

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA PARACENTRAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
INGENIERÍA AGRONÓMICA**



Determinación de la relación existente de la precipitación con los niveles de agua de los pozos en la zona norte de la subcuenca del río Acahuapa, Departamento de San Vicente, 2018.

POR:

CLAUDIA CAROLINA HERRERA DÍAZ

**REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERA AGRÓNOMA**

SAN VICENTE, 15 DE JUNIO DE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

LIC. M. Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. M. Sc. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA PARACENTRAL

DECANO:

ING. MAE ROBERTO ANTONIO DÍAZ FLORES

SECRETARIO:

LIC. M. Sc. CARLOS MARCELO TORRES ARAUJO

JEFE DE DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

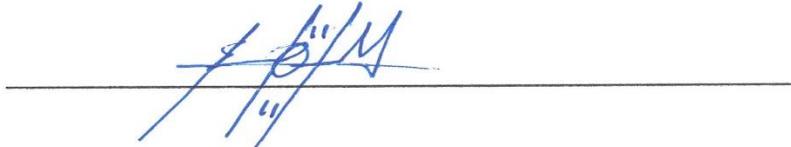
ING. AGR. M. Sc. JOSÉ FREDY CRUZ CENTENO





DOCENTES ASESORES

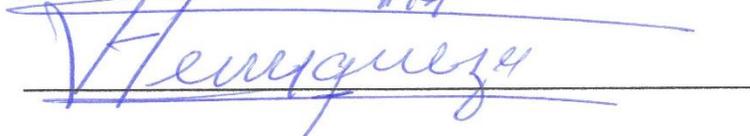
ING. AGR. M. Sc. EDGAR ANTONIO MARINERO ORANTES



LIC. CARLOS RENÁN FUNES GUADRÓN

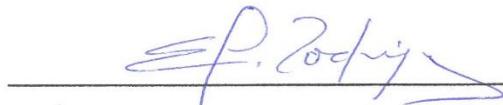


LIC. M. Sc. BENANCIO HENRÍQUEZ MIRANDA



COORDINADOR GENERAL DE PROCESO DE GRADUACIÓN

ING. AGR. EDGARD FELIPE RODRÍGUEZ





**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA PARACENTRAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
INGENIERÍA AGRÓNOMA**

EL PRESENTE INFORME FINAL DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN FUE EVALUADO Y APROBADO POR EL HONORABLE TRIBUNAL EVALUADOR APROBADO POR JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA PARACENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERA AGRÓNOMA

MIEMBROS DEL TRIBUNAL EVALUADOR:

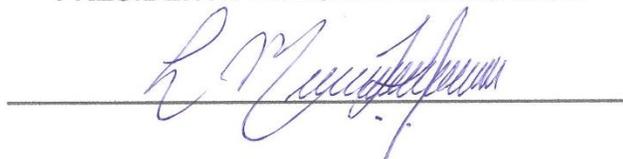
ING. AGR. M. Sc. EDGAR ANTONIO MARINERO ORANTES

DOCENTE ASESOR



ING. AGR. M. Sc. LOURDES MARÍA HERNÁNDEZ HERRADOR

PRESIDENTE TRIBUNAL EVALUADOR



ING. AGR. M. Sc. JOSÉ FREDY CRUZ CENTENO

VOCAL TRIBUNAL EVALUADOR



SAN VICENTE, 21 DE SEPTIEMBRE DE 2023.

RESÚMEN

El presente trabajo se llevó a cabo para determinar la relación entre la precipitación con los niveles estáticos y temperaturas de los pozos domésticos en la zona norte de la subcuenca del río Acahuapa, en el departamento de San Vicente, en el Municipio de Tepetitán. Asimismo, se recolectaron datos de temperatura y niveles estáticos registrados en los sensores *Levellogger Edge*, ubicados dentro de dos pozos, y correspondientes al periodo de febrero de 2014 hasta junio de 2015. La serie de datos registrados por los sensores se promediaron mensualmente y se graficaron los niveles estáticos y temperaturas, se utilizó la fórmula para el cálculo de correlación Rho de Spearman para relacionar las variables y se obtuvieron los mapas de las relaciones entre las precipitaciones estacionales con los niveles estáticos y la relación entre los niveles estáticos con las temperaturas de ambos pozos.

Concluyendo que, al relacionar las variables precipitación con los niveles estáticos en el pozo uno la relación es del 47% con una correlación moderadamente fuerte y en el pozo dos tiene el 29% de relación entre las variables, por tanto, es una correlación moderadamente débil. Mientras que, al relacionar los niveles estáticos y temperaturas, la correlación Rho de Spearman, para el pozo uno tiene 91% de relación entre las variables y para el pozo dos el 85% de relación entre las variables, es decir que la correlación en ambos pozos es positiva moderadamente fuerte.

Palabras Clave: Precipitación, recarga del acuífero, nivel estático, nivel freático.

DEDICATORIA

Esta investigación ha sido realizada con mucha dedicación, desvelo, perseverancia y esfuerzo por lograr culminar con éxito este paso importante que me garantiza una vida productiva y poder entregar una parte de mis conocimientos a mejorar la calidad de vida de mis seres queridos y a la sociedad que será beneficiada con un aporte al conocimiento de este tema desarrollado, para que genere un interés de la importancia de cuidar los mantos acuíferos en general.

Dedico este trabajo a mi Padre Celestial que me dio la sabiduría, el entendimiento, la concentración, la salud, su protección y todo lo necesario para culminar con éxito esta tesis, a mi familia que me han apoyado incondicionalmente tanto con sus aportes y dándome ánimo a seguir adelante, a mis hijos que sacrifiqué tiempo para poder dedicar a elaborar este documento, a mi pareja que me apoyó con su tiempo para poder asistir al lugar de investigación, a mis hermanos que me han apoyado brindándome ánimos de seguir adelante, a mi suegra que me cuidó mis niños mientras dedicaba mi tiempo en este proyecto.

A los lectores de este documento, docentes, compañeros y amigos que somos parte de una sociedad que trata de mejorar las condiciones ambientales sean las adecuadas para la subsistencia de nuestra sociedad mediante las investigaciones realizadas, que conlleven al conocimiento de los problemas que afectan tanto al ser humano como la naturaleza, que a su vez pueda analizarse alguna alternativa de mejora para evitar seguir dañando los mantos acuíferos.

Dios nos bendiga a todos

Carolina Herrera

AGRADECIMIENTOS

A MI DIOS TODOPODEROSO

Por bendecirme y proveerme todo, para lograr esta meta que pongo a su disposición en el transcurso de mi vida, por ser propicio a mi hogar y mi familia, por la sabiduría que guía mis pasos y me fortalece cada día, Te Adoro mi Señor con todo mi corazón, Te Alabo y Bendigo tu Santo Nombre.

A MIS HIJOS, mis amores Alexia Denisse y David Alexander por su paciencia conmigo, en mis horas dedicadas a este trabajo.

A MIS PADRES, Mi Mami Roselia Díaz, y mi Papá Roberto Herrera, por bendecirme, ayudarme para terminar mi carrera, por todo su apoyo y sus consejos.

A MIS HERMANOS, Iliana Beatriz y Roberto Alexander por su valioso apoyo y sus consejos.

A MI PAREJA, Francisco Alexander, Gracias amor por tu paciencia conmigo y por apoyarme en mi trabajo.

A MI TIA, Lucila Herrera, por su apoyo incondicional al cuidar de mi niña Denisse mientras estaba en clases.

A MI SUEGRA, Josefina López, por su apoyo incondicional al cuidar mis hijos David y Denisse, mientras laboraba en mis horas sociales.

A MI AMIGA, Margarita de Acevedo, Gracias mi hermana por sus oraciones y sus consejos.

A MIS JEFAS Y AMIGAS, Lic. Claudia Cuéllar, Lic. Yolanda Martínez, por la oportunidad de laborar en Solidar Suiza, durante mi preparación académica.

A MIS DOCENTES ASESORES, Ing. Edgar Orantes y Lic. Renán Funes, por su valioso conocimiento y por su apoyo para realizar este trabajo.

Atte. **Carolina Herrera**

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	PÁGINA
RESUMEN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE CUADROS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS	xv
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
3. JUSTIFICACIÓN	3
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
5. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
5.1. El ciclo hidrológico	5
5.1.1. Precipitación	5
5.1.2. Infiltración	6
5.1.3. Escorrentía	6
5.1.4. Evaporación	6
5.2. Caracterización hidrológica	7
5.2.1. Acuíferos	7
5.2.2. Clasificación de los acuíferos	7
5.2.3. Acuitardos	9
5.2.4. Acuicludos	9
5.2.5. Acuifugos	9
5.3. Propiedades hidráulicas de los acuíferos	10
5.3.1. Porosidad	10
5.3.2. Permeabilidad o conductividad hidráulica (k)	10
5.3.3. Transmisividad	10
5.3.4. Coeficiente de almacenamiento (s)	11
5.4. Recarga del acuífero	11

5.4.1.	Tipos de recarga del acuífero	11
5.5.	Pozos	11
5.5.1.	Tipos de pozos	12
5.5.2.	Dimensiones del pozo	12
5.5.3.	Profundidad total del pozo	12
5.5.4.	Entubado, ademe o encamisado	13
5.5.5.	Diámetro y longitud del filtro	13
5.6.	Variables hidrológicas	13
5.6.1.	Topografía	13
5.6.2.	Textura del suelo	14
5.6.3.	Capacidad de campo	14
5.6.4.	Punto de marchitez permanente	14
5.6.5.	Disponibilidad de agua en el suelo	15
5.6.6.	Cobertura del suelo	15
5.7.	Parámetros hidrogeológicos de la zona de estudio	15
5.7.1.	Precipitación	15
5.7.2.	Hidrología	17
5.7.3.	Temperatura	17
5.7.4.	Evapotranspiración	18
5.7.5.	Infiltración	18
5.7.6.	Escorrentía	19
5.8.	Agua subterránea	19
5.8.1.	Explotación de las aguas subterráneas	20
5.8.2.	Captación de aguas subterráneas	21
5.8.3.	Entradas subterráneas	21
5.9.	Agua superficial	21
5.9.1.	Distribución del agua superficial	22
5.10.	La capa freática	22
5.11.	El nivel freático	23
5.12.	El nivel estático	23
5.13.	Capacidad de recarga	24
6.	MATERIALES Y MÉTODOS	25
6.1.	Descripción del lugar de investigación	25
6.2.	Recopilación de datos geográficos	25

6.3.	Precipitación registrada durante el periodo 2014-2015	25
6.4.	Fases de la investigación	26
6.4.1.	Fase preliminar	26
6.4.2.	Fase de campo	26
6.4.3.	Fase de procesamiento y análisis de datos	27
6.5.	Distribución poblacional	28
6.6.	Aspectos económicos	28
6.7.	Clima	30
6.8.	Uso actual del suelo	30
6.9.	Geología y topografía	31
6.10.	Precipitación	31
6.11.	Capacidad de infiltración	33
6.12.	Recarga por infiltración	33
6.13.	Recarga potencial del acuífero producido por la precipitación	33
6.14.	Recarga total	34
6.15.	Sequía meteorológica	34
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
7.1.	Datos colectados por los sensores	35
7.2.	Análisis de resultados para cada uno de los pozos	36
7.2.1.	Relación de la precipitación con los niveles estáticos del pozo uno	36
7.2.2.	Relación de la precipitación con los niveles estáticos del pozo dos	37
7.2.3.	Relación de los niveles estáticos y temperaturas del pozo uno	39
7.2.4.	Relación de los niveles estáticos y temperaturas del pozo dos	40
7.3.	Correlación r de Spearman	40
7.3.1.	Correlación r de Spearman para las variables precipitación y niveles estáticos del pozo uno	41
7.3.2.	Correlación r de Spearman para las variables precipitación y niveles estáticos del pozo dos	42
7.3.3.	Correlación r de Spearman para las variables niveles estáticos y temperaturas del pozo uno	44
7.3.4.	Correlación r de Spearman para las variables niveles estáticos y temperaturas del pozo dos	45
8.	CONCLUSIONES	47
9.	RECOMENDACIONES	48

10. BIBLIOGRAFÍA 49

11. ANEXOS 56

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO		PÁGINA
1	Coordenadas topográficas de los pozos en estudio	25
2	Precipitaciones registradas durante el período 2014-2015	26
3	Cantidad de registros obtenidos en el Software Solinst 4.0	27
4	Área y población de los municipios pertenecientes en la zona norte de la subcuenca del río Acahuapa	28
5	Distribución por rubros y área cultivada en la subcuenca del río Acahuapa	31
6	Promedio de las precipitaciones anuales de las estaciones cercanas a la subcuenca del río Acahuapa	32
7	Dato de infiltración de agua en las distintas formaciones geológicas, cercanas a la zona de estudio	33
8	Recarga por infiltración, valores de capacidad de campo (CC), punto de marchitez (PM) y profundidad de raíz (PR)	33
9	Recarga del acuífero superficial producido por la precipitación	34
10	Porcentaje de recarga total en la zona norte de la subcuenca del río Acahuapa	34
11	Datos de los niveles estáticos y temperaturas promediados, desde febrero 2014 hasta junio 2015, en el pozo uno	35
12	Datos de los niveles estáticos y temperaturas promediados, desde febrero 2014 hasta junio 2015, en el pozo dos	36
13	Comparación entre los niveles estáticos y las precipitaciones registradas en el pozo uno	36
14	Comparación entre los niveles estáticos y las precipitaciones registradas en el pozo dos	38
15	Cálculo de coeficiente r de Spearman, según las variables precipitación y nivel estático del pozo uno	41
16	Correlación de las variables precipitación y niveles estáticos del pozo uno..	42
17	Coeficiente de correlación r de Spearman, de las variables precipitación y niveles estáticos, en el pozo dos	43
18	Correlación de las variables precipitación y niveles estáticos del pozo dos..	43

19	Cálculo de coeficiente de correlación r de Spearman de las variables niveles estáticos y temperaturas del pozo uno	44
20	Correlación de las variables niveles estáticos y temperaturas del pozo uno.	45
21	Cálculo de coeficiente de correlación r de Spearman de las variables niveles estáticos y temperaturas del pozo dos	46
22	Correlación de las variables niveles estáticos y temperaturas del pozo dos	46

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA		PÁGINA
1	Textura de los suelos existentes en el área de la subcuenca del río Acahuapa	32

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
1	Representación de la relación entre la precipitación con los niveles estáticos registrados en el pozo uno	37
2	Representación de la relación entre la precipitación y los niveles estáticos registrados en el pozo dos	38
3	Representación del comportamiento de los niveles estáticos y temperaturas en el pozo uno	39
4	Representación del comportamiento de los niveles estáticos y temperaturas registrados en el pozo dos	40

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO		PÁGINA
1	Representación esquemática del ciclo hidrológico	57
2	Representación esquemática de un acuífero confinado	57
3	Representación esquemática de un acuífero poroso	57
4	Representación esquemática de un acuífero de porosidad secundaria	58
5	Representación esquemática de un acuífero fisurado o kárstico	58
6	Relación entre la textura y porosidad	58
7	Representación de los tipos de pozos	59
8	Representación esquemática de las aguas suspendidas por una delgada capa impermeable	59
9	Representación esquemática del nivel estático	59
10	Ubicación geográfica del municipio de Tepetitán	60
11	Mapa geológico de la zona de estudio	60
12	Mapa de microcuencas pertenecientes a la subcuenca del río Acahuapa	61
13	Mapa de datos fisicoquímicos de agua de la subcuenca Acahuapa ...	61
14	Gráfica de las precipitaciones registradas durante el periodo 2014-2015	62
15	Mapa de relaciones entre las variables precipitación y nivel estático del pozo uno	62
16	Mapa de relaciones entre las variables precipitación y nivel estático del pozo dos	63
17	Mapa de relaciones entre las variables niveles estáticos y temperaturas del pozo uno	63
18	Mapa de la relación entre las variables nivel estático y temperaturas del pozo dos	64
19	Tabla de comportamiento hidráulico de las formaciones geológicas ...	64
20	Valores de porosidad de rocas y sedimentos	65
21	Valores de permeabilidad (k)	65
22	Valores de transmisividad para diferentes tipos de materiales	66

23	Valores de coeficiente de almacenamiento (S)	66
24	Componentes del coeficiente de infiltración	67
25	Características de sitio, detalles del pozo uno	67
26	Características de sitio, detalles del pozo dos	68
27	Equipo utilizado en las visitas de campo	68
28	Descarga de información del <i>Levellogger</i> al Software	69
29	Representación de los datos en el Software Solinst 4.0	69
30	Datos de los niveles estáticos y temperaturas del pozo uno	70
31	Datos de los niveles estáticos y temperaturas del pozo dos	70
32	Cuadro de capacidad de infiltraciones registradas en la zona de estudio	71
33	Interpretación del correlativo de Spearman	72
34	Registro de ubicación de los pozos en estudio	72
35	Extracción de <i>Levellogger</i> para realizar la lectura del Software.....	72
36	Representación de algunos datos sin tabular, en el pozo uno	73

1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se abordó el problema de abatimiento del nivel estáticos de los pozos excavados en la zona norte de la subcuenca del río Acahuapa, ubicado en el municipio de Tepetitán del departamento de San Vicente, mediante el uso de sensores de temperatura y nivel de agua *Levelogger*, para la extracción de datos generados de forma continua a partir de los años 2014 - 2015, información que será utilizada para determinar la relación existente entre la precipitación y los niveles de agua en los pozos.

Además, en la estructura del documento describe, en primer lugar, los fundamentos y conceptos teóricos de hidrología, geología y del flujo de agua en los acuíferos y la solución analítica del problema a resolver. Posteriormente se realiza una descripción de la metodología utilizada desarrollada para la toma de datos en el campo, utilizando equipo especializado y los datos generados por los sensores que se encuentran ubicados en los pozos en estudio y así determinar por medio de la solución analítica y comparativa de los resultados que permitieron alcanzar el objetivo planteado en la investigación.

Por tanto, el objetivo de este trabajo fue determinar si existe variación entre la precipitación y los niveles de agua de los pozos, ya que la capacidad de recarga de agua es dinámica y climatológicamente influenciada por los periodos de época seca y de lluvia.

En cuanto al análisis e interpretación de los resultados, se hará por medio del cálculo de correlación Rho de Spearman por medio del sistema IBM SPSS Statistics, para las variables precipitación y niveles estáticos de los datos obtenidos de los sensores *Levelogger Edge*, extraídos por medio del programa *Solinst Levelogger 10.0*.

Además, se graficará el contenido de los promedios mensuales, por medio del programa Excel de Windows, de los niveles estáticos y temperaturas de cada pozo en estudio, que permitirá la creación de una base de datos de monitoreo correlativo generado a partir de esta información, de las variaciones que presente en un futuro, y para el mapeo de las relaciones se utilizará el sistema IBM SPSS Statistics.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la relación existente entre la precipitación y los niveles de agua en pozos excavados en la zona norte de la subcuenca del río Acahuapa, Departamento de San Vicente, empleando sensores de temperaturas y niveles de agua.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Generar la base de datos de temperatura y niveles de agua de los pozos del acuífero superficial.

Establecer la correlación entre la temperatura y niveles de agua con los datos obtenidos en los pozos.

Elaborar los mapas para temperatura y niveles de agua respectivamente.

3. JUSTIFICACIÓN

El presente estudio está enfocado en la generación de información relacionada con el comportamiento de las variaciones de los niveles del agua y la precipitación de la subcuenca del río Acahuapa, con el fin de generar una base de datos de temperatura y niveles de agua de los acuíferos superficiales, estableciendo la correlación entre la temperatura y niveles de agua con los datos obtenidos de los sensores *Levellogger* ubicados en los pozos, del municipio de Tepetitán.

Elaborando gráficas que reflejarán las variaciones de la relación entre las precipitaciones y los niveles estáticos por la reducción o el aumento de la capacidad de recarga de los acuíferos, cuya importancia se establece debido a la demanda del recurso en el futuro, PNUD en 2006, menciona que una persona consume aproximadamente 3,508 m³ por año y se ha proyectado que en el año 2050 tendrá un incremento del 32.84%, todo ello para consumo y utilidades diversas.

Es por ello, que la importancia de esta investigación es relacionar los datos de precipitación con los niveles de agua del pozo, para determinar las variaciones del nivel estático y como se reduce la capacidad del acuífero con el tiempo, y así las entidades encargadas podrán informarse como el monitoreo permitirá a futuro gestionar proyectos para reducir el impacto ambiental generado por la degradación de los acuíferos superficiales.

Al respecto, de la información generada por los *Levellogger*, beneficiará las entidades encargadas de gestionar proyectos de reducción del impacto ambiental en las comunidades cercanas a la subcuenca del río Acahuapa, como las Alcaldías Municipales de la zona.

Además, el valor teórico de esta investigación permitirá el conocimiento del impacto generado por la reducción del nivel del agua de los pozos, y darle continuidad al monitoreo de los sensores, extraer la información y compararlo con los datos ya obtenidos, para observar el resultado del impacto ambiental en la zona de la subcuenca del río Acahuapa.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua de pozo en la subcuenca del río Acahuapa enfrenta un problema en cuanto al uso, explotación y manejo del recurso, debido al desconocimiento de las variaciones del nivel estático del flujo subterráneo del acuífero, capacidad de almacenamiento y área de recarga. Por tal motivo, el presente estudio generará información sobre las variaciones del nivel estático con el fin de determinar la relación existente de la precipitación con los niveles de agua del pozo, ya que se ha observado una reducción considerable en la cantidad de agua generada por los pozos a nivel nacional.

