



Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos
Hidráulicos (ERIS)

**CARACTERIZACIÓN DE LA VULNERABILIDAD HIDROGEOLÓGICA Y PROPUESTA DE
PLAN DE PROTECCIÓN EN FUNCIÓN DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA
SUBTERRÁNEA, EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE ACHUAPA, NICARAGUA**

Ing. Amílcar Josué Ramos Valle

Asesorado por MSc. Ing. Elfego Orozco Fuentes

Guatemala, octubre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN DE LA VULNERABILIDAD HIDROGEOLÓGICA Y
PROPUESTA DE PLAN DE PROTECCIÓN EN FUNCIÓN DEL RIESGO DE
CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA, EN EL ACUÍFERO DEL
VALLE DE ACHUAPA, NICARAGUA**

ESTUDIO ESPECIAL

PRESENTADO A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA Y
RECURSOS HIDRÁULICOS –ERIS-
POR

ING. AMÍLCAR JOSUÉ RAMOS VALLE
ASESORADO POR MSC. ING. ELFEGO ODVIN OROZCO FUENTES

COMO REQUISITO PREVIO PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO (MAGISTER SCIENTIFICAE) EN RECURSOS HIDRÁULICOS
OPCIÓN GESTIÓN INTEGRADA DEL RECURSOS HÍDRICOS

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Córdoba Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE ESTUDIO ESPECIAL

EXAMINADOR(A)	MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes
EXAMINADOR(A)	MSc. Ing. Joram Gil Laroj
EXAMINADOR(A)	MSc. Ing. Elfego Orozco Fuentes

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

CARACTERIZACIÓN DE LA VULNERABILIDAD HIDROGEOLÓGICA Y PROPUESTA DE PLAN DE PROTECCIÓN EN FUNCIÓN DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA, EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE ACHUAPA, NICARAGUA

Tema que fue autorizado por la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), en noviembre de 2018.

Ing. Amílcar Josue Ramos Valle

Correo electrónico: amilkarramos09@gmail.com

Carné No.201890534

UNIVERSIDAD DE
SAN CARLOS DE GUATEMALA



Facultad de Ingeniería
Escuela Regional de Ingeniería
Sanitaria y Recursos Hidráulicos
COORDINACIÓN
RECURSOS HIDRÁULICOS

Edificio ERIS,
Área de prefabricados, CII
Ciudad Universitaria zona 12
Ciudad de Guatemala 01012
Guatemala, C.A.

Tel. (502) 2418 8000,
Ext. 86213 y 86212
(502) 2418 9138

www.ingenieria-usac.edu.gt

Guatemala, 25 de noviembre de 2019

Señores
Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado
Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos
Facultad de Ingeniería, USAC

Respetuosamente les comunico que he revisado la versión corregida, en mi calidad de asesor del estudio y, a la vez, Coordinador de la Maestría de Recursos Hidráulicos, del trabajo de Estudio Especial titulado:

**CARACTERIZACIÓN DE LA VULNERABILIDAD
HIDROGEOLÓGICA Y PROPUESTA DE PLAN DE
PROTECCIÓN, EN FUNCIÓN DEL RIESGO DE
CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA, EN EL
ACUÍFERO DEL VALLE DE ACHUAPA, NICARAGUA**

presentado por la estudiante,

Ingeniero Agrícola Amilcar Josué Ramos Valle

Les manifiesto que el estudiante cumplió con los requisitos exigidos por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), y la Universidad de San Carlos de Guatemala, en la realización de su estudio en forma satisfactoria.

Agradeciéndoles la atención a la presente, se suscribe de ustedes,

Atentamente.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

MSc. Ing. Eifego Orozco
Coordinador Maestría de Recursos Hidráulicos

El Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos -ERIS- después de conocer el dictamen del tribunal examinador integrado por los profesores siguientes: MSc. Ing. Joram Matías Gil Laroj, MSc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque y MSc. Ing. Elfego Odvin Orozco Fuentes; así como el visto bueno del Coordinador de la Maestría en Recursos Hidráulicos, MSc. Ing. Elfego Odvin Orozco Fuentes, la revisión de lingüística realizada por la Licda. en Letras Ruth Noemí Cardona Mazariegos, colegiada No. 12,498, al trabajo del estudiante: Ingeniero Agrícola, Amilcar Josué Ramos Valle, titulado " **CARACTERIZACIÓN DE LA VULNERABILIDAD HIDROGEOLÓGICA Y PROPUESTA DE PLAN DE PROTECCIÓN, EN FUNCIÓN DEL RIESGO DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA, EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE ACHUAPA, NICARAGUA**", en representación de la Comisión de Admisión y Otorgamiento de Grado, procede a la autorización del mismo en Guatemala, 27 de noviembre de 2019.

IMPRIMASE

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"




MSc. Ing. Pedro Cipriano Saravia Celis
DIRECTOR

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por brindarme la oportunidad de seguir creciendo profesionalmente, darme fortaleza y muchas bendiciones.
Mi madre	Ena María Valle, por todo su sacrificio y su amor incondicional, privándose de muchas cosas para que no me faltara nada.
Mi esposa	Yaoska Cárcamo Carvajal, por todo su amor, apoyo y comprensión, por estar siempre a mi lado durante el transcurso de mis estudios superiores.
Mis hermanos y sobrinos	Ena Ramos, Yader Ramos, Jorge Ramos, Reynaldo Reyes y Dylan Duran, por su gran aprecio y cariño hacia mí.
Mi padre	Jorge Ramos, por brindarme siempre su apoyo incondicional en la distancia.
Eliezer José Reyes Valle	A tu memoria hermano y la de mi angelito que desde el cielo me cuidan.
A mi país	A mi patria querida Nicaragua de la cual me orgullece formar parte.

AGRADECIMIENTOS A:

Servicio de Intercambio Académico (DAAD) Por brindarme la oportunidad de seguir creciendo en mi vida profesional.

Catedráticos de ERIS Por todas sus enseñanzas, esmero y disponibilidad total brindada a mi persona.

Mi asesor M.Sc. Ing. Elfego Orozco, por brindarme su acompañamiento en el transcurso de mis estudios, por ofrecer su valioso tiempo y grandes conocimientos.

ENACAL Especialmente a las autoridades de turno, por permitirme realizar mis estudios superiores, así también por el apoyo en la fase de campo y facilitación de información.

Alcaldía de Achuapa y filial ENACAL Achuapa Por el acompañamiento en la fase de campo, el suministro de información, siempre dispuestos a aclarar dudas.

Compañeros de clase Les agradezco por su amistad incondicional, por todos los momentos que compartimos juntos.

Ing. Ramón Dávila Por todas sus enseñanzas y apoyo, por ser un gran maestro y amigo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
FIGURAS.....	V
TABLAS.....	VII
RESUMEN.....	IX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XI
JUSTIFICACIÓN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVI
ANTECEDENTES.....	XIX
ALCANCES.....	XXIII
LIMITACIONES.....	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXV
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Vulnerabilidad hidrogeológica.....	2
1.2. Métodos para determinación la vulnerabilidad.....	3
1.3. Método DRASTIC.....	4
1.4. Método GOD.....	4
1.5. Método AVY.....	5
1.6. Otras metodologías utilizadas para estimar la vulnerabilidad de acuíferos.....	5
1.7. Selección de métodos a utilizar.....	6
1.8. Definición de riesgo.....	7
1.9. Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH).....	8

2.	CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA	9
2.1.	Localización del área de estudio	9
2.2.	Hidrología.....	10
2.2.1.	Hidrología local.....	10
2.3.	Descripción geomorfología.....	12
2.3.1.	Geomorfología local	12
2.4.	Climatología	13
2.5.	Descripción geológica	16
2.5.1.	Grupo coyol (Tmca, Tmcd).....	16
2.5.2.	Grupo matagalpa (Tmci).....	17
2.5.3.	Intrusivos (Tii).....	17
2.5.4.	Cuaternario aluvial - residual (Qal-r)	17
2.6.	Suelos	18
2.6.1.	Clasificación taxonómica	18
2.6.2.	Orden de suelo dentro del acuífero	19
2.6.2.1.	Entisols (L):	19
2.6.2.2.	Mollisols (I)	20
2.7.	Uso de la tierra	21
2.7.1.	Sistemas de clasificación	21
2.7.2.	Uso de la tierra dentro del acuífero	22
2.8.	Hidrogeología.....	24
2.9.	Geofísica sondeos eléctricos verticales SEV	26
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	29
3.1.	Método DRASTIC.....	29
3.1.1.	Profundidad del agua subterránea (D)	31
3.1.2.	Recarga neta (R).....	32
3.1.3.	Medio del acuífero (A)	33
3.1.4.	Tipo de suelo (S).....	33

3.1.5.	Topografía (T).....	34
3.1.6.	Impacto en la zona vadosa (I).....	35
3.1.7.	Conductividad hidráulica (C).....	35
3.2.	Método GOD	36
3.2.1.	Grado de confinamiento hidráulico G y ocurrencia del sustrato suprayacente O	38
3.2.2.	Distancia o profundidad del agua subterránea D....	38
3.3.	Método AVY	38
3.3.1.	Espesor de cada estrato del suelo sobre el acuífero d_i	39
3.3.2.	Conductividad hidráulica de cada estrato del suelo i	39
4.	ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD	41
4.1.	Vulnerabilidad hidrogeológica método DRASTIC.....	42
4.1.1.	Vulnerabilidad insignificante	42
4.1.2.	Vulnerabilidad baja	43
4.1.3.	Vulnerabilidad moderada.....	43
4.1.4.	Vulnerabilidad alta	44
4.1.5.	Vulnerabilidad muy alta	45
4.2.	Vulnerabilidad hidrogeológica método GOD.....	46
4.2.1.	Vulnerabilidad insignificante	47
4.2.2.	Vulnerabilidad baja	47
4.2.3.	Vulnerabilidad alta	47
4.3.	Vulnerabilidad hidrogeológica método AVY.....	49
4.3.1.	Vulnerabilidad extremadamente baja	49
4.3.2.	Vulnerabilidad baja	50
4.3.3.	Vulnerabilidad moderada.....	50
4.4.	Discusión de los métodos utilizados.....	51

4.5.	Mapa de vulnerabilidad	53
4.6.	Usos de los mapas de vulnerabilidad hidrogeológica	54
5.	RIESGO DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	57
5.1.	Identificación de las fuentes contaminantes.....	57
5.1.1.	Clasificación de los índices de vulnerabilidad DRASTIC.....	59
5.2.	Riesgo potencial de contaminación.....	60
5.2.1.	Posibles usos de mapa de riesgo potencial	64
5.2.2.	Determinación del riesgo potencial en función del uso potencial de la tierra.....	65
6.	PROPUESTA DE PLAN DE PROTECCIÓN.....	71
6.1.	Propuesta del plan de protección	73
6.2.	Plan de protección.....	74
	CONCLUSIONES.....	81
	RECOMENDACIONES	83
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
	APÉNDICE A. CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES MÉTODO DRASTIC	91
	APÉNDICE B. CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES MÉTODO GOD	99
	APÉNDICE C. CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES MÉTODO AVY ...	103
	ANEXOS.....	107

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Mapa de localización y cuencas hidrológicas	11
Mapa de relieve del área de estudio	13
Precipitación anual estación PV Achuapa	15
Precipitación mensual estación PV Achuapa.....	15
Mapa de geología	18
Mapa taxonómico.....	21
Mapa de uso de la tierra	23
Mapa de transmisividad hidráulica.....	25
Mapa de ubicación de los SEV y secciones geoelectricas	27
Ubicación espacial de los parámetros DRASTIC.....	30
Método GOD	37
Vulnerabilidad método DRASTIC.....	46
Vulnerabilidad método GOD	48
Vulnerabilidad método AVY	51
Matriz de riesgo	61
Diagrama de valoración del riesgo potencial	62
Riesgo potencial de contaminación	64
Uso potencial de la tierra	67
Riesgo potencial de contaminación en función del uso potencial de la tierra ...	68
Mapa de ubicación de las áreas a proteger	79
Profundidad del agua subterránea.....	92
Recarga neta	93
Medio del acuífero	94
Tipo de suelo	95

Figura 25.	Topografía.....	96
Figura 26.	Impacto en la zona vadosa	97
Figura 27.	Conductividad hidráulica	98
Figura 28.	Tipo de formación geológica	101
Figura 29.	Distancia del nivel del agua subterránea.....	102
Figura 30.	Espesor del estrato sobre el acuífero.....	104
Figura 31.	Conductividad hidráulica	105

TABLAS

I.	Parámetros estadísticos estación PV Achuapa.....	16
II.	Usos de la tierra	23
III.	Peso asignado a cada parámetro, según su importancia.....	30
IV.	Clasificación de la vulnerabilidad, según el índice	31
V.	Profundidad del agua subterránea (D)	32
VI.	Recarga neta (R).....	32
VII.	Medio del acuífero (A)	33
VIII.	Medio del suelo	34
IX.	Topografía (T)	34
X.	Impacto en zona vadosa (I).....	35
XI.	Conductividad hidráulica (C)	36
XII.	Conductividad hidráulica según, tipo de formación geológica	39
XIII.	Rangos de vulnerabilidad método AVY	40
XIV.	Caracterización de vulnerabilidad a través del método DRASTIC	42
XV.	Caracterización de la vulnerabilidad a través del método GOD	47
XVI.	Caracterización de la vulnerabilidad, a través del método AVY	49
XVII.	Asignación de valores, según el tipo de uso de la tierra	58
XVIII.	Asignación índices de vulnerabilidad	60
XIX.	Clasificación del riesgo potencial	63
XX.	Uso potencial de la tierra.....	66
XXI.	Asignación de valores según el uso potencial de la tierra	67
XXII.	Clasificación del riesgo potencial	69
XXIII.	Problemáticas en las áreas susceptibles a la contaminación.....	77
XXIV.	Plan estratégico.....	78
XXV.	Profundidad del agua subterránea (D)	91

XXVI.	Recarga neta (R)	93
XXVII.	Medio del acuífero (A).....	94
XXVIII.	Tipo de suelo (S).....	95
XXIX.	Topografía (T)	96
XXX.	Impacto en la zona vadosa (I).....	97
XXXI.	Conductividad hidráulica (C)	98
XXXII.	Grado de confinamiento hidráulico (G)	100
XXXIII.	Ocurrencia del estrato supratacente (O).....	100
XXXIV.	Distancia del nivel del agua subterránea (D)	102
XXXV.	Espesor del estrato sobre el acuífero (d_i).....	104
XXXVI.	Conductividad hidráulica (k_{vi})	105

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue caracterizar la vulnerabilidad hidrogeológica en el acuífero del valle de Achuapa, utilizando los métodos DRASTIC, GOD y AVY, debido que el DRASTIC integra todas las variables que componen las otras metodologías utilizadas, los resultados obtenidos son más detallados y confiables, por lo que fue seleccionado por encima de los otros. Los índices identificados en los métodos empleados fueron: insignificantes, baja, moderada, alta y muy alta vulnerabilidad, el índice más representativo correspondiente a baja vulnerabilidad ocupando en promedio poco más del 50 % del área de estudio. Con la vulnerabilidad hidrogeológica caracterizada, a través del método DRASTIC y el uso de la tierra 2015, el cual fue representado como amenaza, se determinó el riesgo de contaminación del agua subterránea, obteniendo 4 diferentes rangos, estos fueron: bajo, moderado, alto y muy alto, predominando el riesgo bajo en más del 50 % del área del acuífero.

La propuesta de protección fue dirigida especialmente a los sitios de mayor susceptibilidad a la contaminación del agua subterránea, siendo las áreas que corresponden al riesgo alto y muy alto. El plan de protección está compuesto por dos partes fundamentales, consistiendo en: identificar las posibles fuentes de contaminación y cadenas causantes, y propuestas de protección en función de las problemáticas detectados. Entre las propuestas se destacan: la regulación e inventario de agroquímicos utilizados en la producción agrícola, elaborar sistemas silvopastoriles intensivos para ganadería de doble propósito y realizar una correcta disposición final de los residuos químicos de uso veterinario.

.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El término vulnerabilidad hidrogeológica se comenzó a utilizar de forma intuitiva, a partir de la década de los años 70 en Francia por Albanet y Margat, basados en la afirmación que, en cierta medida el medio físico protege al acuífero de contaminantes que puedan infiltrarse desde la superficie. En los años 80, este concepto fue ampliamente descrito por Haertle, Aller, Foster e Hirata (Foster & Hirata, 1988). Desde entonces han surgido más definiciones y metodologías de evaluación sobre la misma temática, orientadas en la mayoría de los casos a representaciones cartográficas.

La contaminación de las aguas subterráneas es un problema mundial en aumento, una vez que se contaminan estas fuentes hídricas, su remediación es lenta, costosa y muchas veces imposible de realizar.

La necesidad de caracterizar la vulnerabilidad hidrogeológica, se ha convertido más que necesidad una obligación para los tomadores de decisiones, relacionados al sector hídrico y empresas privadas y/o estatales encargado del suministro de agua pública.

El acuífero de Achuapa es una fuente hídrica natural de gran importancia, de este se extrae agua subterránea para diferentes usos, siendo el abastecimiento para consumo humano, el riego agrícola y uso ganadero los principales.

Las actividades económicas en el municipio de Achuapa, dependen en gran medida de la oferta hídrica que almacena el valle, por lo que la posible alteración en la calidad natural del agua subterránea, podría poner en riesgo la

marcha normal de los sectores productivos y por ende, la seguridad hídrica y alimentaria de la población.

Por lo antes expuesto, surge la necesidad de caracterizar la vulnerabilidad hidrogeológica y elaborar una propuesta de plan de protección, en función del riesgo de contaminación del agua subterránea, en las zonas de mayor susceptibilidad a la contaminación del agua subterránea.

Esto conlleva a las siguientes preguntas: ¿La caracterización de la vulnerabilidad hidrogeológica pondrá en evidencia la fragilidad de las propiedades naturales del acuífero del valle de Achuapa? y ¿Con la determinación del riesgo de contaminación del agua subterránea, se podrá elaborar una propuesta de plan de protección, en aquellas áreas con mayor susceptibilidad a la contaminación?

JUSTIFICACIÓN

Los valles intramontanos nicaragüenses son fuentes productoras de agua subterránea con cantidad y calidad aceptable, la cual puede ser extraída a costos relativamente bajos, son el principal suministro del recurso hídrico en todas las localidades donde se ubican; no obstante, se conoce muy poco de estos, ya que los estudios hidrogeológicos son muy limitados.

El acuífero del valle de Achuapa es la fuente de agua más confiable en el municipio, de este se extrae el recurso para el abastecimiento público, riego agrícola y ganadería, por lo que existe una alta dependencia de los diferentes sectores productivos de la población sobre el recurso acuático, siendo la buena calidad de este, un índice de progreso dentro de la municipalidad.

Contrario a lo antes mencionado, son pocos las investigaciones relacionadas al sector hídrico en el acuífero del valle de Achuapa, siendo el estudio de Mapificación Hidrogeológica e Hidrogeoquímica de la Región central de Nicaragua, (INETER – COSUDE, 2004) y exactament el mapa hidrogeológico de la hoja Estelí a escala 1:250,000, la mayor referencia bibliográfica.

Se tiene en cuenta lo importante que es el acuífero de Achuapa, en los diferentes sectores de la municipalidad y la carencia de estudios respectivos al recurso hídrico, en esta investigación se pretende caracterizar la vulnerabilidad hidrogeológica utilizando los métodos DRASTIC, GOD y AVY.

Sin embargo, la vulnerabilidad hidrogeológica al ser una característica natural del acuífero poco cambiante en el tiempo, ofrece limitados aportes por sí sola.

Por consiguiente, se realizará interacción entre vulnerabilidad hidrogeológica y la amenaza, (representada por el uso de la tierra para este estudio) para luego determinar el riesgo de contaminación del agua subterránea e identificar áreas de mayor susceptibilidad a la contaminación del agua subterránea, para las cuales se realizará una propuesta de protección con el propósito de garantizar la calidad natural del recurso hídrico.

OBJETIVOS

General:

Caracterizar la vulnerabilidad hidrogeológica y elaborar propuesta de plan de protección, en función del riesgo de contaminación del agua subterránea en el acuífero del valle de Achuapa.

Específicos:

1. Caracterizar la vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero del valle de Achuapa utilizando los métodos DRASTIC, GOD y AVY.
2. Determinar el riesgo de contaminación del agua subterránea en función del uso de la tierra.
3. Elaborar propuesta de protección en las áreas de mayor susceptibilidad a la contaminación del agua subterránea.

HIPÓTESIS

La vulnerabilidad hidrogeológica en el acuífero del valle de Achuapa es alta en más del 40 % del área, por lo que el riesgo de contaminación del agua subterránea también será alto en más del 50 % de la superficie.

ANTECEDENTES

En la mayor parte de los acuíferos importantes de cada continente, región o país, se han llevado a cabo análisis de vulnerabilidad hidrogeológica, utilizando metodologías que se adecuan a las condiciones naturales del lugar. Canadá, Estados Unidos de América, Portugal, Italia, entre otras, han desarrollado esta herramienta en función de la gestión y toma de decisión referido al aprovechamiento del agua subterránea.

En Guatemala, a través de la Universidad de San Carlos (USAC) y la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), se han realizado aportes sustanciales relacionados al tema de la hidrológica subterránea, entre otros, se puede mencionar el realizado por Morales, (2012), donde demostró que el nivel freático en el acuífero norte del valle de la ciudad de Guatemala descienden progresivamente a una tasa promedio de 9 m/año.

Homero y Rodríguez, (2017), valoraron la calidad de las aguas subterráneas en la municipalidad de San Pedro La Laguna y sus efectos sobre el cuerpo de agua del lago de Atitlán, en esta investigación utilizaron el método GOD.

Rivera, (2005), evaluó el análisis de riesgo dentro del marco de la gestión integral del recurso hídrico en la microcuenca del río Pansalic, Mixco, Guatemala; utilizando el método GOD.

Reiche, (2015) identificó 4 zonas de vulnerabilidad (muy alto, alto, moderado y bajo) a la contaminación de acuíferos cársticos, por medio del método EPIK, en el municipio de Santa Cruz Verapaz. Bardales, (2010), realizó

estimación del potencial de agua subterránea del valle de Monjas Jalapa, estimando una recarga de 620 mm/año.

En el Plan Nacional de los Recursos Hídricos (PNRH, 2017, pág. 53), anexo 2 “Componente agua subterráneas”, señala que el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), ha delimitado 27 acuíferos, de los cuales 12 se clasifican como principales y se ubican entre la planicie del pacífico y la depresión nicaragüense. De esos acuíferos, únicamente en 9 de ellos se ha caracterizado la vulnerabilidad hidrogeológica, usando el método DRASTIC.

Por otro lado, solamente en 1 acuífero, se ha determinado el riesgo potencial de contaminación y se elaboró un plan de protección de las aguas subterráneas. Esta investigación fue realizada en el marco del proyecto “*Uso Sostenible de los Recursos Hídricos*”, (SUWaR - Nicaragua, 2000), siendo este el primer esfuerzo realizado en el país con relación a esta temática.

El plan integral de protección del acuífero de Managua, se formó principalmente por siguientes componentes:

- Vulnerabilidad hidrogeológica: donde se identificaron 3 zonas (alta, moderada y baja).
- Caracterización de la carga contaminante: identificando y clasificando todas las fuentes de contaminación, en el área de estudio.
- Riesgo potencial de contaminación: determinado a través de la caracterización de la vulnerabilidad hidrogeológica e información de carga contaminante, identificando 3 clases de riesgo (alto, moderado y bajo)
- Plan de protección: se estableció en la identificación de la problemática y elaboración de propuestas de protección, según el índice de vulnerabilidad hidrogeológica.

Otros estudios relevantes y referente a la vulnerabilidad hidrogeológica realizados en Nicaragua y son:

- Ramos, (2012) caracterizó la vulnerabilidad hidrogeológica en la cuenca de El Sauce, usando el método DRASTIC.
- Hurtado, (2012) estudió la vulnerabilidad hidrogeológica en sub cuenca de la laguna de Tisma, usando el método DRASTIC.
- Blandón, (2013) identificó la vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero de Estelí, usando el método DRASTIC.
- INETER caracterizó la vulnerabilidad de los acuíferos de Malpaisillo (INETER, 2012), Tipitapa – Malacatoya (INETER, 2014), Nandaime – Rivas (INETER, 2014) y Villanueva (INETER, 2016), usando el método DRASTIC.
- Martínez, (2017), estudiante egresado de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), quien caracterizó la vulnerabilidad hidrogeológica en el acuífero del valle Sebaco, usando el método DRASTIC.

Cabe mencionar investigación realizada por Martínez, (2017), es uno de pocos estudios realizados en esta temática dentro de ERIS.

ALCANCES

En el presente estudio se pretende caracterizar la vulnerabilidad hidrogeológica, utilizando los métodos DRASTIC, GOD y AVY, de los cuales se seleccionará el que se estima más apropiado; también se elabora una propuesta de plan de protección en función del riesgo potencial, en aquellas áreas con mayor susceptibilidad a la contaminación.

LIMITACIONES

La caracterización de la vulnerabilidad hidrogeológica, se realizará utilizando los métodos DRASTIC, GOD y AVY, asimismo la propuesta del plan de protección, será únicamente para las áreas de mayor riesgo potencial a la contaminación.

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es un bien común natural y renovable vital para el desarrollo socioeconómico de cualquier país, región o continente, el subsuelo almacena aproximadamente el 22 % del agua dulce disponible en el planeta tierra, equivalente a 13, 050,000 km³, Much, 2018 (citado en curso de química y microbiología del agua, ERIS – USAC 2018).

Se asume que el agua subterránea al estar situada bajo la superficie del suelo y muchas veces confinada por formaciones geológicas, es incapaz de contaminarse, esta apreciación no está lejos de la realidad, ya que se sabe que la zona no saturada y la taxonomía del suelo desempeñan un papel fundamental en los procesos de atenuación de sustancias contaminantes.

No obstante, existen contaminantes persistentes que conservan sus propiedades químicas en el tiempo y acuíferos susceptibles a la contaminación, debido a sus frágiles propiedades.

Para caracterizar la vulnerabilidad hidrogeológica, es necesario conocer las condiciones geológicas e hidrogeológicas de un acuífero y la sensibilidad de estas propiedades a la contaminación. Este insumo, deberá ser la base principal en la obtención de otras variables importantes, como lo es el riesgo potencial a contaminación.

La vulnerabilidad hidrogeológica y el riesgo potencial, son herramientas de planificación hídrica y deberán ser utilizados en la elaboración de propuestas de protección para las aguas subterráneas, sobre todo en aquellas áreas susceptibles a la contaminación

Nicaragua posee abundancia de recurso hídrico, debido a su situación geográfica y características geomorfológicas, la precipitación promedio del país es próxima a los 2000 mm/año. Como es bien sabido, parte de esta agua se convierte en escorrentía superficial alimentando lagos, lagunas, quebradas y ríos que finalmente descargan en el océano, otra parte percola y pasa a formar la escorrentía subterránea.

Choza (1990), estima el volumen de recarga en 2200 hm³/año, por otro lado, el proyecto Plan Nacional de los Recursos Hídricos (PNRH, 2017, pág. 64), sugiere que esta cifra resulta ampliamente subdimensionada con respecto a cálculos actuales, manifestando que la recarga total de la lluvia útil, sobrepasa los 9,000 hm³/año.

El acuífero del valle de Achuapa tiene un área estimada en 25 km², se ubica en la parte norte – central de Nicaragua, en la zona geomorfológica conocida como: “Tierras altas del interior” (Fenzel, 1989, pág. 5). Esta zona se caracteriza por la presencia de valles intramontanos, algunos capaces de suministrar grandes volúmenes de agua, como es el caso del acuífero de Sebaco, del cual hasta el 2002 se extraían 80 Mm³/año, (Martínez, 2017, pág. 35), utilizados principalmente en la producción de arroz y el acuífero del valle de Estelí, donde los pozos que abastecen el servicio público de agua potable, producen hasta 6,540 m³/día. (ENACAL, 2015).

El valle de Achuapa está compuesto por materiales cuaternarios (Qal –r), la profundidad del agua subterránea es variable, así como es el espesor de la zona saturada (INETER, 2004).

Para identificar zonas propensas a la contaminación subterránea, es necesario caracterizar la vulnerabilidad hidrogeológica, luego determinar el riesgo potencial, según amenaza existente. También se deberá elaborar propuestas de protección en función del riesgo potencial, en aquellos acuíferos susceptibles a la contaminación.

1. MARCO TEÓRICO

En las últimas 5 décadas, la contaminación del agua subterránea ha llegado a ser uno de los problemas ambientales de mayor importancia en el mundo, según Guo *et al.* 2006 (citado en Gijón, 2007). La disponibilidad y calidad de los recursos hídricos son preocupaciones crecientes de la comunidad internacional y autoridades locales, el bienestar de las sociedades, los ecosistemas, la política y economía, depende de la disponibilidad y calidad del recurso, por lo que su manejo integral y sostenible es tema central del siglo 21 y parte de los ejes centrales de la agenda de desarrollo sostenible 2030 (Naciones Unidas, 2015).

De acuerdo con el (Banco Mundial, 2003), los cuerpos de agua subterránea han sufrido y sufren constantes amenazas de contaminación como resultado de la sobreexplotación, urbanización, desarrollo industrial, agricultura y actividades mineras, principalmente. Las complejas interacciones entre el medio ambiente y las actividades humanas determinan la cantidad y calidad de los recursos hídricos, sin embargo, es limitado el conocimiento del estado actual de las fuentes de agua subterránea en nuestra región.

En el Caso de Nicaragua, González 2004, (citado en Martínez, 2017, págs. 45,46), menciona que el 40 % de los pozos perforados (115 en total), analizados en su estudio, presentaron altas concentraciones del plaguicida organofosforado Fention (11, 15 y 16 veces por encima) de las Normas CAPRE.

Por su parte, IBERINSA, (2010, pág. 57), cálculo balance hídrico negativo 0.76 MMA (-2,086 m³/día, -0.02 m³/s), en la subcuenca central de Managua,

concluyendo que existe sobreexplotación, por lo que se recomendó extraer el recurso subterráneo de la subcuenca oriental, perteneciente al mismo acuífero.

