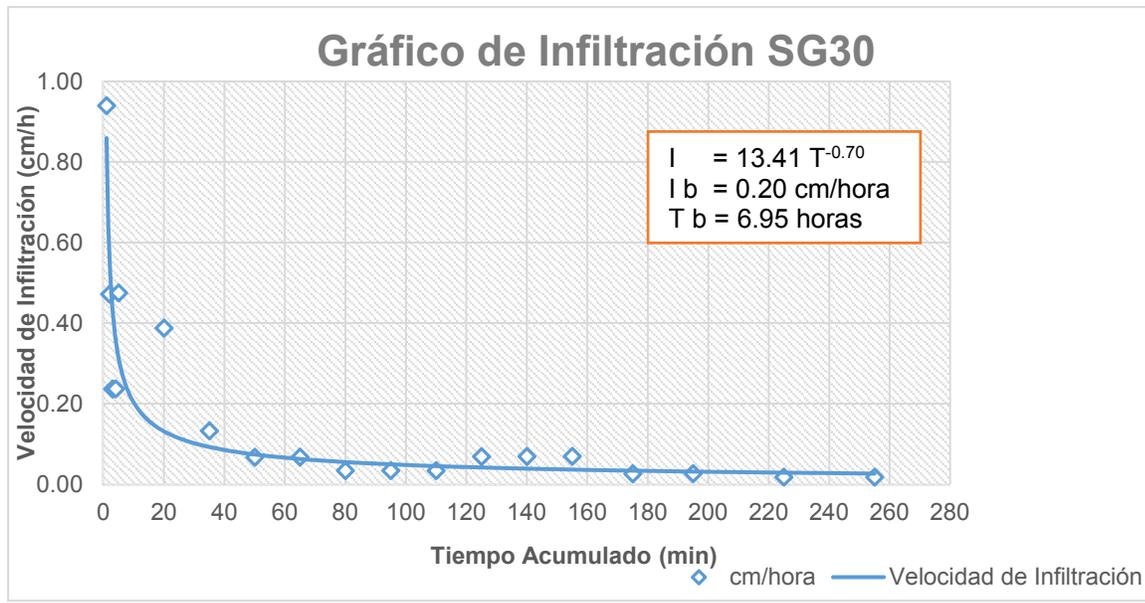
Tomada por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



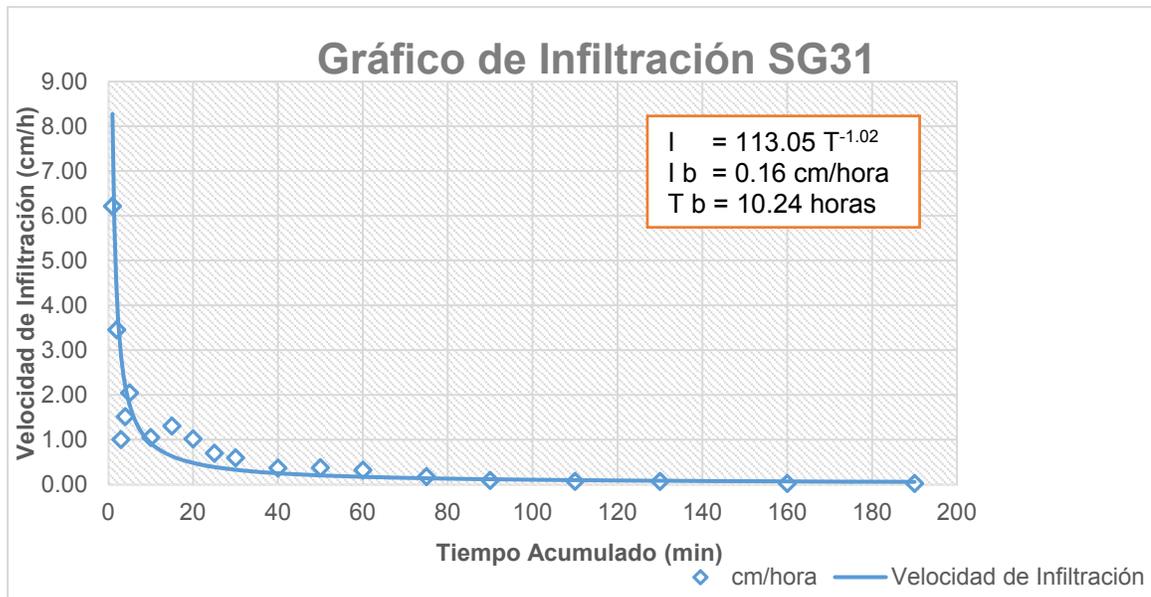
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



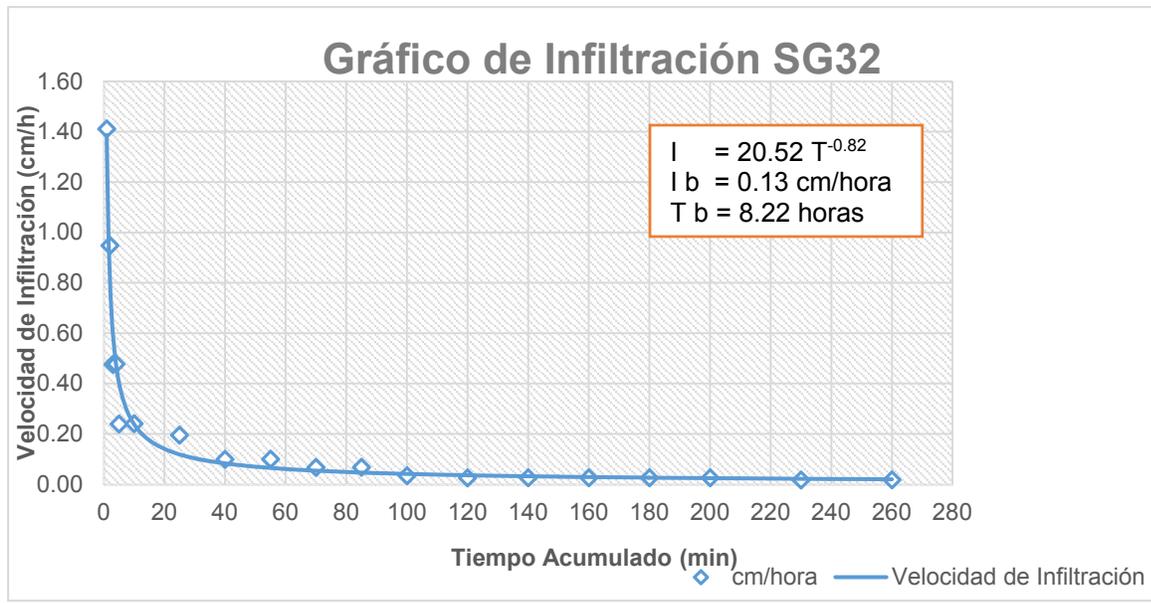
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