Según estudios realizados por Dimas (2005), menciona que la escasez física del recurso se debe a la disminución de la capacidad del territorio para infiltrar agua y que esta pérdida de capacidad está asociada con la alteración del ciclo hidrológico. Otra causa probable es la deforestación generada por el crecimiento poblacional, el proceso de expansión agrícola no planificada, aunado a la alta demanda de agua para todos los usos y el mal manejo del recurso en los acuíferos profundos, que impactan negativamente en la capacidad y su área de recarga disminuye con el paso del tiempo, ya que el nivel estático suele variar, elevándose o disminuyéndose en función de las precipitaciones estacionales o el caudal de agua extraído por las personas para consumo o regadío (Marinero Orantes 2016)

En cuanto, la extracción de datos generados por los sensores *Levelogger*, de modo continuo, determinará las variaciones del nivel estático y la temperatura del agua de los pozos en estudio, esta información será utilizada para generar una base de datos para monitoreo en la subcuenca y correlacionar los datos entre la precipitación con los niveles de agua y temperatura, con los datos obtenidos en el pozo de observación.

5. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

5.1. El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es la circulación continua del agua en sus diferentes estados en el planeta y es la sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la tierra a la atmósfera y volver a la tierra, entre ellos; la evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua. A su vez, involucra un proceso de transporte recirculatorio e indefinido o permanente, este movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas: la primera, el sol que proporciona la energía para elevar el agua (evaporación); la segunda, la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda (precipitación y escurrimiento).

Es el proceso permanente de circulación del agua, continua e interdependiente, de movimiento y transferencia de agua en sus diferentes estados entre la atmósfera y la superficie de la tierra y cuerpos de agua. La radiación solar evapora el agua de los océanos y en la atmósfera el vapor de agua asciende formando nubes, bajo ciertas condiciones la humedad de éstas se condensa y cae a la superficie como lluvia, granizo o nieve, las diferentes formas de precipitación (Ordoñez Gálvez 2011) (Anexo 1).

5.1.1 Precipitación

Es la caída del agua en estado líquido o sólido sobre la superficie terrestre, la fuente principal de la formación de las aguas de la tierra, ríos, lagos, aguas subterráneas y glaciares, el valor de la precipitación en una cuenca o región, se obtiene a partir de registros pluviométricos.

La precipitación que cae en tierra es el origen de toda el agua dulce, parte de esta precipitación después de mojar las hojas y el suelo, corre por la superficie terrestre a los cursos de agua constituyendo el escurrimiento superficial y la otra se infiltra en el suelo, mucha de esta agua es retenida en la zona de las raíces de las plantas y parte de ella vuelve a la atmósfera por la evapotranspiración, el excedente percola de la zona de las raíces hacia abajo por la fuerza de gravedad y continua su descenso hasta ingresar a un reservorio de agua subterránea (Ordoñez Gálvez 2011).

5.1.2. Infiltración

Es el flujo de agua que penetra a través de la superficie del suelo y se redistribuye desde las zonas saturadas hacia las no saturadas del perfil y penetra por unidad de tiempo, la magnitud de la infiltración y la alimentación de la napa subterránea se ven influenciada por la precipitación y las condiciones del terreno (Ordoñez Gálvez 2011). Es el agua de precipitación que, en su descenso por el suelo, ocupa parcial o totalmente los poros o fisuras del suelo o rocas (Collazo Caraballo y Montano Xavier 2012). Los factores que afectan la infiltración según FAO (2013) son: a) tipo de cubierta vegetal, b) características hidráulicas del suelo y el terreno, c) estado de humedad del suelo, d) intensidad de la lluvia o cantidad de agua de riego, e) calidad del agua, f) formación de costras superficiales y g) trabajos agrícolas.

5.1.3. Escorrentía

Es el proceso por el cual el agua de lluvia precipitada en la superficie de la tierra fluye por acción de la gravedad desde las partes más altas hacia las más bajas, confluyendo en ríos, arroyos y otros cuerpos de agua (Collazo Caraballo y Montano Xavier 2012). Además, está determinada por la tasa de infiltración y capacidad de almacenamiento del suelo, las cuales dependen, básicamente de factores climatológicos, geológicos, hidrológicos y edáficos, la intensidad y duración de la lluvia, pero también son determinantes la textura y estructura del suelo, topografía del terreno, la conformación de la red de drenaje y la vegetación son factores importantes (FAO 2013).

La escorrentía superficial generada por la lluvia mensual corresponde a la precipitación mensual menos la retención de lluvia en el follaje menos la infiltración (Schosinsky N. 2006). Cuando la intensidad de la precipitación supera la velocidad de infiltración del suelo se produce la escorrentía superficial que puede causar erosión y es negativa porque, además de representar un volumen de agua no aprovechado, causa daños en el área y aguas abajo como crecidas, sedimentación y contaminación (FAO 2013).

5.1.4. Evaporación

Es la transformación de un líquido al estado gaseoso a cualquier temperatura, parte del agua infiltrada y almacenada se pierde por evaporación, la radiación solar, al impactar la superficie

del suelo, crea condiciones propicias para que ocurra la evaporación del agua, esta pérdida puede ser controlada (FAO 2013). Además, del proceso por el cual el agua de la superficie terrestre pasa del estado líquido al vapor, siendo la energía solar el principal factor desencadenante del proceso (Collazo Caraballo y Montaña Xavier 2012).

5.2. Caracterización hidrogeológica

Los acuíferos son entendidos como formaciones geológicas subterráneas permeables, susceptibles de almacenar y transmitir agua. Así, cabe indicar que en la naturaleza existe una amplia gama de formaciones con capacidades muy diversas para almacenar y transmitir agua; desde el punto de vista hidrogeológico, estas formaciones suelen dividirse en cuatro grupos principales.

5.2.1. Acuíferos

Es una formación geológica capaz de almacenar y transmitir el agua subterránea a través de ella, pudiendo extraerse en cantidades significativas mediante obras de captación o pozos (Collazo Caraballo y Montaña Xavier 2012). Es un cuerpo de agua subterránea existente en formaciones geológicas hidráulicamente conectadas entre sí, por las cuales circulan o se almacenan las aguas del subsuelo (Sánchez-Hernández *et al.* 2017). Además, un acuífero se comporta como si fuera un embalse, donde se debe considerar un caudal de entrada, un caudal de salida y una capacidad de almacenamiento y regulación; el caudal de entrada o recarga de agua, está constituido por el agua infiltrada procedente de infiltraciones, aguas superficiales, riego y aguas residuales; la salida o descarga de agua se produce por el afloramiento superficial de fuentes y manantiales o mediante descarga subterránea hacia los cauces de los ríos u otros acuíferos vecinos o el mar y en el caso de los acuíferos explotados por el hombre, la salida del agua se produce mediante bombeo (Fuentes Yagüe 1993).

5.2.2. Clasificación de los acuíferos

Collazo Caraballo y Montano Xavier (2012), clasifica los acuíferos en función de su estructura (acuíferos libres, no confinados o freáticos, acuíferos confinados, cautivos o a presión y acuíferos semiconfinados o semicautivos) y en función del tipo de porosidad derivada de los materiales que conforman el acuífero (acuíferos de porosidad primaria, porosos o

sedimentarios, acuíferos de porosidad secundaria, fisurados o fracturados y acuíferos por disolución, químicos o kársticos) (Anexo 2)

Los acuíferos en función del tipo de porosidad se clasifican de la siguiente manera:

- a) **Acuíferos libres, no confinados o freáticos:** son aquellos en los que el nivel de agua no está limitado superiormente por un techo impermeable, de forma que existe un nivel freático a una cierta profundidad y que su límite superior está a presión atmosférica (Sánchez-Hernández *et al.* 2017).
- b) **Acuíferos confinados, cautivos o a presión:** cuerpo de aguas subterráneas que se encuentra a presiones mayores que la atmosférica, en medio de dos capas o formaciones impermeables y que está totalmente saturada en todo su espesor (Fuentes Yagüe 1993).
- c) **Acuíferos semiconfinados o semicautivos:** son acuíferos a presión, que algunas capas confinantes son semipermeables, acuitados y a través de ellas le llegan filtraciones o rezumes (Sánchez-Hernández *et al.* 2017). Asimismo, el techo del acuífero está limitado por un terreno semipermeable (Fuentes Yagüe 1993).

Los acuíferos en función del tipo de material se clasifican de la siguiente manera:

- a) **Acuíferos de porosidad primaria, porosos o sedimentarios:** constituidos por formaciones geológicas sedimentarias, los materiales suelen ser gravas y arenas, que varían su composición y tamaño en función de su origen geológico (fluvial, eólico, lacustre, glacial u otros) estos materiales pueden estar sueltos o no consolidados (Collazo Caraballo y Montaña Xavier 2012) (Anexo 3).
- b) **Acuíferos de porosidad secundaria, fisurados o fracturados:** formados por rocas duras de origen ígneo o metamórfico, la porosidad en estos acuíferos viene dada por la presencia de zonas de alteración, fracturas, fallas o diaclasas, única forma que tiene el agua de almacenarse y de circular (Collazo Caraballo y Montaña Xavier 2012) (Anexo 4). Asimismo, están constituidos por rocas consolidadas, en donde el agua circula por las fisuras y grietas formadas en las mismas, algunas rocas como las

calizas y dolomitas, bajo determinadas condiciones solubles al agua, con lo cual las fisuras se agrandan, formando conductos y cavidades de considerable tamaño, fenómeno que recibe el nombre de karstificación (Fuentes Yagüe 1993).

- c) **Acuíferos por disolución, químicos o kársticos:** compuestos por rocas de origen carbonático (calizas, margas, dolomías), donde la porosidad (huecos y cavernas) se desarrollan en forma secundaria por disolución del carbonato, el agua en estos acuíferos circula por entre los huecos con una velocidad mayor que en los acuíferos porosos o fracturados (Collazo Caraballo y Montaña Xavier 2012) (Anexo 5).

5.2.3. Acuitardos

Capaces de almacenar el agua en cantidades muy importantes, pero la transmiten con dificultad; se suelen denominar con frecuencia formaciones semipermeables (limos, arenas limosas, arenas arcillosas u otros), y su capacidad de drenaje es media baja; no son de interés para la obtención de caudales que puedan servir a alguna necesidad hídrica, pero en la naturaleza juegan un papel muy importante como elementos transmisores de agua en recargas verticales a través de grandes superficies.

5.2.4. Acuicludos

Pueden almacenar el agua en cantidades, pero no tienen la capacidad de transmitirla y se drenan con mucha dificultad; el agua se encuentra encerrada en los poros de la formación y no puede ser liberada (arcillas plásticas, limos arcillosos, etc.); se asumen formaciones impermeables que podrían clasificarse para aquellos materiales de roca sedimentarias compactadas como las intercalaciones de areniscas y lutitas micáceas.

5.2.5. Acuifugos

Formaciones incapaces de almacenar y de transmitir el agua; están representados por las rocas compactas, como granitos y gneises, y a veces incluso calizas muy compactas sin karstificar, se muestran como impermeables salvo que existan fracturas que puedan permitir flujos (González de Vallejo *et al.* 2002).

5.3. Propiedades hidráulicas de los acuíferos

Las propiedades de los acuíferos son imprescindibles para conocer la capacidad de almacenar y transmitir agua, y así poder establecer un modelo real del comportamiento del agua subterránea, se menciona la porosidad, la transmisividad, la permeabilidad y el coeficiente de almacenamiento (Collazo Caraballo y Montaña Xavier 2012).

5.3.1. Porosidad

Alude a la cantidad de espacios vacíos dentro de la masa rocosa; la arcilla y la arena son porosas, igualmente una arenisca mal cementada o una roca fracturada o con planos de disolución, porque hay volumen de espacios vacíos en el seno de la roca (Anexo 3). De esta manera lo describe Ordoñez Gálvez (2011) (Anexo 20).

5.3.2. Permeabilidad o conductividad hidráulica (k)

La permeabilidad se define como la capacidad que tiene un material de permitir que se establezca el flujo de aguas subterráneas o cualquier fluido a través suyo, que dependerá de la porosidad y de la conexión entre las aberturas e intersticios, y del tamaño y forma de tales conductos. En otras palabras, la permeabilidad depende no solo de la porosidad de la roca, sino del tamaño de los poros (Ordoñez Gálvez 2011) (Anexo 21).

5.3.3. Transmisividad

Es una medida de la capacidad de un acuífero para conducir agua o transmitir agua, definiéndose como el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo, a través de una franja vertical de acuífero de ancho unitario, extendida en todo el espesor saturado, cuando el gradiente hidráulico es unitario y la temperatura de 15° C (Ordoñez Gálvez 2011).

La Transmisividad es un parámetro que en el campo se mide más fácilmente que la permeabilidad, por ello, se utiliza en los cálculos de explotación de pozos con mayor frecuencia (Angelone *et al.* 2006). Asimismo, se refiere a la cantidad de agua que puede ser transmitida horizontalmente por el espesor saturado del acuífero: $T = k.b$. unidades: $m^2/día$, m^2/seg . (Collazo Caraballo y Montano Xavier 2012) (Anexo 22).

5.3.4. Coeficiente de almacenamiento (S)

Se refiere al volumen que es capaz de liberar el acuífero al descender en una unidad el nivel piezométrico o la presión y se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero, de sección igual a la unidad y altura la del espesor saturado, si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico (Ordoñez Gálvez 2011) (Anexos 23 y 24).

5.4. Recarga del acuífero

Es el proceso a través del cual un acuífero recupera su nivel de agua normal, debido a la percolación del agua precipitada que llega a la zona saturada del acuífero que tiene una o más capas subterráneas de roca o de otros elementos geológicos como porosidad y permeabilidad, capaz de almacenar y transmitir agua subterránea y que puede ser aprovechada para el consumo humano (Chávez Gómez *et al.* 2017).

5.4.1. Tipos de recarga del acuífero

Según a Chávez Gómez *et al.* (2017), los tipos de recarga son: a) recarga directa o difusa, proveniente del agua lluvia; b) recarga concentrada o indirecta, producto de cauces permanentes, estacionales y efímeros; c) flujos laterales, procedentes de otros acuíferos, d) retorno de riegos, excesos de riegos o las pérdidas en los canales de distribución; y e) recarga urbana, producto de fugas de redes de abastecimiento y redes de alcantarillado.

5.5. Pozos

Según Ordoñez Gálvez (2011), un pozo es un agujero, excavación o túnel vertical que perfora la tierra, hasta una profundidad suficiente para alcanzar lo que se busca, sea una reserva de agua subterránea del nivel freático o fluidos como el petróleo, de forma cilíndrica, se suele tomar la precaución de asegurar sus paredes con ladrillo, piedra, cemento o madera, para evitar su deterioro y derrumbe. Además, la perforación manual de pozos profundos se realiza mediante una técnica relativamente fácil, rápida, económica, de los cuales algunos son manuales, aunque tardíos, conocido como pozo somero, otros que utilizan técnicas de excavación con métodos de rotación y percusión, donde la fuerza la origina los operadores o perforadores, maquinaria en la que se reduce el tiempo de realización (Pissa Lizarazo 2015).

5.5.1. Tipos de pozos

El agua subterránea se capta principalmente a través de pozos verticales que son los más difundidos a nivel mundial y a través de pozos horizontales como galerías filtrantes y zanjas de drenaje, entre los pozos verticales pueden ser abiertos, excavados o brocales, perforados o tubulares, entre estos están:

- a) **Pozo somero:** pozo artesanal excavado cuya profundidad total puede llegar hasta 15 metros y que se encuentra capturando agua subterránea contenida en un acuífero libre y cuyo uso es de tipo doméstico, no comercial o para actividades pecuarias menores, de construcción manual o mecanizada, es posible excavar hasta alcanzar el nivel freático (Collazo Caraballo y Montaña Xavier 2012).

- b) **Pozo profundo o sondeo:** pozo perforado o excavado cuya profundidad total sea superior a 15 metros, ya sea que capture agua de acuífero libre, confinado, semiconfinados o una combinación de ellos, son más utilizados para captación de agua subterránea, se les conoce también como semi surgentes, de diámetro reducido de seis a 12 pulgadas de diámetro, su construcción se realiza mediante el empleo de máquinas perforadoras con referente sistema de acuerdo con el material del acuífero a atravesar (Collazo Caraballo y Montaña Xavier 2012) (Anexo 8).

5.5.2. Dimensiones del pozo

Las dimensiones del pozo se definen de la siguiente manera: Por la profundidad total del pozo, el entubado, ademe o encamisado, el diámetro y la longitud del filtro, la construcción del pozo se concebirá de acuerdo con las siguientes etapas, perforación, instalación de ademe, instalación de rejilla que incluye el filtro de grava, sellado sanitario y el desarrollo para obtener un funcionamiento libre de arena a un rendimiento máximo (ANDA s. f.).

5.5.3. Profundidad total del pozo

Se define como la perforación hecha en el terreno a través de diferentes formaciones geológicas, hasta profundidades mayores de 30 metros, con la finalidad de interceptar un

acuífero y explotarlo con fines de abastecimiento para consumo humano y que ha sido debidamente revestida con tubería (ANDA s. f.).

5.5.4. Entubado, ademe o encamisado

Se hace con el fin de evitar el derrumbe en las paredes del pozo, es la fase donde se implanta un sistema hidráulico entre el acuífero y la superficie. Se introduce tubería perforada con el fin que sirva de filtro, mientras se introduce la tubería es importante tener el flujo de agua limpia constante con la bomba de lodos para evitar la penetración del agua del acuífero a través del filtro (Pissa Lizarazo 2015).

5.5.5. Diámetro y longitud del filtro

La longitud del filtro guarda relación con el tipo y granulometría del material que conforma el acuífero y con el caudal a extraer (Ordoñez Gálvez 2011). Es decir, el diámetro deberá ser del tamaño suficiente para permitir la instalación de la protección de la cabeza del pozo.

5.6. Variables hidrológicas

El comportamiento hidrológico y la capacidad de captación de agua de una cuenca hidrológica dependen de la variación temporal y espacial de los patrones de las variables climáticas, y de las características fisiográficas de la subcuenca (Santillán *et al.* 2013). Considerando que en ciertas regiones la disponibilidad del agua depende de la capacidad de captación de la cuenca, la utilización de métodos eficaces como los balances hídricos se ha hecho más recurrente, ya que permiten estimar y determinar el comportamiento hidrológico, su capacidad de captación y los flujos de agua, así como los procesos hidrológicos y los periodos en los cuales se presentan y se consideran los parámetros que se describirán a continuación.

5.6.1. Topografía

Tradicionalmente la topografía se ha definido como una ciencia aplicada, encargada de determinar la posición relativa de puntos sobre la tierra y la representación en un plano de una porción de la superficie terrestre, en un sentido general, se puede definir como la disciplina que abarca todos los métodos para reunir información de partes físicas de la tierra, tales como

el relieve, los litorales, los cauces de corrientes hídricas, entre otros, usando para ello los métodos clásicos de medición de terreno, la fotogrametría y los sensores remotos (Rincón Villalba *et al.* 2017).

5.6.2. Textura del suelo

La textura del suelo determina la proporción en tres tamaños de partículas del suelo (arena (grande), limo (medio) y arcilla (pequeño)), a su vez, afecta los rasgos como la capacidad de retención del agua y la aireación, que, además, es una de las características físicas más importantes y que a través de ella se puede predecir el comportamiento físico del suelo, el movimiento del agua en el perfil, la facilidad de manejo y la cantidad de nutrientes (Chávez Gómez *et al.* (2017) (Anexo 6).

5.6.3. Capacidad de campo

Se refiere a la cantidad relativamente constante de agua que contiene un suelo saturado después de 48 horas de drenaje. El drenaje ocurre por la transmisión del agua a través de los poros mayores de 0.05 mm de diámetro; sin embargo, la capacidad de campo puede corresponder a poros que varían entre 0.03 y un milímetro de diámetro, este concepto se aplica para suelos bien estructurados y se determina mejor en el campo saturando el suelo y midiendo su contenido de agua después de 48 horas de drenaje (FAO 2013).

En la zona norte de la subcuenca, se estima que el tipo de suelos para llegar a la capacidad de campo, considerando una profundidad de un metro necesitarían absorber por lo menos 190 mm de agua. Normalmente los suelos alcanzan la capacidad de campo el primer mes de la época lluviosa (entre mayo y junio), manteniéndose durante los meses restantes a una humedad cercana o mayor a la capacidad de campo (Machuca Laínez 2010).

5.6.4. Punto de marchitez permanente

FAO (2013), hace referencia al contenido de agua de un suelo que ha perdido toda su agua a causa del cultivo y, por lo tanto, el agua que permanece en el suelo no está disponible para el mismo. En esas condiciones, el cultivo está permanentemente marchito y no puede revivir cuando se le coloca en un ambiente saturado de agua.

El contenido de humedad retenido por las partículas de suelo que las plantas no pueden utilizar para satisfacer sus necesidades y recuperar su turgencia, esto provoca la marchitez irreversible en la planta, pues no puede recuperarse, aunque se someta a un ambiente húmedo, por la poca agua que la planta adquiere se debe a altas tensiones de succión por las raíces lo cual incide en bajos rendimientos en la producción de follaje (Chávez Gómez *et al.* 2017).

5.6.5. Disponibilidad de agua en el suelo

Es la cantidad de agua disponible para el crecimiento de las plantas y se encuentra entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (FAO 2013), el suelo está formado por partículas que, a su vez, pueden formar agregados. Entre estas partículas y los agregados se encuentran espacios que tienen agua y aire, el tamaño de las partículas y agregados influye de modo notable en el movimiento y las características del agua en el suelo y en efecto que produce en la planta dado que el agua como el aire son elementos esenciales para su desarrollo (Chávez Gómez *et al.* 2017).