1.1. Vulnerabilidad hidrogeológica

La vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación es una propiedad difícil de determinar y depende de la interacción entre diferentes factores, como profundidad del nivel freático o techo del acuífero, la capacidad de atenuación de las capas litológicas sobrepuestas al acuífero, la tasa de recarga, entre otros parámetros.

Este término fue introducido por primera vez en Francia, por Albanet y Margat, en la década de los 70 y desde entonces existen diferentes corrientes o puntos de vista sobre el mismo, algunos investigadores consideran a la vulnerabilidad como una propiedad referida exclusivamente a las propiedades intrínsecas del acuífero; otros, plantean que además del comportamiento del medio, el tipo de acuífero y carga contaminante deberán ser relevantes en la caracterización hidrogeológica (vulnerabilidad específica).

En los años 80, el término vulnerabilidad fue ampliamente descrito por Haertle, Aller, Foster e Hirata (Foster & Hirata, 1988) y se han desarrollado diversas metodologías cualitativas de evaluación y mapificación de la vulnerabilidad. (Banco Mundial, 2003).

Foster (1987), define que vulnerabilidad a la contaminación del acuífero, es usado para representar las características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante.

Vrba & Zaporozec, (1994), describe a la vulnerabilidad como una propiedad intrínseca de un sistema acuífero que depende de su sensibilidad a impactos naturales o antropogénicos. Autores como Margat, definen la vulnerabilidad intrínseca de un acuífero, como la facilidad con la cual un contaminante introducido en la superficie de la tierra pueda alcanzar y difundirse en el agua subterránea.

Foster & Hirata, (1991), sugieren que la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación representa su sensibilidad para ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta. Custodio, (1995), señala: La vulnerabilidad a la polución expresa la incapacidad del sistema para adsorber las alteraciones, tanto naturales como artificiales. En ambos casos, el autor hace referencia a un contaminante impuesto en el medio.

Antonakos & Panagopoulos, (2016), señalan que la vulnerabilidad es relativa, sin dimensiones y una propiedad no medible que depende de las características del acuífero, tales como geológicas e hidrogeológicas (zona no saturada, horizonte del suelo, relieve, recarga, entre otros).

Todos los autores coinciden que el término de vulnerabilidad es usado para identificar dentro de un sistema hidrogeológico áreas susceptibles a la contaminación, causado por un agente, dependiendo del tipo de sustancia (conservativa o no conservativa) y la carga impuesta, podrá ocasionar daños irremediables al acuífero.

1.2. Métodos para determinación la vulnerabilidad

La caracterización de la vulnerabilidad es un proceso en el cual se combina numerosas características intrínsecas del sistema acuífero para

producir un mapa el que expondrán diferentes áreas de mayor y menor vulnerabilidad hidrogeológica, este deberá ser una herramienta fundamental de planificación y ordenamiento territorial en función de la protección de las fuentes hídricas subterráneas.

1.3. Método DRASTIC

El método DRASTIC es un método empírico desarrollado por Aller, Bennet, Lehr, Petty, & Hackett, (1987) y patrocinado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Este método busca sistematizar la determinación del potencial de los contaminantes de alcanzar la zona saturada. Este método fue nombrado de esta forma, alusivo a los siete parámetros (por sus siglas en inglés) que se superponen para caracterizar geográficamente la vulnerabilidad hidrogeológica, estos parámetros son:

- D** (Depth - Profundidad del agua subterránea)
- R** (Recharge - Recarga neta)
- A** (Aquifer - Medio de acuífero)
- S** (Soil - Medio de suelo)
- T** (Topography - Topografía)
- I** (Impact – Impacto en la Zona Vadosa).
- C** (Hydraulic conductivity – Conductividad Hidráulica)

1.4. Método GOD

El método GOD (Foster & Hirata, 1988), para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos ha sido ampliamente probado en América Latina y el Caribe durante en las últimas décadas, esto debido a su claridad conceptual y a su simplicidad de aplicación. El método considera los siguientes parámetros:

- **(G)** Grado de confinamiento hidráulico del acuífero en consideración.
- **(O)** Ocurrencia del sustrato suprayacente (zona no saturada o capas confinantes) en términos de características litológicas y grado de consolidación, que determinan su capacidad de atenuación de contaminantes.
- **(D)** Distancia al agua determinada como: la profundidad al nivel del agua en acuíferos no confinados o la profundidad al techo de acuíferos confinados.

1.5. Método AVY

Es un Acuífer Vulnerability Index (AVI), (Stempvoortl, Ewert, & Wassenaar, 1992), caracteriza la vulnerabilidad hidrogeológica por medio de la resistencia hidráulica “c” al flujo vertical del agua al pasar por los diferentes materiales sobre el acuífero.

1.6. Otras metodologías utilizadas para estimar la vulnerabilidad de acuíferos

Existen otras metodologías utilizadas para el mismo fin, entre otros se puede mencionar:

SINTAC, desarrollado por CIVITA *et al*, 1990 (citado en Auge, 2004, pág. 3), la cual es una adaptación de la metodología DRASTIC, adecuada a las condiciones hidrogeológicas de Italia.

El método EPIK, desarrollado por Doerfliger y Zwahlen 1997, (citado en Auge, 2004, pág. 5) para acuíferos kársticos.

Método DhT' (Relación de potencial hidráulicos), desarrollado para la red CyTED de vulnerabilidad de acuíferos (citado en Auge, 2004, pág. 8) estima la vulnerabilidad hidrogeológica en acuíferos confinados y semiconfinados principalmente, se consideran las características físicas y geométricas del acuitardo, tales como permeabilidad vertical, espesor, porosidad, continuidad y diferencia de potenciales hidráulicos entre el acuífero confinado por debajo del acuitardo y el acuífero libre, el cual queda por encima.

1.7. Selección de métodos a utilizar

La selección de los métodos DRASTIC y GOD, fue a causa de la gran aceptación que estos tienen en la comunidad científica, ya que han sido ampliamente utilizados en diferentes partes del mundo, asimismo, la forma de caracterizar la vulnerabilidad hidrogeológica, es similar.

El AVY fue seleccionado porque es una metodología muy poca utilizada en la región, por otra parte, forma de caracterizar la vulnerabilidad difiere a la empleada en el DRASTIC y GOD.

Por lo que en esta investigación se pretende, comparar resultados entre métodos ampliamente utilizados (DRASTIC, GOD), con metodologías poco desarrollados en la región, como es el AVY.

1.8. Definición de riesgo

La definición más lógica del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas es concebirlo como : la interacción entre la carga contaminante y la vulnerabilidad del acuífero, determina el riesgo de que la contaminación penetre al acuífero. (Foster & Hirata, 1991, pág. 6).

- La carga contaminante que es, será o pudiera ser aplicada al subsuelo como resultado de una actividad humana.
- La vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación, debido a las características naturales de los substratos que lo separan de la superficie.

El riesgo de contaminación se entiende como: La probabilidad que las aguas subterráneas se contaminen con concentraciones por encima de los recomendados por la OMS, para la calidad de agua de consumo humano. (Foster y Hirata, 1991, pág. 7)

En el ámbito de las aguas subterráneas el riesgo de contaminación está formado por la interacción de las siguientes partes:

- La pasiva, representada por la vulnerabilidad, que no depende de la actividad humana y no cambia perceptiblemente con el tiempo.
- La activa, representada por la amenaza, que depende directamente de la actividad humana en la superficie o subsuperficie del suelo, la cual puede cambiar con el tiempo.

Este concepto es equivalente a la definición de Foster & Hirata, (1991, pág. 7) de riesgo de contaminación de un acuífero. Sin embargo, se debe ser

cuidadoso con la definición de activo y pasivo. La actividad humana puede cambiar características "intrínsecas" del acuífero, como la capacidad de atenuación de las capas sobre el acuífero, el mecanismo de recarga y el espesor de suelo. La amenaza por su parte no es siempre activa. En el sentido estricto de la palabra una ciudad puede cambiar, pero difícilmente dejará de ser ciudad, por lo tanto, la amenaza no desaparecerá, por el contrario, normalmente aumentará con el crecimiento de la ciudad.

1.9. Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH)

La definición más aceptada es la que aprobó Global Water Partnership (GWP) por sus siglas en inglés, mejor conocida en nuestra región por la Asociación Mundial para el Agua.

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) se puede definir como un proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinados del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales (GWP, 2008, pág. 4).

2. CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA

2.1. Localización del área de estudio

El municipio de Achuapa está localizado en la zona norte del departamento de León, al cual pertenece. Está ubicado entre las coordenadas 13° 03 'de latitud norte y 86°35' de longitud oeste, la altitud media del municipio es de 330 msnm, su extensión territorial es de aproximadamente 416.24 km². El casco urbano del municipal de Achuapa se sitúa a 120 km de la cabecera departamental de León y 210 km de la ciudad capital Managua.

Achuapa colinda al norte con el municipio de San Juan de Limay, del departamento de Estelí, al sur con El Sauce, del departamento de León; al este con el municipio de Estelí, perteneciente el departamento del mismo nombre, y al oeste con Villanueva, municipio del departamento de Chinandega.

La población aproximada es de 14,983 hab (Alcaldía de Achuapa, 2018, pág. 6) de los cuales el 51 % son del sexo masculino y el 49 del sexo femenino. La densidad poblacional es de aproximadamente 36 hab/km². El municipio está dividido en 20 comarcas, 48 comunidades y 110 caseríos (INETER, 1999), el casco urbano se comprende en 4 zonas y un barrio llamado San Juan.

El acuífero del valle de Achuapa cubre una extensión territorial aproximada 25 km² (5.96 % del área total del municipio), se localiza entre las coordenadas UTM-WGS 84, 1444768 N; 539140 E, y 1443161 N, 546861 E, zona 16 Norte, a una elevación promedio de 309 msnm. La localización del área de estudio se muestra en la figura 1.

Tomar como referencia el casco urbano de Achuapa, existen dos vías principales que permiten el acceso al acuífero, la carretera pavimentada código 38 comunica al sur con el municipio de San Juan de Limay, y al norte con el municipio de El Sauce, así mismo es la vía principal para la comunicación con la cabecera departamental y la ciudad capital, también el camino general código 40 sirve de conexión con el municipio de Estelí.

2.2. Hidrología

Así como se muestra en la figura 1, hidrográficamente el área de estudio se ubica dentro de la cuenca del río Estero Real, la cual fue identificada con el código 60 en el proyecto hidrometeorológico centroamericano (INETER, 1972).

Según el estudio Recursos Hídricos de Nicaragua (FAO, 2010, págs. 10, 60, 61), la cuenca Estero Real posee una área aproximada de 3,691 km², las aguas superficiales drenan a la vertiente del pacífico, siendo este escurrimiento próximo a 1058 Mm³/año, equivalente a 286.6 mm. El promedio de la recarga subterránea se estima en 80 Mm³/año que equivale a 21.67 mm, asimismo, la cobertura boscosa es de 17 %.

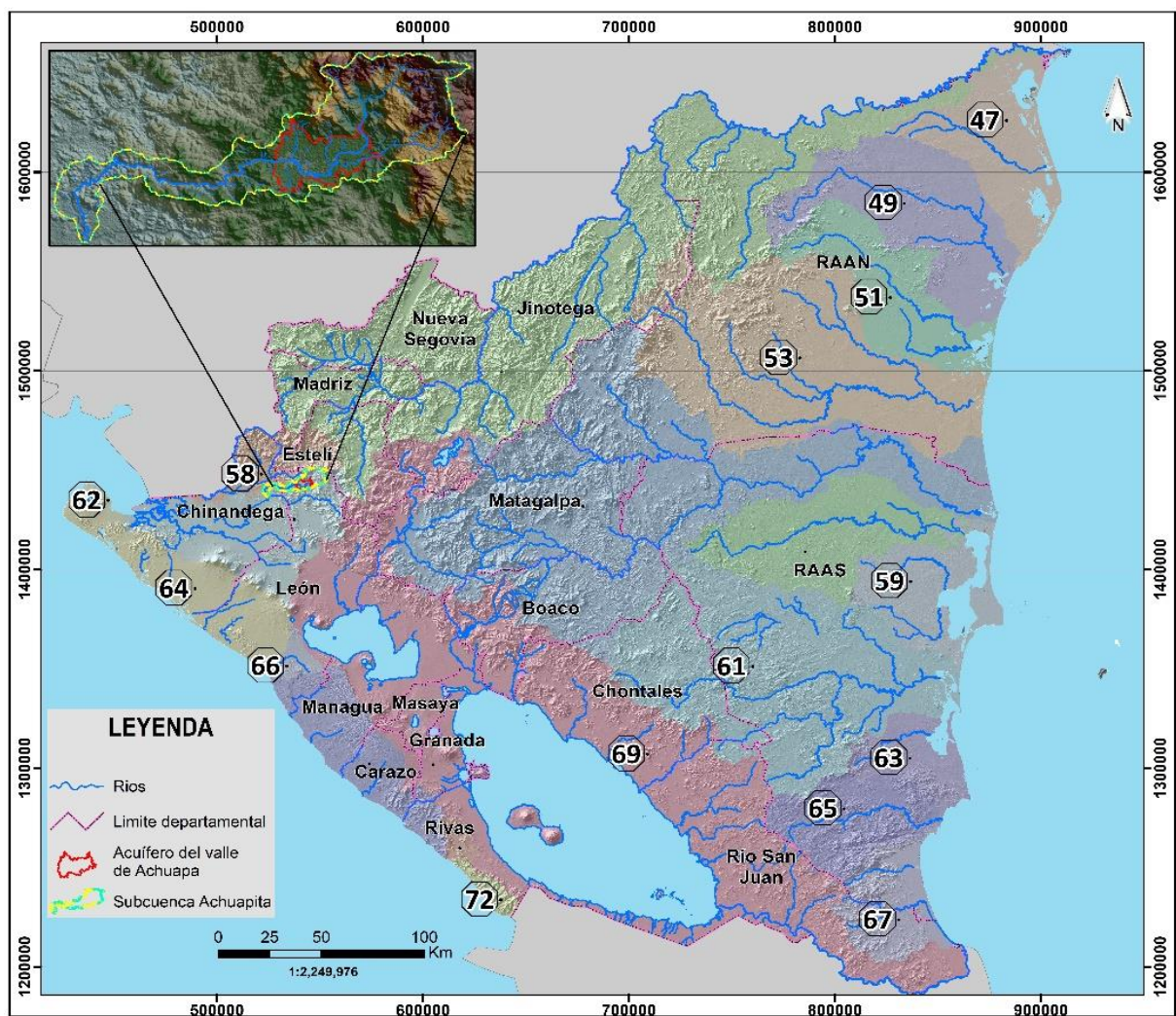
2.2.1. Hidrología local

Los ríos El Coyolar y Chiquito son las fuentes hídricas superficiales principales del municipio, estos son de régimen permanente, la unión de estos da origen al río Achuapita.

El acuífero del valle de Achuapa, así como se muestra en la figura 1, forma parte de la subcuenca del río Achuapita, la cual posee un área próxima a los 161 km², esta unidad hidrológica nace en el sitio conocido como Cordillera

Horno Grande, ubicado al noreste del valle, a una altura topográfica de 1000 msnm y desemboca directamente al río principal de la cuenca hidrológica Estero Real a una elevación de 90 msnm. Dentro de la subcuenca del río Achuapita, los cauces intermitentes son números y bien distribuidos.

Figura 1. Mapa de localización y cuencas hidrológicas



Fuente: proyecto hidrometeorológico centroamericano PHCA, (1960 – 1972).

2.3. Descripción geomorfología

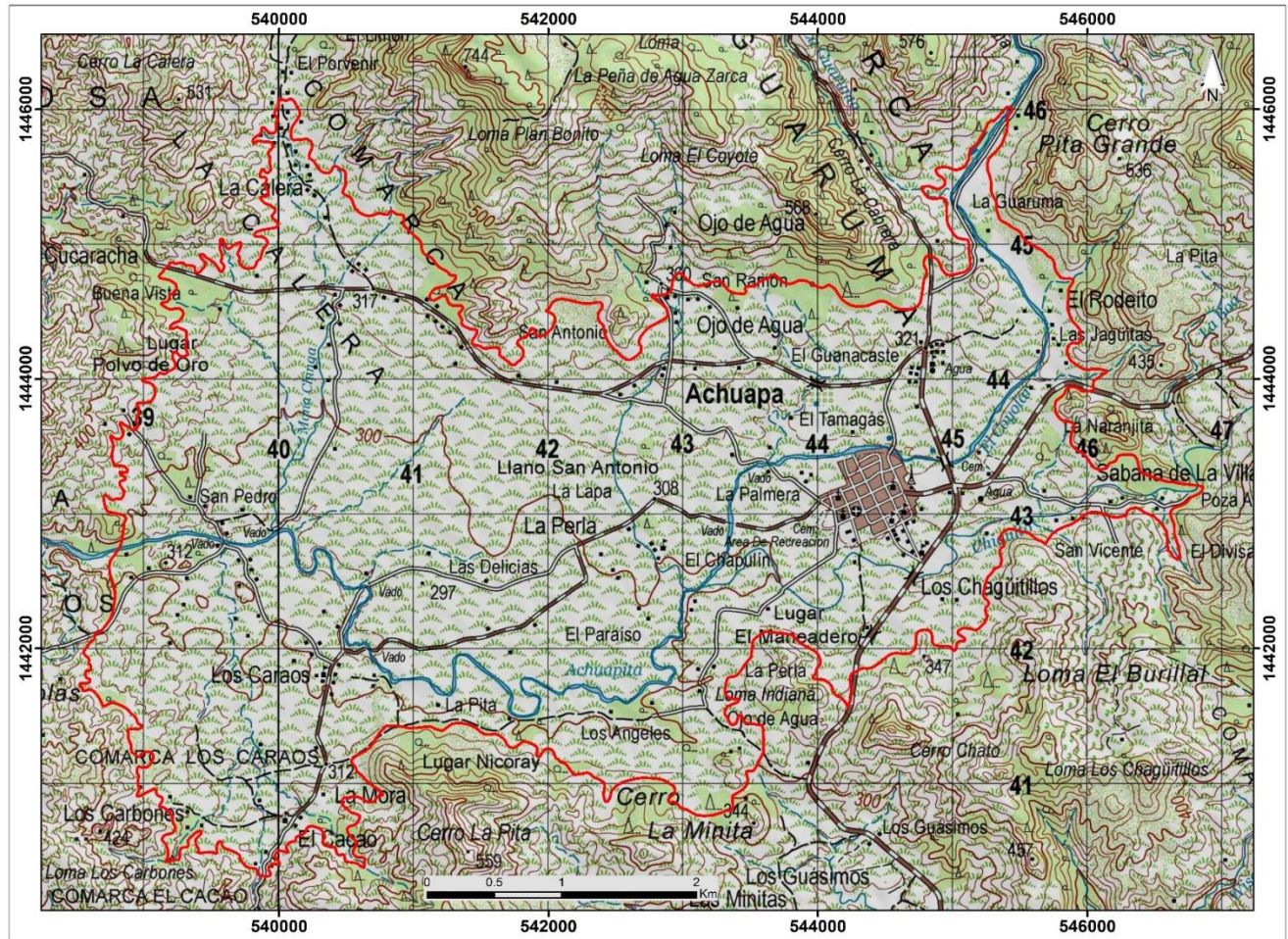
El acuífero se ubica en la provincia geomorfológica conocida como Tierras Altas del Interior, comprende el 33 % de la superficie total de Nicaragua, con un área próxima a los 42,400 km², (Fenzel, 1989, pág. 5), se ubica en el centro del país y es topográficamente la región más elevada con un relieve montañoso y accidentado que varía desde 500 a 2000 msnm. La región está constituida por una amplia meseta volcánica profundamente disecada por ríos caudalosos, los cuales se extienden desde el Norte (curso superior del río Coco), hasta la región del río San Juan de Nicaragua, ubicado al sur del país.

En la región se encuentran numerosos valles intramontanos, siendo El Sauce, Achuapa, San Juan de Limay, Estelí, Sebaco, Pastama y Jinotega, los más importantes. Las formas de relieve predominantes son antiplanicies, mesas, cuevas, cordilleras, serranías, colinas aisladas, terrenos montañosos quebrados, moderadamente hasta muy escarpados, con pendientes que varían entre 15 y 75 %. (Fenzel, 1989, pág. 5)

2.3.1. Geomorfología local

Entre los principales rasgos geomorfológicos se destacan: Al norte. San Jerónimo de Bobadilla, Cerro La Zorra y el Roblito; al sur: el cerro La Mina y El Arrayán; al este, la cordillera Horno Grande, de donde nace la fuente del río Chiquito y prevalece la conservación de bosques secos tropicales y de coníferas; al oeste: el cerro La Flor, El Jocote, cerro Verde, Sulicayan, La Culebra y la Cordillera el Chifle, al centro del municipio, se destaca un valle donde se asienta la población urbana.

Figura 2. Mapa de relieve del área de estudio



Fuente: INETER, (2006).

2.4. Climatología

De acuerdo al Sistema de Köppen, modificado por García (mapa de Clasificación Climática período 1971 – 2000, INETER, 2004), en el acuífero del valle de Achuapa predomina el clima caliente y sub-húmedo con lluvia en verano (AW_2); Este clima predomina en toda la región del pacífico y en la parte de la región norte. Se caracteriza por presentar una estación seca (noviembre - abril) y otro lluviosa (mayo – octubre). La precipitación varía desde un mínimo de 600 mm en los valles intramontanos de le Región Norte, hasta un máximo de

2000 mm al este del municipio de Chinandega y en el municipio de Tuma – La Dalia. (INETER, 2004)

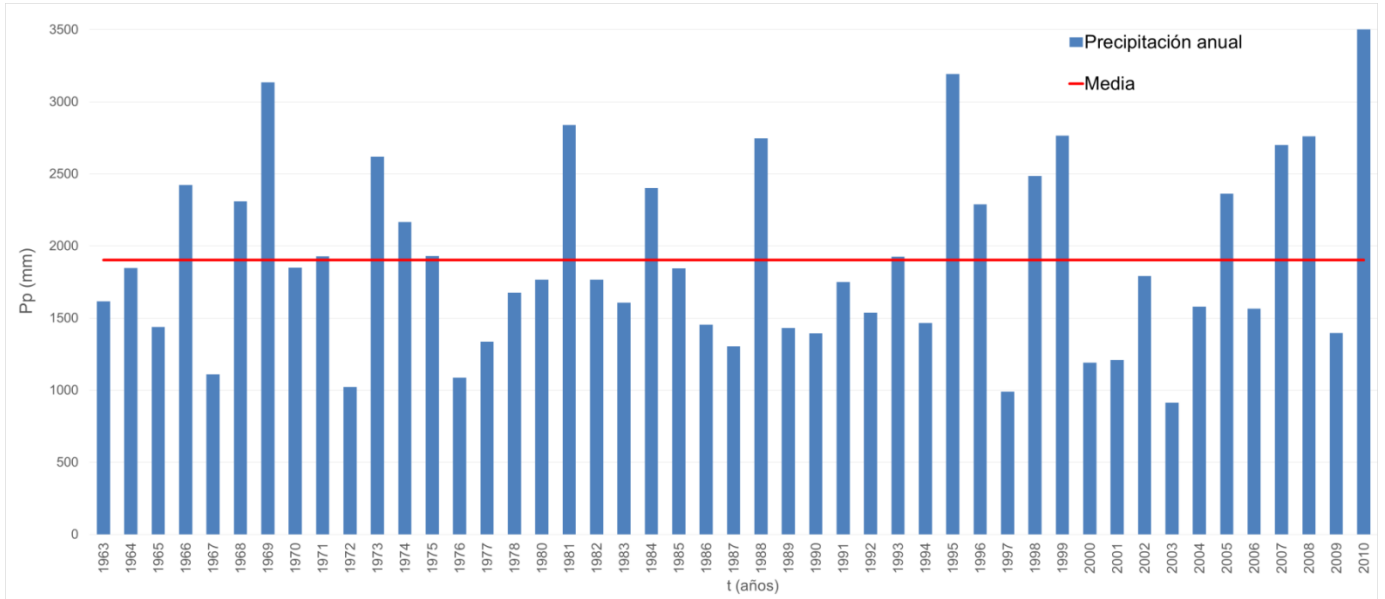
Según el Atlas Climático Nicaragüense periodo 1971 – 2000 (INETER, 2004), la precipitación media anual en el valle de Achuapa varía entre 1800 – 2000 mm/año. La temperatura media anual presenta una variación de 22 a 28 °C, registrándose un aumento en los meses de noviembre a abril.

Dentro del acuífero se ubica una estación de tipo PV (Pluviométrica), la cual es parte de red de registro meteorológico del INETER, ubicada en las coordenadas UTM WGS 544722 E y 1442977 N, con una evaluación de 330 msnm y código 6006. La estación PV de Achuapa cuenta con un registro continuo 47 años (1963 – 2010), excluyendo el año de 1979, registrando una precipitación promedio de 1903.4 mm/año. (INETER, 1963 - 2010).

Se tomó como referencia el promedio aritmético de los datos observados en la estación PV Achuapa, se deduce que en 28 años fueron períodos hidrológicos secos, ya que la precipitación fue menor a la media y 19 años sobrepasaron el valor medio, correspondiendo a años hidrológicos húmedos.

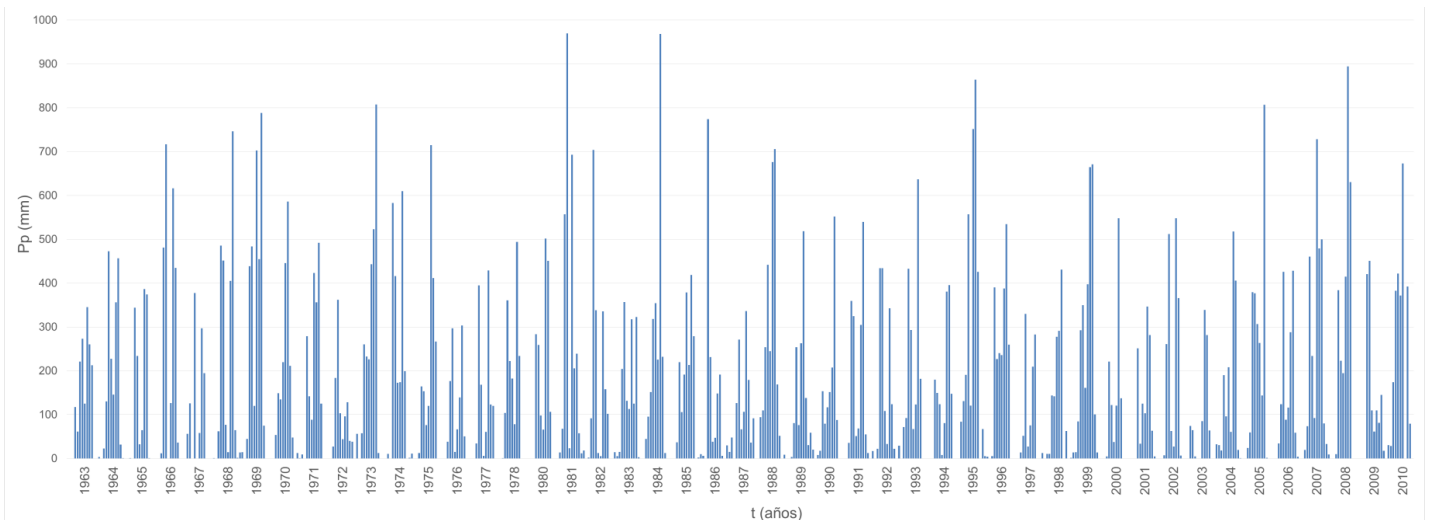
En promedio, se presentan 2 años secos por 1 año húmedo. El período hidrológico más crítico, se registró en 2003 (912.2 mm), así mismo el año hidrológico más acuoso, corresponde al 2010 (3,555.8 mm).

Figura 3. Precipitación anual estación PV Achuapa



Fuente: INETER, (1963 – 2010).

Figura 4. Precipitación mensual estación PV Achuapa



Fuente: INETER, (1963 – 2010).

En la tabla I, se observan los parámetros estadísticos estimados de forma convencional, los cuales fueron determinados con datos observados de la serie de tiempo de lluvia anual la estación PV El Sauce.

Tabla I. **Parámetros estadísticos estación PV Achuapa**

Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Coefficiente de asimetría (Sesgo)	Curtosis	Mínimo	Máximo
1903.4	645	0.34	0.62	-0.33	912	3555

Fuente: elaboración propia (2019).

2.5. Descripción geológica

El acuífero del valle de Achuapa forma parte de la provincia volcánica terciaria, la cual está dentro de la provincia geológica central, conocida geográficamente como Tierras Altas del Interior Mc. BIRNEY Y WILLIAM, 1966, (citado en Fenzel, 1989, págs. 15, 16)

Las rocas de esta provincia han sido divididas en dos grandes grupos: Grupo Coyol y Grupo Matagalpa.

2.5.1. Grupo coyol (Tmca, Tmcd)

McBirney 1965 (citado en Hodgson, 2000, pág. 55) señaló al Grupo Coyol como extensos depósitos horizontales de lavas e ignimbritas que forman amplias mesetas y altiplanicies, en donde se observan cambios distintos muy pronunciados, tanto en el terreno como en las rocas.

Se observan mesetas horizontales de horizontes masivos de ignimbritas, silicíticas, intercaladas con sedimentos tobáceos y algunos horizontes de lava básica. El Grupo Coyol es de la época del Mioceno-Plioceno, tiene una edad próxima a los 3 – 30 millones de años y un espesor que varía entre los 200 a 2300 m. en la provincia central. (Fenzel, 1989, pág. 30).

2.5.2. Grupo matagalpa (Tmci)

Mencionado por primera vez por McBirney and Williams en 1965, en donde predominan rocas autobrechosas andesíticas piroxénicas, lava y lahar en bloques. Debido a la porosidad de la roca y la abundancia de lluvia, la meteorización es profunda.

La alteración hidrotermal ha reducido las rocas a una arcilla blanca amarillenta. Dacitas y dacitas laminares son abundantes y mejor conservadas (citado en Hodgson, 2000, págs. 68-72). La edad del Grupo Matagalpa se refiere al Eoceno-Oligoceno (57.8 – 36.6 millones de años). Garayar en 1971 (citado en Hodgson, 2000, pág. 70), señaló que el espesor varía entre los 200 a 1400 m.