Fuente: Investigación de campo. 2015.



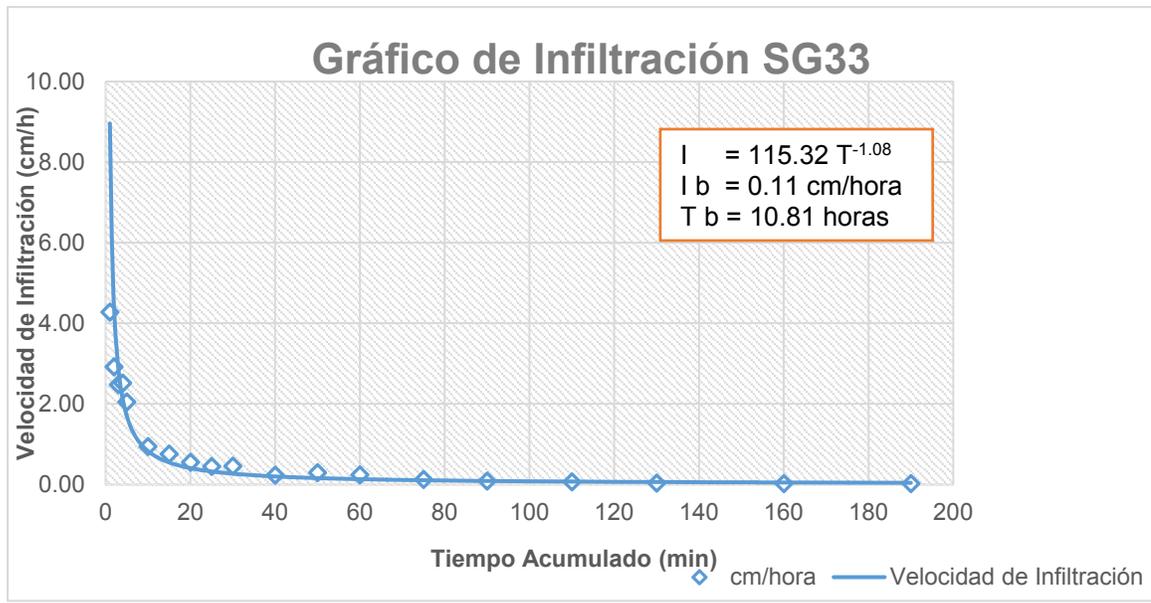
Tomada por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



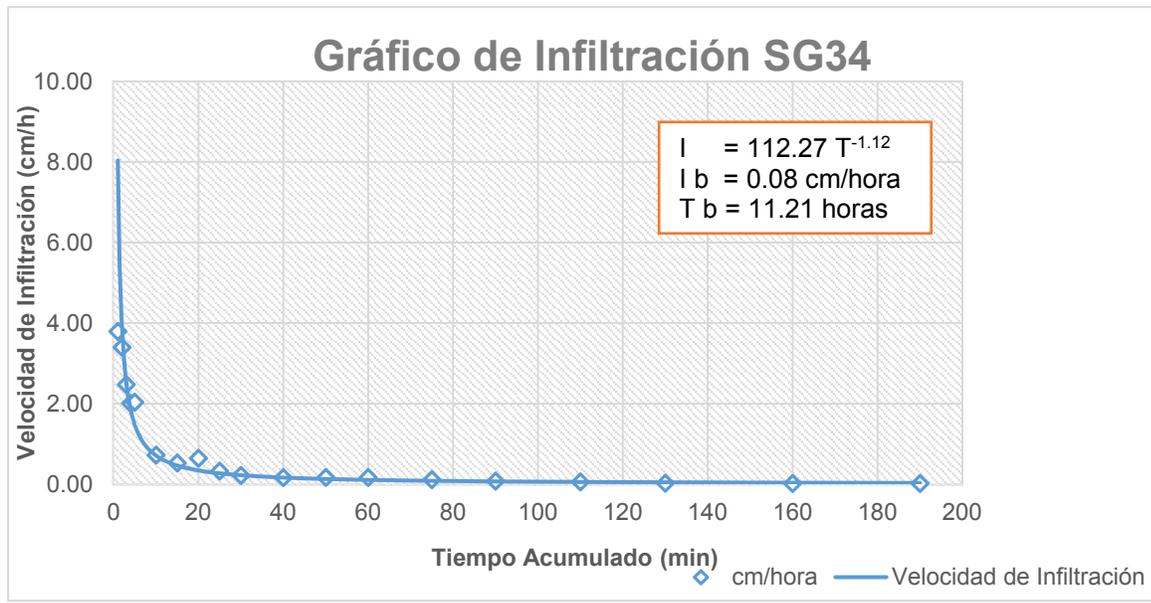
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



Fuente: Investigación de campo. 2015.