5.6.6. Cobertura del suelo

La cobertura del suelo disminuye la escorrentía superficial, permitiendo mayor contacto del agua con la superficie facilitando el proceso de infiltración, por otro lado, gran parte de la lluvia que cae es depositada en la cobertura vegetal como intersección, por lo que se considera la profundidad radicular y la capacidad de retención vegetal (Chávez Gómez *et al.* 2017)

5.7. Parámetros hidrogeológicos de la zona de estudio

La recarga natural es una parte del proceso del ciclo del agua que se genera como consecuencia de la diferencia existente entre las entradas de agua al suelo (precipitación, hidrología y temperatura) y las salidas (evapotranspiración y escorrentía) (Dimas 2005).

5.7.1. Precipitación

En El Salvador, del total de aguas lluvias precipitadas, entre el 63 y 66% se evapora y el restante 34% se incorpora al flujo de la superficie o se infiltra para alimentar los mantos

acuíferos (Dimas 2005). Tomando en cuenta estos datos se estima que el potencial del recurso hídrico utilizable es de unos 20 725 millones de metros cúbicos anuales, de los cuales el 65.75% son superficiales y 34.25% son subterráneas (GWP 2017). El dato de precipitación para la subcuenca del río Acahuapa se establece con el valor de 421 22 millones de metros cúbicos (Marinero Orantes 2016).

En la elaboración del plan nacional de gestión integrada del recurso hídrico, se menciona que el comportamiento de la precipitación tendrá un carácter bimodal, en el que en general, en los meses que ocupan el final de la época seca y el comienzo de la lluviosa, las lluvias tenderán a disminuir y, por el contrario, en los últimos meses de la época lluviosa y comienzo de la seca, las lluvias tenderán a aumentar (MARN 2015). Además, se estimó la probabilidad que habrá un aumento de la precipitación en 2020, pero un descenso en 2050. Por tanto, la tendencia a largo plazo es que en el futuro las precipitaciones al cabo del año disminuirán a pesar de que puedan existir incrementos de precipitación en ciertos meses del año.

Según la evolución de precipitación anual en El Salvador analizado por MARN (2015), entre los años 1965/66 – 2011/12 alternaron doce periodos de precipitación por debajo de la media, el menor valor de la precipitación fue 1 526 mm, se registró en el ciclo anual 2001 - 2002 y concluyeron que se podría deber a la variabilidad en la distribución espacial. Al respecto, se distinguieron dos periodos en El Salvador, el primero es el periodo el lluvioso que comprende desde mayo a octubre, destacándose como los meses más lluviosos a junio y septiembre y, el segundo es el periodo seco desde noviembre hasta abril. Por otra parte, FAO (2013), menciona que el agua que se precipita en forma de lluvia puede tener dos caminos: infiltrarse o moverse debido a la escorrentía, cuya característica se definen por frecuencia de las lluvias y volumen e intensidad.

SNET (2005) delimita dos temporadas climáticas en el país, la época seca y la época lluviosa con sus respectivos periodos de transición; la primera, se presenta entre los meses de noviembre a abril y la segunda de mayo a octubre con un intervalo de reducción de las lluvias entre julio y agosto llamado canícula, el mes más lluvioso es septiembre, seguido por el mes de junio. Los tipos de lluvia que se presentan son de origen; orográfico, convectivo y ciclónico, la precipitación orográfica se origina en la zona de barlovento de las cadenas montañosas del norte y costera, la precipitación convectiva se genera debido al calentamiento de masa de aire

lo que origina precipitaciones fuertes y rápidas, generalmente en horas de la tarde, especialmente en los primeros meses de la época lluviosa.

Las precipitaciones ciclónicas son originadas por sistemas atmosféricos como ondas tropicales, bajas presiones y vaguadas, así como por la influencia o acercamiento de la zona de convergencia intertropical, que afectan al país especialmente en los últimos meses de la época lluviosa, generando temporales de varios días consecutivos. Por otra parte, el país es afectado periódicamente por el fenómeno El Niño, Oscilación del Sur (ENOS). El fenómeno del niño genera retraso de la llegada de la estación lluviosa y un periodo más corto de la misma, así como una disminución en su cantidad, y una prolongación de la canícula (SNET 2005).

5.7.2. Hidrología

MARN (2015), establece que la distribución del agua lluvia en El Salvador está determinada por la topografía y la geología del territorio, la gran mayoría de los ríos poseen drenaje de tipo detrítico, con un proceso geomórfico de erosión fluvial que se tipifica por la densidad de drenaje, la frecuencia de corrientes y la longitud promedio corta de los flujos superficiales.

El régimen hídrico de los ríos de El Salvador está determinado por el régimen de lluvias, de acuerdo con la distribución pluvial durante el año, los ríos presentan dos periodos bien definidos en su régimen y caudal: época lluviosa y época seca, durante la época lluviosa (mayo a octubre) los ríos llevan agua en abundancia, al grado de provocar daños por inundación, en la época seca (noviembre a abril), se presentan caudales más bajos (MARN 2013).

La hidrología de la subcuenca está constituida por un sistema principal de drenajes que es el río Acahuapa, y todos sus afluentes, identificándose los ríos San Felipe, La Joya Caliente, Sisimico, Tiembla tierra, Amapupulta, Ismataco, Antón Flores, Istepeque, Tepetitán y Agua Caliente (Marinero Orantes 2016).

5.7.3. Temperatura

La temperatura media anual es de 24.8°C, presentándose la temperatura media más baja en los meses de diciembre (23.8°C) y enero (23.9°C) debido a la influencia que ejercen los vientos

fríos, por las incursiones de aire frío proveniente del Norte, mientras que el mes más cálido es abril (26.4°C) (SNET 2005).

La temperatura varía entre 15-38°C, dependiendo de la elevación en metros sobre el nivel del mar, y los meses del año. El pico máximo de temperatura se alcanza en los meses de marzo y abril con 38°C, lo cual solo ocurre en la parte baja de la subcuenca, debido a que esta zona se encuentra de 40 a 100 msnm. Mientras que, las temperaturas mínimas alcanzadas son de 15°C en diciembre, y de 16°C en enero y febrero, tanto en la parte media y alta de la subcuenca, debido a sus valores de altura, los cuales van de los 100 a 2 182 msnm (Marinero Orantes 2016).

5.7.4. Evapotranspiración

La evapotranspiración en una zona de cultivo se define como la transpiración de la planta, cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo, más la evaporación del suelo. La evapotranspiración real va a ser proporcional a la humedad del suelo, comparada con la diferencia de humedad entre la capacidad de campo y el punto de marchitez (Schosinsky N. 2006). Es por ello, que el valor de la transpiración anual del país es de 1 010 mm, siendo las regiones hidrográficas con mayor pérdida las de Goascorán (1 037 mm), Lempa (1 029 mm) y la Paz (1 007 mm). La región hidrográfica que presenta menores valores de evapotranspiración real es la Grande de Sonsonate-Banderas (926 mm). En la subcuenca del río Acahuapa, la evapotranspiración es de 211 mm (Marinero Orantes 2016). Aunque, MARN 2016, evaluó la evapotranspiración potencial media anual en El Salvador desde 1965 al año 2012, cuyo resultado es de 1 682 mm/año, en el periodo analizado, que equivaldría en el territorio nacional a un volumen total promedio de 35 390 mm/año.

5.7.5. Infiltración

Para Schosinsky y Losilla (2000), evaluar la infiltración de lluvia que penetra al suelo en una zona, se determinan: la precipitación mensual de la zona, los diferentes valores de infiltración básica de los suelos, la cobertura vegetal del suelo y su pendiente.

5.7.6. Escorrentía

Collazo Caraballo y Montaña Xavier (2012), indica que es el proceso por el cual el agua de lluvia precipitada en la superficie de la tierra fluye por acción de la gravedad desde las partes más altas hacia las más bajas, confluyendo en ríos, arroyos y otros cuerpos de agua y para (Schosinsky N. 2006), la escorrentía superficial generada por la lluvia mensual corresponde a la precipitación mensual menos la retención de lluvia en el follaje menos la infiltración.

5.8. Agua subterránea

Aguas subterráneas es aquella parte vital del agua existente bajo la superficie terrestre que puede ser colectada mediante perforaciones, pozos, túneles o galerías de drenajes o la que fluye naturalmente hacia la superficie a través de manantiales o filtraciones a los cursos fluviales (Ordoñez Gálvez 2011). También, son las aguas de lluvia que se infiltran en el suelo y se depositan en los poros de la tierra y forman parte del recurso necesario para la humanidad y se distinguen porque se encuentran en los poros de las rocas sedimentarias y las aguas subterráneas en las grietas y fracturas de las rocas ígneas y/o metamórficas (ANAM 2013).

El movimiento y almacenamiento del agua subterránea, depende del espesor, textura y estructura de las rocas que constituyen la corteza terrestre, además de la capacidad física del agua para moverse a través de un medio permeable, conservando el flujo de algunos arroyos durante los periodos de sequía. Asimismo, el agua subterránea está almacenada en acuíferos, ubicados a diferentes niveles de profundidad, hasta sistemas confinados que están a varios kilómetros por debajo de la superficie en zonas húmedas, áridas o semiáridas (Ordoñez Gálvez 2011).

Los términos nivel freático, aguas subterráneas y acuífero se utilizan para describir el agua contenida en el suelo y las rocas por debajo del nivel del terreno. Comprender en que se diferencian dichos términos sirve de ayuda para apreciar el modo en que el agua que observamos en la superficie de los humedales esta inherentemente vinculada a los procesos que se desarrollan bajo esa superficie, lo que afecta potencialmente a las vidas y los medios de sustento de miles de millones de personas en todo el planeta (Ramsar 2016).

5.8.1. Explotación de las aguas subterráneas

Las aguas subterráneas constituyen la mayor reserva de agua dulce del mundo y representan más del 97% del total de agua dulce disponible en el planeta, excluyendo los glaciares y casquetes polares. El 3% restante corresponde esencialmente a las aguas superficiales, lagos, ríos, humedales y a la humedad del suelo y su atención se centraba como uso de agua potable (Bellino 2012), que representan una garantía de que la población mundial actual y futura contará con un abastecimiento de agua asequible y seguro, ya que es un recurso renovable que, cuando se gestiona adecuadamente, garantiza un abastecimiento a largo plazo que contribuye a atender las crecientes demandas y a mitigar los impactos del cambio climático (ANAM 2013).

Ordoñez Gálvez (2011), enfatiza que las aguas subterráneas proporcionan útiles funciones y servicios a los seres humanos y al medio ambiente, las cuales se detallan a continuación: a) el 60 – 70% del agua extraída se utiliza para la agricultura en zonas de clima árido y semiárido. El riego aumenta el rendimiento de las cosechas y así el 15% de las tierras explotadas que se riega produce el 40% de los alimentos a nivel mundial; b) un 25 – 40% del agua potable del mundo proviene de las aguas subterráneas y c) el 50% de las megaciudades y cientos de otras ciudades importantes dependen de manera significativa el uso de las aguas subterráneas. Es por ello, que el agua subterránea es, a escala global, la fuente más importante de agua dulce para la sociedad, el agua es un recurso estratégico que puede conseguir el alivio de la pobreza y la seguridad alimentaria, en especial en las zonas áridas y semiáridas (Bellino 2012).

En algunos casos de explotación intensa se han producido descensos importantes de los niveles de agua, disminución de caudales de ríos y manantiales, secado de humedales o subsistencia del terreno (Herráiz 2009). Aunque el agua tiene un módulo de elasticidad pequeño, al descomprimir mediante bombeo un gran volumen de acuífero se puede obtener una cantidad considerable de agua sin vaciar los poros: cuando se bombea un acuífero confinado se produce una disminución de la presión hidrostática proporcional al aumento de la presión litostática (disminuye el volumen de agua contenida en los poros, pero disminuye también el tamaño de los poros aumentando la presión intergranular), de forma que la presión de confinamiento se mantiene constante durante un tiempo. Si la explotación del acuífero continúa en el tiempo, puede inducirse el descenso de nivel piezométrico por debajo del techo del acuífero confinado (Manzano Arellano 2008).

5.8.2. Captación de aguas subterráneas

La captación de aguas subterráneas se realiza mediante pozos y sondeos, un pozo ordinario puede tener un diámetro superior a un metro, dos o tres metros y con una profundidad que no suele sobrepasar los 15 – 20 metros, se reviste con obra de fábrica o con anillos prefabricados de hormigón, y el sondeo es una captación con diámetro inferior a 60 centímetros y una profundidad que excede los 20 metros, se suele entubar con tubo metálico (Fuentes Yagüe 1993).

5.8.3. Entradas subterráneas

Toda el agua que se encuentra en el subsuelo debe tener o haber tenido una fuente de recarga, porque esto se origina si la capacidad de infiltración del terreno es mayor que la intensidad de la lluvia. Algunas veces también puede ocurrir como infiltración originada por ríos, lagos, canales y otros cuerpos de agua superficiales, el suelo entre la superficie del terreno y el nivel freático se conoce como la zona no saturada porque sus poros contienen tanto aire como agua. La dirección del flujo en esta zona es vertical descendente, aunque el flujo ascendente en respuesta a la succión creada por las raíces ocurre durante periodos de sequía este proceso puede extenderse a una profundidad de varios metros bajo ciertas circunstancias. El movimiento natural del agua (descendente) en la zona no saturada es lento (entre diez y un metro por año en promedio), como resultado de la baja conductividad hidráulica de suelos no saturados, debido al hecho que el agua es retenida en los poros más finos por las fuerzas de capilaridad que predominen (CONAGUA s. f.).

5.9. Agua superficial

El agua superficial, es la parte de la precipitación caída (en forma de lluvia, nieve o granizo) discurre por la superficie terrestre formando arroyos y ríos, lo que constituye la escorrentía superficial, otra parte se infiltra en el terreno, rellenando poros y fisuras, cuando éstos se saturan, el agua fluye por gravedad hacia los manantiales, ríos o mares, dando lugar a la escorrentía subterránea. Desde el punto de vista de su explotación hay que tener en cuenta una serie de características diferenciales entre las aguas superficiales y subterráneas, llegando a establecer las siguientes: a) la velocidad de desplazamiento de las aguas superficiales es muy superior (del orden de las 100 000 veces) a la de las aguas subterráneas;

b) el volumen de agua subterránea almacenada es mucho mayor que el volumen del agua que discurre superficialmente en un momento dado; c) las aguas que discurren superficialmente se concentran en un pequeño número de ríos, mientras que las aguas subterráneas se mueven y ocupan grandes extensiones y d) las corrientes superficiales tienen grandes variaciones de caudal, mientras que las subterráneas experimentan unas variaciones muy pequeñas (Fuentes Yagüe 1993)

5.9.1. Distribución del agua superficial

Las aguas superficiales se infiltran en el terreno por los poros y las grietas del suelo, hasta llegar a una cierta profundidad en donde todos los huecos están llenos de agua, esta zona se llama zona de saturación o capa freática.

La zona comprendida entre la superficie de saturación y la superficie del suelo, llamada zona de aireación está recorrida por el agua que se infiltra hacia abajo y el vapor de agua que tiende a escapar hacia la atmosfera. El agua de la zona de saturación asciende por capilaridad por los pequeños intersticios del terreno, formando una franja capilar de mayor o menor espesor, según la naturaleza del terreno puede no existir o elevarse uno, dos o hasta tres metros por encima de la superficie de saturación (Fuentes Yagüe 1993).

5.10. La capa freática

Al infiltrarse otra cantidad de agua de lluvia, se une a la anterior o queda separada de ésta por una capa de gases, haciendo aumentar el peso de la primera obligándola a continuar su descenso; en igual forma otras cantidades se suman a las anteriores hasta llegar a la capa. En algunas partes donde existen subsuelos de La capa freática, es decir la capa de agua más próxima al nivel del terreno, forma ríos y lagos subterráneos que como los superficiales, tienen sus fluctuaciones y corrientes (dirección y velocidad) y están alimentados por la infiltración de las precipitaciones (lluvia) e infiltraciones laterales de los lagos, ríos, canales y otras fuentes.

El agua de las precipitaciones se transmite a la capa, con un retraso más o menos grande, que varía entre días y meses, según la constitución geológica del subsuelo, topografía de la cuenca y profundidad a que esté el agua. el proceso de infiltración es el siguiente: la primera lluvia penetra hasta saturar una capa más o menos delgada del terreno, según su cantidad y

sigue luego descendiendo lentamente hasta que la presión ejercida por los gases telúricos, equilibran a la fuerza resultante del peso del agua (Raffo 1954).

5.11. El nivel freático

Es el nivel por debajo del cual el suelo y las rocas están permanentemente mojados o saturados. Angelone *et al.* (2006), enfatiza lo siguiente: por debajo del nivel freático las presiones neutras son positivas. Además, la profundidad del nivel freático bajo la superficie del terreno suele variar, elevándose y reduciéndose en función de las precipitaciones estacionales o el caudal de agua extraído por las personas para el consumo o el riego. Ramsar (2016), asegura que, el agua que se encuentra por debajo del nivel freático se denomina agua subterránea y Manzano Arellano (2008), afirma que es la cota absoluta en metros sobre el nivel del mar que corresponde a la parte superior de saturación en un acuífero libre.

El descenso del nivel freático medio se produce siempre que hay una extracción continuada de agua en el acuífero. Sin embargo, este descenso no significa que el acuífero esté sobreexplotado, lo que sucede es que el nivel freático busca una nueva cota de equilibrio en que se estabiliza y la sobreexplotación se produce cuando las extracciones totales de agua superan la recarga, esto podría secar los pozos si el nivel freático cae por debajo de su profundidad inicial y ocurre ocasionalmente en años de sequía, ya sea por reducción de la recarga o por sobreexplotación (MARN 2013).

La influencia de factores meteorológicos sobre el nivel freático surge por tres factores: La temperatura, la presión atmosférica y las mareas; la temperatura puede hacer sentir su efecto sobre las napas libres a través de la variación en el contenido de agua del suelo no saturado situado inmediatamente por encima de su nivel freático, las variaciones de la presión atmosférica repercuten muy rápidamente sobre los niveles de agua que se encuentran en pozos y sondajes en napas artesianas, y un aumento de la presión atmosférica produce los siguientes efectos sobre una napa confinada o artésiana (Ordoñez Gálvez 2011).

5.12. El nivel estático

La medida del nivel estático permite cuantificar los volúmenes de agua almacenada en los acuíferos y controlar la explotación de estos, proporcionando una valiosa información acerca

de estos sistemas naturales (Ayala 2003). Al respecto, Angelone *et al.* (2006), definen la altura que alcanza el agua en un tubo vertical o piezómetro en un punto determinado, este se mantiene constante en la vertical de un almacenamiento de agua libre o en la vertical de un medio permeable saturado cuando es homogéneo (Anexo 9).

5.13. Capacidad de recarga

Es la capa de agua más próxima al nivel del terreno y forma ríos y lagos subterráneos que como los superficiales, tienen sus fluctuaciones y corrientes (dirección y velocidad) y están alimentados por la infiltración de las precipitaciones (lluvia, nieve, etc.) e infiltraciones laterales de los lagos, ríos, canales y otros (Raffo, 1954). La recarga del acuífero se lleva a cabo, si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante, una vez satisfecha la capacidad de campo y la evapotranspiración, es la que recarga al acuífero (Schosinsky N. 2006).

La recarga efectiva es el agua que percola a través del límite inferior de la zona no saturada, llega al acuífero freático, y produce ascensos medibles del nivel freático y por las lluvias, la magnitud de la recarga es controlada ampliamente por las características hidráulicas de la zona no saturada, la vegetación, la profundidad del nivel freático y la presencia de flujos de agua, para estimar la recarga se utiliza el método de cálculo del flujo al acuífero mediante la aplicación de la ecuación de Darcy a la zona no saturada, para ello, se debe considerar un plano a los 120 cm de profundidad, teniendo en cuenta que la zona de exploración de las raíces, por el tipo de vegetación presente, se encuentra en unos 70-80 centímetros de profundidad (Weinzettel y Usunoff 2001).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Descripción del lugar de investigación

El estudio se realizó en la zona norte de la subcuenca del río Acahuapa, cuya extensión territorial es de 239. 26 Km², y forma uno de los principales acuíferos del departamento de San Vicente, su cauce principal tiene una longitud de 33 km y que abarca los municipios de Tepetitán, Verapaz, Guadalupe, San Vicente, Apastepeque y San Cayetano Istepeque. Forma parte de la Región Hidrográfica del Río Lempa, una de las más importantes del país, la población actual ubicada en la subcuenca es de aproximadamente 112 236 habitantes, lo cual representa el 80% de la población del departamento de San Vicente (Marinero Orantes 2016). Las coordenadas topográficas correspondientes al río Acahuapa son las siguientes: 13°3´NO y 88°39´W, la temperatura aproximada del lugar es de 30°C y la humedad relativa media diaria nacional varía entre 30% y 40%, llegando alcanzar niveles de humedad hasta 55% (Anexo 10).

6.2. Recopilación de datos geográficos

A partir de los puntos geográficos predefinidos para el muestreo de los pozos, y mediante la utilización de un dispositivo de geoposicionamiento global - GPS (Anexo 27), se obtienen las coordenadas mostradas (Cuadro 1).

6.3. Precipitación registrada durante el período 2014 – 2015

Se utilizaron los registros de las precipitaciones que fueron proporcionados por el Centro de Investigación Ambiental de la Facultad Multidisciplinaria Paracentral de la Universidad de El Salvador CEIA-UES, utilizando los datos de los meses de febrero 2014 a junio de 2015 (Cuadro 2 y Anexo 14).

Cuadro 1. Coordenadas topográficas de los pozos en estudio.

Pozo	X	Y	Elevación
1	13°39´21.9" N	88°51´3.5" O	572 msnm
2	13°39´12.5" N	88°50´25" O	587 msnm

Cuadro 2. Precipitaciones registradas durante el período 2014 – 2015.