2.5.3. Intrusivos (Tii)

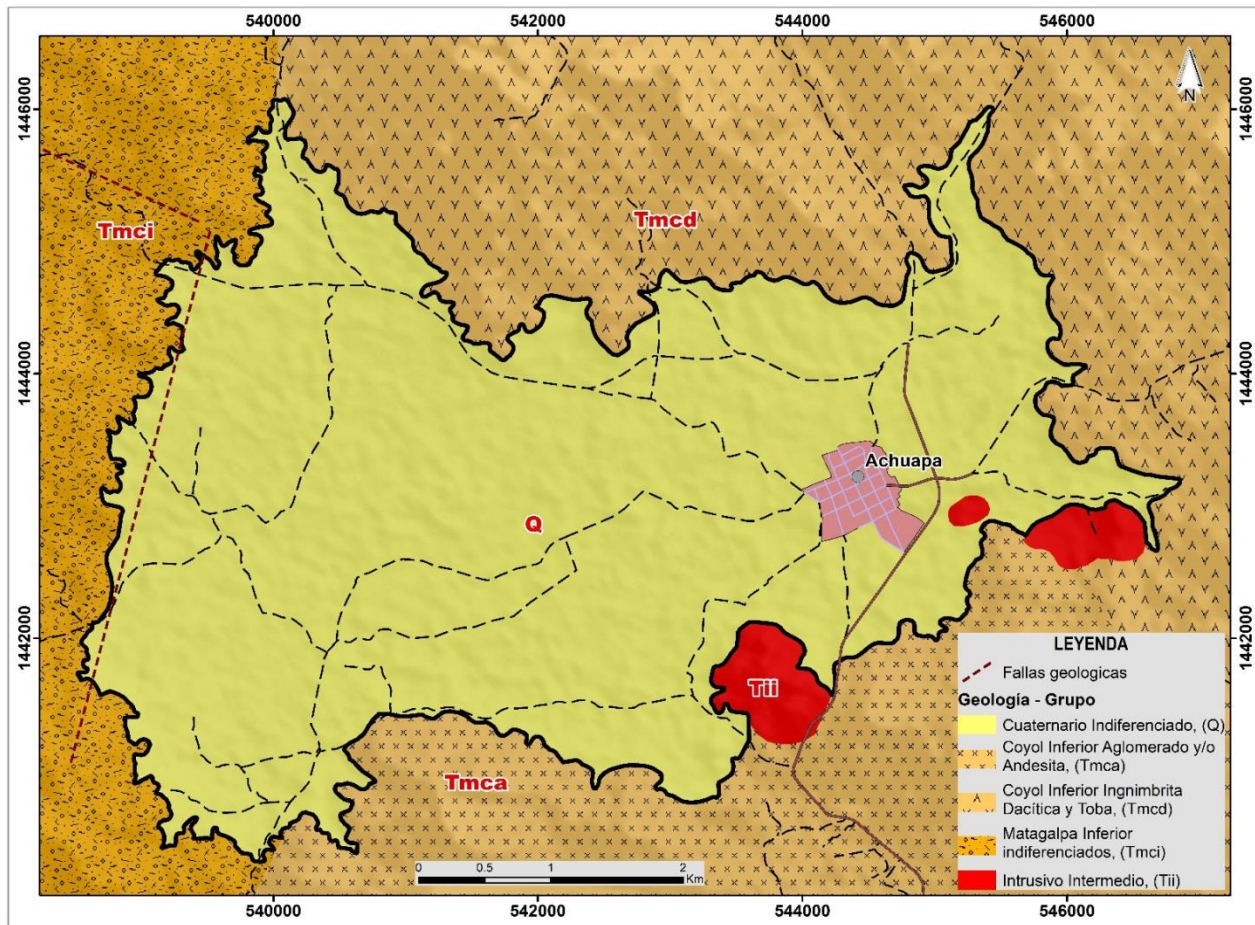
Los cuerpos intrusivos tienen un carácter petrográfico bastantes uniformes y están construidos en forma predominante por cuarzo y feldespatos. Generalmente son rocas holocristalinas, de textura granitoide de grano grueso, media a fino y color variable desde gris claro, oscuro a negro y rosado. (Hodgson, 2000, pág. 105)

2.5.4. Cuaternario aluvial - residual (Qal-r)

Estos depósitos se encuentran sobre el fondo de algunos valles intramontanos, cubriendo muchas rocas básicas (basalto, andesita, ignimbritas, tobas, entre otras), y a lo largo de algunos ríos donde se interdigitan aluvial y suelo residual. (INETER, 2004, pág. 26). Esta formación, se compone

principalmente por sedimentos consolidados (más antiguos) y recientes como: guijarros, bolones, arenas, suelos arenosos, arcillas.

Figura 5. Mapa de geología



Fuente: Catastro e Inventario de Recursos Naturales Nicaragua, (1971).

2.6. Suelos

2.6.1. Clasificación taxonómica

En la descripción general del mapa de órdenes y sub órdenes de suelo (MAG *et al.*, 2015), se indica que:

En Nicaragua existen una gran variedad de suelos distribuidos en función de la geología, clima, el relieve, con distintos estados de desarrollo. El sistema de clasificación utilizado normalmente en Nicaragua es el creado por el departamento de Agricultura de los Estados Unidos y el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (USDA. NRSC) llamado “Soil Taxonomy” (SSS, 1975) y la Word Reference Base (WRB) creada por la FAO como mapa de Suelos del Mundo (FAO – UNESCO, 1971 – 1981).

Este sistema fue utilizado en Nicaragua desde el año 1971, en los levantamientos de suelos en la región del pacífico Nicaragüense (INETER, 1971).

Este sistema de clasificación está organizado en seis categorías, las cuales son: orden, suborden, gran grupo, subgrupo, familia y serie. Los nombres de los suelos están basados en raíces griegas y latinas, denotando significados prácticos, características de suelos o régimen de humedad donde se han desarrollado, (MAG *et al*, 2015), como se muestra en la figura 6.

2.6.2. Orden de suelo dentro del acuífero

Según el mapa de suelos, dentro del acuífero del valle de Achuapa existen las siguientes clases taxonómicas:

2.6.2.1. Entisols (L):

Suelos recientes de formación con poco o ningún desarrollo de horizontes o capas, generalmente muy superficiales. Se encuentran en paisajes de laderas, superficies erosionadas y depósitos recientes, se desarrollan en cualquier tipo de clima y régimen de humedad del suelo.

Tienen diversos usos de la tierra. Este tipo de suelo cubre una extensión de 2.31 km², correspondiente al 9.30 % del área total del acuífero.

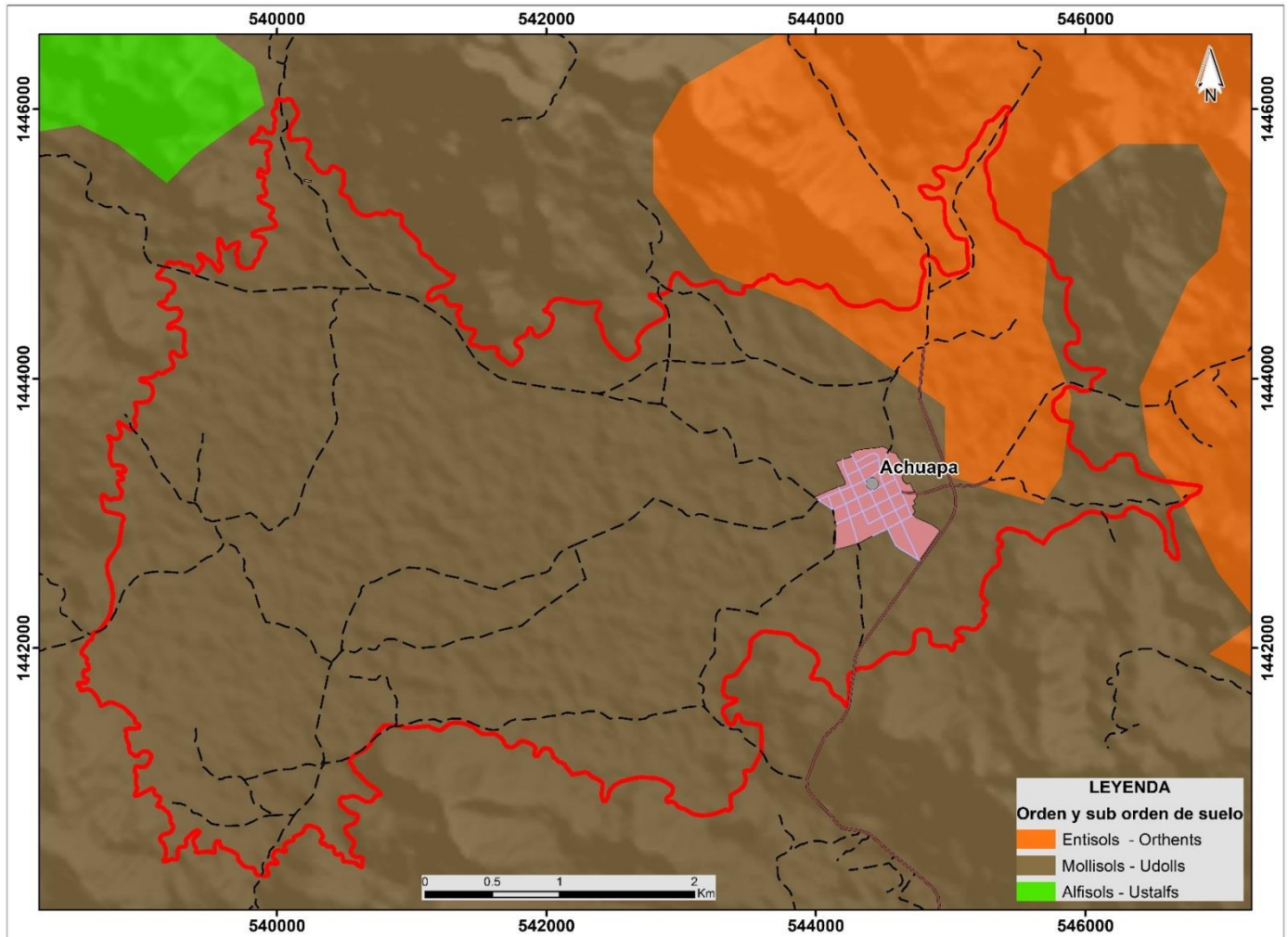
Sub orden Orthents (LF): Suelos de escaso desarrollo, se caracterizan por ser muy superficiales a moderadamente superficiales, ya que se encuentran en lugares accidentados, con pendientes que van de 15 a más de 50 %, donde la erosión reduce las posibilidades de desarrollo de horizontes.

2.6.2.2. Mollisols (I)

Son suelos oscuros, enriquecidos por los altos contenidos de materia orgánica, acorde con su definición etimológica, son suelos suaves, bien estructurados, no son duros ni masivos cuando se secan. Tienen alta fertilidad natural, se han desarrollado, a partir de materiales geológicos básicos, principalmente volcánicos, o de sedimentos en zonas de acumulación. Dentro del acuífero, cubren un superficie de 22.49 km², correspondiente al 90.70 % del área total.

Sub orden Udolls (IH): Estos suelos pertenecen secos menos de 90 días consecutivos en años normales durante el período lluvioso, esto los hace cultivables, ya que no presentan déficit de agua en el suelo durante el desarrollo del cultivo, en Nicaragua están distribuidos en las regiones sub húmedas y húmedas, con una variedad de usos de la tierra.

Figura 6. **Mapa taxonómico**



Fuente: MAG, MARENA, UNA, INAFOR y INETER, (2015).

2.7. Uso de la tierra

2.7.1. Sistemas de clasificación

Sokal, (1974), define un sistema de clasificación como: “El orden o la disposición de los objetos en grupos establecidos sobre la base de sus

relaciones”. Esta una representación abstracta de la realidad en el campo, utilizando criterios de diagnósticos bien definidos.

Para el mapa de coberturas y usos de la tierra, se seleccionaron 17 clases o categorías dando mayor relevancia a elementos forestales y agropecuarios. El mapa se elaboró a partir del procesamiento y clasificación de 300 imágenes satelitales RapidEye TM, correspondientes a los años 2010 – 2012 y verificación de campo 2014 – 2015, obteniendo precisión del 93 %.(MAG *et al.* 2015).

2.7.2. Uso de la tierra dentro del acuífero

Así como se muestra en la tabla I y la figura 7, las áreas destinadas a cultivos anuales y pastos, ocupando un área conjunta de 16.58 km², equivalente al 66.88 %, se ubican al centro del valle, donde la pendiente del terreno es plano o bastante plano.

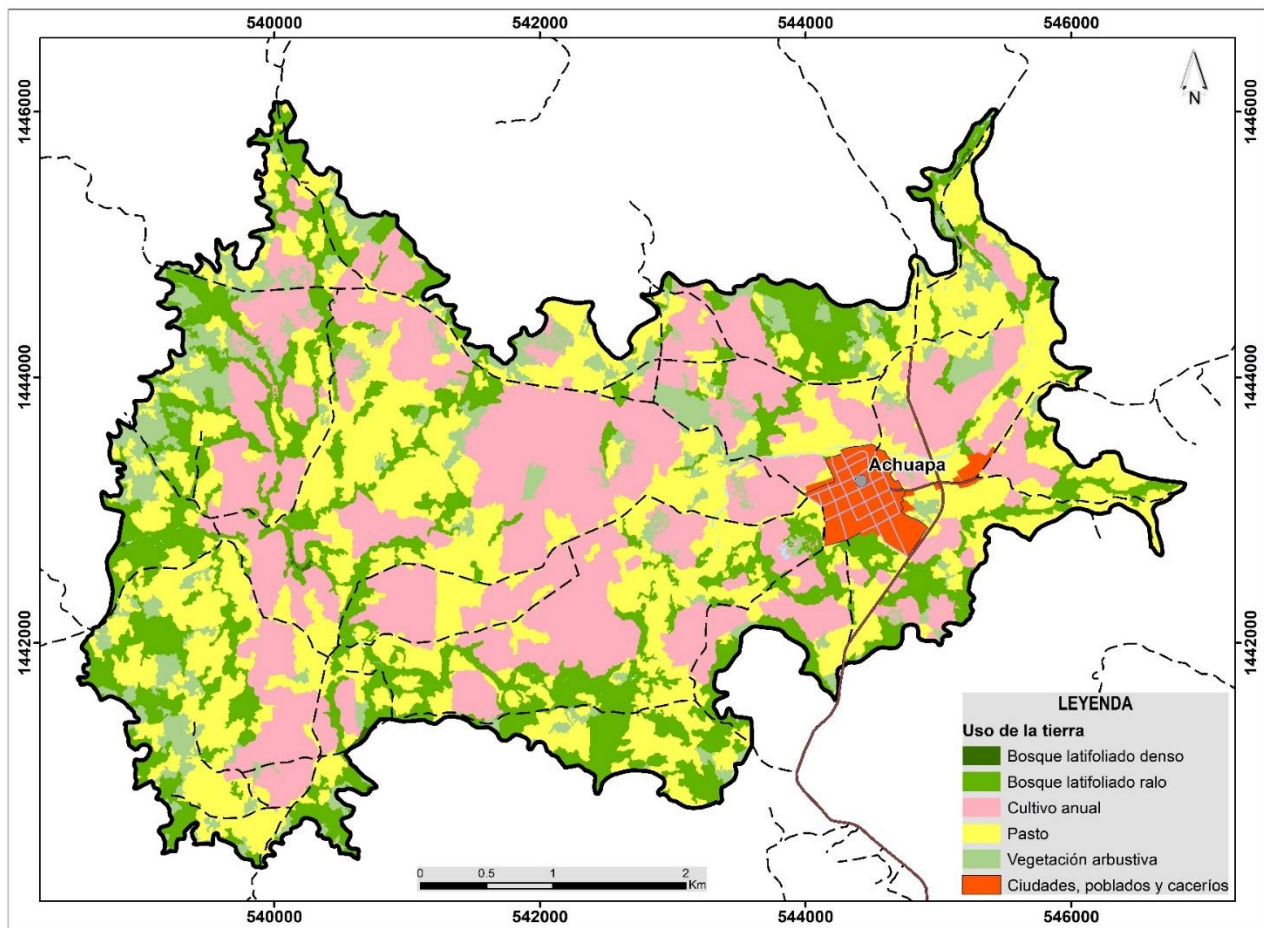
Las áreas boscosas ocupan el al 22.2 %, correspondiente a 5.54 km². Al sobreponer la figura 1 y 7, se observa que este esta cobertura, se ubica principalmente en las riberas y márgenes de ríos y arroyos, así mismo la geometría de estas, varían en función de los cauces existentes en el acuífero, correspondiendo a bosques ribereño o de galería.

Tabla II. Usos de la tierra

Uso de la tierra	Área (km ²)	Porcentaje
Bosque latifoliado denso	0.02	0.1%
Bosque latifoliado ralo	5.42	22.1%
Pasto	8.69	35.4%
Cultivo anual	7.90	31.6%
Ciudades, poblados y caseríos	0.40	1.6%
Vegetación arbustiva	2.27	9.2%
Total	25	100.0%

Fuente: MAG, MARENA, UNA, INAFOR, INETER, (2015) y elaboración propia.

Figura 7. Mapa de uso de la tierra



Fuente: MAG *et al.*, (2015).

2.8. Hidrogeología

El acuífero del valle de Achuapa yace principalmente sobre rocas volcánicas terciarias (grupo Coyol y Matagalpa), las cuales predominan en las Tierras Altas del Interior, estas formaciones no han desarrollado acuíferos continuos de gran extensión, debido a sus condiciones hidrodinámicas adversas.

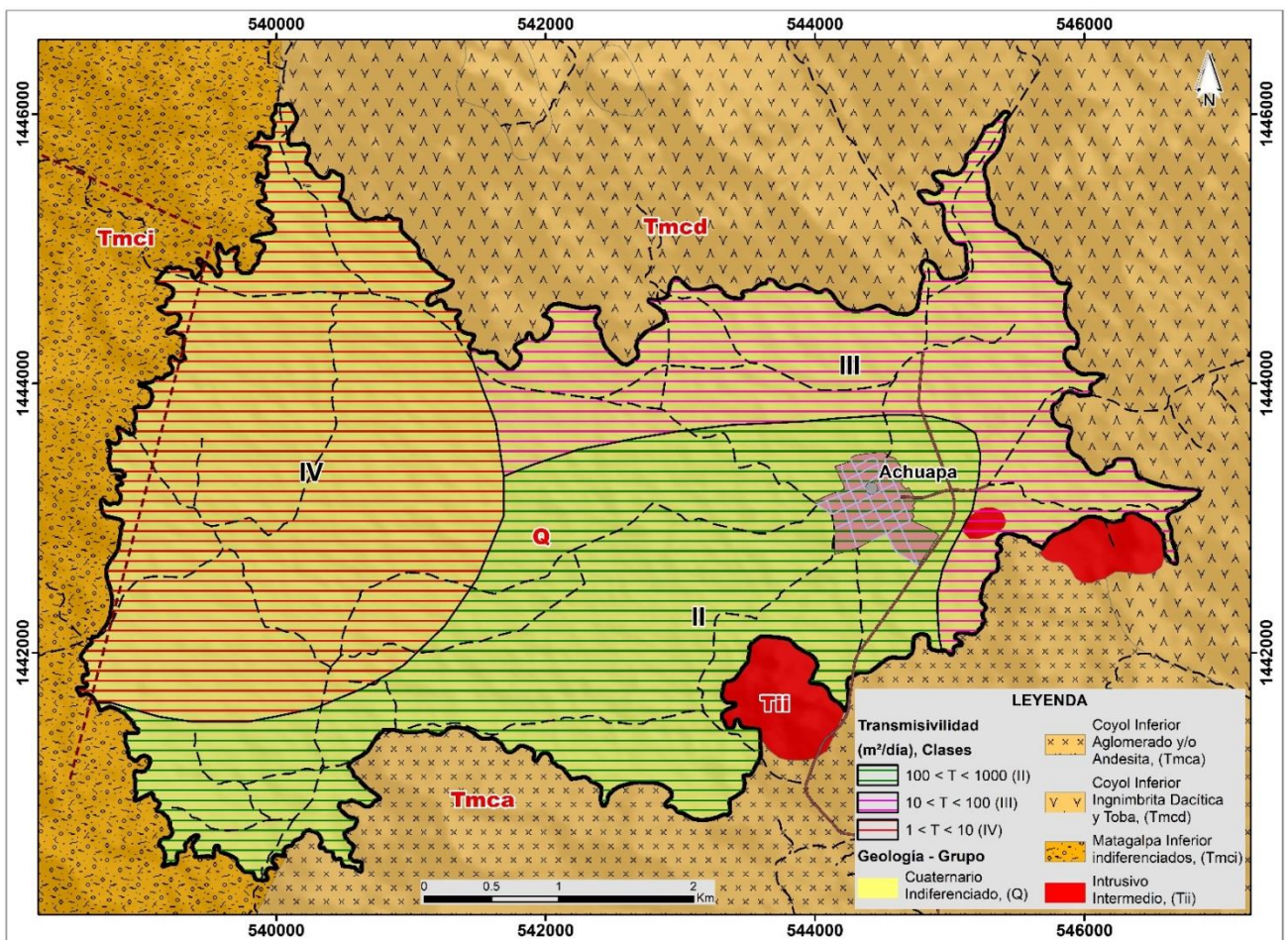
El acuífero del valle de Achuapa está compuesto por rellenos coluvio aluviales del cuaternario (Qal – r), este se ubica entre las curvas de nivel 300 y 340 msnm. La profundidad del agua subterránea varía entre 6 y 20 m, con un volumen aprovechable) de aproximadamente 10 millones de m³/año. (Fenzel, 1989, pág. 54)

Según el mapa hidrogeológico de la hoja Estelí (INETER, 2004, pág. 47), como se muestra en la figura 8, en el acuífero de Achuapa, se encuentran 3 áreas con diferentes clases de transmisividad, las cuales oscilan entre 1, 10, 100 y 1000 m²/día (clase IV, III y II respectivamente), sin embargo, este mismo mapa (hoja hidrogeológica Estelí), menciona que los datos dentro del valle son escasos, aislados o inexistentes, por lo que el nivel de veracidad es dudoso.

En los alrededores del valle, precisamente en las áreas de mayor elevación, la presencia de suelos antiguos sepultados y zonas de rocas meteorizadas (descompuestas) alternando con capas de rocas frescas o poco meteorizadas y fracturadas, favorecen la formación de acuíferos colgados, que al ser cortados por las quebradas dan origen a los numerosos manantiales (ojos de agua), que brotan en las zonas altas en diferentes alturas topográficas, contribuyen en la recarga natural del acuífero.

La geología del entorno del valle está compuesta por los Grupos Coyol (Tmc), Matagalpa (Tomm) e intrusivos intermedios (Tii). Las propiedades hidráulicas de estas formaciones (transmisividad, permeabilidad y capacidad específica), varían según el medio físico (poroso, compacto, o fisurado), esto debido a la heterogeneidad de las rocas, por esta razón que la búsqueda del recurso subterráneo debe realizar particularmente, estudiando cada caso de forma independiente.

Figura 8. Mapa de transmisividad hidráulica



Fuente: INETER, COSUDE, ENACAL (2004).

2.9. Geofísica sondeos eléctricos verticales SEV

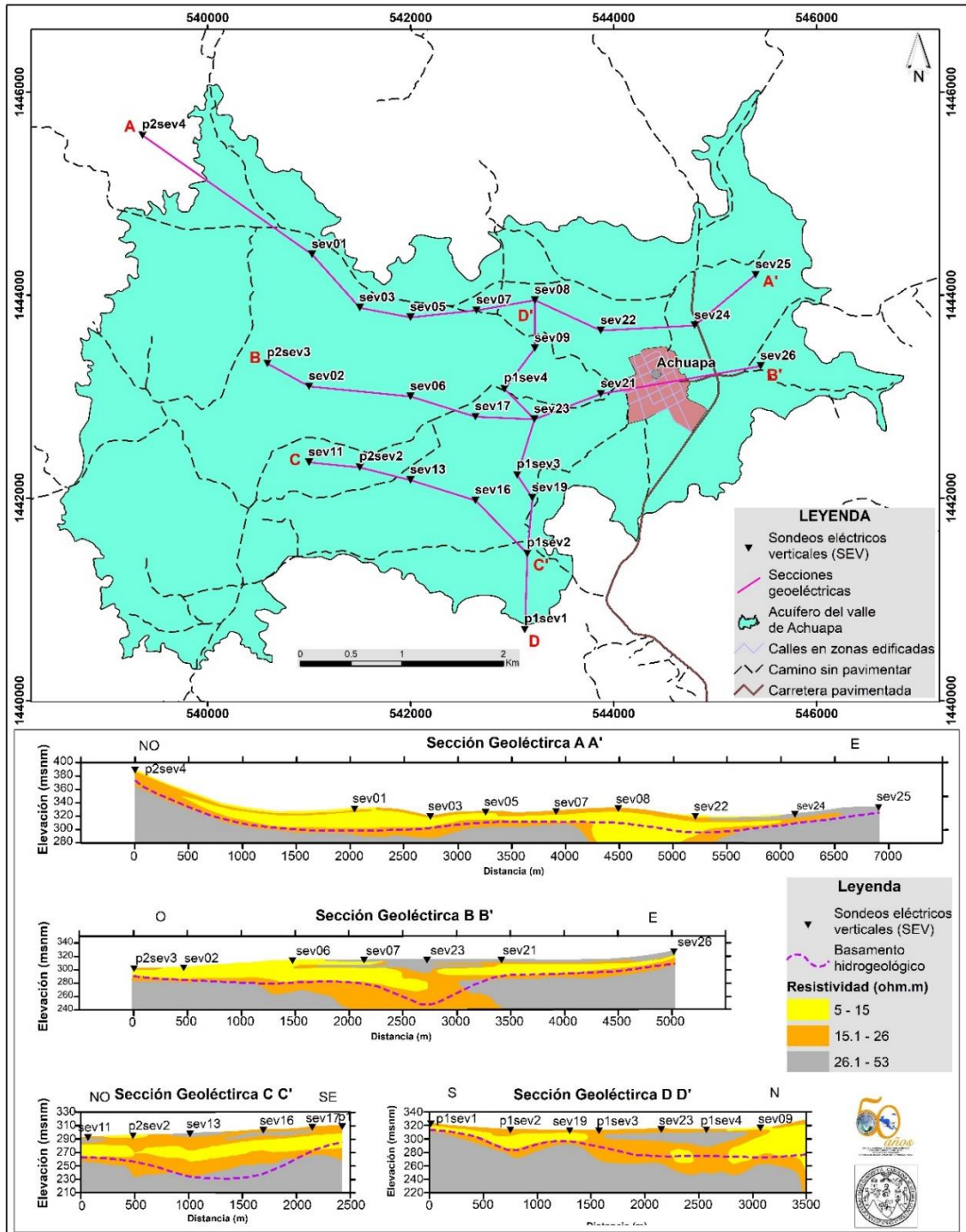
En el marco del convenio de colaboración entre ENACAL – COSUDE – INETER del proyecto de “Mapficiacion Hidrogeológica de la Región Central” y precisamente en la hoja Estelí 1:250,000, se elaboraron un serie de sondeos eléctricos verticales (SEV), en los valles y depresiones intramontanos previamente seleccionados, con el fin de conocer el potencial hidráulico del recurso hídrico subterráneo.

El objetivo principal de estos sondeos fue la determinación del espesor de los materiales permeables y la profundidad del basamento hidrogeológico, así mismo con los resultados obtenidos se puso en evidencia propiedades eléctricas del subsuelo e información de la composición litológica de las rocas que componen el medio subterráneo. (Traña, Vázquez, y Bobadilla, 2002).

En el valle del acuífero de Achuapa se elaboraron 32 SEV distribuidas espacialmente en toda el área, de estos se construyeron 4 secciones geoelectricas, los cuales se muestra en la figura 9.

En promedio, el basamento hidrogeológico se encuentra entre 30 – 40 m, este se compone por rocas volcánicas del grupo Coyol, en ciertos lugares, esta capa confinante supera los 40 m, como es el caso de la parte central del perfil C - C' (SEV 16).

Figura 9. Mapa de ubicación de los SEV y secciones geoelectricas



Fuente: Estudio Geofísico Mapeación Hidrogeológica de la Región Central – Hoja Estelí, (2002) y modificado para este estudio.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Método DRASTIC

El DRASTIC (Aller *et al.* 1987), busca evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos, se basa en la asignación de índices que van de 1 a 10, de acuerdo a las propiedades naturales de los parámetros considerados, siendo 10 al valor de máxima asignado. Cada variable se clasificará, según las características intrínsecas de medio (**r**), para posteriormente multiplicarse por el valor de ponderación (**w**), el cual varía de 1 a 5 establecido en la metodología, la ecuación utilizada en es la siguiente:

$$DRASTIC = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w$$

r = clasificación.

w = peso.