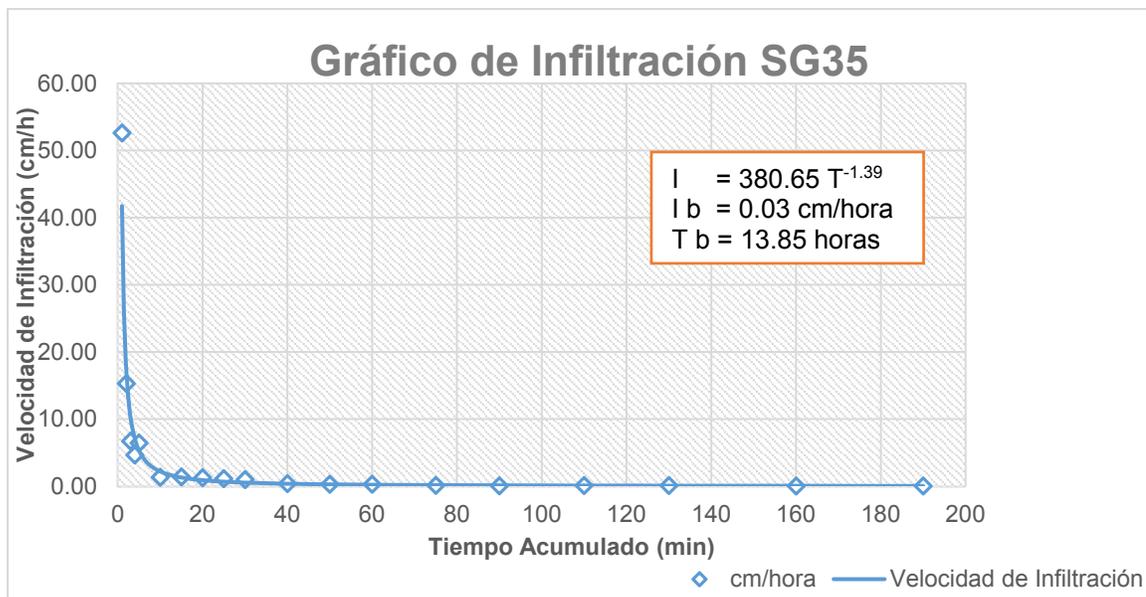
Tomada por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.



Fuente: Investigación de campo. 2015.



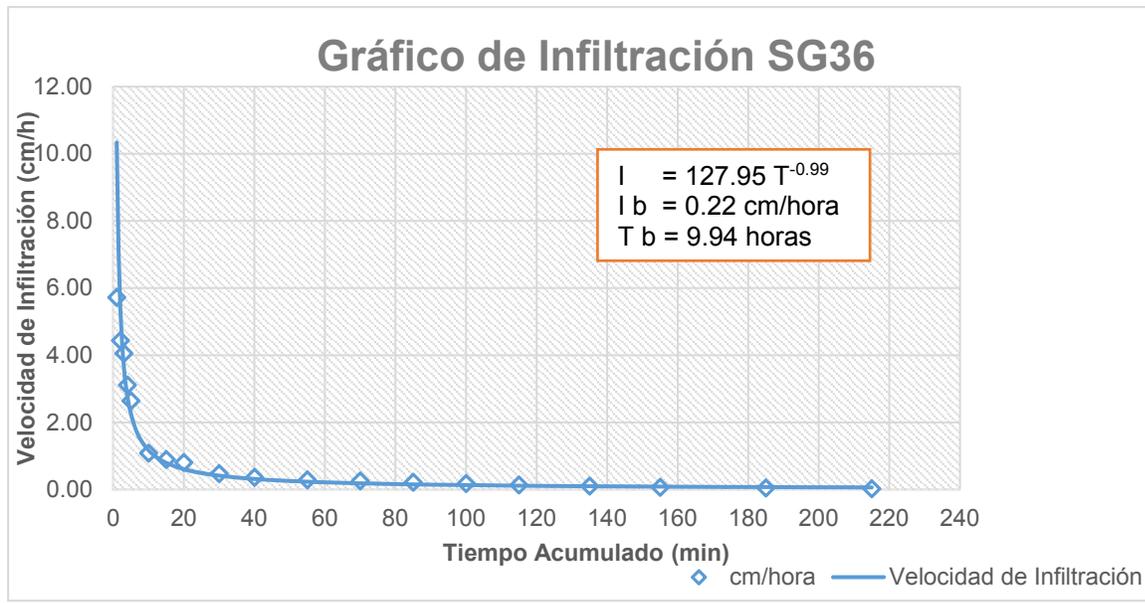
Tomada por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



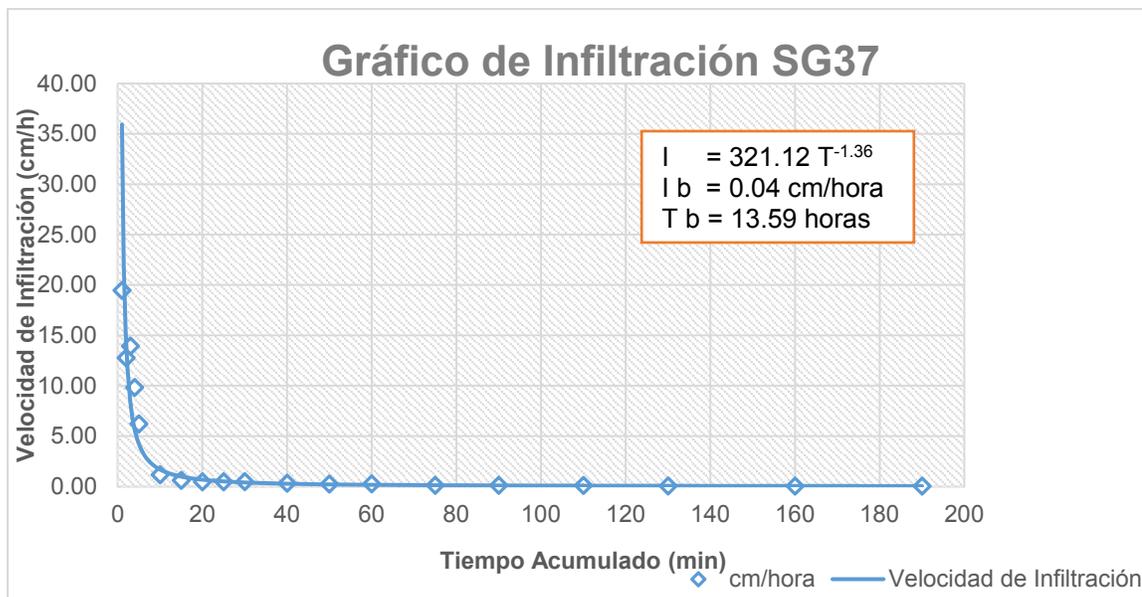
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