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2014	0.0	0.0	17.0	5.0	158.0	213.0	96.0	403.0	529.9	259.1	40.5	0.0
2015	0.0	4.7	11.6	35.8	241.9	98.1	87.3	151.0	279.2	365.0	104.2	0.0

Fuente: Tomado de CEIA-UES s. f.:s. p.

6.4. Fases de la investigación

Con el propósito de conocer la relación de la precipitación con los niveles de agua de los pozos domésticos, se diseñaron tres fases de trabajo: preliminar, de campo, procesamiento de los datos obtenidos y el análisis de resultados.

6.4.1. Fase preliminar

Se realizó el marco teórico y revisión bibliográfica de temas que incluyen antecedentes de primeros estudios realizados en la que relacionan las precipitaciones con los niveles de agua en pozos, incluyendo mapas topográficos, geológicos, información referente a la infiltración, uso de suelos, información hidrometeorológica, recarga de los acuíferos, obtenidos de tesis realizadas en la zona norte de la subcuenca del río Acahuapa. Se obtuvo información de las precipitaciones registradas por las estaciones ubicadas en la zona paracentral y el Centro de Investigación Ambiental de la Facultad Multidisciplinaria Paracentral de la Universidad de El Salvador, junto con el Ministerio de Medio ambiente y recursos naturales. Esta información sirvió para tener un primer acercamiento del comportamiento del flujo subterráneo en la subcuenca del río Acahuapa, correlacionando la precipitación de la zona y los niveles estáticos de los pozos domésticos (Cuadro 2) (Anexo 14)

6.4.2. Fase de campo

Esta fase se realizó a través de visitas de reconocimiento y toma de información utilizando equipo de posicionamiento (Global Positioning System) marca “eTrex”, modelo “vista”, fabricado por la corporación GARMIN (Anexo 27). Obteniendo la ubicación geográfica en esta investigación (Anexos 34 y 35). Además, en las visitas de campo se recopiló información detallada del uso del agua, tiempo de extracción, medición de las dimensiones de los pozos a

través de una ficha técnica en la cual se realizaron anotaciones de la información requerida, se utilizó una cinta métrica para medir el diámetro, la altura del broquel de los pozos y para medir el nivel estático se utilizó el equipo medidor de niveles de agua, marca “Solinst” modelo “101” (Anexos 25, 26 y 27). Aunque, solo se detalla en los anexos no tiene relación alguna con los resultados.

En las visitas realizadas se observó que los sensores fueron ubicados en enero de 2014 programados para 17 meses consecutivos, iniciando desde el mes de febrero y finalizando las lecturas hasta el mes de junio de 2015, posteriormente permanecieron dentro de los pozos y se extrajeron para realizar las capturas de datos hasta el año 2020, en el software Solinst 5.0. También, la extracción de la información contenida en el sensor *Levellogger Edge*, de la marca “Solinst 5”, modelo “3 001”, se realizó a través de un dispositivo adaptador que conecta el sensor con la computadora, y a través del Software Solinst 5, se procedió a extraer la información que fue utilizada para realizar los cálculos en una hoja electrónica Excel, que permitió graficar los datos obtenidos en esta investigación (Anexo 28).

6.4.3. Fase de procesamiento y análisis de datos

Primeramente, se colectó los datos obtenidos de los sensores *Levellogger*, en el Software Solinst 5.0, a través del Barologger Edge, los datos se trasladaron en una hoja electrónica de Excel, estos datos se promediaron mensualmente y se graficaron, asimismo, se utilizó el programa IBM SPSS Statistics para correlacionar las variables precipitación con los niveles estáticos y temperaturas con los niveles estáticos mediante el Coeficiente de Correlación Rho de Spearman (Cuadro 3) (Anexos 29, 30 y 31). Para el análisis de resultados se utilizó la interpretación realizada por Martínez Ortega *et al.* 2009 (Anexos 33 y 36), en la que describe las relaciones entre dos variables y posteriormente se obtuvieron los mapas de las relaciones entre las variables (Anexos 15, 16, 17 y 18).

Cuadro 3. Cantidad de registros obtenidos en el Software Solinst 4.0.

Pozo	Cantidad de registros	fecha	Hora	Altura	Temperatura
1	inicio	04/02/2014	15:46	9.641	28.239
	24 000	03/04/2015	01:50	11.094	31.922
2	inicio	04/02/2014	15:29	9.612	28.991
	22 363	12/06/2015	20:48	11.131	33.605

6.5. Distribución poblacional

Dentro de la subcuenca del río Acahuapa, se hallan diferentes concentraciones de poblaciones, distribuidas en la zona urbana y rural. Los municipios con mayor concentración de habitantes en la zona urbana son: Tepetitán, San Cayetano Istepeque, San Vicente y Apastepeque. Los municipios con mayor cantidad de habitantes en la zona rural son: Santa Clara, San Esteban Catarina, Verapaz, San Lorenzo y Guadalupe (Anexos 11, 12 y 13). Aunque no todos los habitantes de la zona rural están inmersos dentro de la subcuenca, se muestra la cantidad de habitantes de los municipios que tienen mayor concentración de población en la zona de estudio, así también la población que está dentro de la subcuenca del río Acahuapa (Machuca Laínez 2010) (Cuadro 4).

Los rubros más importantes de generación de ingresos son los productos agrícolas, entre los más cultivados está la producción de granos básicos como: maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), sorgo (*Sorghum* spp.) y arroz (*Oryza sativa* L.), los cuales se comercializan principalmente en la cabecera departamental de San Vicente; en cuanto a la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), al INJIBOA.

6.6. Aspectos económicos

Los productores de caña de azúcar la procesan artesanalmente, a través de la elaboración de dulce de panela y otros derivados, por medio de las moliendas (trapiches); entre los cuales existen 11 moliendas, que se encuentran dentro de la zona norte de la subcuenca, de los cuales nueve están en funcionamiento (Machuca Laínez 2010).

Cuadro 4. Área y población de los municipios pertenecientes en la zona norte de la subcuenca del río Acahuapa.

Municipio	Área en la subcuenca (km ²)	Población en la subcuenca	Población total
Guadalupe	5.45	2 255.00	5 585.00
San Cayetano Istepeque	12.58	5 073.00	5 095.00
Tepetitán	12.56	3 136.00	3 813.00
Verapaz	5.90	3 235.00	6 315.00
Total	36.49	13 699.00	20 808.00

Fuente: Tomado de Machuca Laínez 2010:15.

La mayoría de los cañicultores lo comercializan con el Ingenio INJIBOA, para su procesado industrial para la elaboración de azúcar y otros derivados (Machuca Laínez 2010).

Otro cultivo que genera ingresos en la zona alta de la subcuenca es el café (*Coffea arábica* L.), aunque los dos beneficios cercanos no están en funcionamiento, tanto el beneficio Molineros y beneficio Acahuapa, es por ello por lo que lo procesan en el beneficio Las Vegas y beneficio Omorontique en el municipio de Santiago de María del departamento de Usulután (Machuca Laínez 2010).

Las hortalizas y frutas son producidas en menor escala, como una actividad no comercial, ya que son cultivados en la mayoría de los hogares, las cuales son sembradas en el traspatio de las viviendas, cercos, potreros y fincas. En general, con estas actividades agrícolas se emplea un buen número de mano de obra, durante el establecimiento y cosechas de los cultivos de granos básicos y caña de azúcar (Marinero Orantes 2016)

Dentro de la producción pecuaria en la zona, la actividad con mayor importancia es la ganadería vacuna, la cual es comercializada en pie de cría, en los tiangues a nivel nacional, la carne está distribuida dentro de Apastepeque y San Vicente, en los mercados municipales y lo venden por libras a consumidores finales, la leche producida es vendida por los mismos productores al menudeo por botella, o es procesada para la elaboración de quesos y otros derivados lácteos. Por otra parte, la crianza de cerdos, aves de corral, cabras, conejos, peces, etc., es una actividad para consumo local y familiar (Machuca Laínez 2010).

La subcuenca cuenta con servicios básicos de telecomunicaciones, electricidad y agua potable, este último suministrado en la zona urbana por la Administración Nacional de Acueductos y alcantarillados (ANDA), en las zonas rurales se administra por las juntas de agua y por las municipalidades, aunque en algunas zonas se abastecen por medio de pozos domésticos. El sistema de alcantarillado de aguas negras funciona solo en dos municipios, Apastepeque y San Vicente, los cuales vierten sin tratamiento en el río Acahuapa (Marinero Orantes 2016).

6.7. Clima

El clima está zonificado según la altura: sabana tropical caliente o tierra caliente desde 0 – 800 msnm; sabana tropical caluroso o tierra templada de los 800 – 1 200 msnm; y clima tropical de las alturas de los 1 200 – 2 700 msnm (Machuca Laínez 2010). Además, el régimen de viento predominante de la subcuenca se especifica de la siguiente manera: para la zona baja, el rumbo del viento es del norte en la estación seca y de rumbo sur en la estación lluviosa. Las brisas marinas ocurren después del mediodía, durante la noche se desarrolla el sistema local nocturno del viento con rumbos desde las montañas y colinas cercanas, con velocidades promedio de $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. En la zona media, el rumbo de los vientos es del norte para todo el año (CEIA s. f.).

Durante la noche se desarrolla el sistema local nocturno del viento con rumbos desde las montañas y colinas cercanas, la velocidad promedio es de $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. En la zona alta, los vientos son predominantes del rumbo norte en la estación seca y del rumbo sureste en la estación lluviosa (Machuca Laínez 2010).

6.8. Uso actual del suelo

Comprende todas las actividades agropecuarias que se desarrollan en el presente y de tal forma las tierras son utilizadas de acuerdo a las necesidades del hombre, en la mayor parte del territorio de la subcuenca, se encuentra dedicado al sector agropecuario, que incluye el cultivo de café, caña de azúcar, pastos y la mayoría de granos básicos, y parte de los terrenos cultivos forestales de teca (una cualidad importante de los árboles de teca, es la absorción de agua de los suelos, lo que provocaría el secado de pozos cercanos) (Machuca Laínez 2010).

Por otro lado, se tiene una pequeña área de bosque natural, que la actualidad ha sido declarada zona protegida, conocida actualmente como La Joya, ubicada al sureste de la cabecera departamental de San Vicente, así mismo la parte alta del volcán Chinchontepec que por sus altas pendientes representa una zona de gran peligro si se elimina su cobertura vegetal (Cuadro 5) (Machuca Laínez 2010).

Cuadro 5. Distribución por rubros y área cultivada en la subcuenca del río Acahuapa.

Ocupación actual del suelo	Área (km²)	Porcentaje (%)
Caña de azúcar	36.51	16.04
Áreas urbanas	9.32	4.10
Café	9.92	4.36
Pastos y granos básicos	131.11	57.59
Cuerpo de agua	0.62	0.27
Bosques naturales	40.17	17.64
Total	227.65	100.00

Fuente: Tomado de Machuca Laínez 2010:18.

6.9. Geología y topografía

La geología de la subcuenca está diferenciada por el grupo de rocas siguientes: efusivas andesíticas-basálticos, piroclastitas ácidas (tierra blanca), epiclastitas volcánicas y tobas ardientes fundidas (Marinero Orantes 2016).

En el municipio de San Cayetano Istepeque se clasifica geológicamente como rocas efusivas ácidas e intermedias-ácidas, efusivas andesíticas-basálticas, efusivas andesíticas y basálticas, piroclastitas y piroclastitas ácidas (tierra blanca) (EGA 2012). Según el mapa pedológico de la zona de San Vicente, el municipio de Tepetitán está caracterizado por andisoles y litosoles (MAG 2012) (Tabla 1).

La zona alta de la subcuenca del río Acahuapa cuenta en su territorio con bosques primarios y cafetaleros ubicados en el volcán Chinchontepec, que generan las condiciones de infiltración del agua precipitable al acuífero poroso que abastece los sistemas de agua potable de cinco municipios: Guadalupe, Verapaz, Tepetitán, San Cayetano Istepeque y San Vicente, con una población total de 73 690 habitantes (Marinero Orantes 2016).

6.10. Precipitación

La precipitación anual promedio es de 1 785 mm, según carta de isoyetas medias multianuales y el ráster de altitudes analizado desde 1965 – 2012 (47 años continuos), en el territorio salvadoreño en un área de 21 041 km², con un volumen total precipitado promedio de 37,558 mm³/año, estudio realizado en 105 estaciones con registro pluviométrico (MARN 2016).

Tabla 1. Textura de los suelos existentes en el área de la subcuenca del río Acahuapa.

Suelos	Textura	Descripción
Andisoles	Franco	Suelos originarios de cenizas volcánicas, de distintas épocas y en diferentes partes del país, tienen por lo general un horizonte superficial entre 20 y 40 cm de espesor, de color oscuro, textura franca y estructura granular.
Grumosoles	Arcilloso	Suelos muy arcillosos de color gris a negro con vegetación de morros, cuando están muy mojados son muy pegajosos y plásticos. Cuando están secos son muy duros y se rajan. En la superficie son de color oscuro, pero con poco humus o materia orgánica.
Aluviales	Franco	Son suelos de materiales transportados o depositados en las planicies costeras y valles interiores. Son aluviones estratificados de textura variable.
Latosoles arcillo rojizo	Franco Arcilloso	Suelos arcillosos de color rojizo en lomas y montañas. Son bien desarrollados, con estructura en forma de bloques, con un color generalmente rojo, aunque algunas veces se encuentran amarillentos o marrón.

Fuente: Tomado de Marinero Orantes 2016:69.

Aunque, según los promedios de las precipitaciones anuales de las estaciones cercanas a la subcuenca del río Acahuapa, refleja que la estación del Beneficio Acahuapa obtuvo un promedio anual de 1614.94 mm de lluvia (MARN 2016) (Cuadro 6).

Cuadro 6. Promedio de las precipitaciones anuales de las estaciones cercanas a la subcuenca del río Acahuapa.

Estaciones	Precipitación (mm)
Finca El Carmen	2032.30
Puente Cuscatlán	1628.74
Santa Cruz Porrillo	1710.90
Beneficio Acahuapa	1614.94
Santa Clara	1588.22
Promedio	1778.42

Fuente: Tomado de Amaya Meléndez *et al.* 2019:26.

6.11. Capacidad de infiltración

Resultados obtenidos en pruebas realizadas por distintas formaciones geológicas en la zona norte de la subcuenca del río Acahuapa indican valores de infiltración (Cuadro 7), datos que reflejan la conductividad hidráulica de las diferentes formaciones geológicas del suelo presente en la zona de estudio (Anexos 19 y 32).

6.12. Recarga por infiltración

La recarga en las aguas subterráneas es producida por la infiltración de la precipitación y para su cálculo se necesita conocer los valores existentes en los suelos, la capacidad de campo (CC), punto de marchitez (PM) y profundidad de raíz (PR). Los datos contenidos son estándar para los suelos, debido que presentan las mismas características (Cuadro 8).

6.13. Recarga potencial del acuífero producido por la precipitación

Se muestra la recarga por precipitación promedio de la estación más cercana de la subcuenca del río Acahuapa, utilizando el mapa de Polígonos de Thiessen de la estación del beneficio de Acahuapa en un área de 112.21 km² (Cuadro 9).

Cuadro 7. Dato de infiltración de agua en las distintas formaciones geológicas, cercanas a la zona de estudio.

Lugar	Geología	Textura	Datos (cm·h ⁻¹)
Antiguo Tepetitán lahares	Miembro S4	Areno- Franco	24.58
Antiguo Tepetitán cafetal	Miembro S4	Franco	8.96

Fuente: Tomado de Marinero Orantes 2016:61.

Cuadro 8. Recarga por infiltración; valores de capacidad de campo (CC), punto de marchitez (PM) y profundidad de raíz (PR).

Lugar	CC(%)	PM(%)	PR(mm)
Antiguo Tepetitán lahares	18.1	6.8	300.0
Antiguo Tepetitán cafetal	19.8	7.9	2 500.0

Fuente: Tomado de Marinero Orantes 2016:62.

Cuadro 9. Recarga del acuífero superficial producido por la precipitación.

Recarga	Volumen (mm·año⁻¹)
Antiguo Tepetitán lahares	938.97
Antiguo Tepetitán cafetal	864.07

Fuente: Tomado de Marinero Orantes 2016:63.

6.14. Recarga total

Los resultados de las medidas de infiltración de agua en la zona de influencia del trabajo de investigación determinaron el porcentaje de la recarga total de la zona norte de la subcuenca del río Acahuapa, cuyo porcentaje corresponde a la recarga total de los acuíferos, relacionados con la precipitación (Cuadro 10).

6.15. Sequía meteorológica

En Centroamérica existe una amplia evidencia de variabilidad climática, en algunos casos más intensos y frecuentes y otros casos escasos como la sequía y generan fuerte impacto en la producción agrícola y seguridad alimentaria. Durante el año 2014 las pérdidas en agricultura por falta de lluvia fueron de \$70 millones debido a estos eventos extremos secos y altas temperaturas que generan impactos severos en la salud, sector agropecuario y el medio ambiente. Por otra parte, la deficiencia o reducción de las precipitaciones por períodos prolongados tiene un fuerte impacto en la disponibilidad y calidad del agua, tanto superficial como subterránea. También, durante la época lluviosa, cuando deja de llover entre cinco y diez días seguidos, la sequía meteorológica es de intensidad débil, si el periodo seco es de 11 a 15 días consecutivos, la sequía se clasifica en moderada, y si el periodo seco es mayor a 15 días se considera de intensidad fuerte o severa (MARN 2016).

Cuadro 10. Porcentaje de recarga total en la zona norte de la subcuenca del río Acahuapa.

Recarga	Porcentaje (%)
Antiguo Tepetitán lahares	21.22
Antiguo Tepetitán cafetal	19.52

Fuente: Tomado de Marinero Orantes 2016:63.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para determinar la relación existente de la precipitación con los niveles estáticos de los pozos se empleó el uso de sensores de temperatura y niveles de agua, que se encontraban dentro de cada pozo en estudio, la extracción de los datos colectados se realizó mediante el software Solinst 5, y se utilizó una hoja de cálculo en Excel, para el análisis de resultados se usó el programa IBM SPSS Statistics. Los datos de precipitación permitieron el análisis de resultado en esta investigación.

7.1. Datos colectados por los sensores

La extracción de datos con el *Software Solinst Levelogger*, se realizó por medio de un *Levelogger Edge*, dispositivo de conexión directa, que permite el traslado de la información del sensor a la computadora, (Anexos 27-29) de la cual se obtuvieron 24 000 lecturas en el pozo uno y 22 363 lecturas en el pozo dos, durante el periodo desde febrero 2014 hasta el mes de junio de 2015, para lo cual se especifica lo siguiente: la información recopilada se tabuló utilizando una hoja de cálculo electrónico (Microsoft Excel), debido, que se trataba principalmente de información numérica, el procesamiento de esta consistió en promediar los datos diarios de los sensores *Levelogger* cuyas capturas de datos se realizaron con intervalos de tiempo entre diez a 20 minutos, obteniendo los resultados antes indicados, extraídos del sensor *Levelogger* en el pozo uno, luego se promediaron por mes (Cuadro 11). Para la obtención de datos del sensor *Levelogger* ubicado en el pozo dos, se obtuvieron 22 363 lecturas, cuyos intervalos de tiempo fueron de diez a 25 minutos por lectura (Cuadro 12).

Cuadro 11. Datos de los niveles estáticos y temperaturas promediados, desde febrero 2014 hasta junio 2015, en el pozo uno.

	Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Niveles estáticos (m)	2014		11.64	11.61	11.6	11.68	11.68	11.69	11.7	11.71	11.7	11.63	11.51
	2015	11.38	11.30	11.22	11.16	11.12	11.09						
Temperaturas (°C)	2014		31.88	31.88	31.88	31.90	31.89	31.89	31.89	31.89	31.88	31.86	31.80
	2015	31.74	31.72	31.71	31.68	31.66	31.67						

Cuadro 12. Datos de los niveles estáticos y temperaturas promediados, desde febrero 2014 hasta junio 2015, en el pozo dos.

	Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Niveles estáticos (m)	2014		9.98	9.99	9.99	10.00	10.00	9.79	9.78	9.77	9.76	9.74	9.72
	2015	9.70	9.70	9.69	9.69	9.72	9.75						
Temperaturas (°C)	2014		30.23	30.22	30.20	30.18	30.15	29.87	29.78	29.78	29.74	29.7	29.65
	2015	29.58	29.52	29.44	29.44	29.28	29.22						

7.2. Análisis de resultados para cada uno de los pozos

Para la relación de los datos promediados de la precipitación con los niveles estáticos y las temperaturas se utilizó el programa Microsoft Excel, obteniéndose la información que se da a conocer a continuación.

7.2.1. Relación de la precipitación con los niveles estáticos, en el pozo uno

Para comprobar la relación de las variables, precipitación y niveles de agua de los pozos en la zona norte de la subcuenca del río Acahuapa se utilizó los datos de precipitación obtenidos del Centro de Investigación Ambiental de la Facultad Multidisciplinaria Paracentral y el Ministerio de medio ambiente y recursos naturales, los datos promediados de los Niveles estáticos del sensor ubicado en el pozo uno (Cuadro 13).

Posteriormente se graficó en la hoja electrónica Excel los datos promediados de las variables, obteniendo el gráfico que muestra la relación existen entre la precipitación con los niveles estáticos del pozo uno, y se puede observar que los meses que está relacionada la precipitación con los niveles estáticos corresponden a los meses de septiembre 2014 y mayo 2015 (Figura 1). El porcentaje de relación obtenido al correlacionar estas variables en SPSS es 48%.

Cuadro 13. Comparación entre los niveles estáticos y las precipitaciones registradas en el pozo uno.

