



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
Facultad de Tecnología de la Construcción

Monografía

**ESTUDIO DE VULNERABILIDAD HIDROGEOLOGICA DEL ACUIFERO DE
ACHUAPA, USANDO EL MÉTODO DRASTIC.**

Para Optar al Título de Ingeniero Civil.

Elaborado por

Br. David Alejandro Torres Aburto.

Br. Indira Daniela Báez Salgado.

Br. Josué Abraham Matus Díaz.

Tutor

Ing. Aldo Ricardo Alvarado Munguía.

Managua, Abril 2017

RESUMEN

En esta investigación se muestra el proceso metodológico y los resultados referentes a la vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero de Achuapa, usando el método DRASTIC. En este método se consideran los parámetros hidrogeológicos de recarga, topografía, zona no saturada, profundidad del acuífero, conductividad hidráulica, espesor del acuífero y tipo de formación.

Para la implementación del método DRASTIC se consideró el análisis de los siete parámetros hidrogeológicos mencionados anteriormente, que por sus siglas en inglés conforman el nombre de dicho método. A estos parámetros se les asigna un peso (valor) de acuerdo al grado de influencia que tiene cada uno de ellos en el proceso de la contaminación; para lo cual se asignan pesos más altos a los que representan mayor influencia.

El mapa de vulnerabilidad sirve para apoyar decisiones relacionadas con la protección del acuífero y como un instrumento auxiliar muy importante para la formulación de planes de manejo de las aguas subterráneas.

INDICE

| | |
|---|----|
| CAPITULO I: GENERALEIDADES | 1 |
| 1.1. INTRODUCCION | 1 |
| 1.2. ANTECEDENTES | 2 |
| 1.3. JUSTIFICACION | 3 |
| 1.4. OBJETIVOS..... | 4 |
| 1.4.1. Objetivo General..... | 4 |
| 1.4.2. Objetivos Específicos | 4 |
| 1.5. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO | 5 |
| 1.5.1. Macro localización..... | 5 |
| 1.5.2. Micro localización..... | 5 |
| CAPITULO II: DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO | 7 |
| 2.1. RECURSOS NATURALES | 7 |
| 2.1.1. Relieve..... | 7 |
| 2.1.2. Clima..... | 9 |
| 2.1.3. Flora y Fauna | 9 |
| 2.1.4. Uso potencial del suelo | 10 |
| 2.1.5. Área protegida | 11 |
| 2.1.6. Cuenca Hidrográfica | 12 |
| 2.1.7. Aguas Subterráneas..... | 15 |
| 2.1.8. Medio Ambiente..... | 15 |
| 2.1.9. Amenazas naturales. (Análisis de los principales riesgos en el municipio de Achuapa)..... | 16 |
| 2.1.10. Registros de desastres naturales en el municipio. | 17 |
| 2.1.11. Comunidades Amenazadas..... | 18 |
| 2.1.12. Recursos geológicos existentes..... | 20 |
| 2.1.13. Legislación y normativas al medio ambiente del municipio. | 20 |
| 2.2. ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS | 20 |
| 2.2.1. Población y división política y administrativa | 20 |
| 2.2.2. Población económicamente activa | 21 |