Fuente: Investigación de campo. 2015.



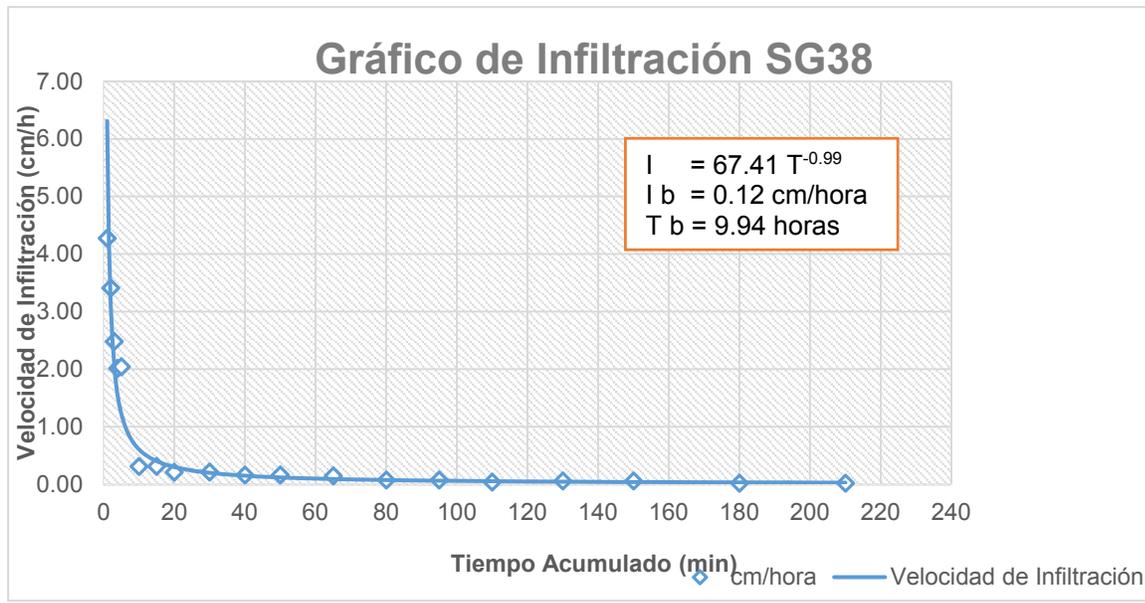
Tomada por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



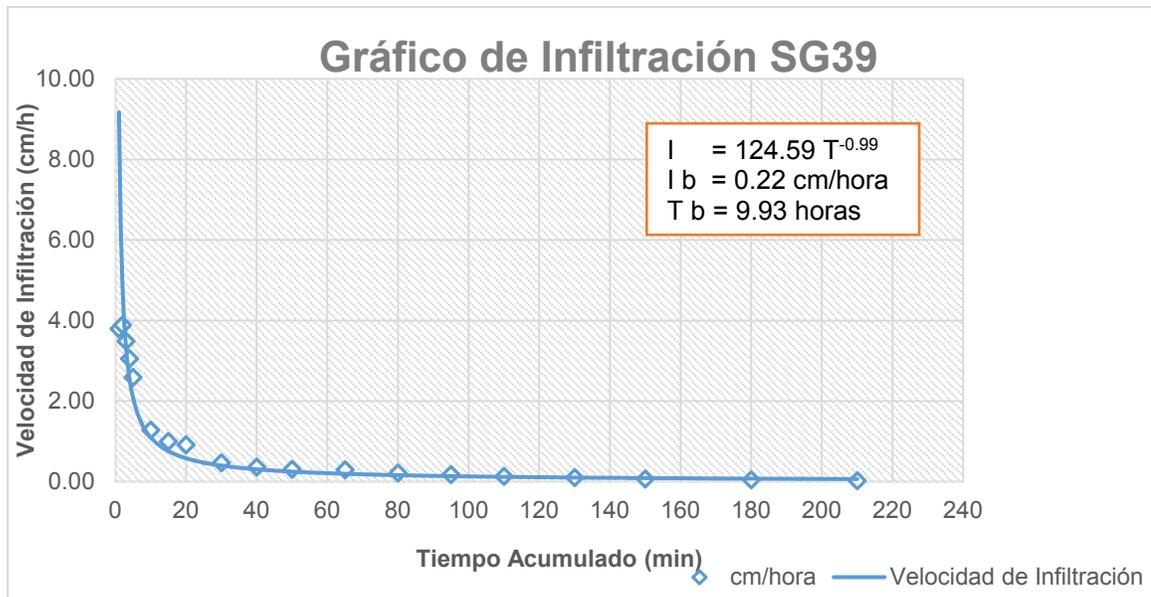
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



Fuente: Investigación de campo. 2015.