	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J
Niveles estáticos	11.64	11.61	11.60	11.68	11.68	11.69	11.70	11.71	11.70	11.63	11.51	11.38	11.30	11.22	11.16	11.12	11.09
Precipitación	0.00	17.00	5.00	158.00	213.00	96.00	403.00	529.90	259.10	40.50	0.00	0.00	4.70	11.60	35.80	241.90	98.10

Relación de la precipitación con los niveles de agua en el pozo uno, registrados durante el periodo 2014-2015

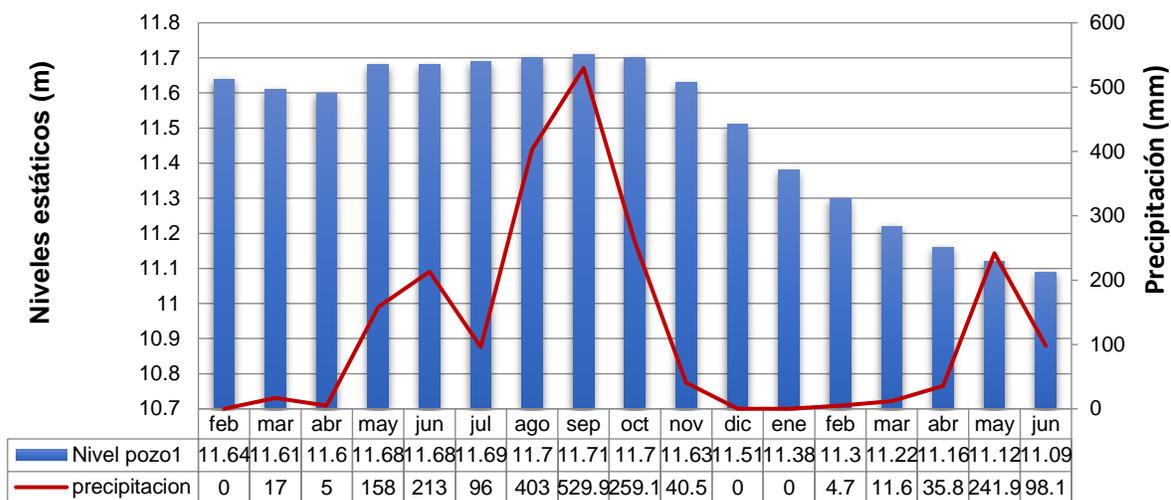


Figura 1. Representación de la relación entre la precipitación con los niveles estáticos registrados en el pozo uno.

Debiendo mencionar que los niveles estáticos de los meses desde febrero y septiembre 2014 se mantienen con valores de 11.6 a 11.7 m es decir, la recarga del acuífero de debe a la infiltración del agua precipitada en el año 2013, mientras que las precipitaciones registradas en el año 2014, mostraron relación solamente en el mes de septiembre 2014 y mayo 2015, la disminución de los niveles de agua desde el mes de octubre 2014 hasta abril 2015 se debe a la extracción de agua del pozo, para uso doméstico y agrícola debido a la sequía meteorológica que afectó parte oriental y paracentral del país abarcando el departamento de San Vicente.

La recarga del acuífero pudo producirse de manera lenta, debido que la recarga por infiltración en la zona conocida como lahares tiene una capacidad de infiltración de $24.58 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$, con una capacidad de recarga del 21.22%, es decir, las extracciones de agua del pozo superaron la recarga de este.

7.2.2. Relación de la precipitación con los niveles estáticos del pozo dos

Para comprobar la relación de las variables, precipitación y niveles de agua del pozo dos en la zona norte de la subcuenca del río Acahuapa se utilizó los datos de precipitación obtenidos del Centro de Investigación Ambiental de la Facultad Multidisciplinaria Paracentral y el

Ministerio de medio ambiente y recursos naturales, los datos de los Niveles estáticos promediados del sensor ubicado en el pozo dos (Cuadro 14).

Posteriormente se graficó en la hoja electrónica Excel los datos promediados de las variables, obteniendo el gráfico que muestra la relación existen entre la precipitación con los niveles estáticos (Figura 2). Observándose que los niveles estáticos disminuyeron considerablemente desde el mes de julio de 2014, debido a las extracciones de agua para uso doméstico y agrícola que ocasionó la sequía meteorológica que afectó la zona paracentral durante aproximadamente 31 días, y que generó pérdidas considerables en los cultivos de granos básicos y por ello recurrieron a utilizar el agua del pozo para suplir las necesidades de riego y uso cotidiano.

Cuadro 14. Comparación entre los niveles estáticos y las precipitaciones registradas en el pozo dos.

	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J
Niveles estáticos	0.00	9.98	9.99	9.99	10.00	10.00	9.79	9.78	9.77	9.76	9.74	9.72	9.70	9.70	9.69	9.69	9.72
Precipitación	0.00	0.00	17.00	5.00	158.00	213.00	96.00	403.00	529.90	259.10	40.50	0.00	0.00	4.70	11.60	35.80	241.90

Relación de la precipitación con los niveles estáticos en el pozo dos, registrados en el periodo 2014-2015

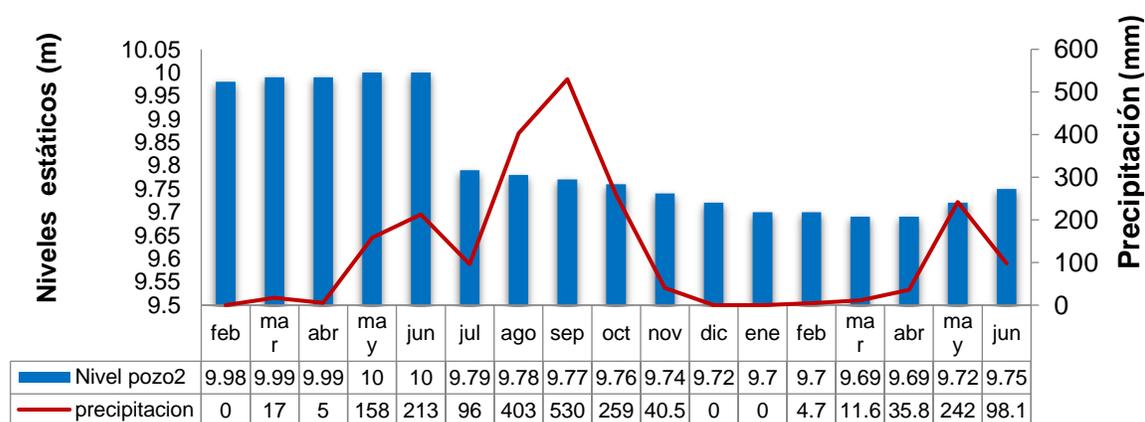


Figura 2. Representación de la relación entre la precipitación y los niveles estáticos registrados en el pozo dos.

No obstante, al iniciar la temporada lluviosa del año 2015, para el mes de mayo la precipitación registrada está relacionada con los niveles estáticos, probablemente influya en los niveles estáticos posteriores, debido al tiempo que tarda el acuífero en aumentar su nivel piezométrico, que según el estudio realizado por Marinero Orantes (2016), la recarga total por infiltración es 19.52%, con una textura de suelo franco y capacidad de infiltración $8.96 \text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$. En la gráfica es evidente que la relación del nivel de agua del pozo con la precipitación es del 29% según la correlación de las variables en SPSS, solamente en el mes de mayo de 2015 se observa que existe relación.

7.2.3. Relación de los niveles estáticos y temperaturas del pozo uno

Para relacionar los niveles estáticos y las temperaturas se utilizaron los promedios de los datos colectados por los sensores *Levelogger* que aparecen en el Cuadro 11.

Se observa claramente la relación de los niveles estáticos y las temperaturas registradas en el pozo uno, aunque hay variaciones en los niveles de agua que aumentan mientras las temperaturas tienden a disminuir en los meses de julio 2014 hasta febrero de 2015 (Figura 3). La relación se representa en un 91%, ya que la correlación obtenida en SPSS determinó que las variables tienen una relación fuerte entre ambas.

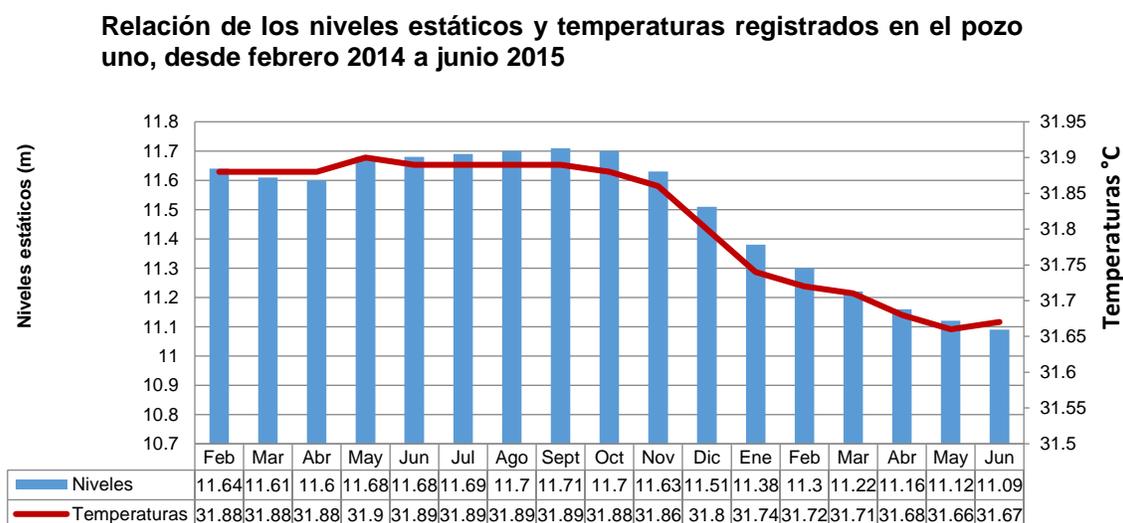


Figura 3. Representación del comportamiento de los niveles estáticos y temperaturas en el pozo uno.

7.2.4. Relación de los niveles estáticos y temperaturas del pozo dos

Para graficar la relación entre los niveles estáticos y temperaturas del pozo dos (Cuadro 12), se elaboró a través de una hoja electrónica de Excel, obteniendo la relación entre las variables temperaturas y niveles de agua se muestra un aumento en los niveles de agua representados en los meses de febrero hasta junio 2014 (Figura 4).

Las temperaturas se mantuvieron similares en los mismos meses, aunque, en los meses siguientes desde el mes de julio 2014 hasta el mes de abril de 2015, se observa una disminución considerable en los niveles de agua y temperatura manteniéndose relacionados entre sí. Por tanto, la relación de los niveles de agua con la temperatura es del 91%, según la correlación de las variables en el sistema SPSS.

7.3. Correlación r de Spearman

Para realizar el cálculo de correlación r de Spearman (Martínez Ortega *et al.* 2009), se utilizó la información contenida de las precipitaciones estacionales, los niveles estáticos y temperaturas promediados de los sensores *Levellogger*.

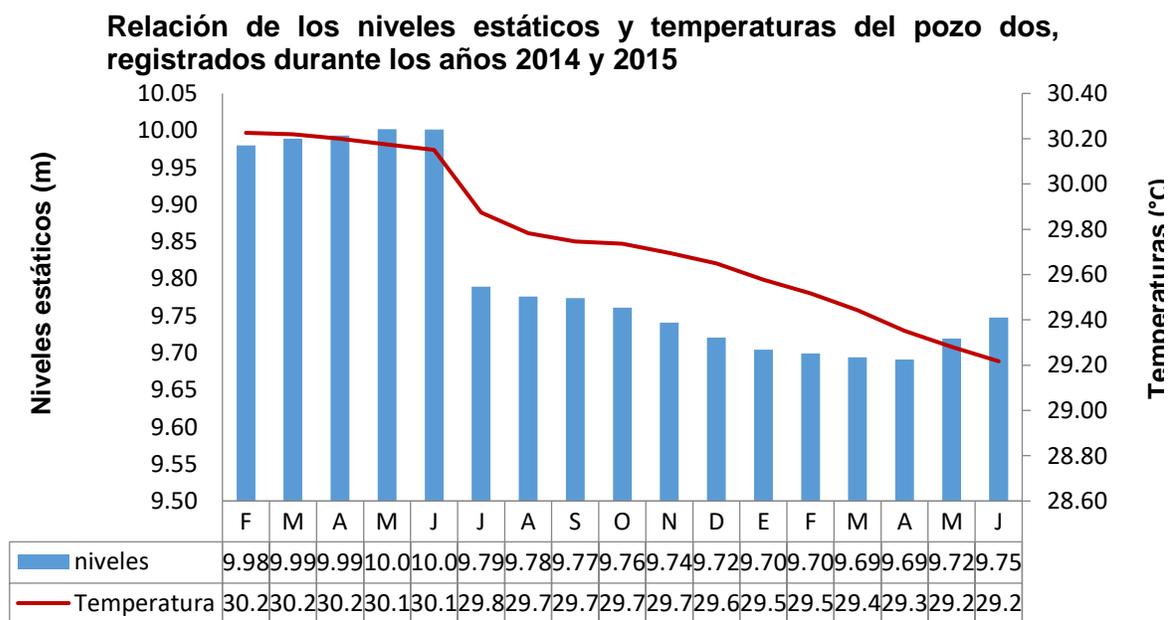


Figura 4. Representación del comportamiento de los niveles estáticos y temperaturas registrados en el pozo dos.

7.3.1. Correlación r de Spearman para las variables precipitación y niveles estáticos del pozo uno

Para calcular el coeficiente rho de Spearman, se utilizó una hoja de cálculo de Excel, donde las variables precipitación y niveles estáticos, son determinadas en el rango x e y, el rango x corresponde a las precipitaciones y el rango y corresponde a los niveles estáticos, la diferencia (d) es la resta de ambos rangos, el valor de d2 corresponde a la diferencia al cuadrado, obteniendo los resultados que aparecen a continuación (Cuadro 15).

Realizando el cálculo del correlativo r de Spearman (Anexo 33), el resultado es $r = 0.47671569$, la interpretación según las escalas es la siguiente: Escala uno; el coeficiente tiene relación lineal débil entre las dos variables, Escala dos; según la escala dos no tiene correlación, Escala tres; es mala, Escala cuatro; la relación de la precipitación y los niveles estáticos es débil.

Cuadro 15. Cálculo de coeficiente r de Spearman, según las variables precipitación y nivel estático del pozo uno.

No	Precipitación	Nivel estático	rango x	rango y	d	d2
1	0.0	11.64	2	11.0	9.0	81.00
2	17.0	11.61	7	9.0	2.0	4.00
3	5.0	11.60	5	8.0	3.0	9.00
4	158.0	11.68	12	12.5	0.5	0.25
5	213.0	11.68	13	12.5	-0.5	0.25
6	96.0	11.69	10	14.0	4.0	16.00
7	403.0	11.70	16	15.5	-0.5	0.25
8	529.9	11.71	17	17.0	0.0	0.00
9	259.1	11.70	15	15.5	0.5	0.25
10	40.5	11.63	9	10.0	1.0	1.00
11	0.0	11.51	2	7.0	5.0	25.00
12	0.0	11.38	2	6.0	4.0	16.00
13	4.7	11.30	4	5.0	1.0	1.00
14	11.6	11.22	6	4.0	-2.0	4.00
15	35.8	11.16	8	3.0	-5.0	25.00
16	241.9	11.12	14	2.0	-12.0	144.00
17	98.1	11.09	11	1.0	-10.0	100.00
Total						427.00

Finalmente, se comprobó el resultado de la correlación de las variables precipitación con los niveles estáticos del pozo uno mediante sistema IBM SPSS Statistics, utilizando la fórmula Rho de Spearman (Cuadro 16) y el mapa de la relación (Anexo 15).

Según la interpretación de los resultados escritos por Martínez Ortega *et al.* (2009), el valor obtenido del Coeficiente de correlación Rho de Spearman es $r = 0.475$, es positiva moderadamente fuerte debido al valor obtenido que está más cercano a 0.5, es decir, que las variables en estudio están relacionadas entre sí (Cuadro 16).

7.3.2. Correlación r de Spearman para las variables precipitación y niveles estáticos del pozo dos

Para calcular el coeficiente r de Spearman, se utilizó una hoja de cálculo de Excel, donde las variables precipitación y niveles estáticos, son determinadas en el rango x e y, el rango x corresponde a las precipitaciones y el rango y corresponde a los niveles estáticos, la diferencia (d) es la resta de ambos rangos, el valor de d^2 corresponde a la diferencia al cuadrado, obteniendo los resultados que se detallan a continuación (Cuadro 17).

La interpretación del correlativo de Spearman para el valor obtenido $r = 0.2935049$, según las escalas que representan los resultados es la siguiente: Escala 1; el coeficiente de correlación oscila entre -1 y 1, Escala 2; la correlación es negativa fuerte moderada débil, Escala 3; es correlación mala porque su valor es $r < 0.5$, Escala 4; la relación es débil (Cuadro 18).

Cuadro 16. Correlación de las variables precipitación y niveles estáticos del pozo uno.

		Precipitación	Nivel estático
Rho de Spearman	Precipitación	Coeficiente de correlación	1.000
		Sig. (bilateral)	0.054
		N	17
	Nivel estático	Coeficiente de correlación	0.475
		Sig. (bilateral)	0.054
		N	17

Cuadro 17. Coeficiente de correlación r de Spearman, de las variables precipitación y niveles estáticos, en el pozo dos.

No	Precipitación	Nivel estático	rango x	rango y	d	d2
1	0.00	9.98	2	13.0	11.0	121.00
2	17.00	9.99	7	14.5	7.5	56.25
3	5.00	9.99	5	14.5	9.5	90.25
4	158.00	10.00	12	16.5	4.5	20.25
5	213.00	10.00	13	16.5	3.5	12.25
6	96.00	9.79	10	12.0	2.0	4.00
7	403.00	9.78	16	11.0	-5.0	25.00
8	529.90	9.77	17	10.0	-7.0	49.00
9	259.10	9.76	15	9.0	-6.0	36.00
10	40.50	9.74	9	7.0	-2.0	4.00
11	0.00	9.72	2	5.5	3.5	12.25
12	0.00	9.70	2	3.5	1.5	2.25
13	4.70	9.70	4	3.5	-0.5	0.25
14	11.60	9.69	6	1.5	-4.5	20.25
15	35.80	9.69	8	1.5	-6.5	42.25
16	241.90	9.72	14	5.5	-8.5	72.25
17	98.10	9.75	11	8.0	-3.0	9.00
Total						576.50

Finalmente se comprobó el resultado mediante el sistema SPSS, y se elaboró el mapa de las relaciones (Anexo 16).

Cuadro 18. Correlación de las variables precipitación y niveles estáticos del pozo dos.

Correlaciones				
			Precipitación	Nivel estático
Rho de Spearman	Precipitación	Coeficiente de correlación	1.000	0.290
		Sig. (bilateral)		0.260
		N	17	17
	Nivel estático	Coeficiente de correlación	0.290	1.000
		Sig. (bilateral)	0.260	
		N	17	17

Según la interpretación de los resultados escritos por Martínez Ortega *et al.* (2009), el valor obtenido de Rho de Spearman es $r = 0.290$, la correlación es positiva moderadamente débil, por que el valor se encuentra en medio del rango de 0 – 0.49 (Cuadro 18).

7.3.3. Correlación r de Spearman para las variables niveles estáticos y temperaturas del pozo uno

La interpretación del coeficiente de correlación Rho de Spearman para las variables niveles estáticos y temperaturas del pozo uno, mediante las escalas detalladas por Martínez Ortega *et al.* 2009, son las siguientes: Escala uno; el coeficiente de correlación oscila entre 0 y 1, indica que si existe relación lineal entre las dos variables en estudio, Escala dos; la correlación es positiva moderada fuerte ya que su valor obtenido fue $R = 0.91237745$, Escala tres; la relación es Excelente, cuyo rango oscila entre $R = 0.9 \leq R < 1$, y la Escala cuatro; el rango oscila entre 0.76 – 1.00 y la relación es entre fuerte y perfecta (Cuadros 19 y 20).

Cuadro 19. Cálculo de coeficiente de correlación r de Spearman, según las variables niveles estáticos y temperaturas del pozo uno.

No	Nivel estático	Temperatura	rango x	rango y	d	d2
1	11.64	31.88	11.0	10.5	0.5	0.25
2	11.61	31.88	9.0	10.5	-1.5	2.25
3	11.60	31.88	8.0	10.5	-2.5	6.25
4	11.68	31.90	12.5	17.0	-4.5	20.25
5	11.68	31.89	12.5	14.5	-2.0	4.00
6	11.69	31.89	14.0	14.5	-0.5	0.25
7	11.70	31.89	15.5	14.5	1.0	1.00
8	11.71	31.89	17.0	14.5	2.5	6.25
9	11.70	31.88	15.5	10.5	5.0	25.00
10	11.63	31.86	10.0	8.0	2.0	4.00
11	11.51	31.80	7.0	7.0	0.0	0.00
12	11.38	31.74	6.0	6.0	0.0	0.00
13	11.30	31.72	5.0	5.0	0.0	0.00
14	11.22	31.71	4.0	4.0	0.0	0.00
15	11.16	31.68	3.0	3.0	0.0	0.00
16	11.12	31.66	2.0	1.0	1.0	1.00
17	11.09	31.67	1.0	2.0	-1.0	1.00
					Total	71.5

Cuadro 20. Correlación de las variables niveles estáticos y temperaturas del pozo uno.

Correlaciones				
			Nivel estático	Temperatura
Rho de Spearman	Nivel estático	Coeficiente de correlación	1.000	0.911
		Sig. (bilateral)		<.001
		N	17	17
	Temperatura	Coeficiente de correlación	0.911	1.000
		Sig. (bilateral)	<.001	
		N	17	17

Para comprobar este resultado se realizó la correlación Rho de Spearman a través del sistema IBM SPSS (Cuadro 20). Además, se elaboró el mapa de las relaciones (Anexo 17).