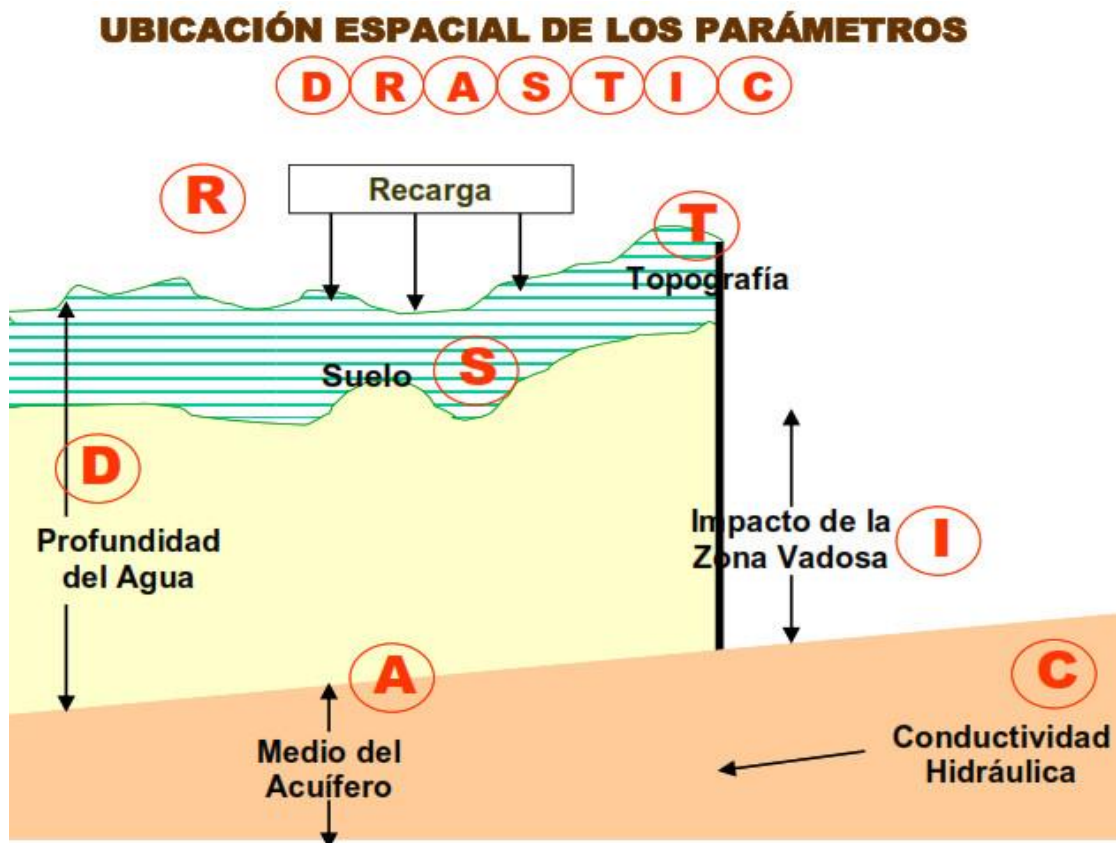
En la figura 10, se muestra la ubicación espacial de cada parámetro y en la tabla III, se observa el peso asignado a cada variable de acuerdo a su importancia, en el método.

Tabla III. **Peso asignado a cada parámetro, según su importancia**

Parámetro	Peso
D Profundidad del agua subterránea	5
R Recarga neta	4
A Medio del acuífero	3
S Medio del suelo	2
T Topografía	1
I Impacto en la zona vadosa	5
C Conductividad hidráulica	3

Fuente: Metodología DRASTIC, (1987).

Figura 10. **Ubicación espacial de los parámetros DRASTIC**



Fuente: Metodología DRASTIC, (1987).

Tabla IV. **Clasificación de la vulnerabilidad, según el índice**

Índice de Vulnerabilidad	
< 100	Vulnerabilidad insignificante
101 - 119	Vulnerabilidad muy baja
120 - 139	Vulnerabilidad baja
140 - 159	Vulnerabilidad moderada
160 - 179	Vulnerabilidad alta
180 - 199	Vulnerabilidad muy alta
> 200	Vulnerabilidad extrema

Fuente: Metodología DRASTIC, (1987).

Los pasos metodológicos realizados para obtener cada una de las variables que contemple el método DRASTIC, se describen a continuación.

3.1.1. Profundidad del agua subterránea (D)

Para determinar la profundidad del agua subterránea, se realizó un inventario *in situ* de pozos perforados y excavados a mano (enero del 2019), distribuidos estratégicamente en el acuífero, como herramienta principal para esta actividad, se utilizó una cinta electrónica marca Solints, la cual emite sonido al entrar en contacto con el agua. En el anexo 10 y 11, se puede observar la sonda utilizada.

Tabla V. **Profundidad del agua subterránea (D)**

Profundidad (m)	Clasificación Dr
0 – 1.5	10
1.5 – 4.6	9
4.6 – 9.1	7
9.1 – 15.2	5
15.2 – 22.9	3
22.9 – 30.5	2
>30.5	1

Fuente: Metodología DRASTIC, (1987).

3.1.2. Recarga neta (R)

La estimación de la recarga se realizó con base al “*Mapa de distribución de la tasa de infiltración máxima estimada (en mm/mes) sobre la distribución de Grupos Litológicos definida para Nicaragua en el PNRH 2017*” (PNRH, 2017, pág. 59) y el dato de precipitación media anual, suministrado por la estación PV Achuapa. (INETER, 1963 - 2010).

Según tabla IV “*Valores de infiltración máxima obtenidos de los valores de permeabilidad vertical para grupos litológicos de Nicaragua*” (PNRH, 2017), la infiltración máxima en el acuífero del valle de Achuapa, se estima sea de 1999 mm/mes.

Tabla VI. **Recarga neta (R)**

Recarga (mm / año)	Clasificación Rr
0 – 50	1
50 – 103	3
103 - 178	6
178 - 254	8
>254	9

Fuente: Metodología DRASTIC, (1987).

3.1.3. Medio del acuífero (A)

Valora el tipo de material que constituye el acuífero, considerando que a mayor granulometría y fracturación, mayor permeabilidad. La caracterización de esta variable se realizó utilizando el mapa geológico del área de estudio, descripciones litológicas de pozos perforados por ENACAL (ver anexo 3 y 4) y los SEV realizados en el Estudio Geofísico para el Proyecto Mapificación Hidrogeológica de la Región Central – Hoja Estelí, (Traña *et al*, 2002, págs. 10, 25, 26).

Tabla VII. **Medio del acuífero (A)**

Tipo de acuífero	Rango de clasificación Ar	Valor típico Ar
Lutita masiva	1 – 3	2
Metamórfica/Ígnea	2 – 5	3
Metamórfica/Ignea meteorizada	3 – 5	4
Till glacial	4 – 6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 – 9	6
Arenisca masiva	4 – 9	6
Caliza masiva	4 – 9	6
Arena o grava	4 – 9	8
Basaltos	2 – 10	9
Caliza karstica	9 – 10	10

Fuente: Metodología DRASTIC, (1987).

3.1.4. Tipo de suelo (S)

Este parámetro se obtuvo del mapa de suelos de la república de Nicaragua, (MAG *et al.*, 2015), donde se describió de forma general órdenes y subórdenes de suelos.

Tabla VIII. **Medio del suelo**

Tipo de suelo	Clasificación S _r
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol – cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

Fuente: Metodología DRASTIC, (1987).

3.1.5. Topografía (T)

Para la determinación de este parámetro, se elaboró un modelo de elevación digital (DEM), tomando como base curvas de nivel del área de estudio, usando un sistema de información geográfica (SIG), se elabora un mapa de pendiente (%), para después reclasificarlo según indica la metodología.

Tabla IX. **Topografía (T)**

Pendiente (%)	Clasificación S _r
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
> 18	1

Fuente: Metodología DRASTIC, (1987).

3.1.6. Impacto en la zona vadosa (I).

El análisis de la zona vadosa, se analizó de igual forma que el parámetro del medio del acuífero, por lo que se utilizó la misma fuente de información.

Tabla X. Impacto en zona vadosa (I)

Tipo de material	Rango de clasificación Ar	Valor típico Ar
Capa confinante	1	1
Cieno – arcilla	2 – 6	3
Lutita	2 – 5	3
Caliza	2 – 7	6
Arenisca	4 – 8	6
Secuencias de arenisca, caliza y lutita	4 – 8	6
Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo	4 – 8	6
Metamórfica/Ignea	2 – 8	4
Arena y grava	6 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Caliza kárstica	8 – 10	10

Fuente: Metodología DRASTIC, (1987).

3.1.7. Conductividad hidráulica (C)

Este parámetro fue determinado utilizando la ecuación $K = T/m$ (Utilizada para estudios similares por INETER / departamento de Hidrogeología, donde:

T = Transmisividad ($m^2/día$).

K = Conductividad hidráulica.

m = Espesor saturado (m).

Los rangos de transmisividad, se tomaron del informe final “*Estudio de Mapificación Hidrogeológica e Hidrogeoquímica de la Región Central de Nicaragua*” (INETER, 2004, pág. 47). La profundidad del basamento

hidrogeológico se obtuvo de los SEV 36 antes mencionados. En sitios específicos donde se desconocía el espesor del acuífero, se realizó estimación, según apreciación del autor.

Tabla XI. **Conductividad hidráulica (C)**

Rangos (m/día)	Clasificación Cr
0.04 – 4.08	1
4.08 – 12.22	2
12.22 – 28.55	3
28.52 – 40.75	6
40.75 – 81.49	8
> 81.49	10

Fuente: Metodología DRASTIC, (1987).

3.2. Método GOD

El método GOD desarrollado por Foster & Hirata, (1988), trata de ser simple y sistemático. La metodología se basa en la interacción de tres variables discretas que son: (G) Grado de confinamiento o tipo de acuífero, (O) Grado de consolidación de las capas suprayacentes, (D) Distancia del agua subterránea desde la superficie del suelo.

El índice de vulnerabilidad, según este método se calcula como el producto de los siguientes factores:

$$VULNERABILIDAD = G * O *$$

3.2.1. Grado de confinamiento hidráulico G y ocurrencia del sustrato suprayacente O

La determinación de estas variables fue similar a los parámetros “A” y “I” descritas en la metodología DRASTIC, por lo que se hizo uso de las mismas fuentes de información antes mencionadas.

3.2.2. Distancia o profundidad del agua subterránea D

La determinación de este parámetro es igual a la variable “D” contemplada en la metodología DRASTIC, por lo que se utilizó el mismo inventario de pozos perforados y excavados.

3.3. Método AVY

El método cuantifica la vulnerabilidad natural de un acuífero por medio de la resistividad hidráulica (C_T) al pasar los flujos de agua por diferentes estratos de suelos que supraayacen el acuífero (Stempvoortl *et al.*,1992). La resistencia hidráulica es un factor que indica el tiempo aproximado de caudal del flujo vertical del agua que atraviesa la zona no saturada por unidad de gradiente de carga y se calcula por medio de la expresión siguiente:

$$C_T = \sum_{j=1}^n \frac{d_i}{K_{vi}}$$

Donde:

C_T = Resistencia hidráulica

d_i = Espesor de cada estrato del suelo sobre el acuífero (cm).

K_{vi} = Conductividad hidráulica de cada estrato del suelo i (cm/h).

Los pasos metodológicos realizados para obtener las variables que contemple la metodología AVI se discuten a continuación:

3.3.1. Espesor de cada estrato del suelo sobre el acuífero d_i

La determinación de este parámetro se utilizará el inventario de pozos antes mencionado, debido que la distancia entre el terreno y la zona saturada equivale al espesor del acuífero. También se hará uso de registros litológicos de pozos perforados propiedad de ENACAL, esto debido a la presencia de materiales semi confinantes encontrados el pozo Tamagás / reemplazo (ver anexo 4).

3.3.2. Conductividad hidráulica de cada estrato del suelo i

La estimación de la conductividad hidráulica se realizó con base a “*Tabla 4: Valores de infiltración máxima obtenidos a partir de los valores de permeabilidad vertical para los grupos litológicos de Nicaragua*” (PNRH, 2017, pág. 59). Los rangos establecidos para las formaciones o grupos geológicos se presentan en la tabla XII.

Tabla XII. **Conductividad hidráulica según, tipo de formación geológica**

Tipo de material geológico	Conductividad hidráulica	
	mm/mes	cm/h
Cuaternarios acuífero Achuapa	1,999	0.21
Grupo Coyol Superior	700	0.01
Rocas plutónicas (Intrusivos ácidos)	60	0.001

Fuente: Diagnóstico inicial de los recursos hídricos en Nicaragua y desarrollo de líneas estratégica, Componente Agua Subterránea, (2017).

El método AVY establece rangos de vulnerabilidad, los cuales varían desde extremadamente alta, hasta extremadamente baja. En la tabla XIII, se observan estos índices.

Tabla XIII. **Rangos de vulnerabilidad método AVY**

Resistencia hidráulica (c)	Log (c)	Vulnerabilidad AVY
0 - 10	< 1	Muy alta
10 - 100	1 - 2	Alta
100 - 1000	2 - 3	Moderada
1000 - 10,000	3 - 4	Baja
> 10,000	> 4	Insignificante

Fuente: Stempvoort *et al*, (1992).

Como herramienta principal en la mapificación de los parámetros que contempla cada metodología, se utilizó un sistema de información geográfica, siendo este un instrumento potente, el cual permite manipular grandes volúmenes de información espacial en diferentes formatos, resultando ideal para esta investigación.

4. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD

Posterior al desarrollo de cada método, se obtuvo como resultado un mapa de vulnerabilidad hidrogeológica por cada uno de estos. Cabe mencionar que cada metodología posee variables en común, como es el caso de la profundidad del agua subterránea, nombrada con la sigla “*D*” para la metodología DRASTIC, “*D*” para el método GOD y “*d_i*” para el AVY, el cual no es más que el espesor del estrato litológico sobre la zona saturada.

Por otro lado, la conductividad hidráulica es una variable en común entre el método DRASTIC y AVY, con la diferencia que en la primer metodología se tendrá que determinar con base a las propiedades hidráulicas del medio subterráneo, realizando ensayos de bombeo o cualquier otra técnica de campo, que pueda proporcionar valores confiables de este parámetro. El método AVY estima el valor de esta variable, según el tipo de formación geológica, el anexo 8 muestra los valores propuesto por el autor (Stempvoortl et al. 1992), según tipo de formación geológica.






El grado de confinamiento hidráulico “*G*” y la ocurrencia del estrato suprayacente “*O*”, contemplados por el método GOD, son las mismas variables establecidas por el método DRASTIC y nombradas tipo de acuífero “*D*” e impacto en la zona vadosa “*I*”.

Sin más que referir, a continuación se presentan los resultados obtenidos por cada método utilizado en la caracterización de la vulnerabilidad hidrogeológica, en el acuífero del valle de Achuapa.

4.1. Vulnerabilidad hidrogeológica método DRASTIC

Los resultados obtenidos fueron reclasificados, según el índice de vulnerabilidad propuesto por la metodología (tabla IV), obteniendo el mapa de vulnerabilidad hidrogeológica con 5 rangos diferentes, las cuales varían de insignificante hasta muy alta vulnerabilidad, se presenta en la figura 12. Así mismo, en la tabla XV se muestra el área comprendida y los índices agrupados por cada uno de las clases señaladas.

Tabla XIV. **Caracterización de vulnerabilidad a través del método DRASTIC**

Índice	Vulnerabilidad	Área (km ²)	Porcentaje
79 - 85	Insignificante 	0.05	0.2%
120 - 139	Baja 	8.55	34.8%
140 - 159	Moderada 	6.59	26.8%
160 - 179	Alta 	6.80	27.7%
180 - 191	Muy alta 	2.56	10.4%
		25	100%

Fuente: elaboración propia, (2019).

4.1.1. Vulnerabilidad insignificante

Esta área la constituye los valores numéricos DRASTIC (VND), que van desde 79 hasta 85, comprende básicamente un afloramiento de roca intrusiva intermedia (Tii). Este tipo de formaciones geológicas son incapaces de almacenar agua, no obstante al estar dentro del valle, se tomó en cuenta.

4.1.2. Vulnerabilidad baja

Está comprendida por los índices DRASTIC 120 a 139, en esta zona se localizan las aguas de mayor profundidad dentro del valle, las cuales varían entre los 15 y 23 m.

Así mismo, existe semi confinamiento en la parte noreste del acuífero, evidenciado al momento de perforar el pozo Tamagás reemplazo (anexo 4); además, el material litológico de la zona no saturada y saturado está compuesto por materiales del Grupo Coyol, los cuales poseen mayores elementos de atenuación con respecto a la formaciones cuaternarios.

Por otra parte, las pendientes del terreno son mayores $> 18 \%$, limitando de esta forma la permanencia del agua sobre el terreno, también esta zona se ubica en el límite del acuífero, siendo esta, el área de transición rocas recientes permeables y rocas más antiguas e impermeables, por lo que la conductividad hídrica es menor con relación a otros lugares del valle.

4.1.3. Vulnerabilidad moderada

El área de moderada vulnerabilidad la componen los índices comprendidos entre 140 y 159, la textura del suelo es de tipo franco arenoso, por lo que presentando buena permeabilidad, facilitando de esta forma el transporte de sustancias hacia subsuelo.

Por otro lado, se presentan 2 sitios con diferentes pendientes. El primero varía entre de 0 a 2 %, siendo este un suelo a nivel, por lo que el agua permanecerá mayor tiempo sobre la superficie del terreno, lo que podría incidir en la introducción de contaminantes al subsuelo. En el segundo sitio, la

pendiente varía entre 2 y 6 %, correspondiendo a terrenos ligeramente inclinados y posiblemente afectados por la erosión hídrica en zonas de escasa cobertura vegetal.

El medio del acuífero y la zona vadosa están compuesta por rocas pertenecientes al grupo Coyol de tipo andesita, dacita y basalto principalmente y la profundidad del agua subterránea, esta se encuentra entre los 9 y 15 m. Así mismo, la conductividad hidráulica varía entre los 5 y 30 m/día.

Los parámetros que marcan la diferencia en la clasificación de esta índice son: Impacto en la zona vadosa, medio del suelo y la profundidad del agua subterránea.

4.1.4. Vulnerabilidad alta

El área de alta vulnerabilidad está constituida por los índices que van desde los 160 hasta 179. En esta superficie, la textura del suelo es de tipo franco arenoso, los parámetros de la zona vadosa y el medio del acuífero, los componen materiales cuaternarios (gravas, arenas, bolones, guijarros y suelos arenosos principalmente).

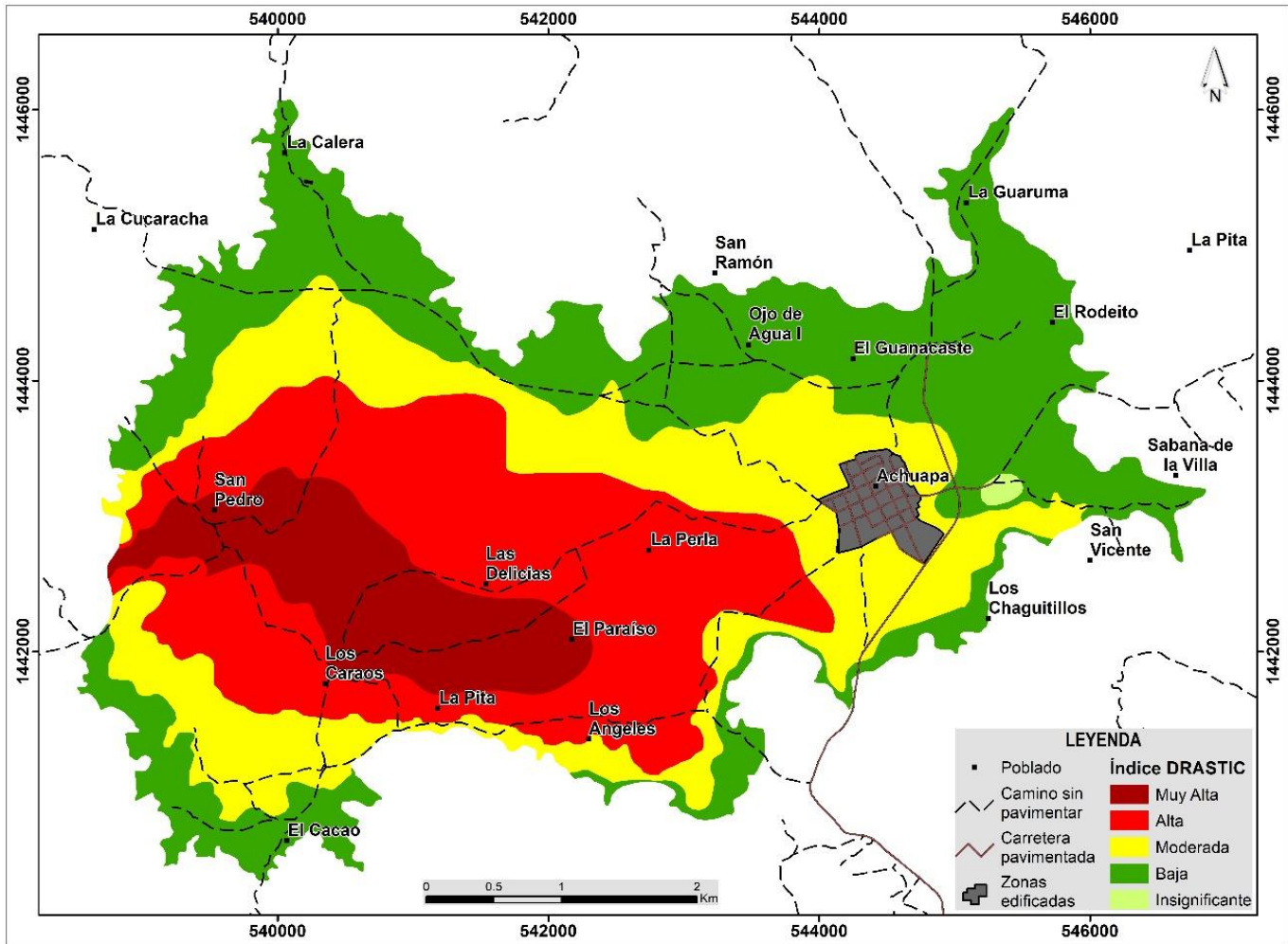
El agua subterránea se encuentra entre los 4 a 9 m de profundidad, también la conductividad hidráulica es la de mayor valor en todo el valle (30 – 40 m/día). La pendiente del terreno varía entre 0 y 2 %, por lo que el movimiento del agua será principalmente vertical y no horizontal, debido al tipo de formación geológica.

4.1.5. Vulnerabilidad muy alta

Esta zona está constituida por los índices que van desde 180 hasta 191, las condiciones hidrogeológicas son iguales a las presentes en el área de alta vulnerabilidad, con la salvedad que la profundidad del agua, se encuentra menor de 5 m.

En la figura 12 se muestran los límites geográficos entre cada uno de los índices de vulnerabilidad hidrogeológica caracterizadas, a través del método DRASTIC.

Figura 12. Vulnerabilidad método DRASTIC






Fuente: elaboración propia, (2019).

4.2. Vulnerabilidad hidrogeológica método GOD

Los resultados obtenidos fueron clasificados, según la metodología GOD (figura 11), obteniendo un mapa de vulnerabilidad hidrogeológica compuesto por 3 diferentes índices, los cuales son: Insignificante, baja y alta vulnerabilidad hidrogeológica. Asimismo, en la tabla XVI se presenta un resumen de resultados respecto a la caracterización de la vulnerabilidad.

Tabla XV. **Caracterización de la vulnerabilidad, a través del método GOD**

Índice	Vulnerabilidad	Área (km ²)	Porcentaje
0.032	Insignificante 	0.05	0.2%
0.192	Baja 	15.25	62.1%
0.512 - 0.576	Alta 	9.24	37.7%
		25	100%

Fuente: elaboración propia.

4.2.1. Vulnerabilidad insignificante

Esta área la constituye índice 0.032, comprende básicamente un afloramiento de roca intrusiva intermedia (Tii).

4.2.2. Vulnerabilidad baja

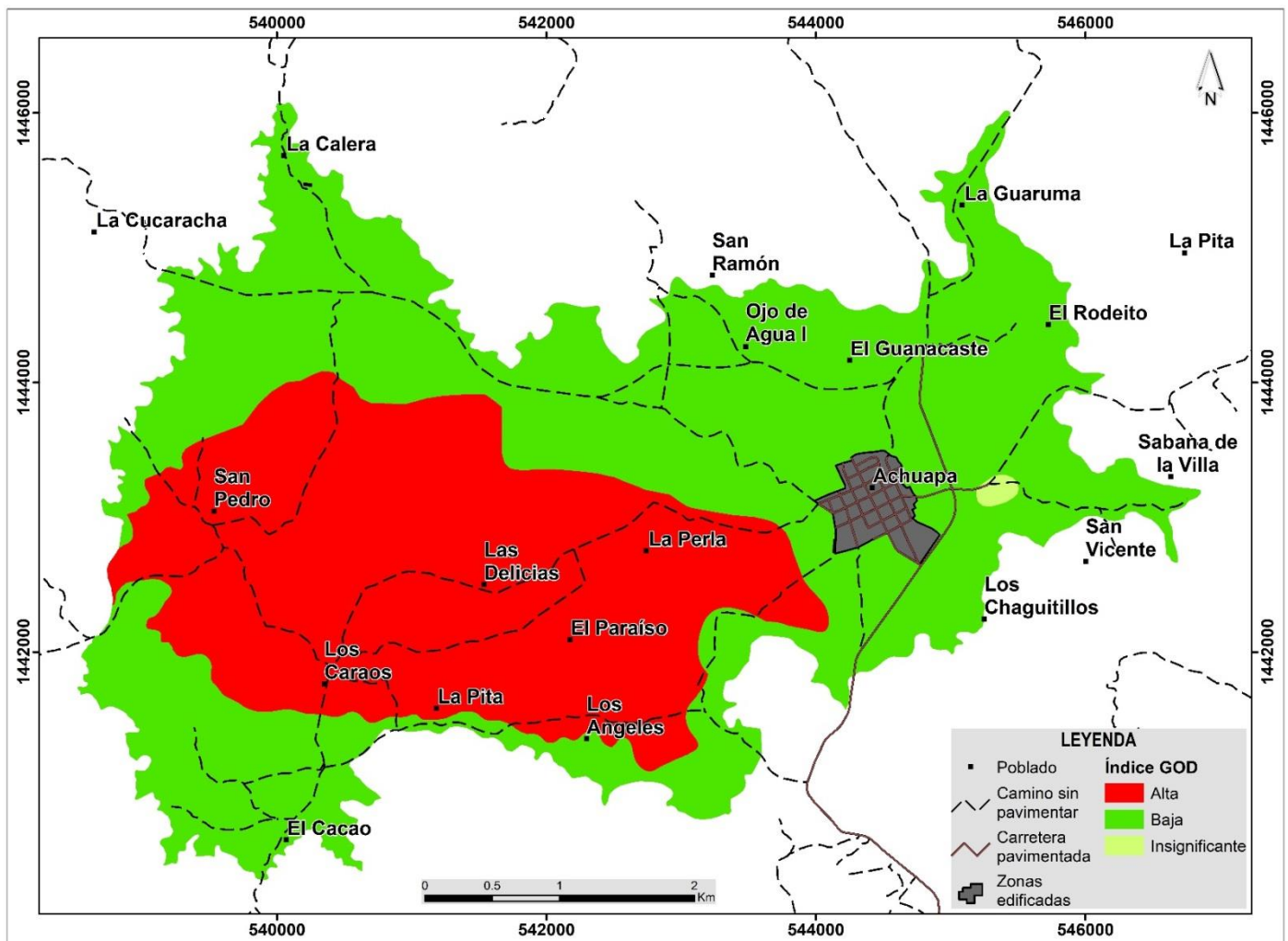
El área de baja vulnerabilidad la compone el índice 0.192. En esta zona la profundidad del agua subterránea se encuentra entre 9.1 y 22.9 m, además existe un semiconfinamiento del cual ya se hizo referencia. Por otro lado, el estrato suprayacente está compuesto por rocas del Grupo Coyol.

4.2.3. Vulnerabilidad alta

Se compone por los índices 0.512 y 0.576. En esta zona se ubican las aguas más someras del acuífero, encontrándose entre los 1.9 y 9 m. También el estrato suprayacente lo componen materiales cuaternarios aluviales completamente libres, como son: gravas, arenas, bolones, guijarros y suelo arenosos, principalmente.

Los límites geográficos entre cada una de las áreas de vulnerabilidad hidrogeológica caracterizadas por el método GOD, se muestran en la figura 13.

Figura 13. Vulnerabilidad método GOD



Fuente: elaboración propia, (2019).

4.3. Vulnerabilidad hidrogeológica método AVY

Los resultados obtenidos fueron clasificados, según la tabla XVII, obteniendo un mapa de vulnerabilidad hidrogeológica con 3 diferentes índices: Extremadamente baja, baja y moderada. En la tabla XVII, se presenta un resumen de los resultados respecto a la caracterización de la vulnerabilidad.

Tabla XVI. **Caracterización de la vulnerabilidad, a través del método AVY**

C_t	Log (C_t)	Vulnerabilidad	Área (km ²)	Porcentaje
10,714.38 - 150,0000	4.02 - 6.17	Insignificante	8.59	35.0%
3,333.30 - 8,571.43	3.52 - 3.93	Baja	13.40	54.6%
952.38	2.98	Moderada	2.56	10.4%
			25	100%

Fuente: elaboración propia, (2019).

4.3.1. Vulnerabilidad extremadamente baja

Esta área la constituye los índices Log (C_t) comprendidos entre 4.02 – 6.17, en esta zona el agua subterránea alcanza sus mayores profundidades, por ende el espesor del estrato litológico sobre el acuífero (d_i), es mayor.

La conductividad hidráulica representada por (K_{vi}), se caracterizó, según la tipo de formación geológica a como se muestra en la tabla XIII, para este caso se obtuvo 0.01 cm/h, correspondiente al Grupo Coyol.