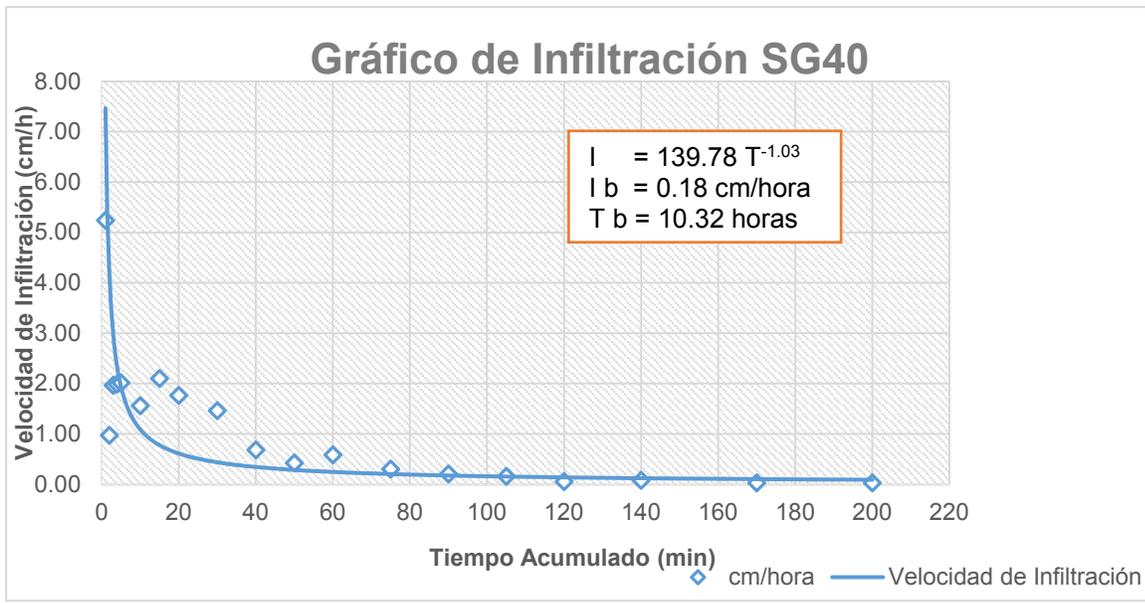
Tomada por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



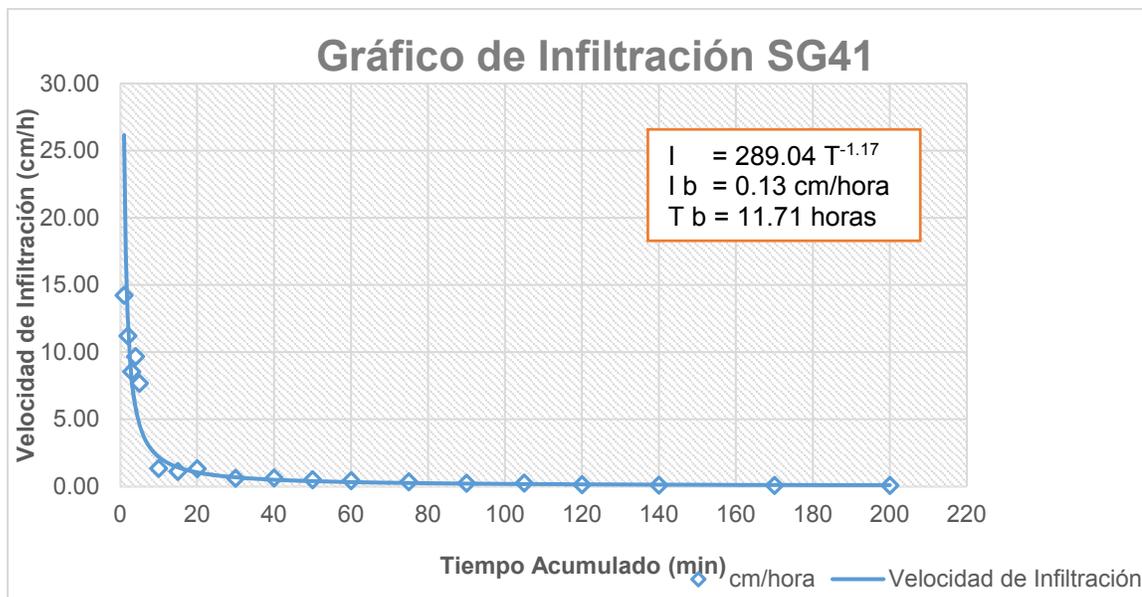
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



Fuente: Investigación de campo. 2015.



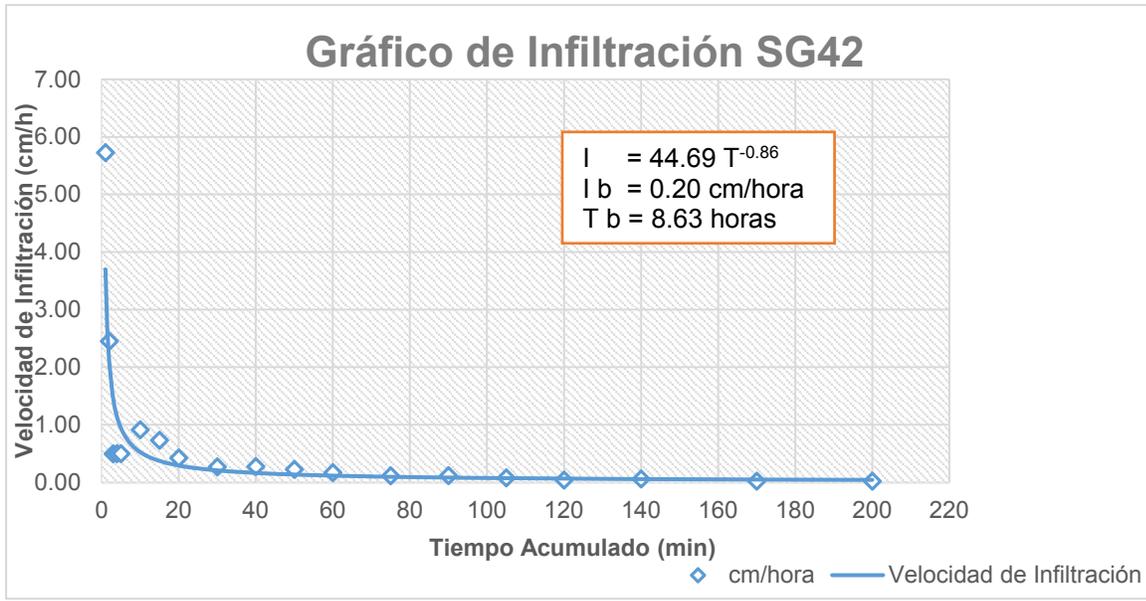
Tomada por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.