El coeficiente de correlación Rho de Spearman es $r = 0.911$, indica que, la relación entre las dos variables en estudio, debido que su interpretación es positiva moderadamente fuerte con un rango de 0.76 – 1.00, es decir, es una relación entre fuerte y perfecta (Anexo 33).

7.3.4. Correlación r de Spearman para las variables niveles estáticos y temperaturas del pozo dos

En la hoja de cálculo de Excel, donde las variables niveles estáticos y temperaturas, son determinadas en el rango x e y, el rango x corresponde a las precipitaciones y el rango y corresponde a los niveles estáticos, la diferencia (d) es la resta de ambos rangos, el valor de d^2 corresponde a la diferencia al cuadrado, obteniendo el resultado en el (Cuadro 21).

La interpretación del coeficiente de correlación Rho de Spearman para las variables niveles estáticos y temperaturas del pozo uno, mediante las escalas detalladas por Martínez Ortega *et al.* 2009, son las siguientes: Escala uno; el coeficiente de correlación oscila entre 0 y 1, indica que si existe relación lineal entre las dos variables en estudio, Escala dos; la correlación es positiva moderada fuerte ya que su valor obtenido fue $R = 0.85477941$, Escala tres; la relación es buena, cuyo rango oscila entre $R = 0.8 \leq R < 0.9$, y la Escala cuatro; el rango oscila entre 0.76 – 1.00 y la relación es entre fuerte y perfecta (Anexo 33).

Se comprobó el resultado anterior, mediante el Sistema IBM SPSS, para calcular la correlación Rho de Spearman (Cuadro 22) y el mapa de las relaciones (Anexo 18).

Cuadro 21. Cálculo de coeficiente de correlación r de Spearman, según las variables niveles estáticos y temperaturas del pozo dos.

No	Nivel estático	Temperatura	rango x	rango y	d	d ²
1	9.98	30.23	13.0	17.0	4.0	16.00
2	9.99	30.22	14.5	16.0	1.5	2.25
3	9.99	30.20	14.5	15.0	0.5	0.25
4	10.00	30.18	16.5	14.0	-2.5	6.25
5	10.00	30.15	16.5	13.0	-3.5	12.25
6	9.79	29.87	12.0	12.0	0.0	0.00
7	9.78	29.78	11.0	10.5	-0.5	0.25
8	9.77	29.78	10.0	10.5	0.5	0.25
9	9.76	29.74	9.0	9.0	0.0	0.00
10	9.74	29.70	7.0	8.0	1.0	1.00
11	9.72	29.65	5.5	7.0	1.5	2.25
12	9.70	29.58	3.5	6.0	2.5	6.25
13	9.70	29.52	3.5	5.0	1.5	2.25
14	9.69	29.44	1.5	3.5	2.0	4.00
15	9.69	29.44	1.5	3.5	2.0	4.00
16	9.72	29.28	5.5	2.0	-3.5	12.25
17	9.75	29.22	8.0	1.0	-7.0	49.00
Total						118.50

Cuadro 22. Correlación de las variables niveles estáticos y temperaturas del pozo dos.

Correlaciones				
			Nivel estático	Temperatura
Rho de Spearman	Nivel estático	Coeficiente de correlación	1.000	0.854
		Sig. (bilateral)		<.001
		N	17	17
	Temperatura	Coeficiente de correlación	0.854	1.000
		Sig. (bilateral)	<.001	
		N	17	17

El coeficiente de correlación Rho de Spearman realizado en SPSS es $r = 0.854$, corresponde a una relación positiva moderadamente fuerte, que según el rango de 0.76 – 1.00, está dentro de una relación entre fuerte y perfecta (Anexo 33).

8. CONCLUSIONES

Para la relación entre precipitación y niveles de agua se concluye que:

1. Existe relación de la precipitación con los niveles de agua de los pozos, aunque debido a factores como la sequía meteorológica pueden disminuir los niveles de agua por la extracción de agua de los acuíferos para uso doméstico y agrícola.
2. En los pozos en estudio la disminución de los niveles de agua se debió a la sequía meteorológica que duró aproximadamente 31 días en la zona oriental abarcando el departamento de San Vicente que impactó de forma considerable en la recarga subterránea, es decir, que la recarga de los acuíferos si está climatológicamente influenciada por los períodos secos y de lluvia.

En cuanto a la relación entre temperaturas y niveles de agua, se concluye que:

1. La relación de los niveles estáticos y las temperaturas, mediante el cálculo de correlación Rho de Spearman, se obtuvo un valor de $r = 0.9123$ para el pozo uno y $r = 0.854$ para el pozo dos.
2. La relación entre la precipitación y las temperaturas de los pozos están definidas por el clima de la zona, es decir que, al aumentar los niveles estáticos debido a la precipitación, también aumenta la temperatura del agua.
3. Existe correlación entre las variables, de manera positiva y moderadamente fuerte, que según los rangos 0.76 – 1.00, corresponde a una relación fuerte y perfecta entre los niveles estáticos y las temperaturas de ambos pozos.

9. RECOMENDACIONES

1. Para obtener un resultado más preciso de la precipitación en la zona de estudio es necesario contar con un pluviómetro que esté siendo monitoreado muy cerca del pozo que se desea analizar, esto permitirá determinar si la recarga del acuífero coincide con los datos obtenidos en los *Levellogger*.
2. Se debe analizar por medio de un infiltómetro la recarga del acuífero para determinar si la recarga del acuífero coincide con los datos registrados en los *Levellogger*.
3. Para calcular el valor Rho de Spearman se debe realizar un cálculo por medio de una hoja electrónica de Excel y luego comprobar el resultado por medio del sistema IBM SPSS Statistics, para obtener un resultado más preciso.
4. Para introducir los datos en el Sistema IBM SPSS, es necesario utilizar una variable ID o número correlativo que muestre la relación de las variables en el mapa de relaciones.
5. Para nuevas investigaciones se recomienda realizar monitoreo de geología y topografía, capacidad de infiltración, recarga de infiltración, recarga total del acuífero, en la zona de estudio específicamente donde se encuentre el pozo, para determinar si los datos obtenidos coinciden con los datos obtenidos en los sensores *Levellogger*.
6. En la realización de nuevas investigaciones se debe tomar en cuenta los períodos de sequía que puedan afectar o diferenciar los resultados obtenidos de la correlación de las variables.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Amaya Meléndez, LA; Montalvo Alfaro, CR; Rivas Castro, S. 2019. Análisis de las variaciones anuales de la precipitación en la zona comprendida entre los municipios de Guadalupe y de San Vicente, El Salvador C.A. Tesis Ing. Agr. San Vicente, El Salvador, UES. 93 p.
- ANAM (Autoridad Nacional del ambiente, Panamá). 2013. Las Aguas subterráneas de la región del Arco seco y la importancia de su conservación (en línea). Panamá. 51 p. Consultado 3 feb. 2020. Disponible en <https://fliphtml5.com/eebm/ltvc/basic>
- ANDA (Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados, El Salvador). s. f. Norma técnica para CA la perforación de pozos profundos en la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (en línea). San Salvador, El Salvador. 26 p. Consultado 15 ago. 2020. Disponible en https://www.academia.edu/27964771/NORMA_TECNICA_PARA_LA_PERFORACION_DE_POZOS_PROFUNDOS_EN_LA_ADMINISTRACION_NACIONAL_DE_ACUEDUCTOS_Y_ALCANTARILLADOS
- Angelone, S; Garibay, MT; Casaux, MC. 2006. Geología y Geotecnia: permeabilidad de suelos (en línea). Universidad Nacional de Rosario. Argentina. 39 p. Consultado 3 feb. 2020. Disponible en <https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad%20en%20Suelos.pdf>
- Ayala, JR. 2003. Selección, instalación y mantenimiento de redes para la monitorización de aguas subterráneas. Madrid, España. 13 p. Consultado 15 ago. 2020. Disponible en https://www.igme.es/ACTIVIDADESIGME/LINEAS/HIDROYCA/publica/libros2_TH/lib106/pdf/lib106/in_3d.pdf
- Bellino, NO. 2012. Aguas subterráneas: conocimiento y explotación (en línea). Universidad de Buenos Aires. Argentina. 227 p. Consultado 3 feb. 2020. Disponible en https://cms.fi.uba.ar/uploads/aguasubterraneas_2012_fe69895e76.pdf

Busnelli, J. 2018. Aguas subterráneas: hidrografía y geografía (en línea). Tucumán, Argentina, UNT. 32 p. Consultado 12 jul. 2020. Disponible en <https://docplayer.es/22295793-Aguas-subterraneas-hidrografia-geografia-facultad-de-filosofia-y-letras-u-n-t-jose-busnelli.html>

CEIA (Centro de Investigación Ambiental de la Facultad Multidisciplinaria Paracentral de la Universidad de El Salvador). s. f. Datos de precipitación de los años 2014 y 2015. San Vicente, El Salvador. s. p.

Chávez Gómez, JD; Flores Martínez, JA; Paíz Saravia, EJ. 2017. Caracterización de zonas potenciales de recarga acuífera en el Municipio de San Jorge, San Miguel, El Salvador (en línea). Tesis Ing. Agr. San Vicente, El Salvador, UES. 123 p. Consultado 12 jul. 2020. Disponible en <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/15044/1/Caracterizaci%C3%B3n%20de%20zonas%20potenciales%20de%20recarga%20acu%C3%ADfera.pdf>

Collazo Caraballo, MP; Montañó Xavier, J. 2012. Manual de agua subterránea (en línea). Montevideo, Uruguay. 121 p. Consultado 14 jul. 2020. Disponible en http://www.ose.com.uy/descargas/reclutamiento/ci_0006_16_manual_agua_subterranea.pdf

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua, México). s. f. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: rehabilitación de pozos (en línea). México DF, México. 172 p. Consultado 14 jul. 2020. Disponible en <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro40.pdf>

Dimas, L. 2005. La situación del recurso hídrico en El Salvador (en línea). Boletín SIE. El Salvador. N.º 235. 8 p. Consultado 10 jul. 2020. Disponible en <https://docplayer.es/14164599-La-situacion-del-recurso-hidrico-en-el-salvador.html>

EGA (Equipo Gestor Ambiental, El Salvador). 2012. Diagnóstico ambiental participativo del municipio de San Vicente (en línea). San Vicente, El Salvador. 140 p. Consultado 15 jul. 2020. Disponible en <https://www.caritas.sv/nuestro-trabajo/documentos/educativos/29-diagnostico-ambiental-participativo-del-municipio-de-san-vicente-sept-2012/file>

Evans, JM. (Servicio Geológico de los Estados Unidos, Estados Unidos). s. f. Diagrama del ciclo del agua (en línea, blog). Colorado, Estados Unidos, USGS. Consultado 1 ago. 2023. Disponible en: <https://water.usgs.gov/gotita/watercyclegraphic.html>

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Italia). 2013. Captación y almacenamiento de agua de lluvia: opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. 270 p. Consultado 5 may. 2020. Disponible en <https://www.fao.org/3/i3247s/i3247s.pdf>

Fibras y Normas de Colombia S.A.S. 2023. Aguas subterráneas, definición, importancia, formas de extracción, tipos de contaminación y recomendaciones (en línea, blog). Colombia. Consultado 19 ago. 2023. Disponible en <https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/aguas-subterraneas-definicion-importancia-formas-de-extraccion-tipos-de-contaminacion-y-recomendaciones/>

Freeze, RA; Cherry, JA. 1979. Groundwater (en línea). New Jersey, Estados Unidos, Prentice-Hall, Inc. 606 p. Consultado 20 ago. 2020. Disponible en <https://www.unigrac.org/sites/default/files/resources/files/Groundwater%20book%20-%20English.pdf>

Fuentes Yagüe, JL. 1993. Aguas Subterráneas (en línea). Ministerio de Agricultura, pesca y alimentación. Madrid, España, Rivadncncyra, S. A. 32 p. Hojas divulgadoras Núm. 1/92 HD. Consultado 17 mar. 2021. Disponible en https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1992_01.pdf

GWP (Asociación Mundial para el Agua, Suecia). 2017. La situación de los recursos hídricos en Centro América: hacia una gestión integrada (en línea). Tegucigalpa, Honduras. 100 p. Consultado 13 abr. 2021. Disponible en https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/situacion-de-los-recursos-hidricos_fin.pdf

González de Vallejo, LI; Ferrer, M; Ortuño, L; Oteo, C. 2002. Ingeniería geológica (en línea). Madrid, España, PEARSON Educación. 715 p. Consultado 3 feb. 2020. Disponible en https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5540850/mod_resource/content/1/Livro%202.pdf

- Herráiz, AS. 2009. La importancia de las aguas subterráneas (en línea). Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales 103(1):97-114. Consultado 4 abr. 2020. Disponible en https://www.dipucadiz.es/export/sites/default/transicion-ecologica-y-desarrollo-urbano-sostenible/.galeria_de_ficheros/docu_cursos_jornadas/jornada-agua-subterranea/informacion_general/Importancia-de-las-aguas-subterraneas.pdf
- López Serrano, OF; Delgado Martínez, SA. 2019. Caracterización de los niveles del agua subterránea del área metropolitana de Bucaramanga-Fase 1 (en línea). Tesis Ing. Bucaramanga, Colombia, UPB. 53 p. Consultado 10 ago. 2023. Disponible en <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/8265/39027.pdf?sequence=1>
- Machuca Laínez, JA. 2010. Propuesta de un sistema de alerta temprana para inundaciones en la cuenca del río Acahuapa de El Salvador (en línea). Tesis maestría. Guatemala, USAC. 87 p. Consultado 3 feb. 2019. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Jose-Machuca/publication/328517273_Proposal_for_an_early_warning_system_for_floods_in_the_Acahuapa_river_basin_of_El_Salvador/links/5bd219e24585150b2b875b69/Proposal-for-an-early-warning-system-for-floods-in-the-Acahuapa-river-basin-of-El-Salvador.pdf
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería, El Salvador). 2012. Clasificación de suelos por división política de El Salvador, C.A. (en línea). San Salvador, El Salvador. 82 p. Consultado 3 mar. 2019. Disponible en <https://www.transparencia.gob.sv/institutions/mag/documents/149632/download>
- Manzano Arellano, M. 2008. Trazado e Interpretación de superficies piezométricas (en línea). (22 p.). Asignaturas: hidrología subterránea (ITOP) / Hidrogeología (ITM). UPCT. Consultado 3 mar. 2020. Disponible en https://www.upct.es/~minaees/practica2_explicacion.pdf
- Marinero Orantes, EA. 2016. Caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea de la subcuenca del río Acahuapa, departamento de San Vicente, El Salvador. Tesis Maestría. San Vicente, El Salvador, UES. 179 p. Consultado 2 ene. 2019. Disponible en <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/10269/1/13101611.pdf>

MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, El Salvador). 2013. El agua y la vida son inseparables (en línea). San Salvador, El Salvador. 32 p. Consultado 3 mar. 2022. Disponible en <http://rcc.marn.gob.sv/xmlui/handle/123456789/188>

MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, El Salvador). 2015. Estudio de los cambios multitemporales en la cuenca del río Jiboa: informe geomorfológico (en línea). San Salvador, El Salvador. (20 p.). Consultado 3 mar. 2022. Disponible en <http://rcc.marn.gob.sv/bitstream/handle/123456789/186/ESTUDIO%20DE%20LOS%20CAMBIOS%20MULTITEMPORALES%20DEL%20RIO%20JIBOA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, El Salvador). 2016. Cuatro años continuos de sequía en El Salvador: 2012 – 2015 (en línea). San Salvador, El Salvador. 42 p. Consultado 2 feb. 2020. Disponible en <https://cidoc.ambiente.gob.sv/documentos/docuemnto-sequia-meteorologica-edc2016-web-pdf/>

Ordoñez Gálvez, JJ. 2011. Aguas subterráneas – Acuíferos (en línea). Lima, Perú, imprenta IBEGRAF. 41 p. Cartilla técnica “Contribuyendo al desarrollo de una cultura del agua y la gestión integral del recurso hídrico”. Consultado 20 feb. 2020. Disponible en https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subterraneeas.pdf

Martínez Ortega, RM; Tuya Pendás, LC; Martínez Ortega, M; Pérez Abreu, A; Cánovas, AM. 2009. El Coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización (en línea). Revista Habanera de Ciencias Médicas 8(2):(1-20). Consultado 20 feb. 2020. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/1804/180414044017.pdf>

Pissa Lizarazo, SA. 2015. Guía básica de construcción de pozos profundos en Colombia (en línea). Pereira, Colombia, Unilibre. 40 p. Consultado 3 jul. 2019. Disponible en <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/17141>

Raffo, JM. 1954. Variaciones de la napa freática en relación con la precipitación, la presión atmosférica y la temperatura. p. 99-110. Buenos Aires, Argentina.

RAMSAR (Convención sobre los humedales de importancia internacional, Suiza). 2016. Introducción a la convención sobre los humedales (en línea). 5 ed. Gland, Suiza. 117 p. Subserie I: Manual 1 Cooperación internacional sobre los humedales. Consultado 3 nov. 2020. Disponible en https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/handbook1_5ed_introductiontoconvention_s_final.pdf

Rincón Villalba, MA; Vargas Vargas, WE; González Vergara, CJ. 2017. Topografía: conceptos y aplicaciones (en línea). Colombia, ECOE Ediciones. 380 p. Consultado 8 sep. 2021. Disponible en <https://www.ecoediciones.com/wp-content/uploads/2018/02/Topograf%C3%ADa-Conceptos-y-aplicaciones-ebook.pdf>

Sánchez-Hernández, GA; Júnez-Ferreira, HE; Álvarez-Robles, W; González-Trinidad, J; Bautista-Capetillo, C; Herrera-Zamarrón, GS. 2017. Optimización del monitoreo del nivel del agua subterránea para una frecuencia fija (en línea). Tecnología y Ciencias del Agua 8(5):19-38. Consultado 12 ago. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-02>

Santillán Gutiérrez, E; Dávila-Vásquez, G; de Anda Sánchez, J; Díaz Torres, JJ. 2013. Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazones, Veracruz, México (en línea). Ambiente & Agua 8(3):104-117. Consultado 8 sep. 2021. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/928/92829234009.pdf>

Schosinsky N, G. 2006. Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos (en línea). Revista Geológica de América Central (34-35):13-30. Consultado 2 jun. 2019. Disponible en <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/download/4223/4047>

Schosinsky, G; Losilla, M. 2000. Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual (en línea). Revista Geológica de América Central 23:43-55. Consultado 12 jun. 2019. Disponible en <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/download/8579/8102/>

SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales, El Salvador). 2005. Balance hídrico integrado y dinámico en El Salvador: componente evaluación de recursos hídricos (en línea). San Salvador, El Salvador. 109 p. Consultado 2 feb. 2019. Disponible en <https://www.snet.gob.sv/Documentos/balanceHidrico.pdf>

Solinst Canadá Ltd. s. f. Instrumentos de alta calidad para el monitoreo de aguas subterráneas y superficiales (en línea). Ontario, Canadá. (24 p.). Ficha técnica. Consultado 3 ago. 2020. Disponible en <https://www.solinst.com/espanol/productos/ds/genspanish.pdf>

Villanueva Martínez, M; Iglesias López, A. 1984. Pozos y acuíferos: técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo (en línea). Madrid, España, IBERGESA. 426 p. Consultado el 19 de agosto de 2023. Disponible en https://www.igme.es/biblioteca/Libros_agotados/pozos_acuiferos_2.pdf

Weinzettel, PA; Usunoff, EJ. 2001. Cálculo de la recarga mediante la aplicación de la ecuación de Darcy en la zona no saturada (en línea). 2001, Barcelona, España. 225-231. Consultado 23 ago. 2020. Disponible en <https://host170.sedici.unlp.edu.ar/server/api/core/bitstreams/a235a6c3-65a4-4591-97c8-3dab477fdf89/content>

11. ANEXOS



Anexo 1. Representación esquemática del ciclo hidrológico.

Fuente: Tomado de Evans s. f.: s. p.



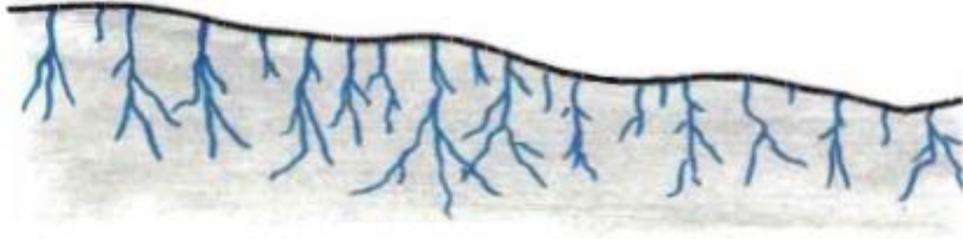
Anexo 2. Representación esquemática de un acuífero confinado.

Fuente: Tomado de Collazo Caraballo y Montano Xavier 2012:21.



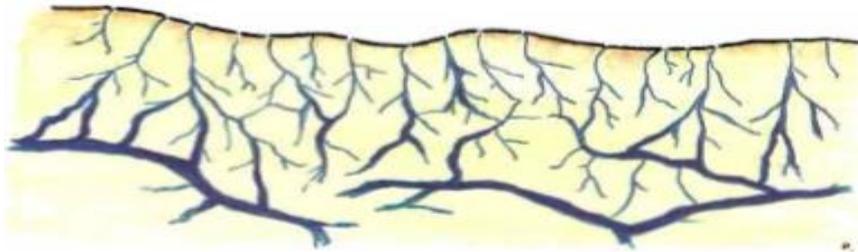
Anexo 3. Representación esquemática de un acuífero poroso.