4.3.2. Vulnerabilidad baja

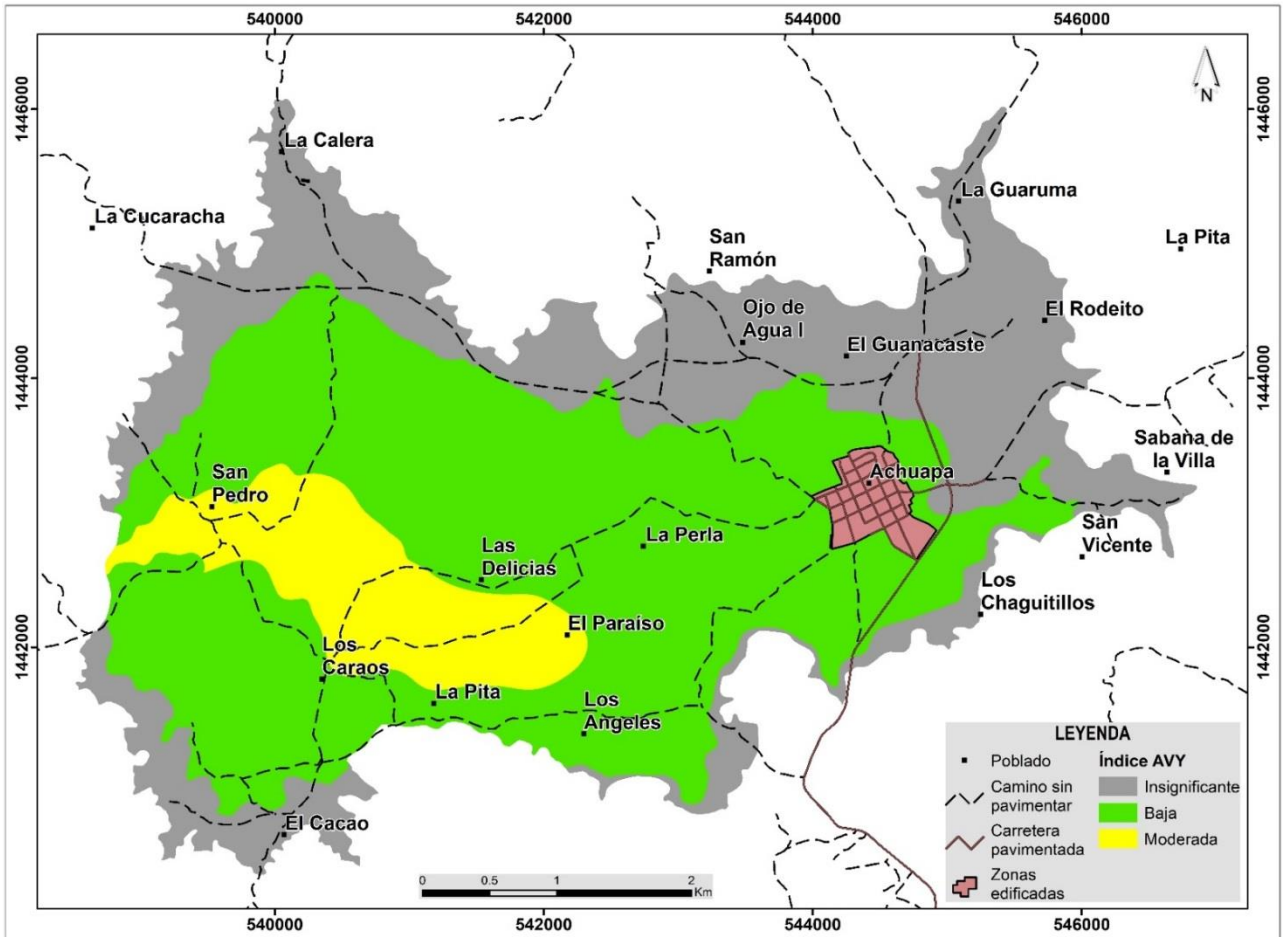
La componen los índices Log (C_t) que varían entre los rangos 3.52 y 3.75; el espesor del estrato litológico (d_i), es menor con relación a la vulnerabilidad extremadamente baja. También, el área está comprendida por la formación geológica del Grupo Coyol y materiales cuaternarios, por esta razón, la conductividad hidráulica (K_{vi}), varía entre los rangos de 0.01 – 0.21 cm/h.

4.3.3. Vulnerabilidad moderada

Esta área la comprende el índice Log (C_t) 2.98. El espesor del estrato litológico (d_i) es escaso, por ende, las aguas subterráneas, se encuentran a pocos m. La conductividad hidráulica (K_{vi}), corresponde a 0.21 cm/h, según PNRH, (2017, pág. 58)

Los límites geográficos entre cada una de los 3 índices de vulnerabilidad hidrogeológica caracterizadas a través del método AVY, se pueden observar en la figura 13.

Figura 14. Vulnerabilidad método AVY



Fuente: elaboración propia, (2019).

4.4. Discusión de los métodos utilizados

El mapa resultante en cada metodología, demostraron diferentes índices de vulnerabilidad hidrogeológica, en algunos casos se identificaron áreas muy favorables para el alojamiento y transporte de sustancias contaminantes, a consecuencia de las frágiles propiedades del acuífero, en otros sitios fue lo contrario, ya que las propiedades intrínsecas de atenuación ofrecen una importante protección.

Se hace énfasis en la similitud presenta entre los métodos DRASTIC y GOD, ya que las áreas de muy alta y alta vulnerabilidad del DRASTIC corresponden casi por completo con el área de alta vulnerabilidad del GOD, esto a que los dos métodos contemplan las mismas variables y el proceso de determinación de los índices es similar.

Por otro lado, existe similitud entre la alta vulnerabilidad del DRASTIC y la moderada vulnerabilidad del AVY, debido a que la variable de profundidad del agua subterránea representada con la sigla “**D**” en el DRASTIC y el espesor del estrato litológico que se simboliza “**d_i**” el AVY, es el mismo parámetro.

Cabe mencionar que los pasos en la determinación de los índices AVY, es completamente diferente a los métodos DRASTIC y GOD, así mismo, el parámetro de conductividad hidráulica representado por **K_{vi}**, es dato bibliográfico (ver anexo 8), propuesto por los autores del método. Sin embargo, en esta investigación se tome el valor propuesto en el PNRH, (2017, pág. 58), “*Cuaternario Acuífero Achuapa*”, anexo 14.

Las variables de mayor sensibilidad en la caracterización de la vulnerabilidad hidrogeológica para esta investigación fueron:

Profundidad del agua subterránea: Corresponde a los parámetros “**D**” del método DRASTIC, “**D**”, de la metodología GOD y “**d_i**” del método AVY.

Litología del acuífero: Corresponde a la variable “**A**” de la metodología DRASTIC y al parámetro “G” del método GOD.

Litología de la zona vadosa o no saturada: Se identifica con la letra “**I**” en el método DRASTIC y “**O**” en la metodología GOD.

Conductividad hidráulica: Se simboliza con la sigla “**C**” en el método DRASTIC y “**K_{vi}**” en la metodología AVY.

Adicionalmente, se deduce que el método DRASTIC es más detallado, debido a que integra todas las variables que componen las otras metodologías utilizadas en esta investigación, sumadas a esto, también involucra otros parámetros como tipo de suelo “**S**”, recarga neta “**R**” y pendiente o topografía del terreno “**T**”.

Por lo antes descrito, se seleccionó el mapa de vulnerabilidad hidrogeológica caracterizada por del método DRASTIC y dejar de lado los mapas obtenidos, a través del GOD y AVY.

Cabe señalar que, al no contar con datos confiable sobre las variables que componen el DRASTIC, causará serios inconvenientes en el desarrollo del análisis, también involucrará considerables costos económicos, si se pretender generarla información. Siendo más apropiado utilizar alguna otra metodología que involucre un menor número de variables, y de esta forma simplificar el análisis.

4.5. Mapa de vulnerabilidad

El mapa de vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero del valle de Achuapa, refleja áreas con diferentes niveles de sensibilidad relativa a la contaminación.

Para facilitar su interpretación se utilizó un sistema de coloración, el cual consiste de la siguiente manera: Muy alta vulnerabilidad está representada por un color rojo oscuro, alta vulnerabilidad se representa usando un tono rojo,

moderada vulnerabilidad se distingue por la tonalidad amarilla, baja vulnerabilidad se aprecia con un color verde e insignificante vulnerabilidad, se muestra con una coloración verde claro, a como se muestra en la figura 12.

Este mapa se anexa a este documento a escala 1:30,00 y será impreso en formato adecuado para la correcta visualización del lector.

4.6. Usos de los mapas de vulnerabilidad hidrogeológica

La vulnerabilidad hidrogeológica es un instrumento fundamental en la planificación y gestión adecuada del agua subterránea; sin embargo, no deberá ser el único criterio para la toma de decisiones relacionadas al recurso hídrico, si uno de los más importantes.

La vulnerabilidad hidrogeológica puede relacionarse con la posible carga contaminante impuesta por las diferentes actividades antropogénicas y de esta forma obtener el riesgo de contaminación al agua subterránea.

Es importante señalar que el mapa de vulnerabilidad hidrogeológica es un instrumento de gran utilidad en el acuífero del valle de Achiuapa, el cual servirá para:

- Priorizar áreas donde la protección del agua subterránea es de vital importancia.
- Identificar áreas donde se justifique una atenuación especial o esfuerzos encaminados a la protección del agua subterránea.
- Identificar áreas donde los plaguicidas, pesticidas y fertilizantes representen una mayor amenaza para el agua subterránea.

- Base principal para otros estudios hidrogeológicos de mayor amplitud y detalle.
- Como instrumento de estudio para determinar adecuada ubicación de posibles fuentes de contaminación en áreas vulnerables.

5. RIESGO DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

La determinación del riesgo de contaminación del agua subterránea, se realizó con base a la identificación de posibles fuentes de contaminación del agua subterránea y los índices de vulnerabilidad hidrogeológica, caracterizada a través del método DRASTIC; a continuación se presenta el procedimiento empleado.

5.1. Identificación de las fuentes contaminantes

Para la identificación de las fuentes de contaminación, se utilizó como insumo principal la capa de uso de la tierra (MAG *et al.*, 2015), del cual se hizo referencia en el inciso 2.7.2. Como es bien sabido, el uso que se le destine al suelo, afectara la calidad natural del agua subterránea. Además el uso del suelo proporciona una descripción general de las actividades naturales y/o antropogénicas que se desarrollan, e indican los posibles tipos de contaminantes que podrían infiltrarse al subsuelo.

Por consiguiente, se elabora una escala relativa de 5 clases, otorgando valores más elevados a los usos de la tierra con potenciales más elevados en contribuir a la contaminación del agua subterránea, se muestra en la tabla XVIII.

Tabla XVII. **Asignación de valores, según el tipo de uso de la tierra**

Uso de la tierra	Valores asignados
Agua	1
Bosque latifoliado denso	2
Bosque latifoliado ralo	2
Vegetación arbustiva	3
Pasto	4
Ciudades, poblados y caseríos	4
Cultivo anual	5

Fuente: MAG *et al.*, (2015) y elaboración propia, (2019).

Cabe mencionar que al uso destinado para cultivo anual, se le asignó el valor de 5, debido a que en estas áreas se hace uso de agroquímicos como fertilizantes, herbicidas y pesticidas, esto con el fin de aumentar la producción agrícola, que en su mayoría son granos básicos como maíz y frijol, consumidos localmente.

En las áreas poblados (casco urbano, poblados y caseríos), se le asignó un valor de 4, ya que estas zonas son focos potenciales de contaminación, debido a la heterogeneidad de sus actividades.

Cabe mencionar que, existe sistema de abastecimiento público de agua potable exclusivo para el sector urbano, no obstante, carecen de alcantarillado sanitario, por lo que el depósito final de excretas se realiza con técnicas de saneamiento *in-situ*, a través de fosas de infiltración, sumideros ciegos, letrinas y fosas sépticas principalmente.

Así mismo, algunos poblados del área rural no cuentan con sistemas de agua potable, por lo que abastecimiento se realiza por medio de pozos familiares excavados a mano. El saneamiento se realiza de igual forma que en

la parte urbana, con la salvedad que las fuentes de agua se ubican a pocos metros de los sistemas individuales de disposición de excretas, lo que podría contaminar directamente las aguas subterráneas.

En las zonas destinadas para ganadería, se le otorgó un valor de 4, debido de la contaminación generada por las excretas del ganado vacuno, depositadas en la superficie del terreno, las que podría llegar a la zona saturada, a través del proceso de lixiviación. Cabe mencionar que en esta actividad, es común la utilización de productos químicos de uso veterinario, el cual es ingerido o rociado sobre la superficie del animal, por lo que este uso genera múltiples contaminantes.

A la vegetación arbustiva se le otorgó el valor de 3, estos lugares son sitio de regeneración natural de bosque y fuentes de importantes de energía, la cual es utilizada principalmente en la preparación de alimentos. Al bosque latifoliado denso y bosque latifoliado raro, se les asignó un valor 2, este tipo de cobertura no genera contaminación alguna.

A los espacios ocupados por el agua, se le otorgó un valor de 1, ya que el recurso hídrico diluirá, dispersará y transportará cualquier sustancia contaminante, trasladando el problema el problema hacia otro sitio.

5.1.1. Clasificación de los índices de vulnerabilidad DRASTIC

La asignación de valores a cada índice de vulnerabilidad, se realizó de igual forma que la empleada en la capa de uso de la tierra, otorgando valores más altos a los índices más susceptibles a la contaminación y valores menores a los sitios de mayor atenuación hidrogeológica.

Tabla XVIII. **Asignación índices de vulnerabilidad**

Índice de vulnerabilidad	Valores asignados
Insignificante	1
Baja	2
Moderada	3
Alta	4
Muy alta	5

Fuente: elaboración propia, (2019).

5.2. Riesgo potencial de contaminación

Para la determinación del riesgo potencial, se realizó sobre posición y multiplicación de los valores asignados a las capas, uso de la tierra y vulnerabilidad hidrogeológica. Los rangos establecidos en la caracterización del riesgo potencial, se ejemplifican en la siguiente matriz:

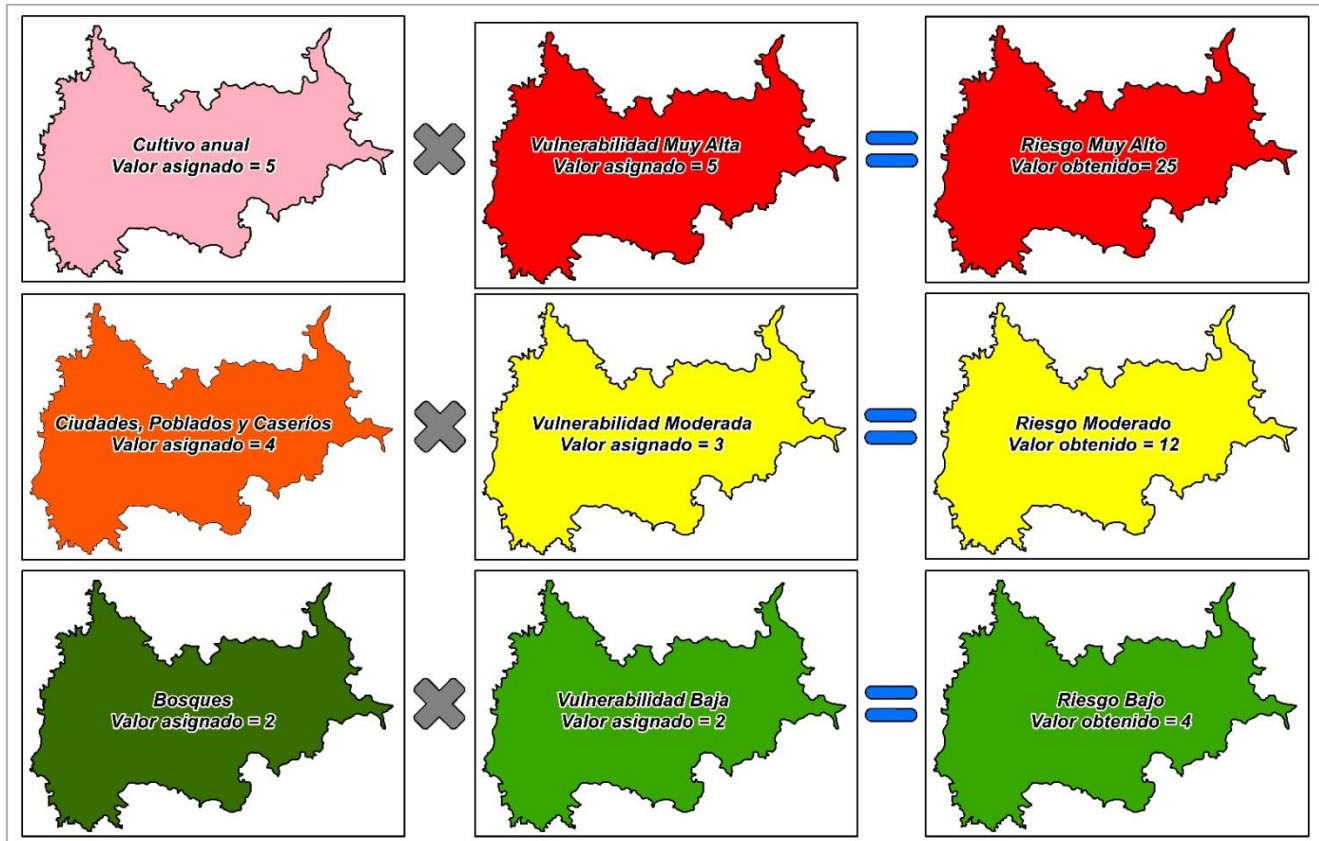
Figura 15. **Matriz de riesgo**

		Vulnerabilidad Hidrogeológica		
		ALTA	MODERADA	BAJA
Contaminación en función del uso de la tierra	ALTA	Riesgo alto	Riesgo alto	Riesgo moderado
	MODERADA	Riesgo alto	Riesgo moderado	Riesgo bajo
	BAJA	Riesgo moderado	Riesgo bajo	Riesgo bajo

Fuente: SUWaR - Nicaragua, (2000) y reeditado para presente estudio, (2019).

Para una mejor comprensión de las variables utilizadas en la determinación del riesgo potencial, se elaboró un diagrama, el cual ilustra gráficamente, la operación matemática realizada (ver figura 16), así mismo se muestran 3 de los 14 resultados obtenidos.

Figura 16. Diagrama de valoración del riesgo potencial







Fuente: elaboración propia, (2019).

El riesgo potencial se interpreta como la probabilidad existente que el acuífero se contamine, por ende, afecte sustancialmente la calidad natural de las aguas subterráneas, esta condición dependerá de la interacción entre la variable de uso de la tierra y la vulnerabilidad hidrogeológica, para esta investigación.

Como se muestra en la tabla XX, más del 50 % del área de estudio está comprendida en el riesgo bajo, así mismo, el riesgo extremo y alta, cubren el 17.1% del acuífero. En la figura 17, se muestra el mapa de riesgo potencial del valle de Achuapa.

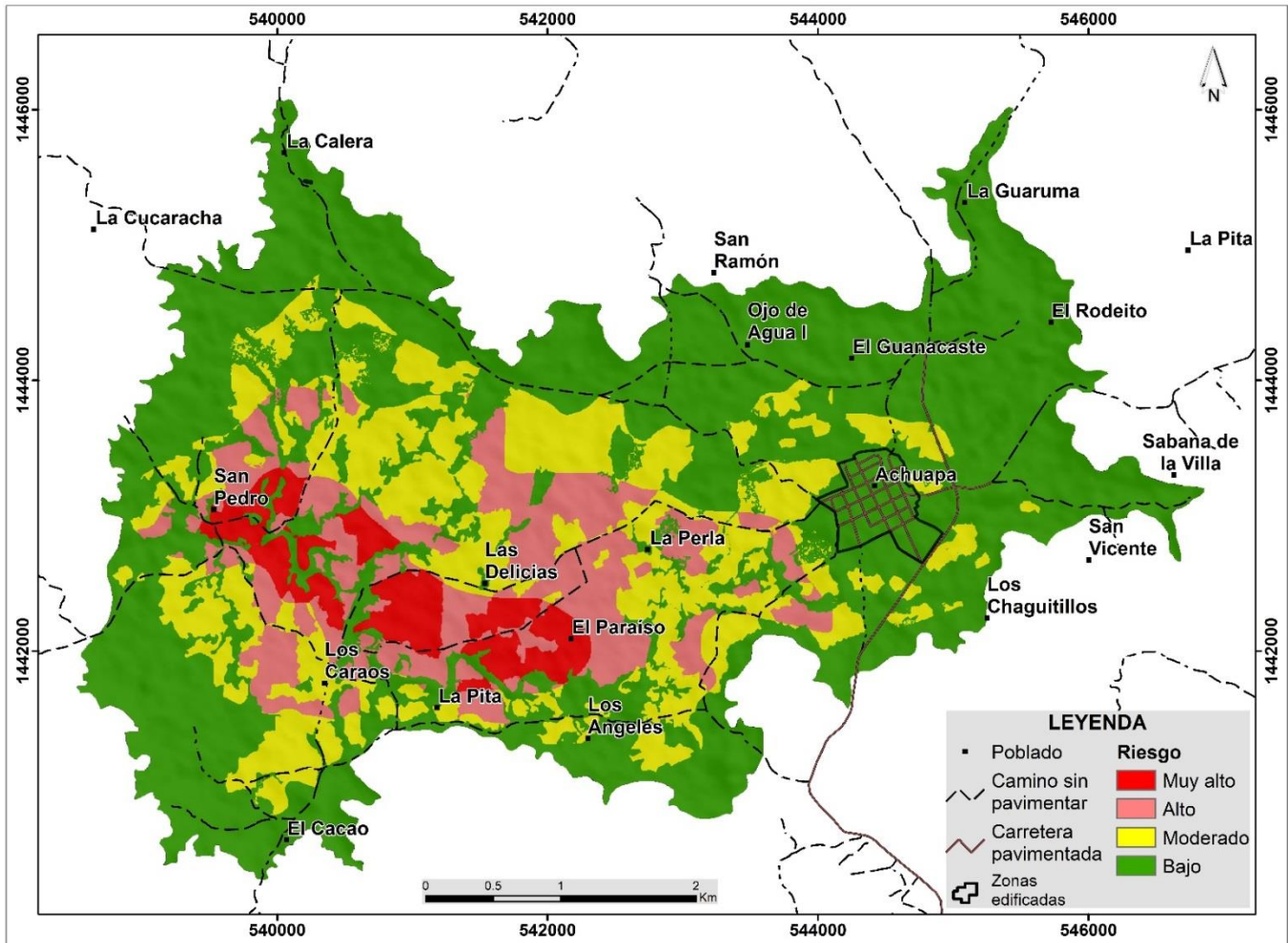
La determinación del riesgo evidencia y delimita áreas prioritarias, donde se deberán enfocar esfuerzos y recursos en la implementación de acciones, sobre aquellas zonas que ameriten mayor atención, debido a sus frágiles propiedades.

Tabla XIX. **Clasificación del riesgo potencial**

Valores	Riesgo	Área (km²)	Porcentaje
1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9 y 10	Bajo 	12.47	50.9%
12 y 15	Moderado 	7.85	32.0%
16 y 20	Alto 	3.03	12.4%
25	Muy alto 	1.15	4.7%
		25	100%

Fuente: elaboración propia. (2019).

Figura 17. Riesgo potencial de contaminación



Fuente: elaboración propia, (2019).

5.2.1. Posibles usos de mapa de riesgo potencial

El mapa de riesgo potencial de contaminación es dinámico y dependerá principalmente del uso que se le asigne a la tierra, ya que la vulnerabilidad es una condición que depende de las características naturales del acuífero, por lo que es relativamente estática, poco cambiante en el tiempo.

El mapa de riesgo potencial de contaminación es una herramienta importante referente al recurso hídrico subterráneo, en el acuífero del valle de Achuapa, podrá ser utilizado en:

- Establecer orden de prioridades en las acciones regulatorias de las actividades que presenten una amenaza a la calidad natural del agua subterránea.
- Utilizarlo como instrumento de evaluación de impacto ambiental en la caracterización de futuras fuentes de contaminación que pudieran instalarse en el acuífero.
- Conocer el riesgo potencial actual y el tipo de amenaza que representan las diferentes actividades realizadas en los suelos del acuífero.
- Establecer sistema de monitoreo de las acciones realizadas en la superficie del valle, sobre todo en las áreas destinadas para agricultura y zonas edificadas.
- Al ser una herramienta de fácil comprensión, se podrán planificar y dirigir recursos técnicos y económicos a sitios en donde exista mayor riesgo de contaminación al agua subterránea dentro del acuífero.

5.2.2. Determinación del riesgo potencial en función del uso potencial de la tierra

Según el *“Mapa de Uso Potencial de la Tierra de la República de Nicaragua”* (MAG *et al.*, 2015), el uso potencial se define como la utilización más apropiada que tienen los suelos, mediante sistemas adecuados de manejo puedan ser sometidos a una explotación sostenible con un mínimo deterioro de los recursos naturales.

Los suelos dentro del acuífero son de vocación agrícola en más de un 80 %, se muestra en la tabla XX y figura 18, así mismo los sitios destinados a protección y conservación del recurso hídrico cubren apenas el 9.31% del área de estudio.

Adicionalmente se deduce que la superficie destinada a la protección del recurso hídrico es escasa y que las extensas áreas destinadas a la agricultura, representan la mayor amenaza en perjuicio de la calidad natural del agua subterránea en el acuífero de Achuapa.

Tabla XX. **Uso potencial de la tierra**

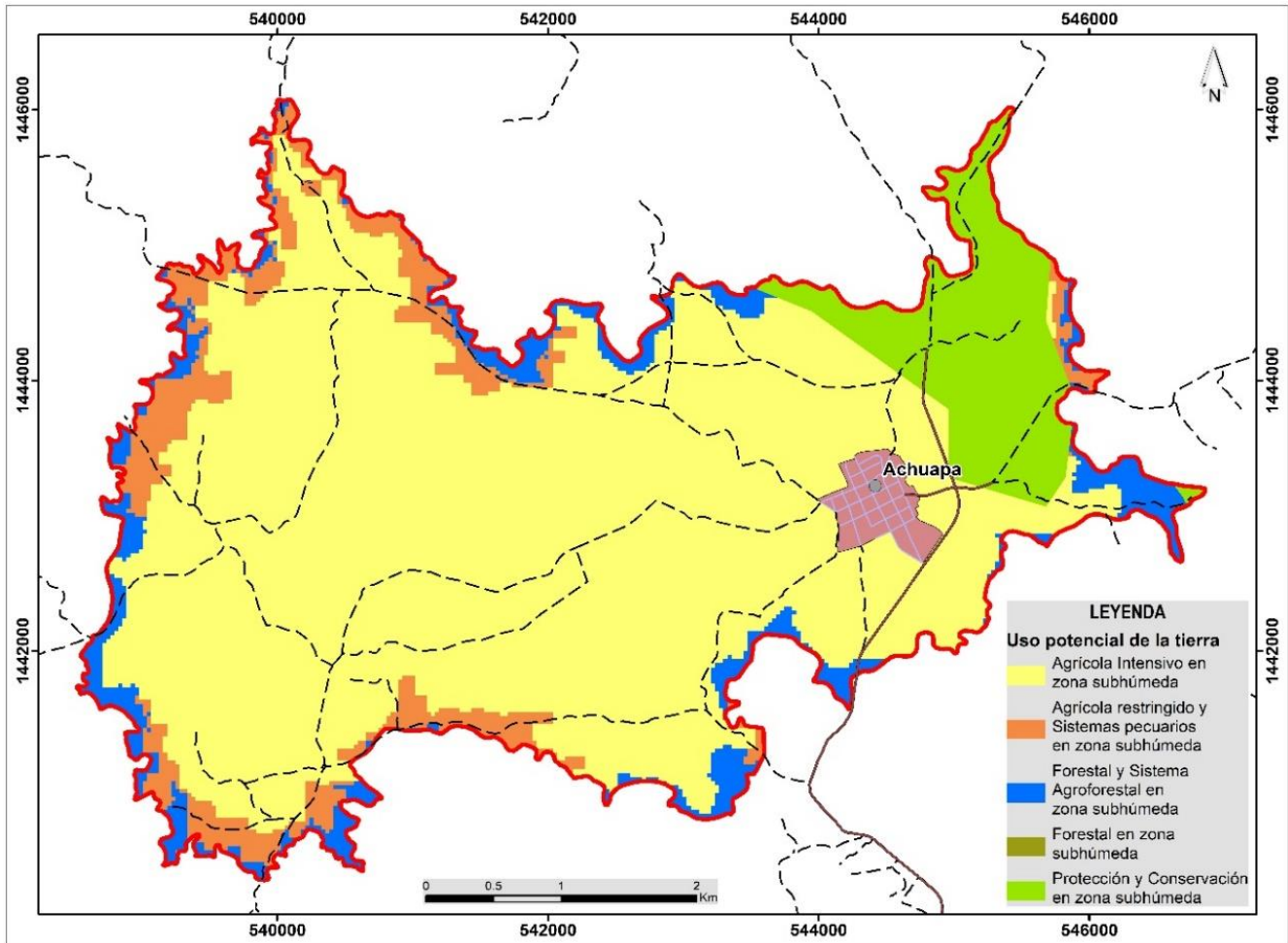
Uso de la tierra	Área (km²)	Porcentaje
Agrícola intensivo en zona subhúmeda	18.59	75.7%
Agrícola restringido y Sistemas pecuarios en zona subhúmeda	1.92	7.8%
Forestal y sistema Agroforestal en zona subhúmeda	1.73	7.0%
Protección y conservación en zona subhúmeda	2.31	9.4%
Total	25	100.00%

Fuente: MAG *et al.*, (2015).

La asignación de valores, al uso potencial de la tierra, se realizó de igual forma que la empleada en el inciso 5.2, otorgando los más elevados a las actividades con mayor potencial de contaminación al agua subterránea, a como se muestra en tabla XXI. También se utilizó la información de la tabla XVIII, correspondiente al otorgamiento de valores, según el índice de vulnerabilidad hidrogeológica.

Como resultado de la interacción entre el uso potencial de la tierra y la vulnerabilidad hidrogeológica, se obtiene el riesgo potencial de contaminación, el cual se puede apreciar en la figura 18.