Fuente: Investigación de campo. 2015.



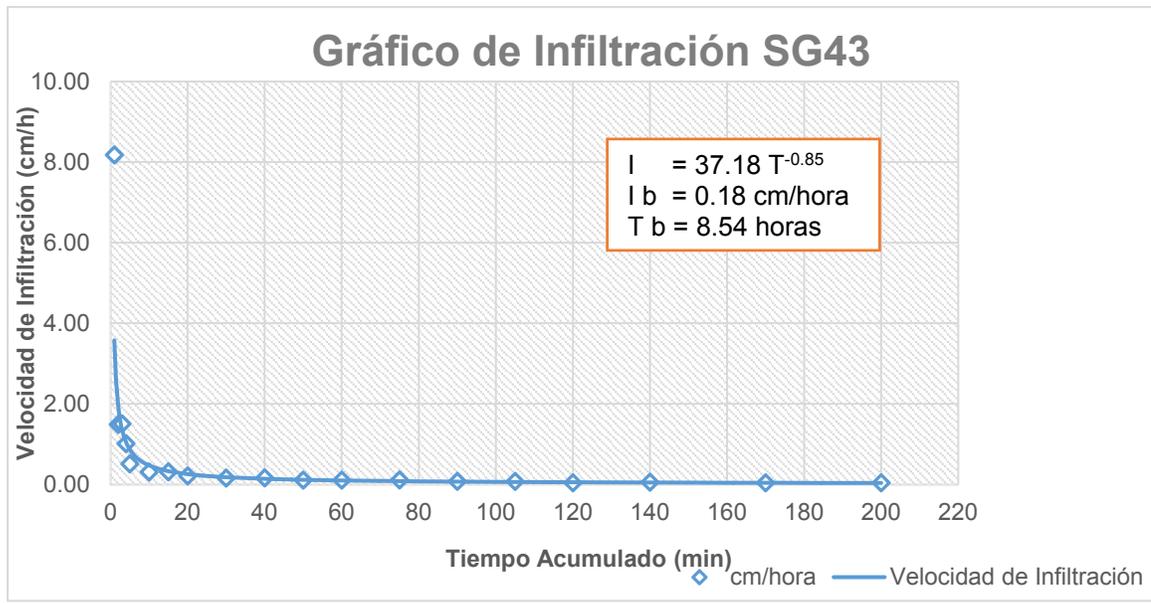
Tomada por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.



Fuente: Investigación de campo. 2015.



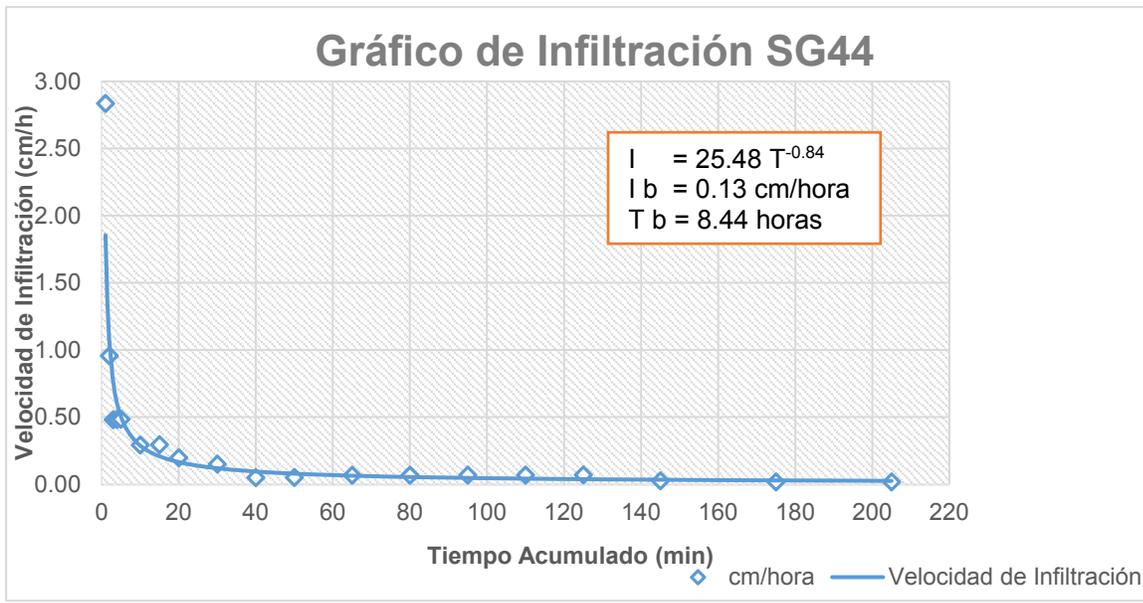
Tomada por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