Fuente: Tomado de Fuentes Yagüe 1993:7.



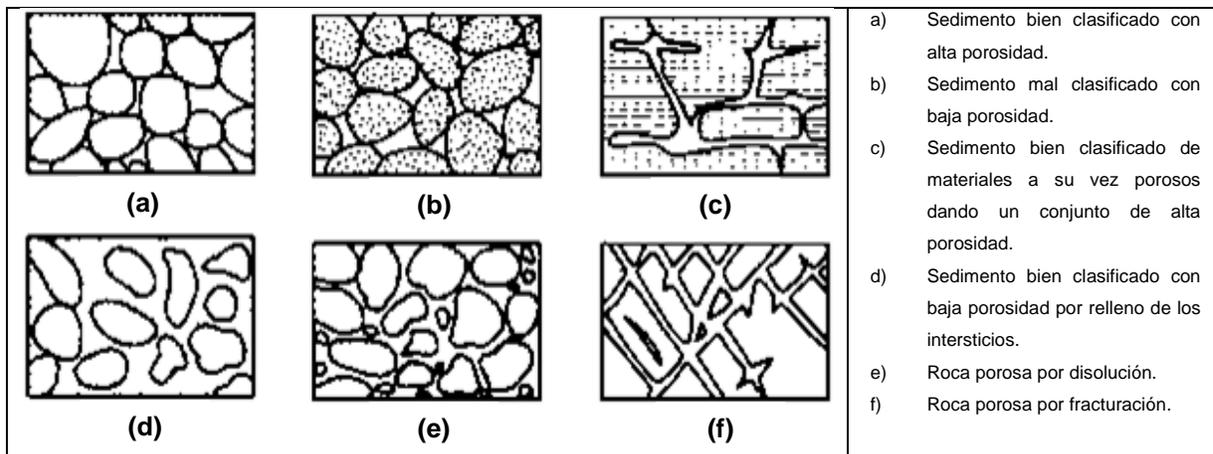
Anexo 4. Representación esquemática de un acuífero de porosidad secundaria.

Fuente: Tomado de Fuentes Yagüe 1993:8.



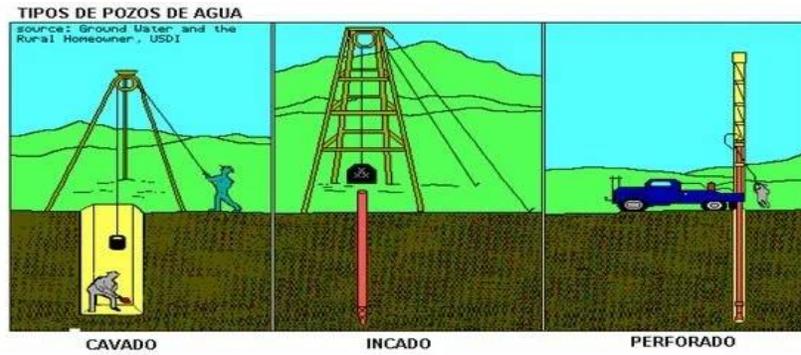
Anexo 5. Representación esquemática de un acuífero fisurado o kárstico.

Fuente: Fuentes Yagüe 1993:7.



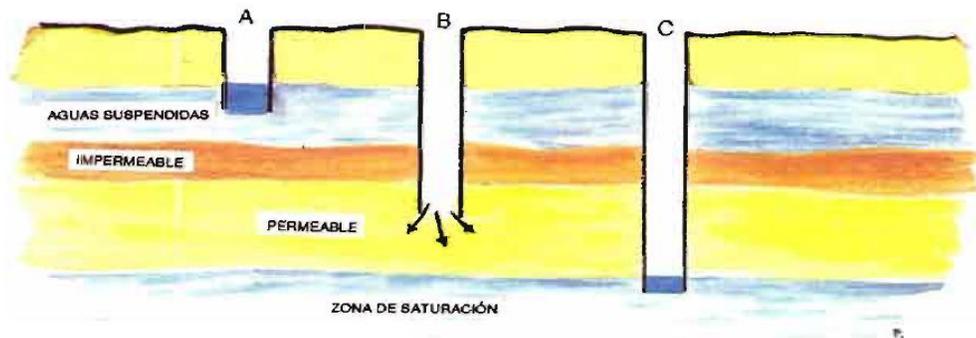
Anexo 6. Relación entre la textura y porosidad.

Fuente: Tomado de Marinero Orantes 2016:31.



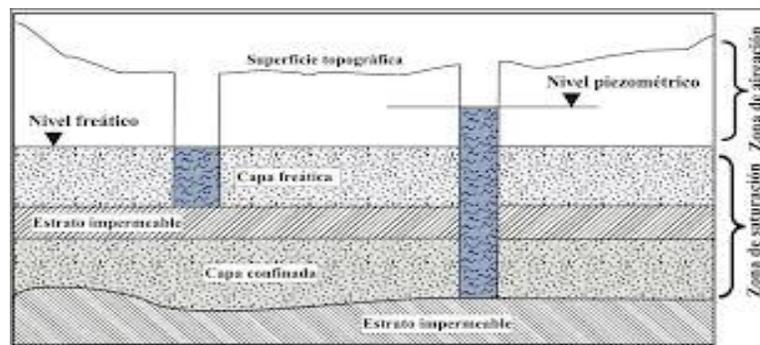
Anexo 7. Representación de los tipos de pozos.

Fuente: Tomado de Fibras y Normas de Colombia S.A.S. 2023:1.



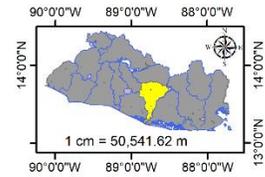
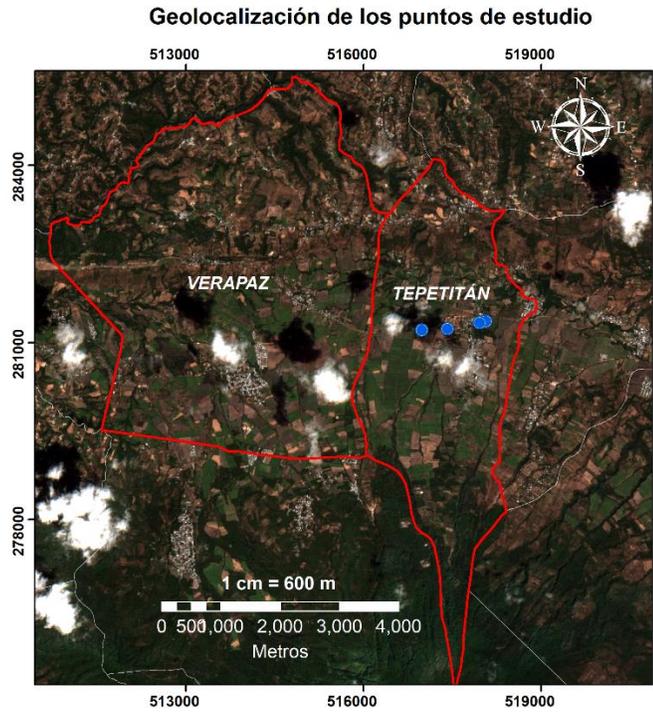
Anexo 8. Representación esquemática de las aguas suspendidas en capa impermeable.

Fuente: Tomado de Fuentes Yagüe 1993:5.



Anexo 9. Representación esquemática del nivel estático.

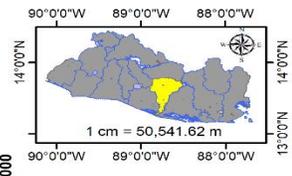
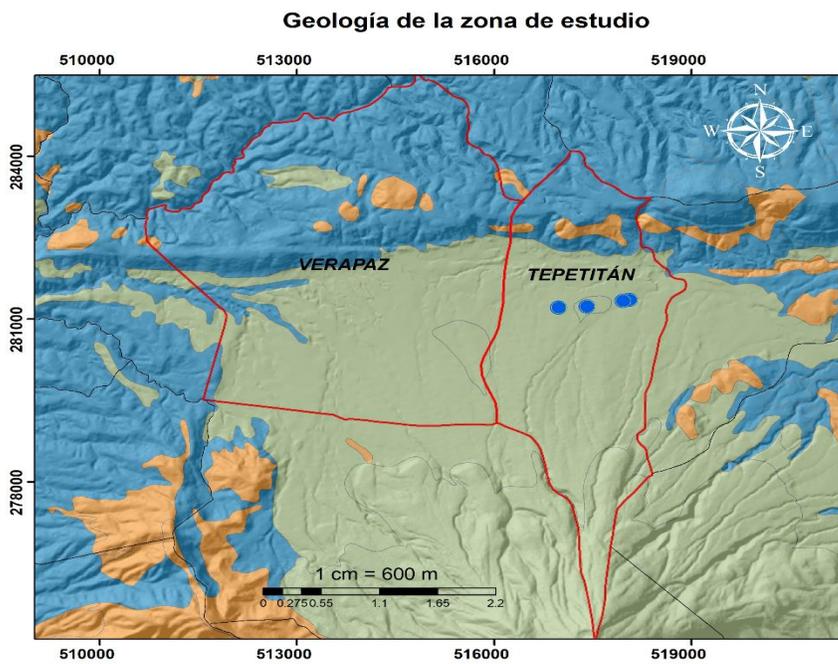
Fuente: Tomado de Busnelli 2018:1.



Proyección cónica conformal de Lambert
 Datun norteamericano de 1927
 Fuente: Base de datos de la
 Universidad de El Salvador.
 Facultad Multidisciplinaria Paracentral
 Autor:



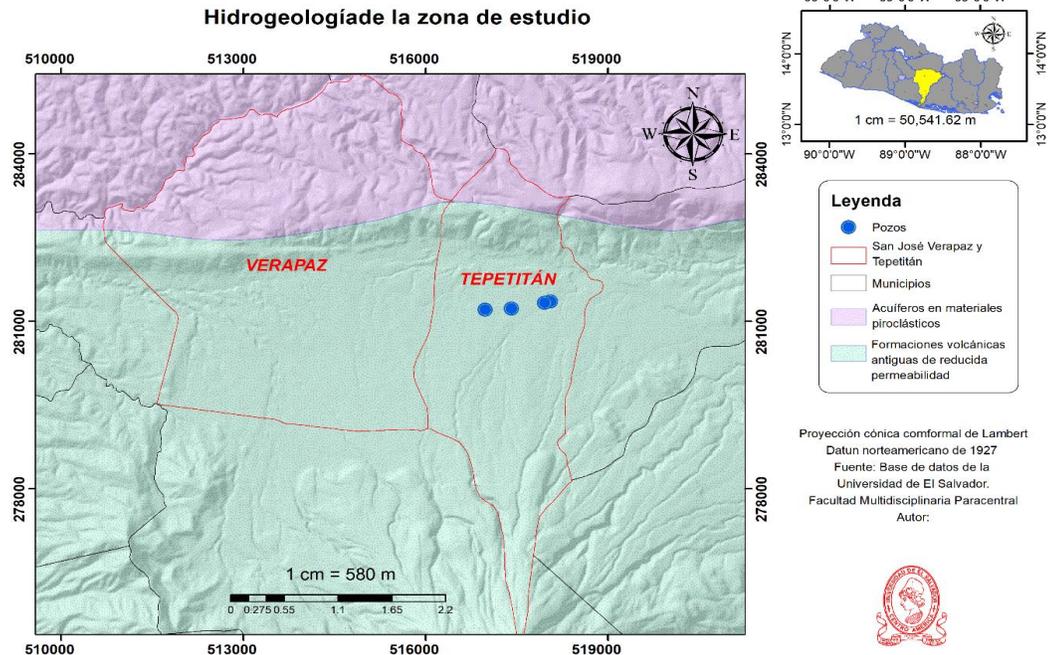
Anexo 10. Geolocalización del municipio de Tepetitán.



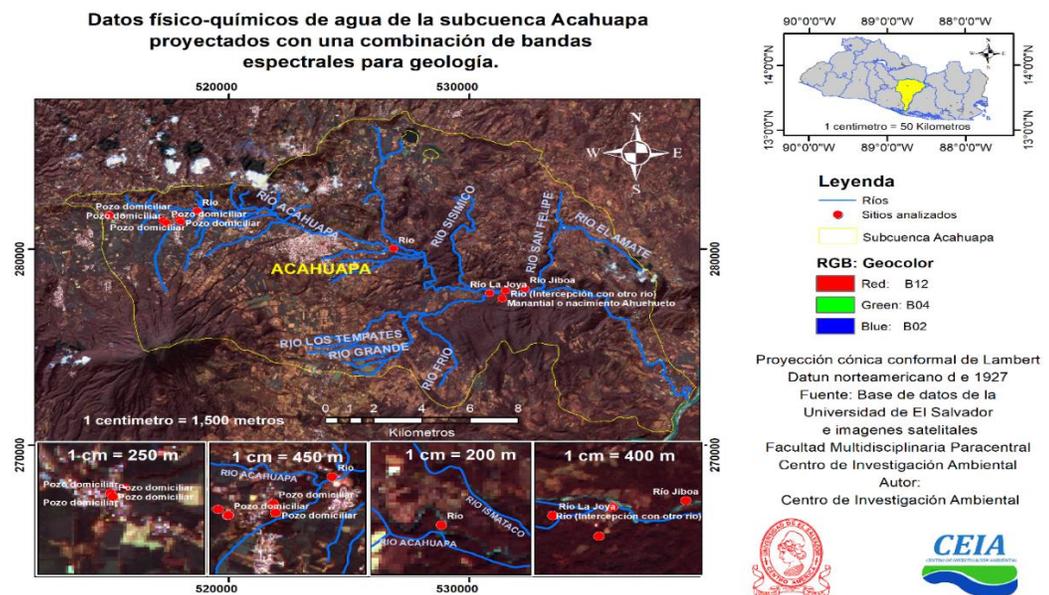
Proyección cónica conformal de Lambert
 Datun norteamericano de 1927
 Fuente: Base de datos de la
 Universidad de El Salvador.
 Facultad Multidisciplinaria Paracentral
 Autor:



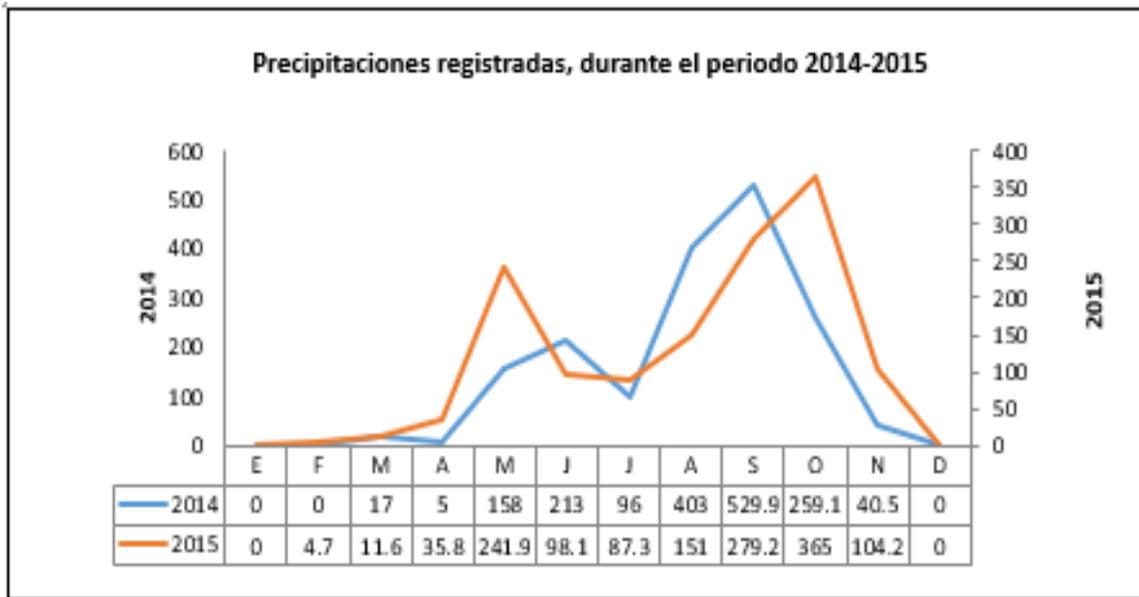
Anexo 11. Mapa geológico de la zona de estudio.



Anexo 12. Mapa de microcuencas perteneciente a la subcuenca del río Acahuapa.

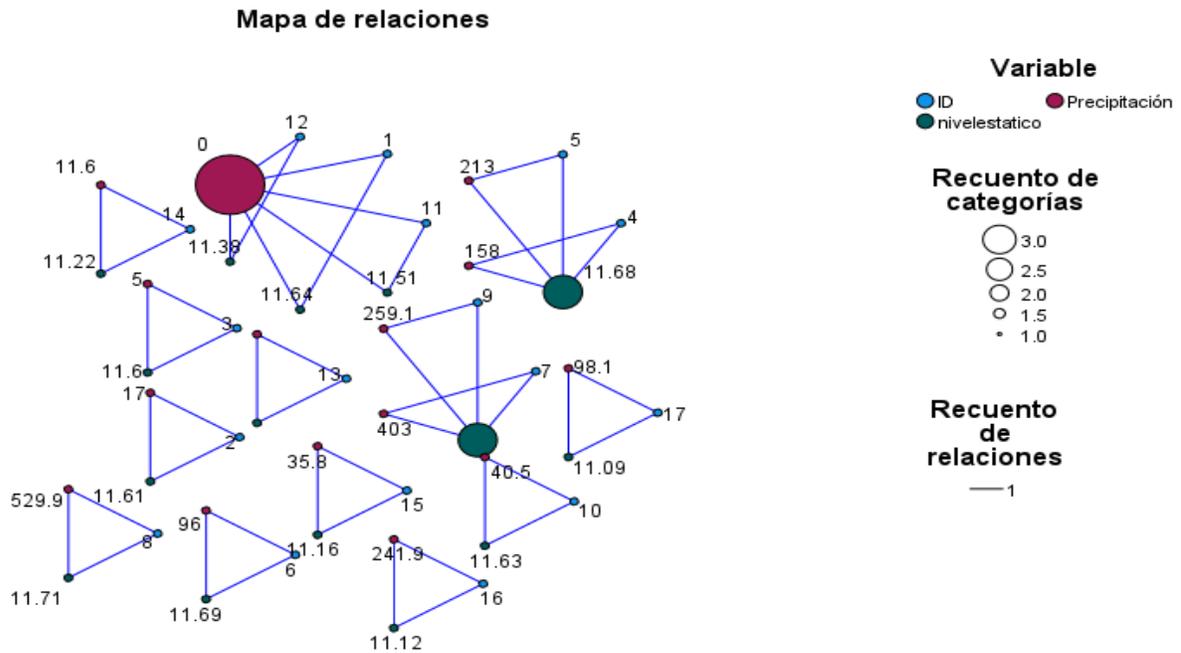


Anexo 13. Mapa de datos físicoquímicos de agua de la subcuenca Acahuapa.

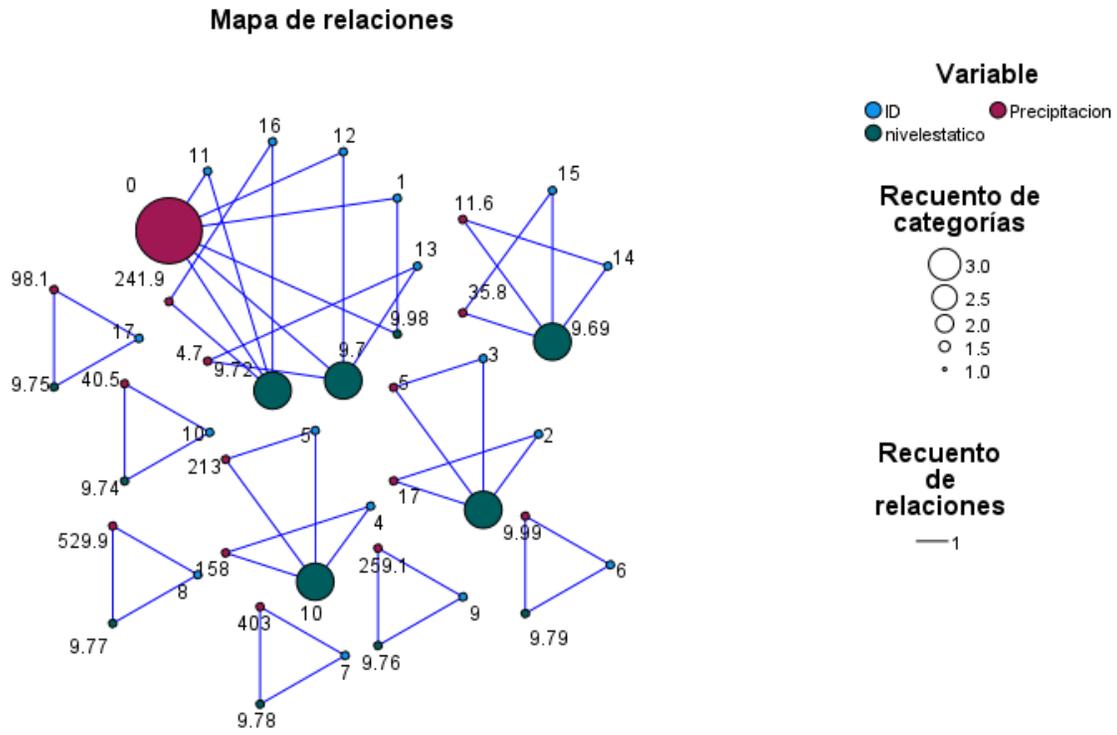


Anexo 14. Gráfica de las precipitaciones registradas, durante el periodo 2014-2015.