Figura 18. **Uso potencial de la tierra**



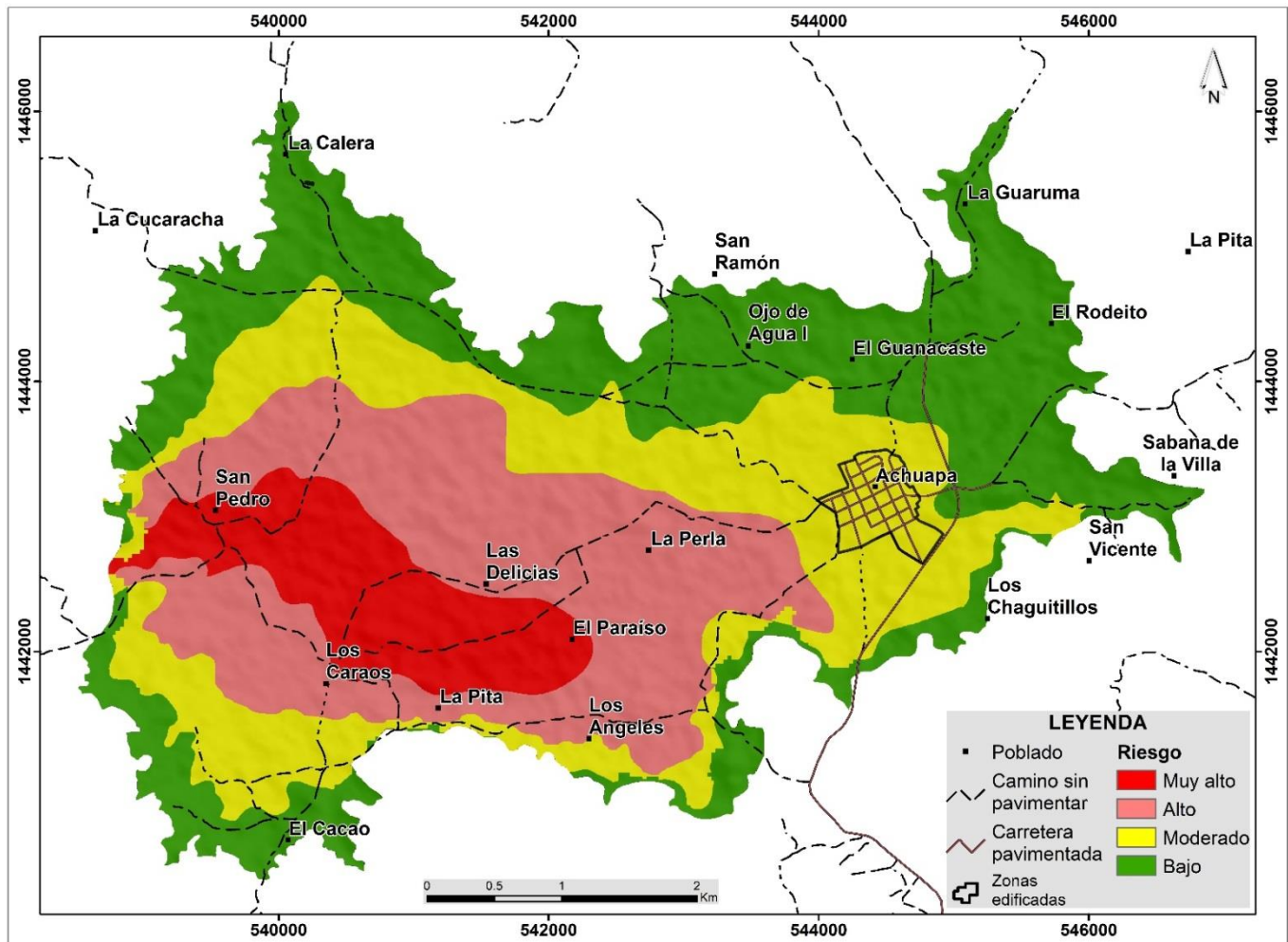
Fuente: MAG *et al.*, (2015).

Tabla XXI. **Asignación de valores según el uso potencial de la tierra**

Uso potencial de la tierra	Valores asignados
Agrícola intensivo en zona subhúmeda	5
Agrícola restringido y Sistemas pecuarios en zona subhúmeda	5
Forestal y sistema Agroforestal en zona subhúmeda	3
Protección y conservación en zona subhúmeda	2

Fuente: MAG *et al.*, y elaboración propia, (2019).

Figura 19. Riesgo potencial de contaminación en función del uso potencial de la tierra







Fuente: elaboración propia, (2019).

Cabe mencionar que las áreas delimitadas en el mapa de riesgo potencial, de la figura 18, son iguales a los rangos de vulnerabilidad hidrogeológica, lo cual resulta lógico, ya que más del 80 % del área de estudio corresponde a un único uso, el cual es potencialmente agrícola, por lo que la divisoria geográfica será en función de los índices DRASTIC.

Si el uso del suelo en el acuífero del valle de Achupa, fuera el propuesto por el mapa de uso potencial de la tierra, el escenario presentado, sería más desfavorable que el obtenido en la figura 17, aumentado el área de riesgo extremo y alto en más del 100 %; asimismo, las zonas de riesgo moderado y bajo se reducirían en 6 y 15 % respectivamente, a como se muestra en las tablas XIX y XXII.

Tabla XXII. **Clasificación del riesgo potencial**

Valores	Riesgo	Área (km²)	Porcentaje
2, 3, 4, 5, 6, 9 y 10	Bajo 	8.78	35.8%
12 y 15	Moderado 	6.47	26.4%
20	Alto 	6.75	27.5%
25	Muy alto 	2.54	10.3%
		24.55	100%

Fuente: elaboración propia, (2019).

6. PROPUESTA DE PLAN DE PROTECCIÓN

El agua subterránea es un bien natural vital para el pleno desarrollo de cualquier región, país o continente, es el recurso hídrico mayor confianza para diferentes usos, debido a su fácil acceso y calidad aceptable. Desempeña un papel fundamental en el bienestar del ser humano y de todos los ecosistemas acuáticos.

Para salvaguardar la calidad natural del recurso subterráneo, es obligación de los tomadores de decisiones, planificadores y profesionales del sector hídrico, elaborar estrategias, estatutos, legislaciones, reglamentos y planes de protección sobre todo, en aquellos acuíferos sensibles a la contaminación.

Un plan de protección de acuíferos es un instrumento de planificación y administración del agua subterránea, mediante la ejecución de proyectos en conjunto con actividades de conservación, resguardo y uso sostenible del recurso.

Existen guías elaboradas por profesionales expertos en la materia, dirigida a personas influyentes en cuanto al tema hídrico se refiere, estas tienen como objetivo principal, dotar a planificadores hídricos con herramientas metodológicas, fundamentales en la protección del agua subterránea.

Sin embargo, esas guías no siempre son la solución absoluta, ya que las condiciones planteadas en algunos casos, se alejan de la realidad o su reproducción involucra grandes costos económicos, por lo que el planificador deberá poner todo su ingenio y desarrollar diferentes acciones acorde a cada situación.

Como estudio de caso, se puede mencionar lo ocurrido en la isla de Barbados, la cual es altamente dependiente del agua subterránea para su abastecimiento público. La explotación se realiza mediante 17 pozos que extraen aproximadamente 115 millones de l/d, de un acuífero kárstico altamente permeable y con una vulnerabilidad extrema.

La gran demanda a causa del desarrollo urbano conllevó al gobierno de Barbados a implementar un plan estratégico, el cual consistió en definir áreas de protección alrededor de los pozos de abastecimiento, estos perímetros fueron definidos en función del tiempo de viaje promedio del agua subterránea. En la mayoría de los casos, estas acciones fueron exitosas, logrando los objetivos propuestos (Banco Mundial, 2003, pág. 43).

Otro caso similar ocurrió en la ciudad Esperanza, Argentina, en este lugar existe un acuífero semiconfinado, intensamente explotado para diferentes usos, esta situación conjunta con una vulnerabilidad moderada, llevó a la necesidad de implementar medidas de protección que incluían la planificación del uso del territorio.

Para ello se delimitaron 20 perímetros de protección en los pozos municipales de abastecimiento de agua pública. Sin embargo, en esta ocasión, la implementación de estas estrategias no fue eficiente, por lo que se optó por reubicar los pozos de explotación en un campo de bombeo fuera de la intervención humana. (BM, 2013, pág. 49)

En la mayoría de los casos, las propuestas y planes de protección suelen fracasar a causa de herradas planificaciones, fuertes presiones socioeconómicas o propuestas antieconómicas, como fue el caso en la ciudad de Esperanza, Argentina. Por ende, para proteger la calidad del agua en un

acuífero, es necesario restringir las prácticas actuales y futuras del uso del territorio, sin embargo, esta actividad no es fácil realizarla, ya que al ser el agua, un bien público, utilizada en todos los sistemas productivos, se hace difícil controlar su explotación y tratamiento.

6.1. Propuesta del plan de protección

La propuesta de protección del acuífero del valle de Achuapa, se elaboró adoptando los lineamientos utilizados en el proyecto: “*Uso Sostenible de los Recursos Hídricos – SUWaR Nicaragua - Estrategia de Protección para el Acuífero de Managua*”. El Proyecto SUWaR – Nicaragua, (2000).

Este proyecto fue elaborado en función de la protección del agua subterránea en el acuífero de Managua. Con el esfuerzo conjunto y coordinado del Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales (MARENA), la empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (ENACAL) y el Programa de Investigación y Docencia del Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Ingeniería (PIDMA – UNI), con el apoyo técnico del Real Instituto de Tecnología (KTH) y la Universidad de Linköpin, ambos de Suecia y el apoyo financiero de la Agencia Sueca para el desarrollo Internacional (ASDI). (MARENA, ENACAL, PIDMA - UNI, KTH, & ASDI, 2000, pág. 1)

Cabe mencionar que a la fecha este es el esfuerzo, de mayor envergadura en Nicaragua, referido a la protección y preservación de la calidad natural del agua subterránea; además al ser un modelo de moderada complejidad, puede ser fácilmente reproducido en cualquier acuífero del país (Choza, 2002). No obstante, su reproducción en los acuíferos Nicaragüenses, ha sido parcial, limitándose a la caracterizando únicamente a la vulnerabilidad hidrogeológica, a través del método DRASTIC.

En el acuífero del valle de Achuapa, se utilizará la misma metodología empleada antes mencionado, la cual se compone básicamente de la siguiente forma:

- Vulnerabilidad hidrogeológica.
- Caracterización de las fuentes potenciales de contaminación puntual y difusa, en función del uso de la tierra.
- Riesgo potencial de la contaminación del agua subterránea.
- Propuestas de protección en sitios susceptibles a la contaminación.

6.2. Plan de protección

El plan de protección, se enfocará en brindar atención especial en aquellas áreas de mayor fragilidad en relación a sus propiedades hidrogeológicas. Para esta investigación se definieron las zonas de riesgo extremo y alto, como los sitios de mayor susceptibilidad a la contaminación del agua subterránea.

El plan se compone de dos partes fundamentales, la primera identifica la posible causa de contaminación y cadenas causales, en las áreas destinadas a proteger. La segunda parte consta de propuestas técnicas y actividades de protección en función de las problemáticas encontradas.

6.3. Problemáticas identificadas

Según el IV censo nacional agropecuario CENAGRO (INIDE y MAGFOR, 2011, pág. 20), en Achuapa la superficie destinada al sector agropecuario es de 292.2 km², correspondiente al 74.74 % del area total del municipio. La explotación agrícola se realiza en 104,5 km², por 1321 productores, de estos,

1,131 aplican herbicidas, 904 insecticidas, 643 fertilizantes y 300 fungicidas (INIDE y MAGFOR, 2011, pág. 22). Los pesticidas organoclorados comunmente utilizados en este sector son: aldrin, taxafeno, delta-BHC, endrin aldehido, toxafeno, garmoxón, estelaton de uso ganadero, entre otros.

La explotación pecuaria se realiza en 182.4 km², contabilizando 17,941 cabezas de ganado bovino en 1,235 fincas, los desparasitantes internos y externos son utilizados en 1,131 fincas (INIDE y MAGFOR, 2011, pág. 24). Los químicos de uso veterinario, son suministrados principalmente por 3 establecimientos ubicados en el casco urbano del municipio, (Alcaldía de Achuapa, 2018, pág. 23).

De las 1,235 fincas donde se desarrolla la actividad pecuaria, solamente en 36 % (454), existen sistemas de estabulación bovina (INIDE y MAGFOR, 2011, pág. 24), por lo que el 64 % restante, pastorea libremente, depositando las excretas en la superficie del suelo.

6.4. Propuestas de protección

Las cifras antes mencionadas son municipales y desactualizada, por lo que se propone cuantificar e inventariar todos los agroquímicos utilizados en las actividades agropecuarias dentro del acuífero, así mismo, estos residuos deberán ser recolectados y depositados correctamente en el basurero municipal, el cual se ubica a un km del valle.

Se deberá estabular en medida de lo posible al semoviente y utilizar las excretas para la generación de abono orgánico; también se podrán desecar e utilizarlas como combustible. Se propone implementar sistemas silvopastoriles como alternativa de producción de doble propósito (leche y carne), estas


buenas prácticas maximizan la eficiencia productiva, económica y son amigables con el ambiente, (López, y otros, 2017).

Los sistemas de silvopastoriles son bancos de proteína asociado a árboles con pastos mejorados, las especies de árboles más utilizados en estas técnicas son: *leucaena leucocephala* (Lam.) de wit, *gliricidia sepium* (Jacq.) kunth, *albizia lebbeck*, *bauhinia purpurea*, los pastos ideales para asociarlos con dichos árboles serán: *megathyrsus maximus*, *cynodon nlemfuensis*, *cenchrus ciliaris*, *cenchrus purpureus* (Schumach), (López, y otros, 2017).

6.5. Plan estratégico

En las tablas XXIII y XXIV se muestra la propuesta del plan de protección, para el acuífero del valle de Achuapa, el cual podría servir de guía en otro acuífero del país.

Tabla XXIII. Problemáticas en las áreas susceptibles a la contaminación



Causa		Impacto		
Amenaza a la calidad del agua subterránea	Cultivo anual	Uso de agroquímicos	Infiltración	Riesgo de contaminación del agua subterránea por agroquímicos
	Pasto (Ganadería)	Excretas depositadas a cielo abierto	Infiltración	Riesgo de contaminación del agua subterránea por coniformes fecales en acuíferos someros y freáticos
				Riesgo de contaminación del agua subterránea por coliformes fecales en los pozos del sistema público de abastecimiento

Fuente: elaboración propia, (2019).

Tabla XXIV. **Plan estratégico**

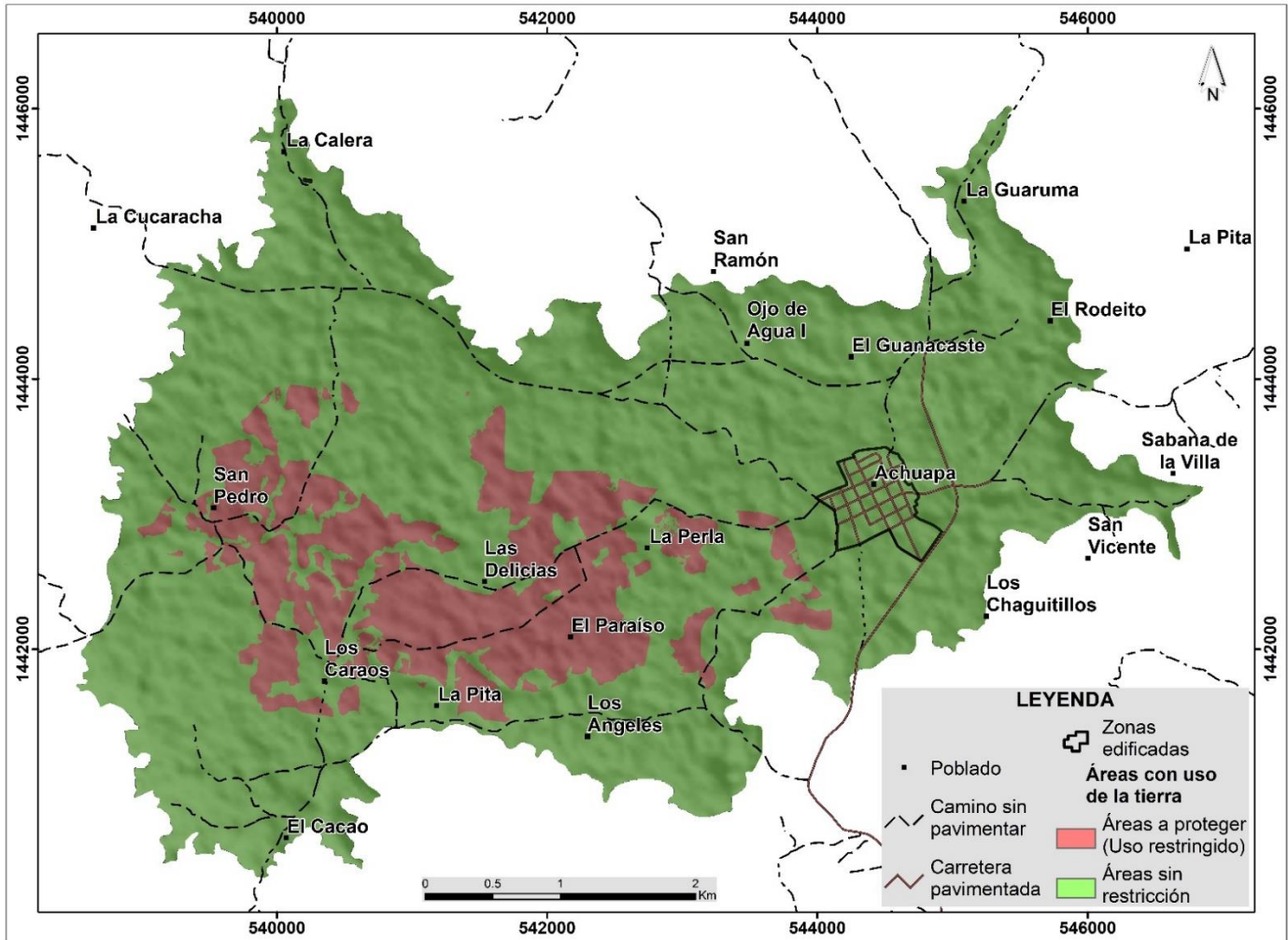
Propuestas de protección	Objetivo	Actividades de protección	Seguimiento	Línea de tiempo
	Regulación e inventario del uso de agroquímicos	Cuantifica e inventariar los tipos agroquímicos utilizados en los procesos agropecuarios	Unidad municipal de agua y saneamiento (UMAS) Achuapa y Ministerio Agropecuario (MAG)	Corto plazo
		Recolectar los desechos agroquímicos, para luego depositarlos correctamente en el basurero municipal		Corto plazo
	Implementar sistemas silvopastoriles intensivos para la ganadería doble propósito	Se deberá estabular en medida de lo posible al semoviente y utilizar las excretas para la generación de abono orgánico y combustible	Unidad municipal de agua y saneamiento (UMAS) Achuapa y Ministerio Agropecuario (MAG)	Mediano plazo
Se deberán identificar en el valle, árboles y pastos mejorados con altos niveles nutritivos, los cuales deberán ser combinados para general alimento de calidad y así aumentar eficiencia y productividad de los sistemas existentes; de no contar con dichas especies, se identificarán sitios idóneos para iniciar su plantación		Mediano y largo plazo		

Fuente: elaboración propia, (2019).

En la figura 20, se observa geográficamente las zonas propuestas a proteger, las cuales suman un área conjunta de 4.18 km², equivalente al 17.1 % de la superficie total del acuífero; también se muestran las zonas que en esta investigación se consideró que no es necesaria la protección, porque suman un

área conjunta de 20.32 km², equivalente al 82.9 % de la superficie total del valle.

Figura 20. Mapa de ubicación de las áreas a proteger



Fuente: elaboración propia, (2019).

CONCLUSIONES

1. En la caracterización de la vulnerabilidad hidrogeológica obtenida, a través del método DRASTIC, se edificaron cinco índices: insignificante, baja, moderada, alta y muy alta, el índice de mayor y menor valor numérico DRASTIC fue 78 y 191, respectivamente. El índice que predomina es el de baja vulnerabilidad, con un área de 8.55 km², correspondiente al 34.8 %. Los índices de extrema y alta vulnerabilidad corresponden 6.80 km² y 2.56 km² respectivamente, equivalente al 27.7 % y 10.4 % de la superficie del acuífero.
2. En la caracterización obtenida a través del método GOD, se identificaron tres diferentes índices de vulnerabilidad hidrogeológica, estos fueron: Insignificante, baja y alta, el índice de mayor y menor valor fue 0.032 y 0.576 respectivamente. El índice de mayor extensión geográfica fue el baja vulnerabilidad con un área de 15.25 km², correspondiente al 62.1 %, el índice de alta vulnerabilidad obtuvo una superficie de 9.24 km² equivalente al 37.7 %.
3. En la caracterización obtenida a través del método AVY, se identificaron tres diferentes índices de vulnerabilidad hidrogeológica, estos fueron: Insignificante, baja y moderada, los índices de mayor y menor valor fueron 4.03 y 2.98 Log (c_t) respectivamente. El índice de mayor extensión geográfica fue el baja vulnerabilidad con un área de 13.40 km², correspondiente al 54.6 %; el índice de insignificante vulnerabilidad obtuvo un área de 8.59 km², equivalente al 35 %; el índice de moderada vulnerabilidad alcanzó una superficie de 2.56 km², la cual equivale 10.4 %.

4. En ninguno de los métodos utilizados para caracterizar la vulnerabilidad hidrogeológica, se cumple la hipótesis planteada en el estudio, así mismo el índice más representativo en todas las metodologías desarrolladas, es el de baja vulnerabilidad, ocupando en algunos casos más del 60 % del área de estudio.
5. Se identificaron 4 diferentes áreas de riesgo de contaminación del agua subterránea, estos fueron: muy alto, alto, moderado y bajo. El riesgo bajo es el de mayor extensión, con un área de 12.47 km², correspondiente al 51 %, el riesgo moderado se extiende en 7.85 km², equivalente a 32 %; por su parte, el riesgo alto posee un área de 3.03 km², la cual corresponde al 12.4 %, y el riesgo muy alto, con 1.15 km², que equivale al 4.7 % del área de estudio, por lo que no se cumple la hipótesis planeada en la investigación.
6. Según el CENAGRO 2011, en el municipio de Achuapa, más del 85 % productores agrícolas hacen uso de herbicidas; el 68.4 % utiliza insecticidas, 48.7 % aplica fertilizantes y el 22 % emplea fungicidas, en sus procesos productivos. Asimismo, el 91.6 % de la explotación pecuaria utiliza químicos de uso veterinario y del 100 % del ganado vacuno; únicamente el 36 % se estabula, el restante pastorea libremente en el campo.
7. La primer actividad en la propuesta de protección, será cuantificar e inventario los diferentes agroquímicos utilizados en el valle, los cuales deberán ser recolectados y depositados de forma correcta en el basurero municipal. También se deberán implementar sistemas silvopastoriles de doble propósito, para aumentar la eficiencia y productividad de los sistemas existentes.

RECOMENDACIONES

1. Se deberá realizar un inventario de los principales usuarios del agua en el acuífero, asimismo, se deberá cuantificar el volumen de agua extraído y el tipo de uso que se le asigna.
2. Se sugiere utilizar esta investigación como referencia en la realización de otros estudios relacionados al agua superficial y subterránea.
3. Es aconsejable elaborar balance hídrico superficial y subterránea, así mismo, se debe realizar investigaciones utilizando modelos matemáticos.
4. Se sugiere desarrollar estudios similares en otros acuíferos intramontanos de región, cuyas características hidrogeológicas sean similares al valle de Achuapa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaldía de Achiuapa. (2018). Caracterización del Municipio de Achiuapa. Achiuapa, León.
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J., Petty, R., & Hackett, G. (1987). *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*. Dublin, Ohio: U.S. Environmental Protection Agency (EPA).
- Antonakos, A., & Panagopoulos, G. (2016). *Optimization of the DRASTIC Method for Groundwater Vulnerability Assessment Via the Use of Simple Statistical Methods and GIS*.
- Auge, M. (2004). Vulnerabilidad de Acuíferos Conceptos y Métodos. 3,5,8.
- Banco Mundial. (2003). Protección de la calidad del agua subterránea. En S. Foster , R. Hirata , D. Gómez , M. D'Elia , & M. Paris , *Guía para Empresas de Agua, Autoridades Municipales y Agencias Ambientales* (págs. vi, 43,49). Washington, D.C. 20433, USA: Mundi-Prensa.
- Banrepcultural. (2000). *Biblioteca Virtual Banco de la República*. Obtenido de <http://babel.banrepcultural.org/cdm/ref/collection/p17054coll10/id/2773>
- Bardales. (2010). *Estimación del Potencial del Recurso Hídrico Subterráneo del Valle de Monjas, Jalapa, Guatemala*. Jalapa, Guatemala: USAC - ERIS.

- Choza, A. (1990). *Diagnóstico Resumido de la Situación de los Recursos Hídricos en Nicaragua*. Managua.
- Choza, A. (2002). Elementos básicos para la protección de las aguas subterráneas aplicados en el acuífero de Managua, Nicaragua. *Revista Geológica de América Central*.
- Custodio, J. (1995). *Vulnerabilidad de los Acuíferos a la Polución; Seminario Internacional de Aguas Subterráneas*. Santiago de Chile.
- ENACAL. (2015). *Diseño definitivo de pozo Villa Cuba (Bo. Oscar Gámez)*. Estelí.
- FAO. (2010). Recursos Hídricos de Nicaragua.
- Fenzel, N. (1989). En *Nicaragua; Geografía, Clima, Geología y Hidrogeología* (págs. 5, 15 , 16, 30, 54). Belém: PIDL.
- Foster. (1987). *Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. Proc Intl Conf "Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants"*.
- Foster, & Hirata. (1988). *Determinación del Riesgo de Contaminación del Agua Subterránea*. Lima, Perú: CEPIS.
- Foster, S. (1987). *Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. Proc Intl Conf "Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants"*. The Netherlands .

- Foster, S., & Hirata, R. (1988). *Groundwater Hydraulic Confinement, Overlaying Strata, Depth to Groundwater Table*. CEPIS-OPS.
- Foster, S., & Hirata, R. (1991).). Determinación del riesgo de contaminación de Aguas. Lima, Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).
- Gijón, G. (2007). *Análisis espacial de la vulnerabilidad del Agua Subterránea a la contaminación en el Estado de Yucatán, México*. Merida, Yucatán, México: Universidad Autónoma de Yucatán.
- GWP. (2008). Principios de gestión integrada de los recursos hídricos. En G. C. América, *Bases para el desarrollo de planes nacionales* (pág. 4).
- Hodgson, G. (2000). Geología regional de Nicaragua. En *Introducción al Léxico Estratigráfico de Nicaragua* (págs. 55, 57, 58, 68-72, 105). Managua, Nicaragua.
- Homero, E., & Rodríguez, E. (2017). *Calidad de las Aguas Subterráneas en el Municipio de San Pedro La Laguna y sus Efectos Sobre el Cuerpo de Agua del Lago Atitlán*. Guatemala: ERIS - USAC.
- Hurtado, J. (2012). *Estudio de vulnerabilidad Hidrogeológica de la Subcuenca Laguna de Tisma, Utilizando el Método DRASTIC*. Tisma, Managua: Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).
- IBERINSA. (2010). Diseño de Proyecto de Agua Potable y Saneamiento Sureste de Managua. En A. N. Producción. Managua.

INETER. (1963 - 2010). *Red de Estaciones Meteorológicas*.

INETER. (1971). *Evaluó del Catastro Municipal*.

INETER. (1972). *Proyecto Hidrometeorológico Centroamericano (PHCA)*.

INETER. (1999). *Delimitación Territorial Municipio de Achuapa*. Achuapa, León.

INETER. (2004). *En estudio de mapificación Hidrogeológica e Hidrogeoquímica de la Región Central de Nicaragua* (págs. 26, 47). Managua, Nicaragua: COSUDE.

INETER. (2004). *Atlas Climático Nicaragüense*.

INETER. (2004). *Clasificación Climática por Köppen Modificado*.

INETER. (2012). *Estudio de vulnerabilidad del Manto Acuífero de Malpaisillo*. Malpaisillo, León.

INETER. (2014). *Estudio de Vulnerabilidad del Acuífero de Tipitapa - Malacatoya*. Tipitapa, Managua.

INETER. (2014). *Estudio de vulnerabilidad del Acuífero Nandaime-Rivas*. Nandaime, Rivas.

INETER. (2016). *Estudio de vulnerabilidad del Acuífero de Villanueva*. Villanueva, Chinandega.

- JICA, & INETER. (2006). *Hoja cartográfica, Achupa Nicaragua 2855 II Edición 3* - INETER. Managua.
- MAG, MARENA, UNA, INAFOR, & INETER. (2015). *Atlas de Mapas Nacionales de suelos, uso potencial, coberturas y usos de la Tierra y conflictos de uso de la República de Nicaragua*. Managua.
- MARENA, ENACAL, PIDMA - UNI, KTH, & ASDI. (2000). Proyecto uso sostenible de los Recursos Hídricos SUWaR - Nicaragua. Managua.
- Martínez, R. (2017). *Evaluación de la vulnerabilidad del Acuífero del Valle de Sébaco Ante la Contaminación y Sobreexplotación y Propuesta de un Plan de Gestión del Recurso Hídrico*. Sebaco, Matagalpa: USAC - ERIS.
- Morales, J. (2012). *Evaluación del desenso del Nivel Freático en la Parte Norte del Acuífero Metropolitano en el Valle de Guatemala*. Guatemala: ERIS - USAC.
- Naciones Unidas. (Septiembre de 2015). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
- PNRH. (2017). Diagnóstico Inicial de los Recursos Hídricos y Desarrollo de Líneas Estratégicas, Anexo 2 Componente Aguas Subterráneas. Nicaragua: WORLD BANK GROUP.
- Ramos, A. (2012). *Vulnerabilidad Hidrogeológica de la Cuenca El Sauce Usando el Método DRASTIC*. El Sauce, León: Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

Reiche, A. (2015). *Ánalysis e indentificación de zonas vulnerables a la contaminación intrínseca de acuíferos cársticos, por medio del Método EPIK, en el Municipio de Santa Cruz Verapaz*. Cobán, Alta Verapaz: USAC.

Rivera, P. (2005). *Análisis de riesgo del Marco de la Gestión Integral del Recurso Hídrico en la Microcuenca del río Pansalic, Mixco, Guatemala*. Mixco, Guatemala.

Sokal. (1974). *Sistema de Clasificación de Suelos*.

Stempvoortl, D., Ewert, L., & Wassenaar, L. (1992). *Aquifer Vulnerability Index: A Gis Compatible E Method for Grounwater Vulnerability Mapping*. Canadian Water Resources Journal.

Traña, M., Vázquez, B., & Bobadilla, O. (2002). Estudio Geofísico para el Proyecto Mapificación Hidrogeológica de la Región Central—Hoja Estelí. Managua.

UNESCO. (2018). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018. En WWDR, *Soluciones Basadas en la Naturaleza para la Gestión del Agua* (pág. 11). Paris, Francia: UNESCO.

Vrba, J., & Zaporozec, A. (1994). *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*. Hannover : H. Heise, 1994.