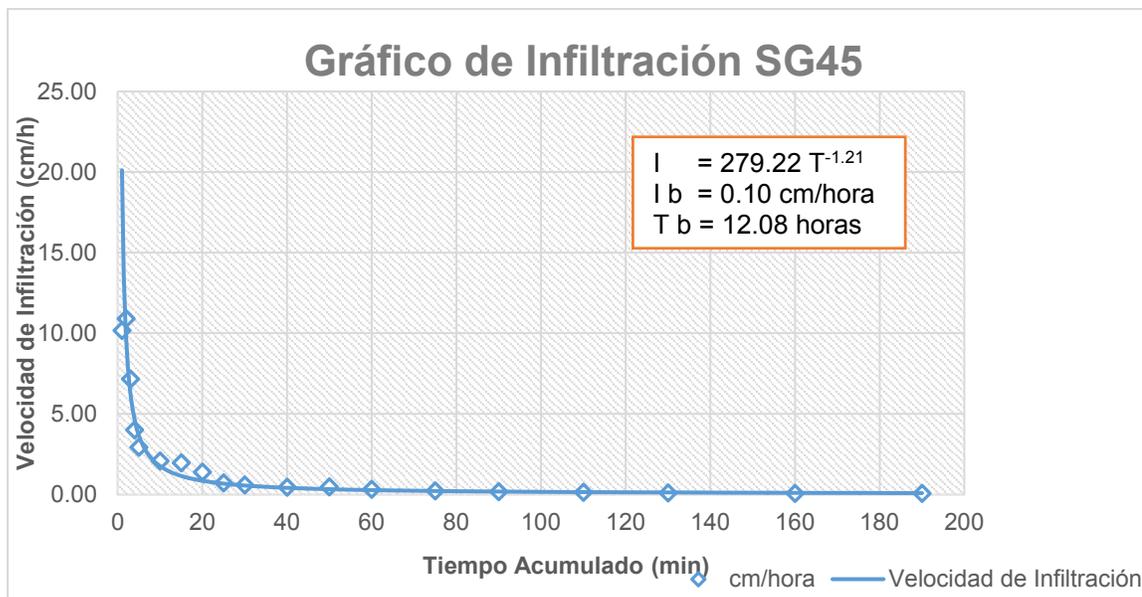
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



Fuente: Investigación de campo. 2015.



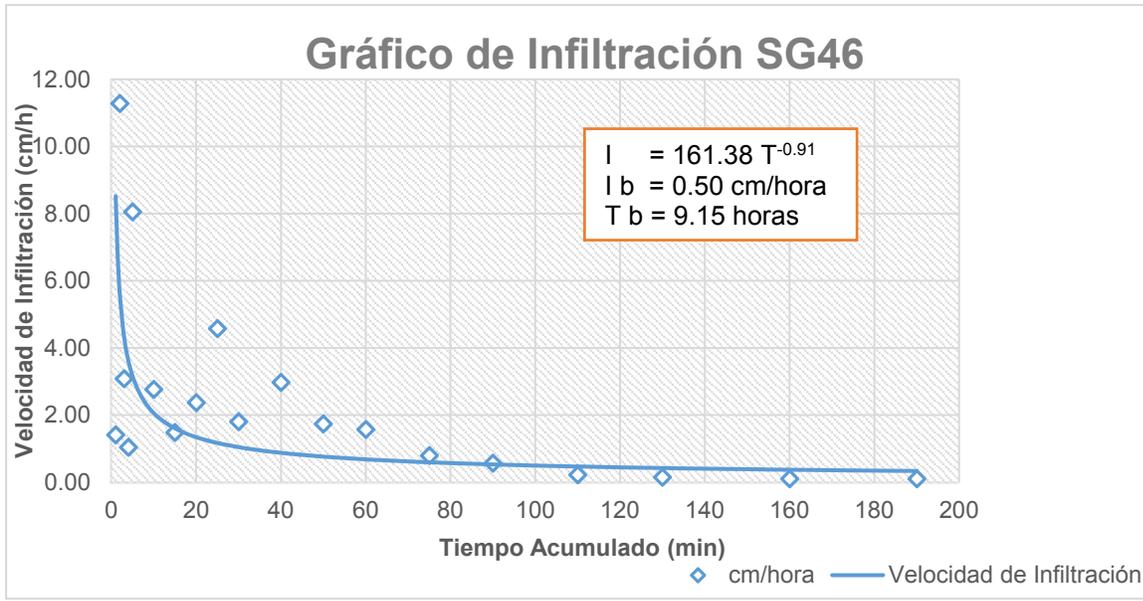
Tomada por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



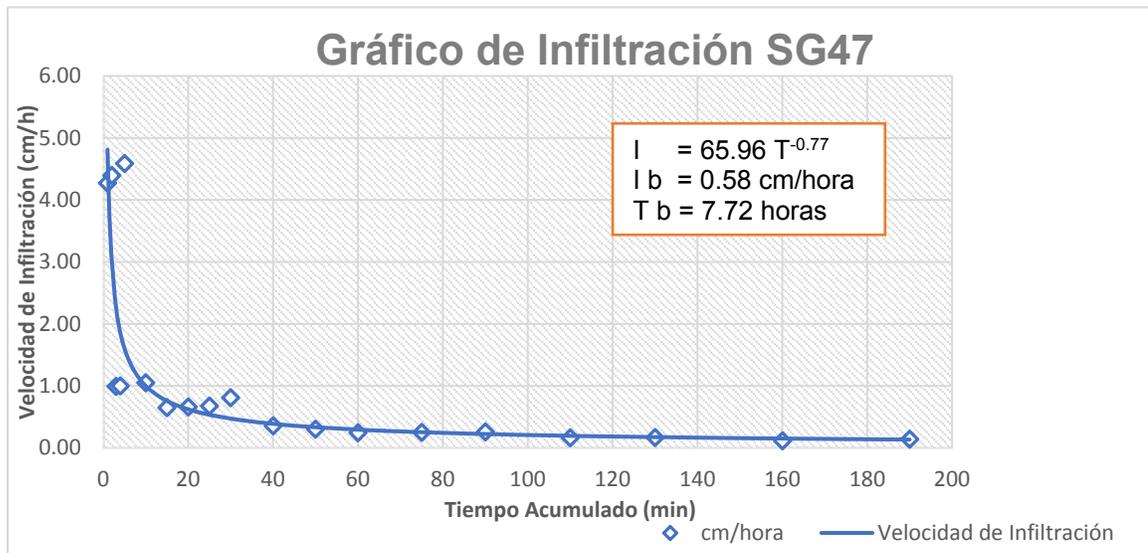
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



Fuente: Investigación de campo. 2015.