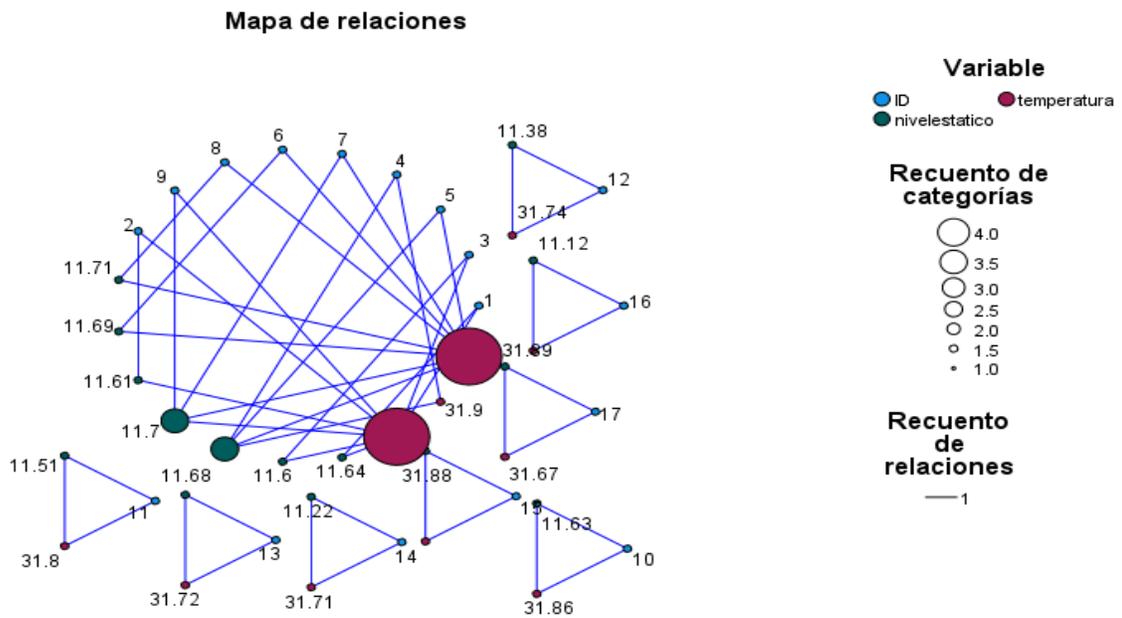
Fuente: Elaborado con base de CEIA-UES s. f.: s. p.



Anexo 15. Mapa de relaciones entre las variables precipitación y nivel estático del pozo uno.

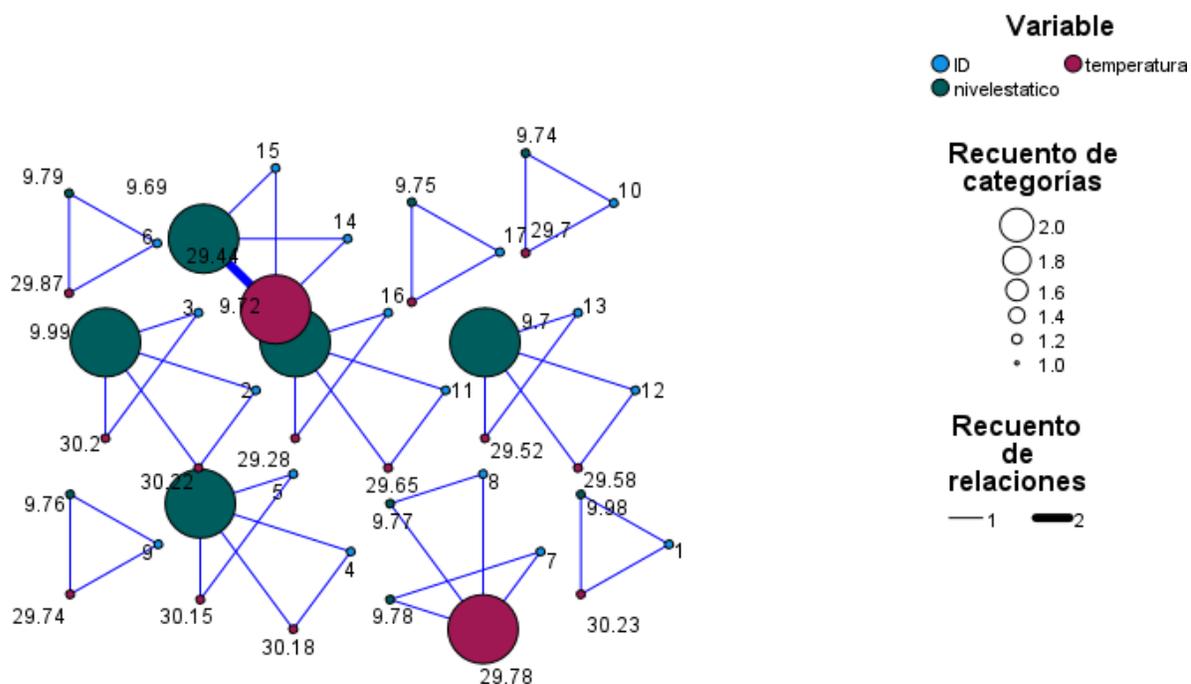


Anexo 16. Mapa de relaciones entre las variables precipitación y nivel estático del pozo dos.



Anexo 17. Mapa de relaciones entre los niveles estáticos y temperaturas del pozo uno.

Mapa de relaciones



Anexo 18. Mapa de la relación entre los niveles estáticos y temperatura del pozo dos.

Anexo 19. Tabla de comportamiento hidráulico de las formaciones geológicas.

Formación	Capacidad			Formaciones características
	Almacenamiento	Drenaje	Transmisión	
Acuíferos	Alta	Alta	Alta	Arenas, gravas, calizas
Acuitardo	Alta	Media/baja	Baja	Limos, arenas limosas y arcillosas, con estratos medianos a delgados
Acuicludos	Alta	Muy baja	Nula	Arcillas, lutitas, pizarras y micro conglomerados
Acuifugos	Nula	Nula	Nula	Granitos, gneises, mármoles

Fuente: Tomado de González de Vallejo *et al.* 2002:264.

Anexo 20. Valores de porosidad de rocas y sedimentos.

Materiales	n (%)
Depósitos no consolidados	
Gravas	25 – 50
Arenas	25 – 50
Limos	35 – 50
Arcillas	40 – 70
Rocas	
Basalto fracturado	5 – 50
Calizas Kársticas	5 – 50
Areniscas	5 – 30
Caliza dolomita	0 – 20
Pizarra	0 – 10
Rocas cristalinas fracturadas	0 – 10
Rocas cristalinas compactas	0 - 5

Fuente: Tomado de Freeze y Cherry 1979:37.

Anexo 21. Valores de permeabilidad (k).

K (m/día)	Calificación estimada	Posibilidades del acuífero
$K < 10^{-2}$	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica
$10^{-2} < K < 1$	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica
$1 < K < 10$	Media	Pozos entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresión teórica
$10 < K < 100$	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s de 10 m de depresión teórica
$100 < K$	Muy alta	Pozos con más de 100 l/s con 10 m de depresión teórica

Fuente: Tomado de Villanueva Martínez e Iglesias López 1984:21.

Anexo 22. Valores de transmisividad para diferentes tipos de materiales.

Calificación	Impermeables	Poco permeable	Algo permeable	Permeable	Muy permeable
Calificación del acuífero	Sin acuífero	Acuífero muy pobre	Acuífero pobre	Acuífero de regular a bueno	Acuífero excelente
Tipo de materiales			Arena fina	Arena limpia	
	Arcilla compacta	Limo arenoso	Arena limosa	Grava y arena	Grava limpia
	Pizarra	Limo	Caliza poco	Arena fina	Dolomitas, calizas
	Granito	Arcilla limosa	Fracturada	Caliza	Muy fracturadas
			Basaltos	Fracturada	

Fuente: Tomado de López Serrano y Delgado Martínez 2019:19.

Anexo 23. Valores de coeficiente de almacenamiento (s).

Tipo de material permeable	Forma de funcionamiento del acuífero	Valores de S (medio)
Kárstico: Calizas y dolomitas jurásicas	Libre	2×10^{-2}
	Semiconfinados	5×10^{-4}
Calizas y dolomitas cretácicas y terciarias	Confinado	5×10^{-5}
	Libre	$2 \times 10^{-2} - 6 \times 10^{-2}$
	Semiconfinados	$10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \times 10^{-5}$
Poroso intergranular: Gravas y arenas	Libre	$5 \times 10^{-2} - 15 \times 10^{-2}$
	Semiconfinados	10^{-3}
Kársticos y porosos: Calcareniticas marinas terciarias	Confinado	10^{-4}
	Libre	$15 \times 10^{-2} - 18 \times 10^{-2}$

Fuente: Tomado de Villanueva Martínez e Iglesias López 1984.:23.

Anexo 24. Componentes del coeficiente de infiltración.

Por pendiente	pendiente	KP
Muy plana	0.02% - 0.06%	0.30
Plana	0.30% - 0.40%	0.20
Algo plana	1% - 2%	0.15
Promedio	2% - 7%	0.10
Fuerte	Mayor de 7%	0.06
Por cobertura vegetal		KV
Cobertura con zacate menos del 50%		0.09
Terrenos cultivados		0.10
Cobertura con pastizal		0.18
Bosques		0.20

Fuente: Tomado de Schosinsky y Losilla 2000:16.

Anexo 25. Características de sitio, detalles del pozo uno ubicado en la zona norte de la subcuenca del río Acahuapa, conteniendo al sensor *Levellogger*.

Pozo	Pz-1
Propietario	Isabel Jovel Herculano
Dirección	Cantón Antiguo Tepetitán
Coordenada x	13°39'21.9" N
Coordenada y	88°51'39.5" O
Elevación	572 m.s.n.m.
Profundidad del pozo	15 m
Nivel estático	13.65 m
Diámetro del broquel	1.61 m
Altura del broquel	0.60 m
Distancia del pozo a la vivienda	25 m aproximadamente
Cantidad de agua extraída	Aproximadamente 6 barriles
Tiempo de extracción	30 minutos, con cubeta
Frecuencia de uso	1 vez por semana
Uso del agua	Doméstico
Temperatura	31.58 °C
Fecha de evaluación	18 de septiembre 2018 y 1 de marzo de 2019
Observaciones	El sensor se encuentra permanentemente en el pozo y sigue disponible para realizar recolección de datos
Extracción de datos con el <i>Barologger</i>	10 de marzo de 2020

Anexo 26. Características de sitio, detalles del pozo dos ubicado en el Cantón Antiguo Tepetitán.

Pozo	Pz-2	Distancia del pozo a la vivienda	3 m aproximadamente
Propietario	Jorge Cáceres	Cantidad de agua extraída	Aproximadamente 6 barriles
Dirección	Cantón Antiguo Tepetitán	Tiempo de extracción	25 minutos, con cubeta
Coordenada x	13°39'12.5" N	Frecuencia de uso	Cada 15 días
Coordenada y	88°50'25" O	Uso del agua	Riego de plantas y ganado
Elevación	587 m.s.n.m.	Temperatura	30.52 °C
Profundidad del pozo	12.0 m actualmente 9.28 m	Fecha de evaluación	10 de septiembre de 2018, 1 de marzo 2019
Nivel estático	8.41 m	Observaciones	El propietario retiró el sensor por considerarlo innecesario, en el año 2017. En la profundidad del pozo se observa arena y material rocoso, ocasionando la disminución de la profundidad de este (2.72 m)
Diámetro del broquel	2.43 m	Extracción de datos con el <i>Barologger</i>	10 de marzo de 2020
Altura del broquel	0.72 m		

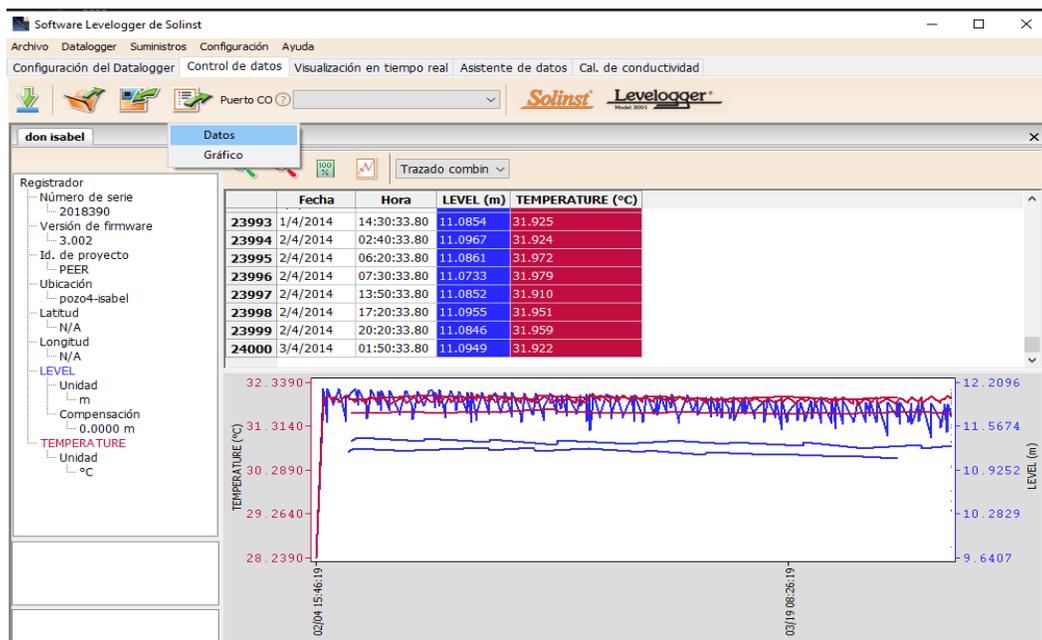


Anexo 27. Equipo utilizado en las visitas de campo: a) GPS, b) medidor de agua, modelo 101, y c) Barologger: dispositivo de conexión con la computadora.

Fuente: Tomado de Solinst Canadá Ltd. s. f.:6.



Anexo 28. Descarga de información del Levellogger al software.



Anexo 29. Representación de los datos en el Software Solinst 4.0.

Anexo 30. Datos de los niveles estáticos y temperaturas del pozo uno, registrados y promediados por mes, durante el periodo de febrero 2014 hasta junio 2015.

	Niveles estáticos (m)	Temperatura (°C)
Febrero 2014	11.64	31.88
Marzo	11.61	31.88
Abril	11.60	31.88
Mayo	11.68	31.90
Junio	11.68	31.89
Julio	11.69	31.89
Agosto	11.70	31.89
Septiembre	11.71	31.89
Octubre	11.70	31.88
Noviembre	11.63	31.86
Diciembre	11.51	31.80
Enero 2015	11.38	31.74
Febrero	11.30	31.72
Marzo	11.22	31.71
Abril	11.16	31.68
Mayo	11.12	31.66
Junio	11.09	31.67

Anexo 31. Datos de los niveles estáticos y temperaturas del pozo dos, registrados y promediados por mes, durante el periodo de febrero 2014 hasta junio 2015.

	Niveles estáticos (m)	Temperaturas (°C)
Febrero	9.98	30.23
Marzo	9.99	30.22
Abril	9.99	30.20
Mayo	10.00	30.18
Junio	10.00	30.15
Julio	9.79	29.87
Agosto	9.78	29.78
Septiembre	9.77	29.78
Octubre	9.76	29.74
Noviembre	9.74	29.70
Diciembre	9.72	29.65
Enero	9.70	29.58
Febrero	9.70	29.52
Marzo	9.69	29.44
Abril	9.69	29.44
Mayo	9.72	29.28
Junio	9.75	29.22

Anexo 32. Cuadro de capacidad de infiltraciones registradas en la zona de estudio.

Lugar	Geología	Textura	Datos (cm/h)
Antiguo Tepetitán lahares	Miembro S4	Areno-Franco	24.58
Antiguo Tepetitán cafetal	Miembro S4	Franco	8.96
Col. La Gloria San Vicente	Miembro S1	Franco-Arenoso	0.29
Las Minas, Apastepeque	Miembro b3	Franco-Arenoso	31.00
Calderas, Apastepeque	Miembro b1	Franco-Limoso	1.89

Fuente: Tomado de Marinero Orantes 2016:61.

Según las descripciones geológicas los valores de los miembros S1, S4, b1 y b3, corresponden a la siguiente descripción:

Miembro S1: es el miembro inferior de la formación Cuscatlán y está constituido por unidades sedimentarias y volcánicas. Las primeras son fluvio-lacustres y se ubican en cuencas intermontañas alineadas rumbo noreste (Citado por Marinero 2016).

Miembro S4: de acuerdo con el mapa Geológico de El Salvador, escala 1:100,000, estos materiales corresponden S4, comúnmente conocido como “Tierra blanca”. Sobre este miembro, se describe como una secuencia de piroclastos ácidos y epiclastitas volcánicas subordinadas, localmente efusivas ácidas

Miembro b3: según la escala 1:100,000 y de acuerdo con el mapa Geológico de El Salvador, estos materiales se definen como el miembro superior de la formación Bálsamo y está constituido por rocas efusivas básicas- intermedias, localmente con alteración hidrotermal, silificación y limos rojos

Miembro b1: son depósitos sedimentarios del cuaternario constituido principalmente por secciones con intercalaciones de rocas piroclásticas, depósitos de estuario, barras costeras, depósitos coluviales, conos de deyección y suelo almoor.

Anexo 33. Interpretación del correlativo de Spearman.

Escala	Descripción
1	El coeficiente de correlación oscila entre -1 y 1, el valor 0 indica que no existe relación lineal entre las dos variables en estudio
2	Correlación negativa perfecta -1 Correlación negativa fuerte moderada débil -0.5 Ninguna correlación 0 Correlación positiva moderada fuerte 0.5 Correlación positiva perfecta 1
3	Perfecta R=1 Excelente $R= 0.9 \leq R < 1$ Buena $R=0.8 \leq R < 0.9$ Regular $R=0.5 \leq R < 0.8$ Mala $R < 0.5$
4	Rango: Relación: 0 - 0.25 Escasa o nula 0.26 – 0.50 Débil 0.51 – 0.75 Entre moderada y fuerte 0.76 – 1.00 Entre fuerte y perfecta

Fuente: Tomado de Martínez Ortega 2009:10.



Anexo 34. Registro de ubicación de los pozos en estudio.



Anexo 35. Extracción de *Levelogger* para realizar la obtención de datos.

Anexo 36. Representación de algunos datos, sin tabular con fecha desde el 4 hasta el 9 de febrero de 2014. Datos registrados en el pozo uno.

Fecha	Nivel estático	Temperatura	2014/02/07	10.9926	31.611
2014/02/04	9.6119	28.991	2014/02/07	10.5386	31.633
2014/02/04	10.9540	31.678	2014/02/07	10.8599	31.656
2014/02/04	10.6207	31.676	2014/02/07	10.9614	31.661
2014/02/04	10.4557	31.755	2014/02/07	10.9831	31.665
2014/02/04	10.3435	31.804	2014/02/07	10.9626	31.649
2014/02/04	10.2852	31.848	2014/02/07	10.9765	31.656
2014/02/04	10.7950	31.894	2014/02/07	10.9661	31.659
2014/02/04	10.9093	31.919	2014/02/07	10.7152	31.646
2014/02/04	10.9384	31.918	2014/02/07	10.3904	31.671
2014/02/04	10.9514	31.913	2014/02/07	10.5755	31.746
2014/02/04	10.9621	31.886	2014/02/07	10.8749	31.771
2014/02/04	10.9721	31.888	2014/02/07	10.9380	31.787
2014/02/04	10.9827	31.853	2014/02/07	10.9554	31.785
2014/02/05	10.9937	31.721	2014/02/07	10.9672	31.787
2014/02/05	10.9825	31.690	2014/02/07	10.9785	31.771
2014/02/05	10.9712	31.690	2014/02/08	10.9888	31.666
2014/02/05	10.9604	31.674	2014/02/08	10.7580	31.633
2014/02/05	10.9502	31.668	2014/02/08	10.9097	31.651
2014/02/05	10.9638	31.671	2014/02/08	10.9630	31.652
2014/02/05	10.6133	31.665	2014/02/08	10.9789	31.644
2014/02/05	10.5145	31.724	2014/02/08	10.9685	31.653
2014/02/05	10.8710	31.737	2014/02/08	10.9533	31.647
2014/02/05	10.9458	31.753	2014/02/08	10.4531	31.665
2014/02/05	10.9629	31.749	2014/02/08	10.2884	31.704
2014/02/05	10.9734	31.755	2014/02/08	10.5357	31.760
2014/02/05	10.9834	31.742	2014/02/08	10.8551	31.813
2014/02/06	10.9935	31.661	2014/02/08	10.9288	31.823
2014/02/06	11.0035	31.640	2014/02/08	10.9477	31.828
2014/02/06	10.9916	31.634	2014/02/08	10.9590	31.824
2014/02/06	10.9802	31.631	2014/02/08	10.9702	31.819
2014/02/06	10.9689	31.620	2014/02/08	10.5468	31.813
2014/02/06	10.9458	31.611	2014/02/08	10.3898	31.865
2014/02/06	10.9573	31.611	2014/02/08	10.6146	31.927
2014/02/06	10.9681	31.604	2014/02/08	10.8895	31.953
2014/02/06	10.5088	31.631	2014/02/08	10.9509	31.959
2014/02/06	10.6523	31.675	2014/02/08	10.9657	31.946
2014/02/06	10.9013	31.710	2014/02/08	10.9775	31.936
2014/02/06	10.9571	31.713	2014/02/09	10.9882	31.807
2014/02/06	10.9715	31.711	2014/02/09	10.9726	31.754
2014/02/06	10.9822	31.698	2014/02/09	10.9613	31.756