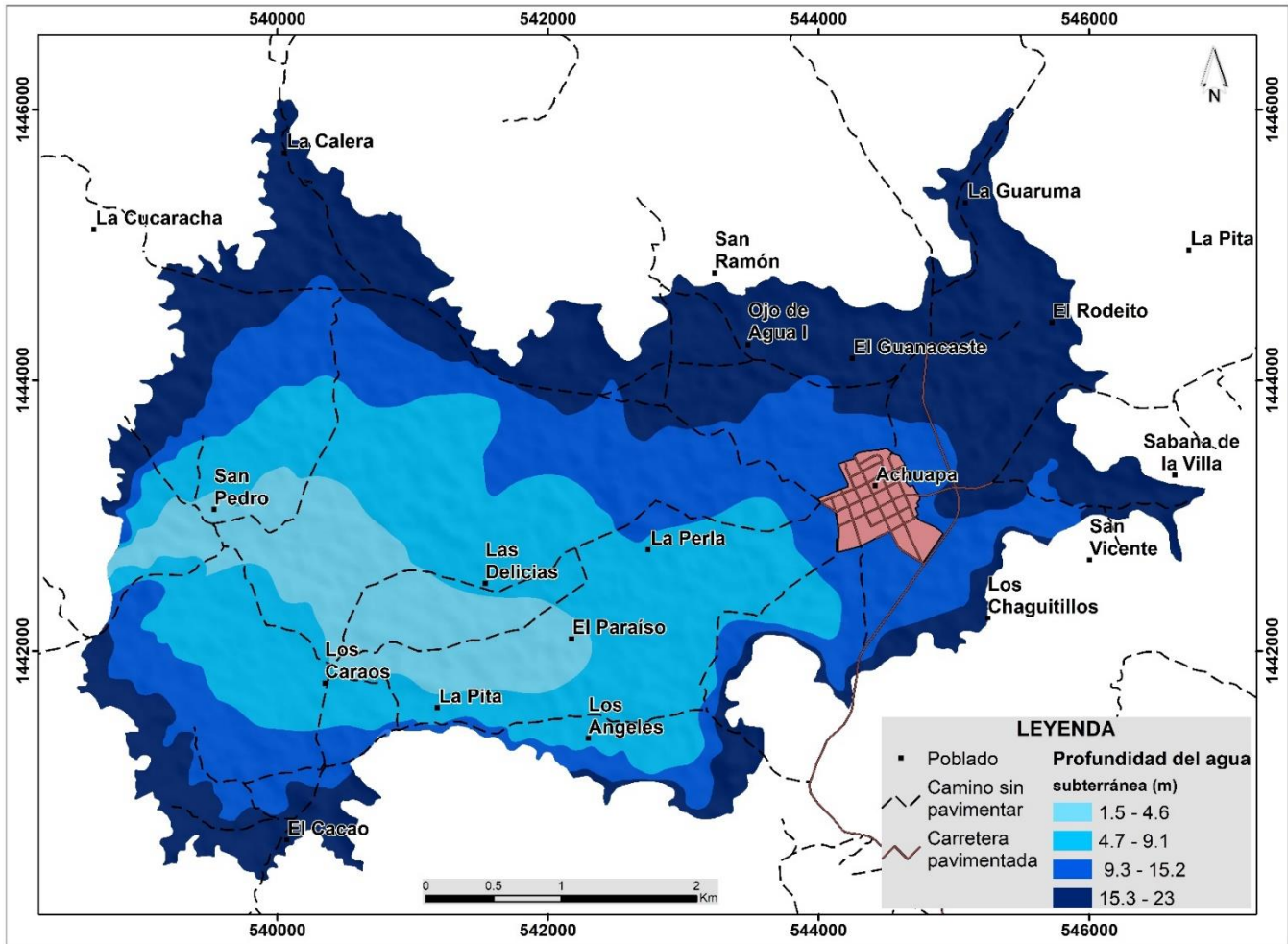
APÉNDICE A. CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES MÉTODO DRASTIC

Tabla XXV. **Profundidad del agua subterránea (D)**

Rangos de Profundidad (m)	Clasificación Dr		Peso	Valor Numérico DRASTIC (VND)
1.3 - 4.6	9		5	45
4.7 - 9.1	7		5	35
9.2 - 15	5		5	25
15.1 - 23	3		5	15

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Profundidad del agua subterránea



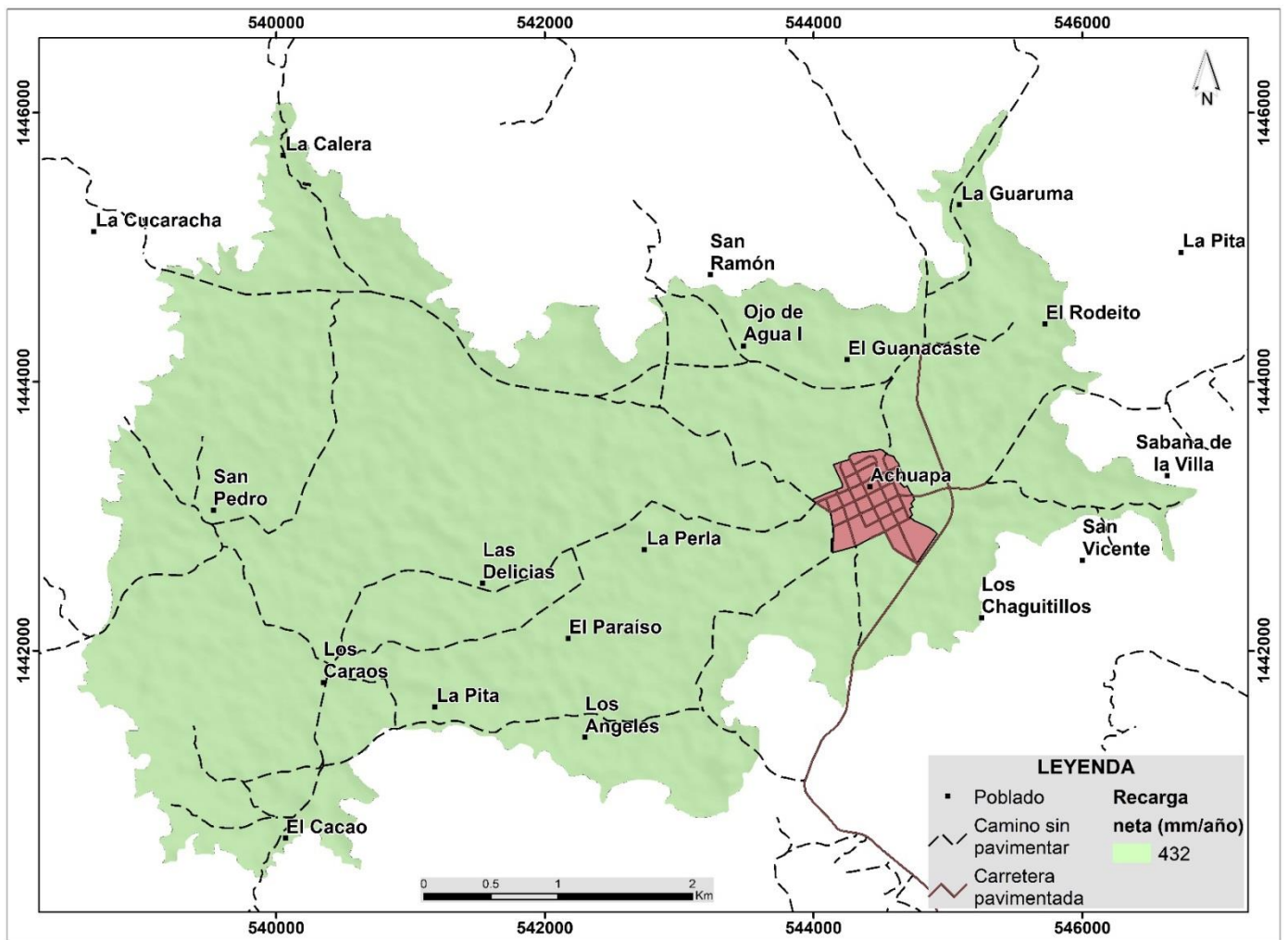
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Recarga neta (R)**

Recarga (mm/año)	Clasificación Rr	Peso	Valor Numérico DRASTIC (VND)
> 254	4	9	36




Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Recarga neta**



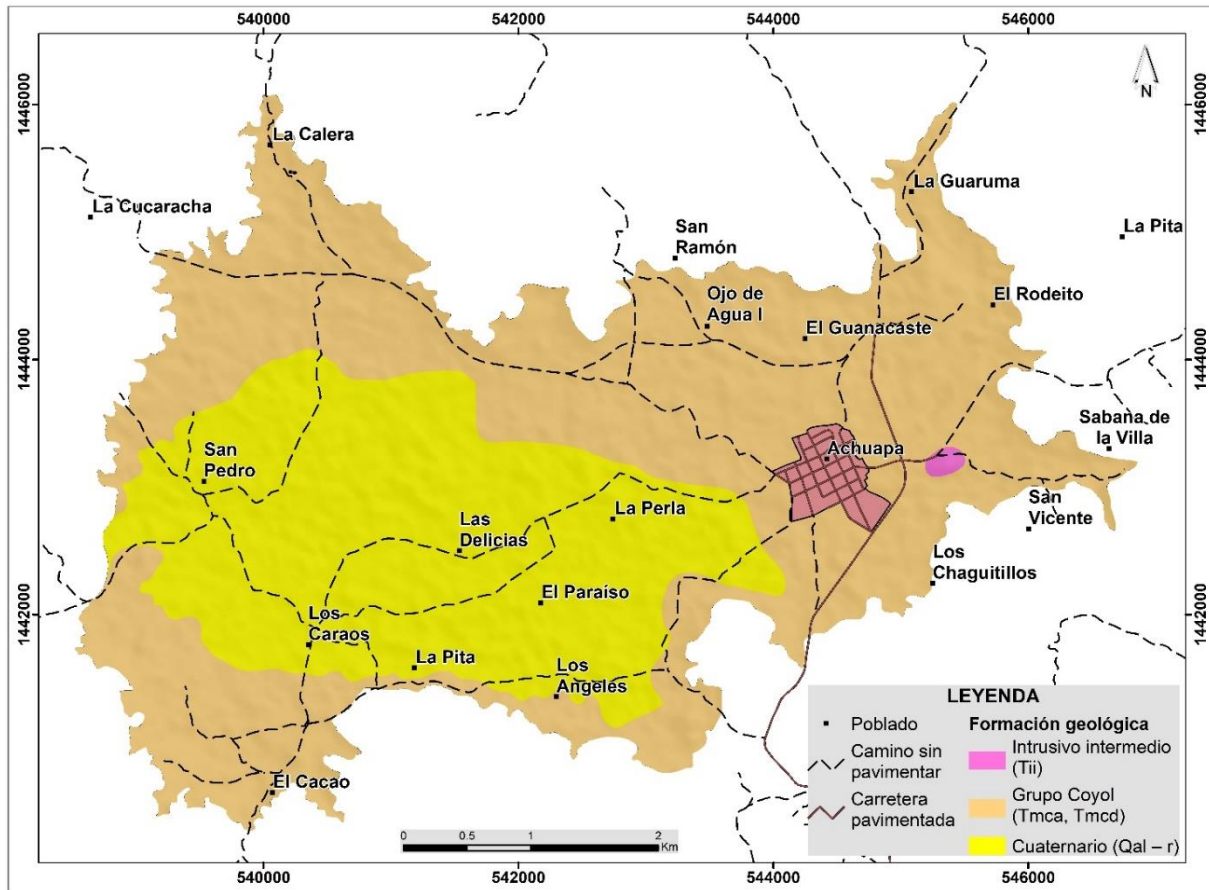
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. Medio del acuífero (A)

Tipo de acuífero	Clasificación Dr	Peso	Valor Numérico DRASTIC (VND)
Sedimentos recientes: Arena, grava y suelos arenosos.	8 	4	32
Rocas volcánicas: Ignimbritas, lavas basálticas – andesitas y piroclásticas, alteradas y fracturadas (Grupo Coyol).	6 	4	24
Intrusivos intermedios.	2 	4	8

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Medio del acuífero



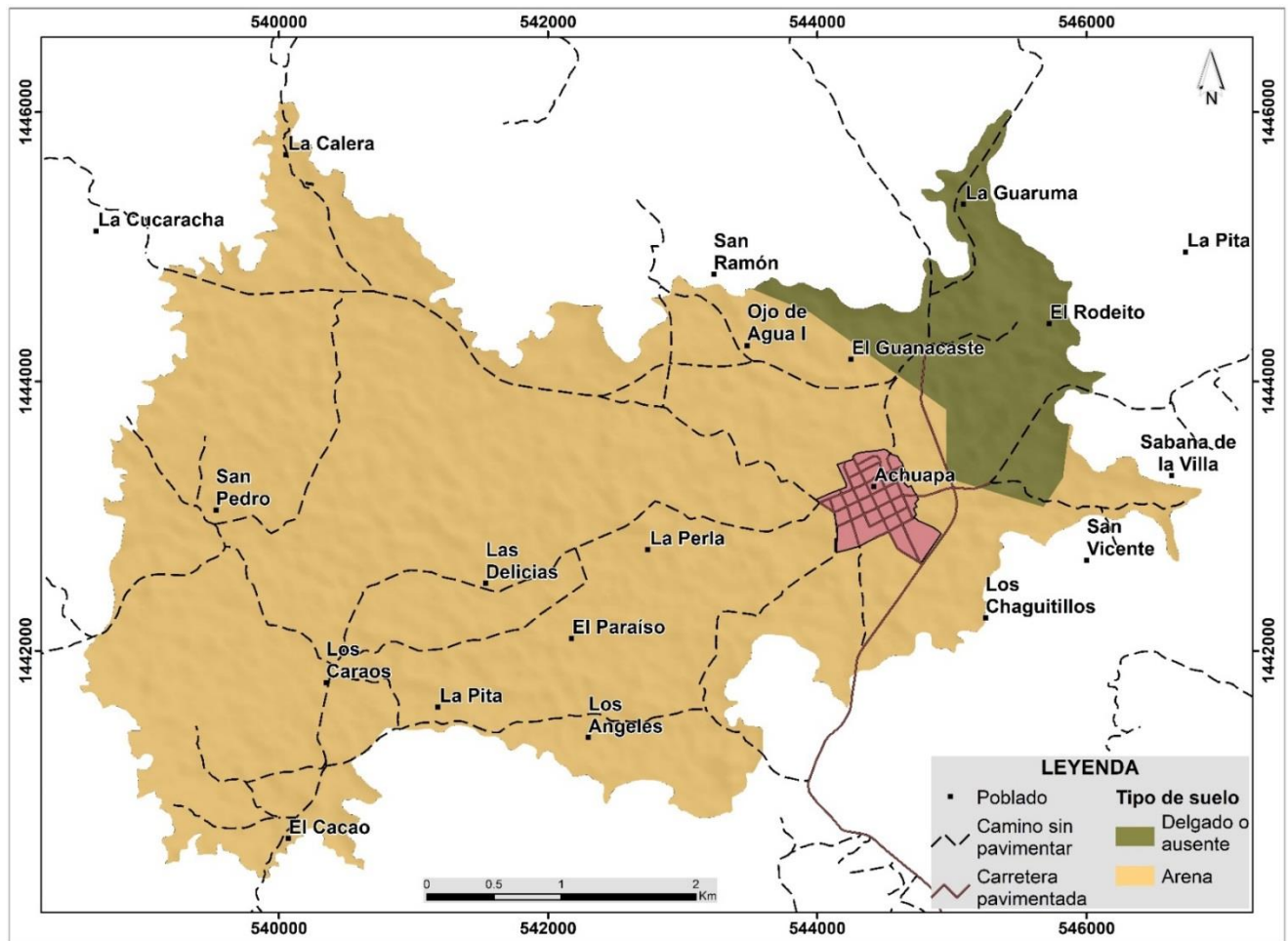
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. Tipo de suelo (S)

Tipo de suelo	Clasificación Sr	Peso	Valor Numérico DRASTIC (VND)
Delgado o ausente	9	2	18
Arena	8	2	16




Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Tipo de suelo



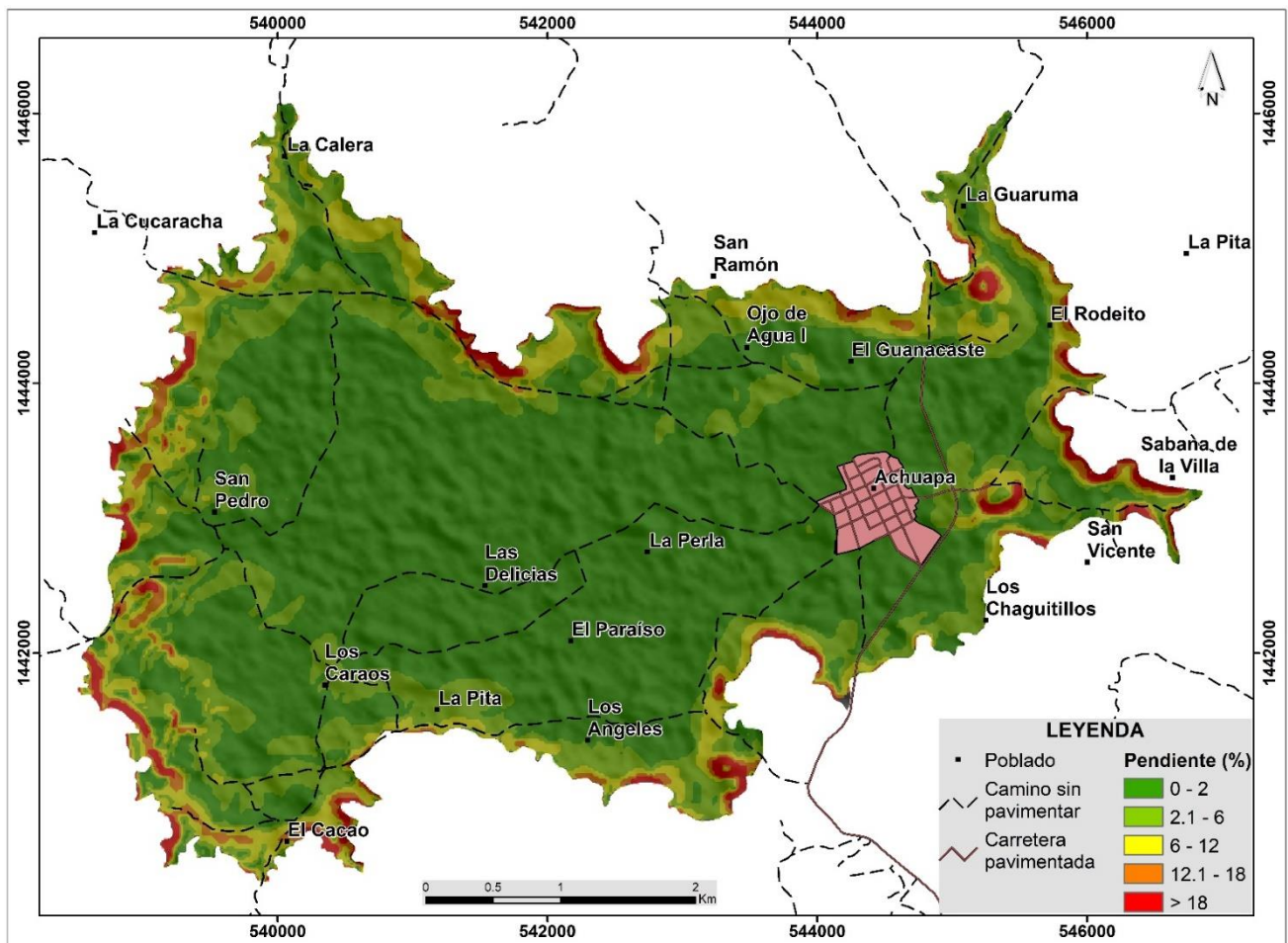
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. Topografía (T)

Pendiente (%)	Clasificación Sr		Peso	Valor Numérico DRASTIC (VND)
0 – 2	10		1	10
2 – 6	9		1	9
6 – 12	5		1	5
12 – 18	3		1	3
> 18	1		1	1

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. Topografía



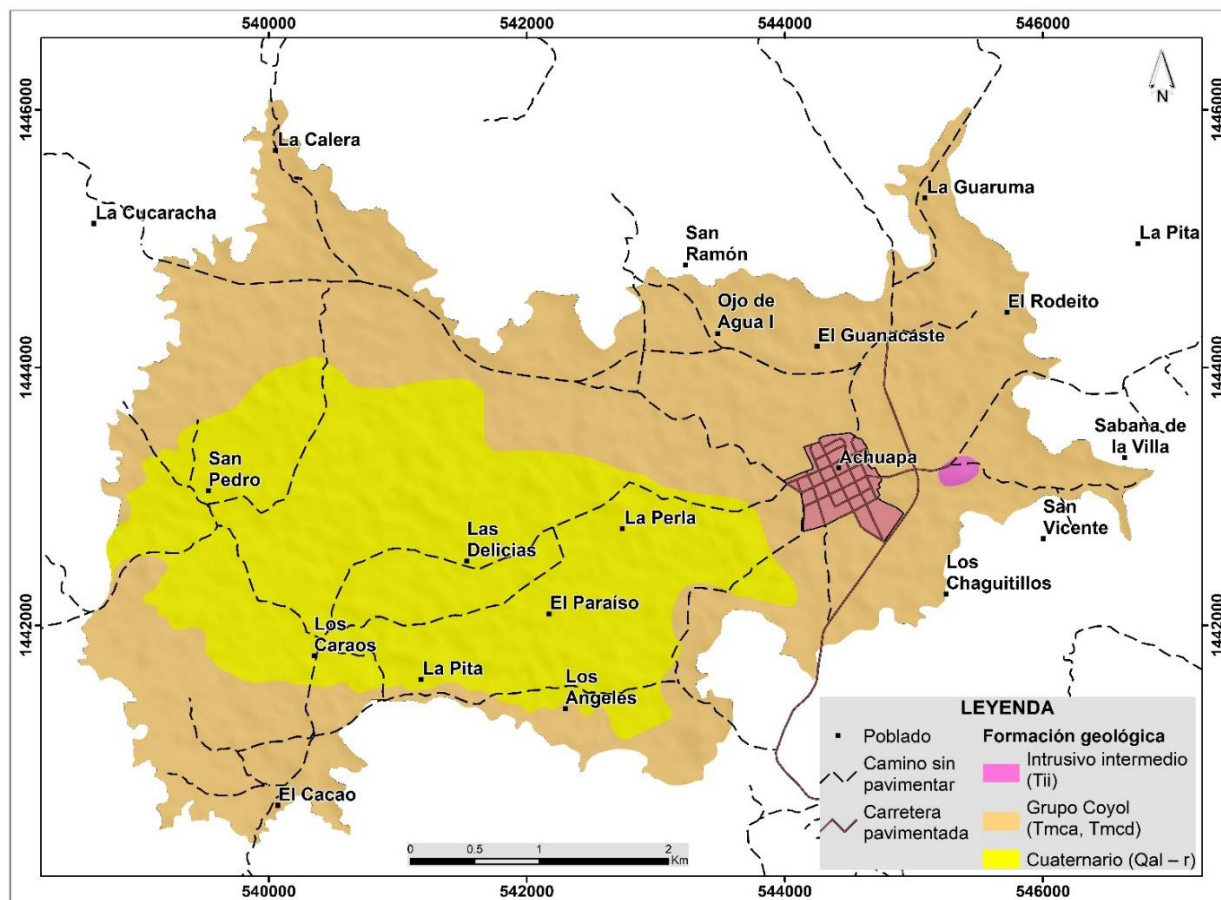
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Impacto en la zona vadosa (I)**

Tipo de material	Clasificación Dr	Peso	Valor Numérico DRASTIC (VND)
Sedimentos recientes: Arena, grava y suelos arenosos.	8	5	40
Rocas volcánicas: Ignimbritas, lavas basálticas – andesitas y piroclásticas, alteradas y fracturadas (Grupo Coyol).	6	5	30
Intrusivos intermedios.	2	5	10

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Impacto en la zona vadosa**



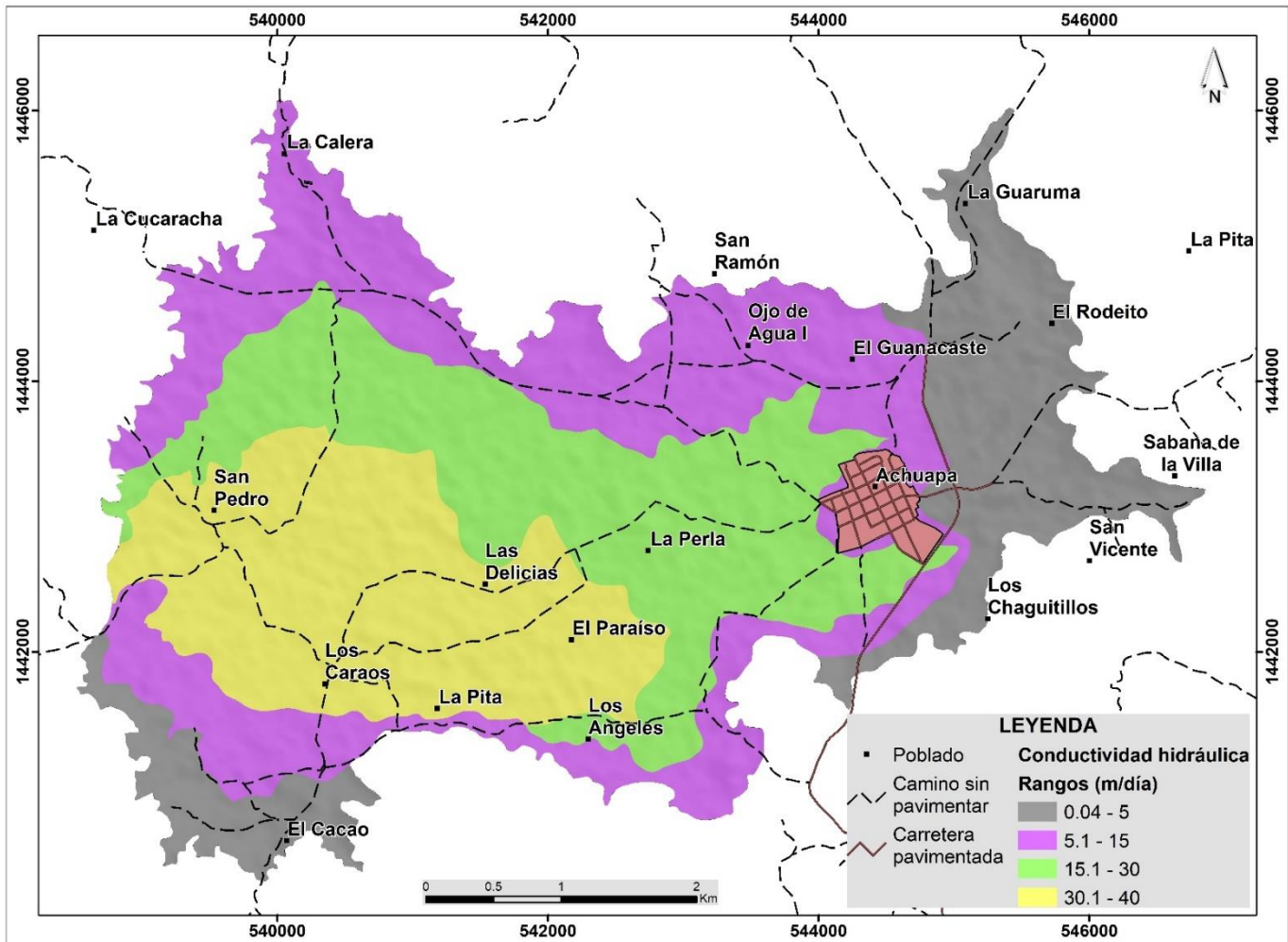
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Conductividad hidráulica (C)**

Rangos (m/día)	Clasificación Cr	Peso	Valor Numérico DRASTIC (VND)
0.04 - 5	1	3	3
5.1 - 15	2	3	6
15.1 - 30	4	3	12
30.1 - 40	6	3	18

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Conductividad hidráulica**



Fuente: elaboración propia.