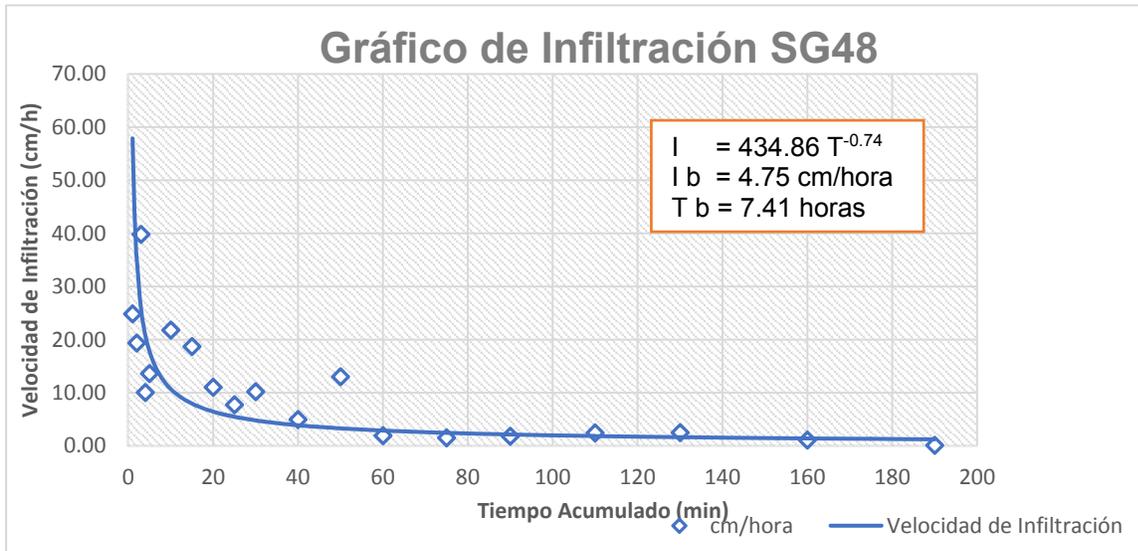
Tomada por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



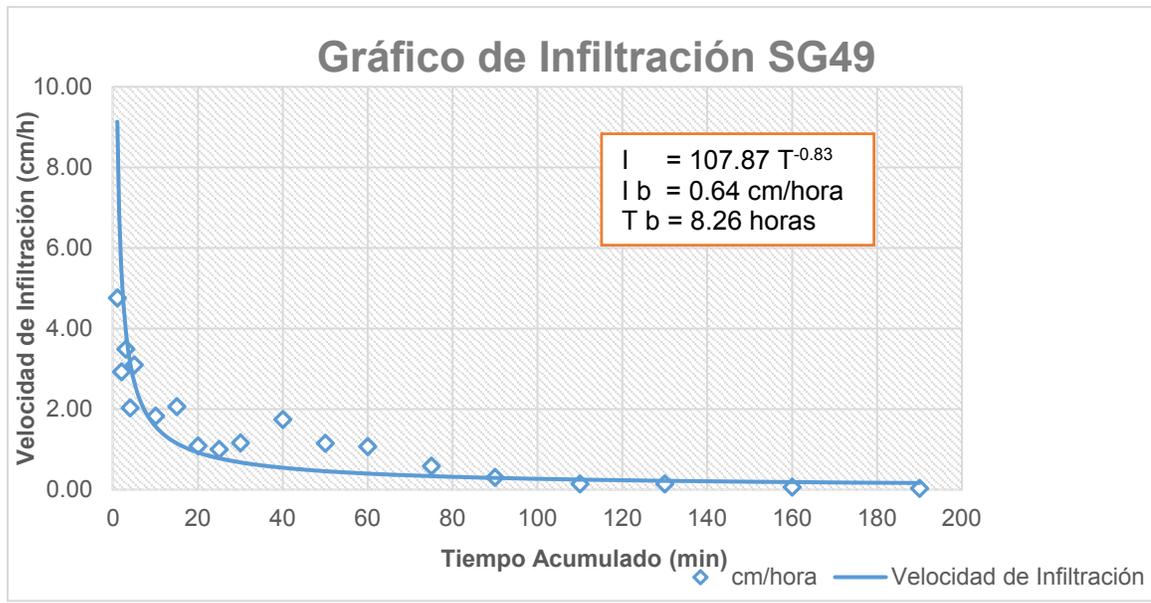
**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



Fuente: Investigación de campo. 2015.



Tomada por: Sergio Estuardo Solares García. 2015.



**Fuente:** Investigación de campo. 2015.



**Tomada por:** Sergio Estuardo Solares García. 2015.



# CUNOR

CENTRO UNIVERSITARIO DEL NORTE

Universidad de San Carlos de Guatemala



15094

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

## Geología

Al trabajo titulado:

**"Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos kársticos en el área urbana y los alrededores del municipio de Cobán, Alta Verapaz"**

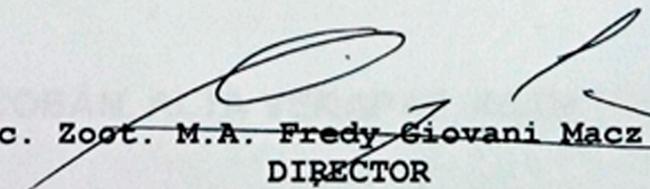
Presentado por el (la) estudiante:

**Sergio Estuardo Solares García**

Autoriza el

# IMPRIMASE

*"Id y enseñad a todos"*

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



Cobán, Alta Verapaz agosto del 2015