**APÉNDICE B. CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES
MÉTODO GOD**

Tabla XXXII. **Grado de confinamiento hidráulico (G)**

Tipo de acuífero		Clasificación
No confinado		0.8
Semiconfinado		0.4
Libre		0.1

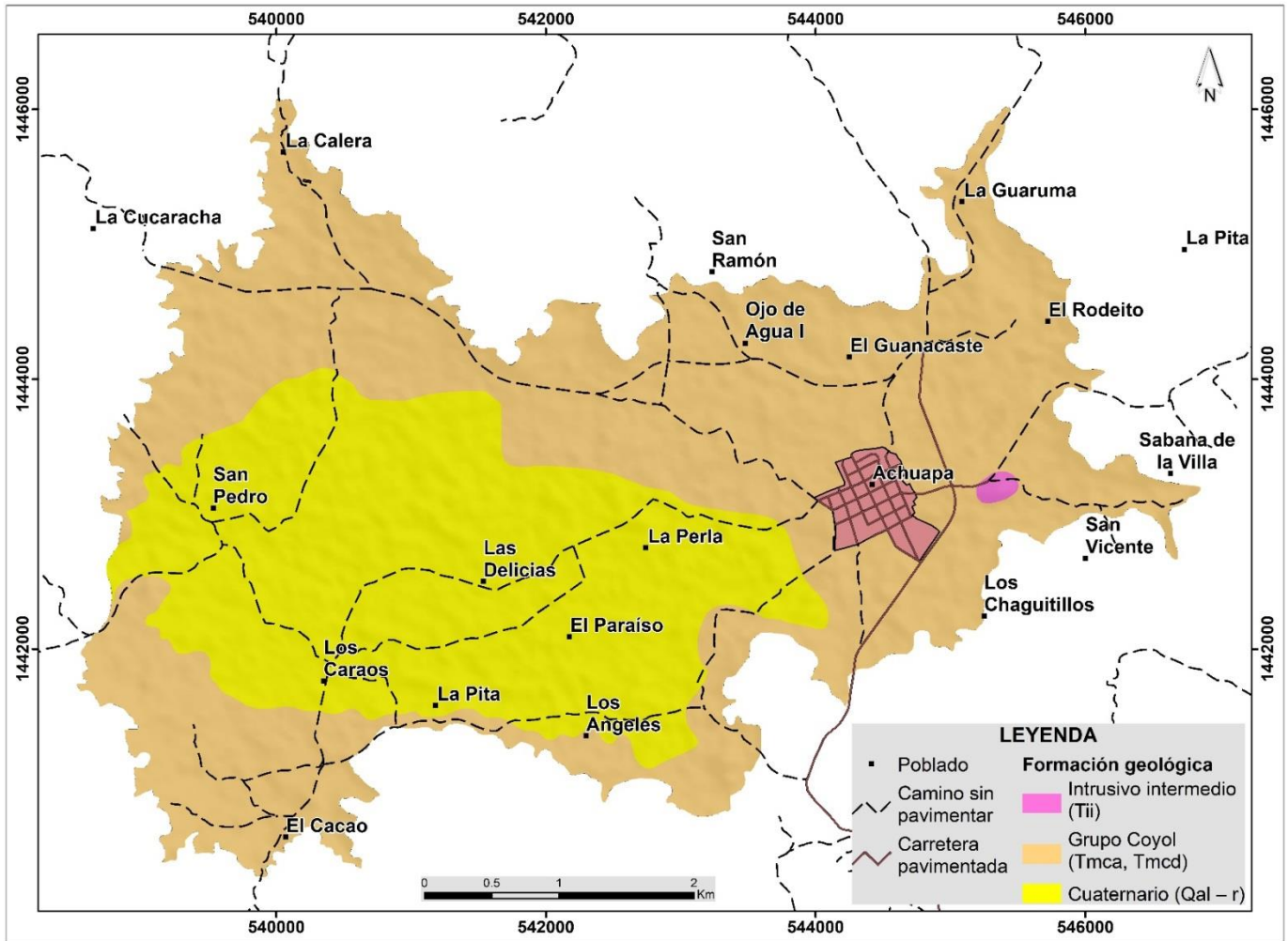
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Ocurrencia del estrato supratacente (O)**

Características litológicas		Clasificación
Arenas aluviales y gravas coluviales		0.8
Formaciones volcánicas antiguas		0.6
Formación ígnea		0.4

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. Tipo de formación geológica



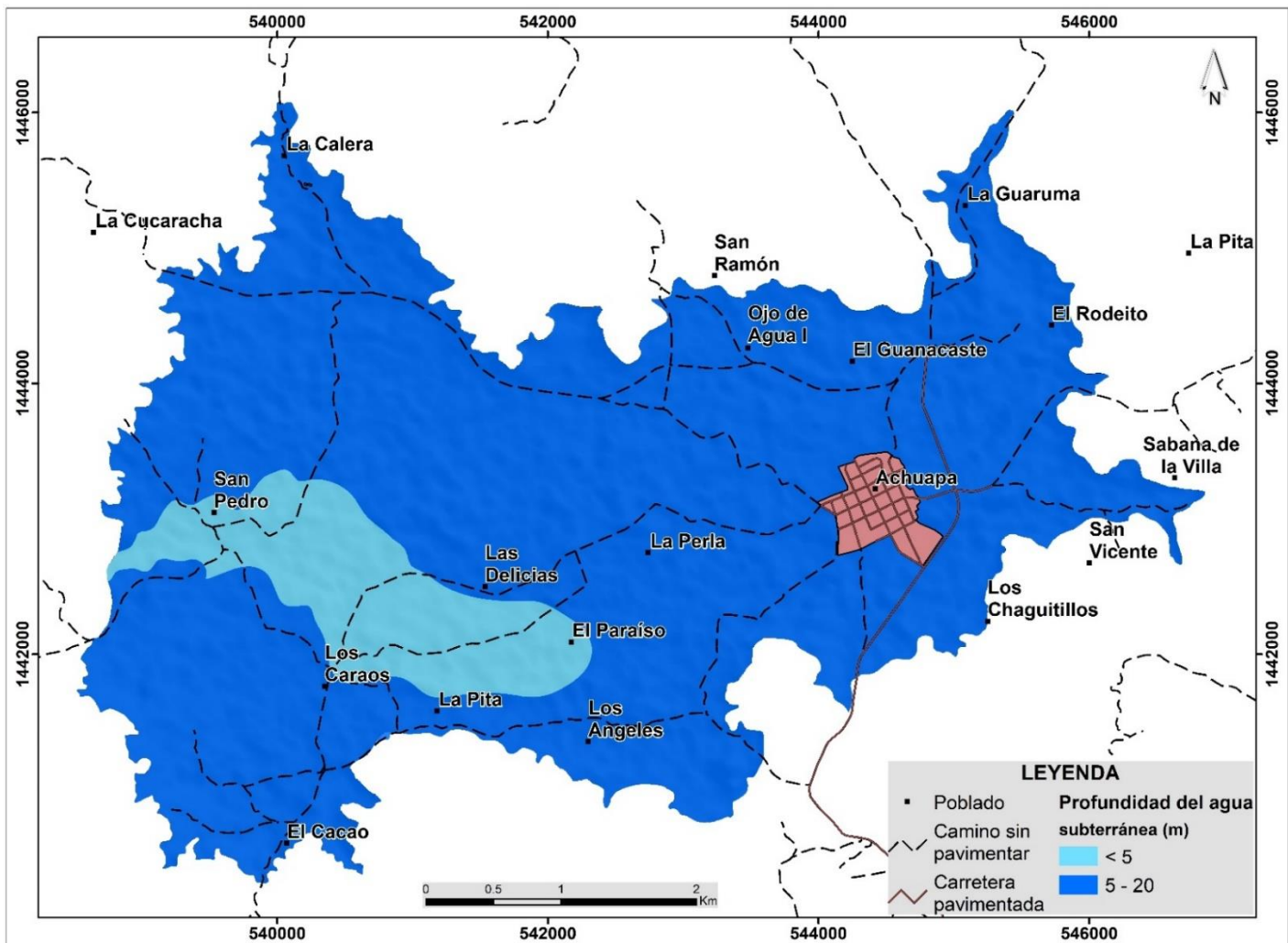
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. Distancia del nivel del agua subterránea (D)

Rangos (m)	Clasificación
< 5	0.9
5 - 20	0.8

Fuente: elaboración propia.







Figura 29. Distancia del nivel del agua subterránea



Fuente: elaboración propia.

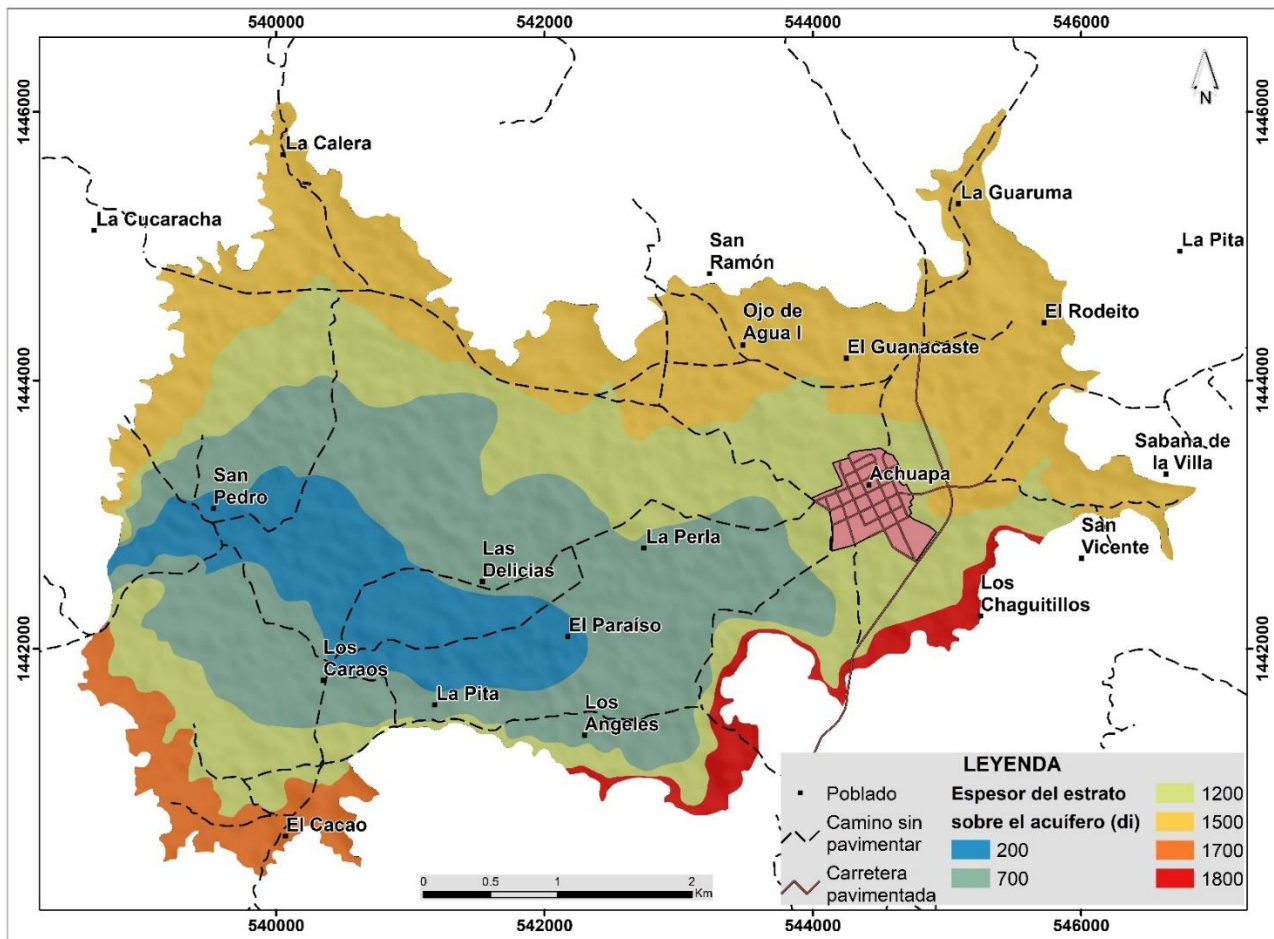
**APÉNDICE C. CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES
MÉTODO AVY**

Tabla XXXV. **Espesor del estrato sobre el acuífero (d_i)**

d_i (cm)	
200	
700	
1200	
1500	
1700	
1800	




Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Espesor del estrato sobre el acuífero**



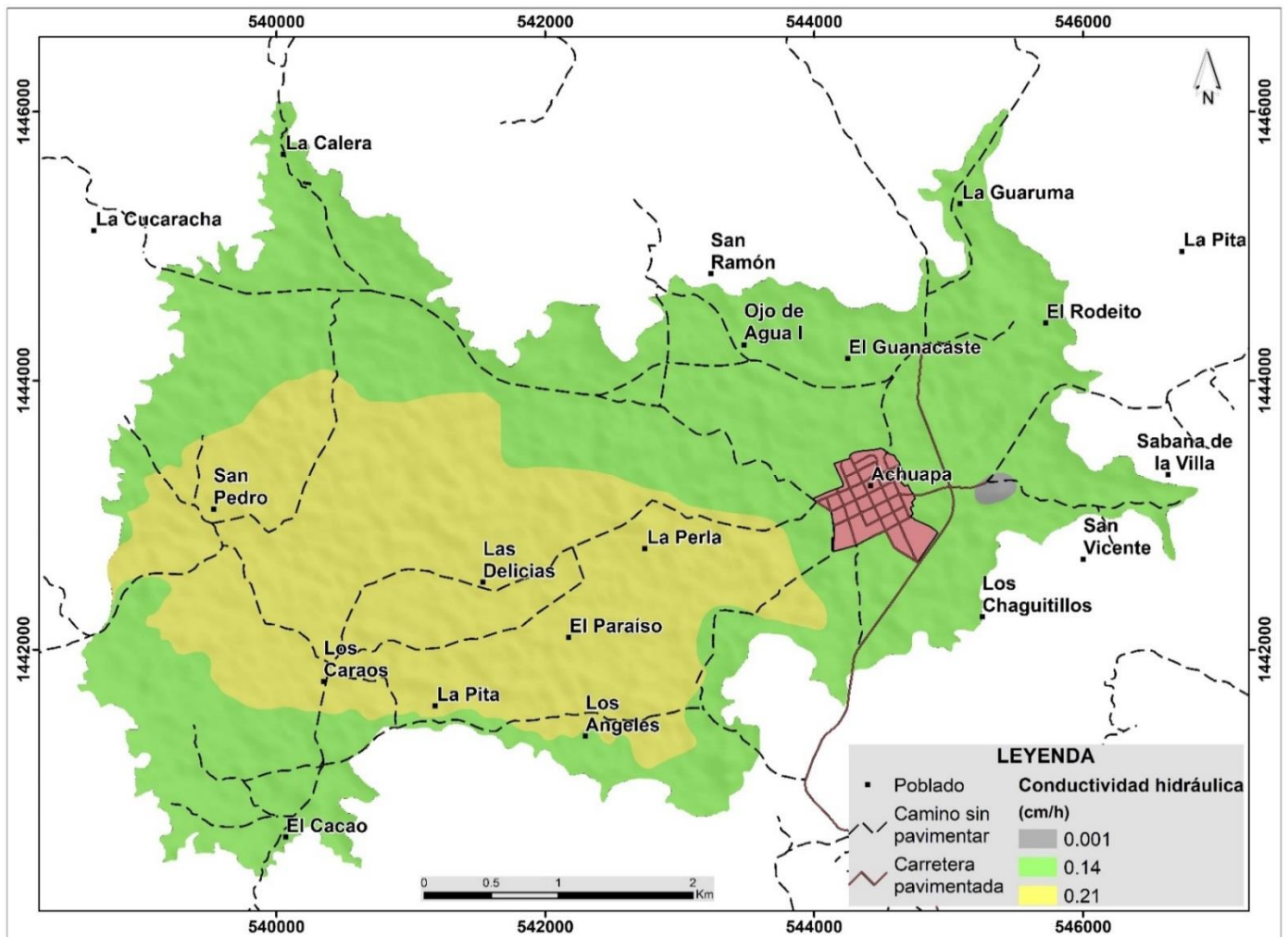
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. Conductividad hidráulica (k_{vi})

k_{vi} (cm/h)	
0.001	
0.14	
0.21	

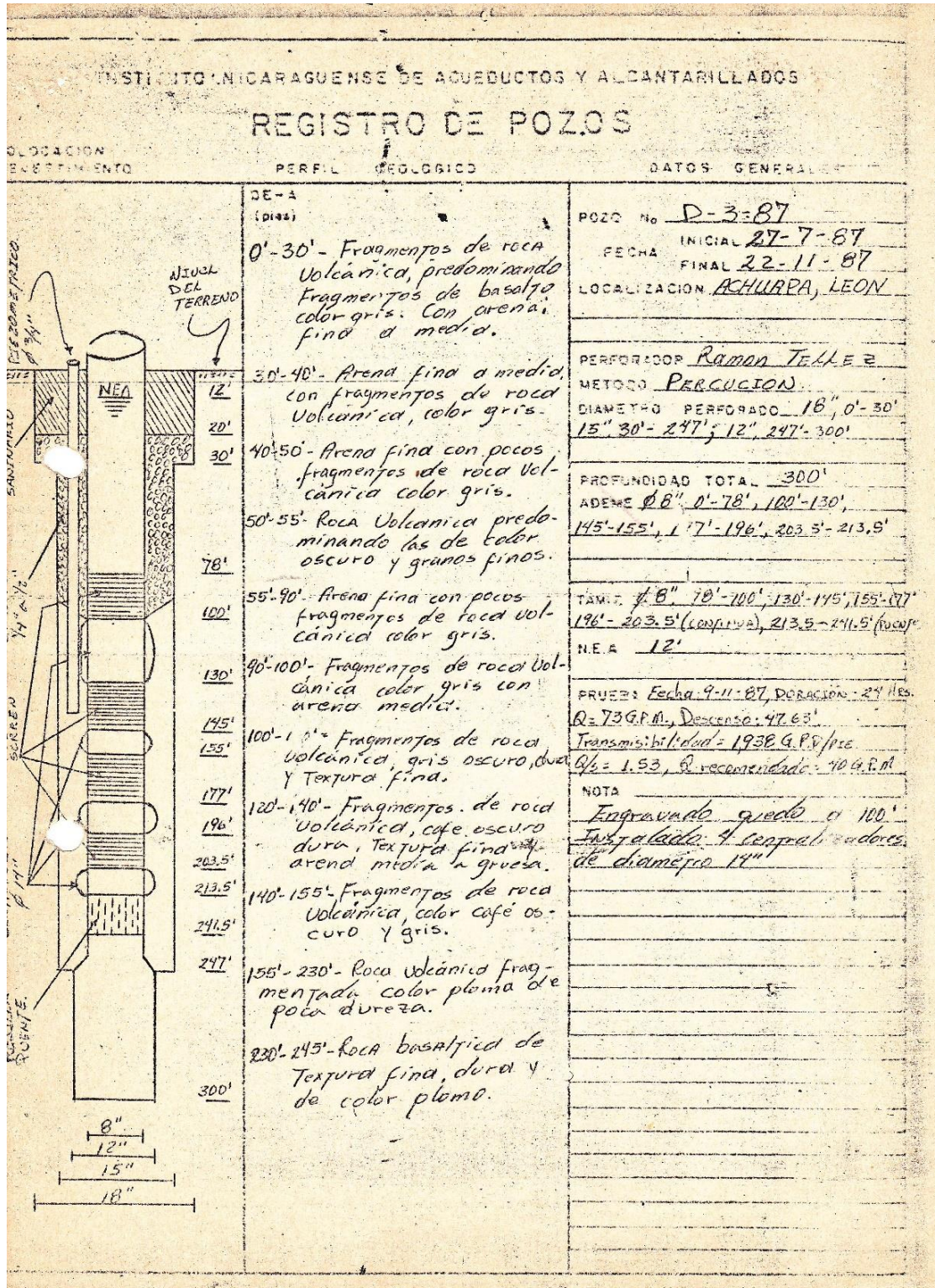
Fuente: elaboración propia.

Figura 31. Conductividad hidráulica

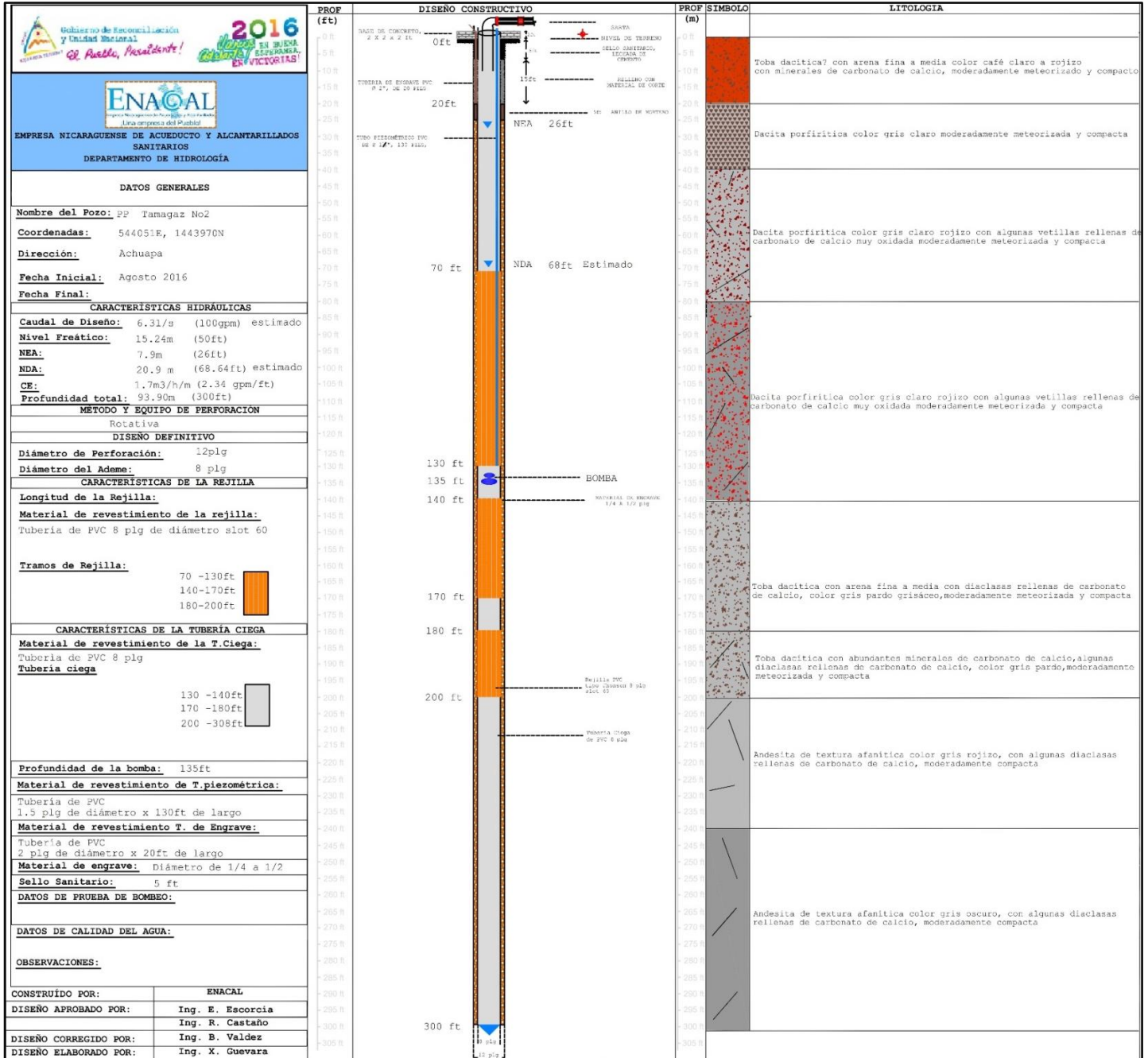


Fuente: elaboración propia.

Anexo 2: Perfil pozo Tamagás



Anexo 3: Perfil pozo Tamagás (Reemplazo)



**Anexo 4: Hydraulic Conductivity (K_i) Estimates for various sediments
in the Canadian Prairies.**

Sediment Type	Standart Code	Hydraulic Conductivity
Gravel	A	1000 m/d
Sand	B	10 m/d
Silt sand	C	1 m/d
Silt	D	10^{-1} m/d
Fractured, till, clay or shale (0 to 5 m from ground surface)	E	10^{-3} m/d
Fractured, till, clay or shale (5 to 10 m from ground surface)	F	10^{-4} m/d
Fractured, till, clay or shale (10 m from ground surface, but weathered based on colour: brown or yellow)	F	10^{-4} m/d
Massive till or mixed sand - silt - clay	G	10^{-5} m/d
Massive clay or shale	H	10^{-6} m/d

Method Aquifer Vulnerability Index (AVI)

*Estimate base on Freze and Cherry (1979)

*Estimate base on Keller *et.al* (1988)

*Assumes that fractures diminish downward

Revue Canadienne des ressources hydriques

Vol. 18, No. 1, 1993.

Anexo 5 Infiltración máxima

Tabla 4: Valores de infiltración máxima obtenidos a partir de los valores de permeabilidad vertical para los grupos litológicos de Nicaragua.

CODE GEO	cod MV		Formaciones o grupos geológicos nacionales representativos	I (mm/mes)
111	5	Sedimentos recientes: guijarros, arenas, suelos arenosos, arcillas	Cuaternarios Acuiferos Intramontanos	11432
112	5	Sedimentos consolidados (mas antiguos) y recientes: guijarros, arenas, suelos arenosos, arcillas	Cuaternarios Zona Pacifico	18000
1121	5	Sedimentos consolidados (mas antiguos) y recientes: guijarros, arenas, suelos arenosos, arcillas	Cuaternarios Pacifico Acuifero El Sauce	8400
1121	5	Sedimentos consolidados (mas antiguos) y recientes: guijarros, arenas, suelos arenosos, arcillas	Cuaternarios Acuifero Achuapa	1999
1121	5	Sedimentos consolidados (mas antiguos) y recientes: guijarros, arenas, suelos arenosos, arcillas	Cuaternarios Acuifero San Juan de Lim	2151
1121	5	Sedimentos consolidados (mas antiguos) y recientes: guijarros, arenas, suelos arenosos, arcillas	Cuaternarios Acuifero Pueblo Nuevo	500
1121	5	Sedimentos consolidados (mas antiguos) y recientes: guijarros, arenas, suelos arenosos, arcillas	Cuaternarios Acuifero Condega	2228
1121	5	Sedimentos consolidados (mas antiguos) y recientes: guijarros, arenas, suelos arenosos, arcillas	Cuaternarios Acuifero Somoto	2320
1121	5	Sedimentos consolidados (mas antiguos) y recientes: guijarros, arenas, suelos arenosos, arcillas	Cuaternarios Acuifero San Fernando	1564
1121	5	Sedimentos consolidados (mas antiguos) y recientes: guijarros, arenas, suelos arenosos, arcillas	Cuaternarios Acuifero Susucayán	1380
1121	5	Sedimentos consolidados (mas antiguos) y recientes: guijarros, arenas, suelos arenosos, arcillas	Cuaternarios Acuifero Jalapa	3285
1121	5	Sedimentos consolidados (mas antiguos) y recientes: guijarros, arenas, suelos arenosos, arcillas	Cuaternarios Acuifero San Bartolo	1200
1121	5	Sedimentos consolidados (mas antiguos) y recientes: guijarros, arenas, suelos arenosos, arcillas	Cuaternarios Acuifero Wiwili	200
1121	5	Sedimentos consolidados (mas antiguos) y recientes: guijarros, arenas, suelos arenosos, arcillas	Cuaternarios Acuifero La Concordia	1200
1121	5	Sedimentos consolidados (mas antiguos) y recientes: guijarros, arenas, suelos arenosos, arcillas	Cuaternarios Acuifero Jinotega	1600
1121	5	Sedimentos consolidados (mas antiguos) y recientes: guijarros, arenas, suelos arenosos, arcillas	Cuaternarios Acuifero Pantasma	1333
1122	5	Sedimentos consolidados (mas antiguos) y recientes: guijarros, arenas, suelos arenosos, arcillas	Cuaternarios Zona Caribe	7200
113	4	Rocas sedimentarias y sedimentos: areniscas, guijarros, arenas y arcillas	Bragman Bluff	450
121	1	Rocas sedimentarias: calizas arrecifales, margas, areniscas y conglomerados	El Salto	840
122	1	Rocas sedimentarias: areniscas tobaceas, lutitas, grauwackas y conglomerados calcareos	El Fraile	700
123	1	Rocas sedimentarias: areniscas tobaceas, grauwackas, lutitas, conglomerados y calizas	Masachapa	504
141	1	Rocas sedimentarias: rocas detríticas silíceas de grano grueso a fino, lutitas y aglomerados	Ningún nombre	576
151	2	Rocas sedimentarias: conglomerados polimíticos y areniscas rojas	Totogalpa	533
171	1	Rocas sedimentarias: arcosas y conglomerados, lutitas calcareas, margas	Todos los Santos	576
211	4	Rocas volcánicas: lavas, tobas, cenizas, aglomerados, escorias basálticas y andesíticas-basálticas	Ningún nombre	6160
212	2	Rocas volcánicas: ignimbritas, tobas, aglomerados y escorias basálticas	Grupo Las Sierras	1500
221	4	Rocas volcánicas: ignimbritas, brechas dacíticas, lavas basálticas-andesíticas y piroclásticas	Grupo Coyol Superior	700
222	4	Rocas volcánicas: lavas basálticas, andesíticas y dacíticas; ignimbritas, tobas	Grupo Coyol Inferior y Coyol Superior	600
223	4	Rocas volcánicas: lavas basálticas, andesíticas, riolíticas-dacíticas; aglomerados	Grupo Coyol Inferior	600
224	2	Rocas volcánicas: predominio de depositos volcanicos indiferenciados	Ningún nombre	500
251	3	Rocas volcánicas: predominio de depositos volcanicos indiferenciados	Ningún nombre	500
321	1	Rocas volcánicas y sedimentarias: piroclásticas, ignimbritas, tobas, lavas (riolíticas, dacíticas, basálticas), areniscas y conglomerados	Tamarindo	560
331	4	Rocas volcánicas y sedimentarias: tobas riolíticas-dacíticas, lavas andesíticas-basálticas, ignimbritas y areniscas	Matagalpa Caribe Norte	396
3311	4	Rocas volcánicas y sedimentarias: tobas riolíticas-dacíticas, lavas andesíticas-basálticas, ignimbritas y areniscas	Matagalpa Caribe Sur	560
3312	4	Rocas volcánicas y sedimentarias: tobas riolíticas-dacíticas, lavas andesíticas-basálticas, ignimbritas y areniscas	Matagalpa Pacifico	364
3313	4	Rocas volcánicas y sedimentarias: tobas riolíticas-dacíticas, lavas andesíticas-basálticas, ignimbritas y areniscas	Matagalpa Región Central	340
341	1	Rocas volcánicas y sedimentarias: piroclásticas, tobas, lavas andesíticas, aglomerados, areniscas, calizas, margas	Brito	700
342	1	Rocas volcánicas y sedimentarias: lutitas, areniscas y calizas silificadas, clastos de andesitas	Machuca	600
343	1	Rocas volcánicas y sedimentarias: tobas, aglomerados, calizas, cherts, areniscas, lutitas	Matiguas	560
361	1	Rocas volcánicas y sedimentarias: piroclásticas, andesitas, arcosas, areniscas calcareas, lutitas	Rivas	532
421	4	Rocas plutónicas: granodioritas	Márgenes Batolito de Dipilto	72
422	3	Rocas plutónicas: dioritas y granodioritas	Ningún nombre	63
423	3	Rocas plutónicas: gabrodioritas, gabros y diabasas	Ningún nombre	42
441	3	Rocas plutónicas: gabrodioritas, diabasas	Ningún nombre	26
442	3	Rocas plutónicas: dioritas, gabros, diabasas	Ningún nombre	70
461	4	Rocas plutónicas: granitos	Márgenes Batolito de Dipilto	162
462	4	Rocas plutónicas: sienitas, granosienitas	Márgenes Batolito de Dipilto	108
463	4	Rocas plutónicas: granitos y granodioritas	Batolito de Dipilto	60
581	4	Rocas metamórficas y sedimentarias: esquistos, cuarcitas, marmoles, metavolcanitas, areniscas y lutitas	Pre-Terciario metamórfico	60