| | |
|--|-----------|
| 2.2.3. Principales Actividades económicas..... | 21 |
| 2.2.4. Servicios básicos | 22 |
| CAPITULO III: MARCO TEORICO | 25 |
| 3.1. PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS | 25 |
| 3.1.1. Acuíferos..... | 25 |
| 3.1.2. Condiciones de la superficie freática | 26 |
| 3.1.3. Condiciones de artesianismo..... | 27 |
| 3.1.4. Acuíferos semiconfinados..... | 27 |
| 3.1.5. Factores de infiltración..... | 29 |
| 3.1.6. Los procesos geológicos originan acuíferos | 29 |
| 3.1.7. Las funciones de un acuífero | 30 |
| 3.1.8. Porosidad..... | 31 |
| 3.1.9. Permeabilidad..... | 31 |
| 3.1.10. Espesor del acuífero | 31 |
| 3.2. CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS | 32 |
| 3.2.1. Contaminación Hidrogeológica | 32 |
| 3.2.2. Contaminación Agrícola | 32 |
| 3.2.3. Modelos de Contaminación del agua subterránea | 33 |
| 3.2.4. Transporte de la contaminación en el acuífero | 33 |
| 3.3. VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS | 38 |
| 3.3.1. Concepto de Vulnerabilidad | 38 |
| 3.3.2. Vulnerabilidad Hidrogeológica..... | 39 |
| 3.3.3. Métodos para determinar la vulnerabilidad de un acuífero..... | 40 |
| CAPITULO IV: DISEÑO METODOLÓGICO | 47 |
| 4.1. SISTEMA NUMÉRICO DRASTIC | 47 |
| 4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DRASTIC | 49 |
| 4.2.1. Profundidad del agua subterránea (D). | 49 |
| 4.2.2. Recarga (R). | 50 |
| 4.2.3. Medio Acuífero (A)..... | 51 |
| 4.2.4. Medio del Suelo (S) | 52 |
| 4.2.5. Topografía (T). | 53 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.6. Impacto en la Zona Vadosa (I)..... | 54 |
| 4.2.7. Conductividad Hidráulica (C) | 55 |
| 4.3. OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DRASTIC..... | 57 |
| 4.4. IDENTIFICACIÓN DE LOS ESCENARIOS HIDROGEOLÓGICOS. | 58 |
| 4.5. ELABORACIÓN DE ZONAS DE VULNERABILIDAD HIDROGEOLÓGICA. | 59 |
| CAPITULO V: CALCULOS Y RESULTADOS..... | 61 |
| 5.1. Características de los parámetros hidrogeológicos del acuífero de Achuapa. | 61 |
| 5.1.1. Profundidad del Agua. | 61 |
| 5.1.2 Recarga neta..... | 64 |
| 5.1.3 Medio del acuífero..... | 66 |
| 5.1.4 Suelo..... | 68 |
| 5.1.5 Topografía..... | 70 |
| 5.1.6 Zona vadosa. | 73 |
| 5.1.7 Conductividad hidráulica..... | 75 |
| 5.2. Escenarios Hidrogeológicos. | 77 |
| 5.3. Vulnerabilidad Hidrogeológica del acuífero de Achuapa. | 77 |
| 5.3.1 Descripción del área de Alta Vulnerabilidad..... | 79 |
| 5.3.2 Área de Moderada Vulnerabilidad..... | 79 |
| 5.3.3 Área de Baja Vulnerabilidad. | 80 |
| 5.3.4. Usos del mapa de Vulnerabilidad. | 80 |
| BIBLIOGRAFIA | 85 |
| ANEXOS | 86 |

CAPITULO I: GENERALEIDADES

1.1. INTRODUCCION

Este trabajo investigativo se elaborará con el fin de obtener un mapa de vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero de Achuapa, como herramienta útil para los planificadores en la priorización de áreas donde la protección del agua subterránea es muy importante.

La sobreexplotación de los recursos del agua subterránea en las diferentes regiones del país se acentúa cada día más, mediante su uso en la agricultura, ganadería, industria y el abastecimiento de la población que cada día va en aumento.

Para el abastecimiento de agua potable la población rural dispone de fuentes subterráneas de agua mediante el uso de pozos particulares, pozos comunales excavados a mano o perforados, mini acueductos, ojos de agua y pequeños pozos de agua muy someros a orillas de los ríos y quebradas.

Debido a la creciente demanda y al deterioro en la calidad de las aguas superficiales en el país, el suministro de agua potable se realiza a través de las fuentes de agua subterránea (73%).

Para la caracterización de la vulnerabilidad hidrogeológica se consideraron los parámetros (variables) de profundidad del agua freática, la recarga neta, la formación del acuífero, el tipo de suelo, la topografía, el impacto en la zona vadosa y la conductividad hidráulica. En base a estos elementos se crearon los mapas de vulnerabilidad.

1.2. ANTECEDENTES

A nivel internacional se han hecho diversos estudios sobre vulnerabilidad hidrogeológica, utilizando diferentes metodologías, incluyendo la del método DRASTIC.

El primer estudio de Vulnerabilidad Hidrogeológica fue hecho sobre el Acuífero de Managua o Las Sierras. El área donde se realizó este estudio tenía una superficie de 1040 Km² comprende, la cual comprendía las Sub-Cuencas subterráneas occidental, Central y Oriental del acuífero de Managua. Esta área fue seleccionada por la gran importancia que tiene el acuífero de Managua tiene.

1.3. JUSTIFICACION

Para garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo es necesaria una adecuada protección, que considere los diferentes actores y factores de las zonas correspondientes. Conociendo las zonas de mayor vulnerabilidad a la contaminación pueden establecerse en ellas programas específicos de conservación y monitoreo.

Se hace necesario dotar a los planificadores del agua, de un instrumento basado en el conocimiento de la vulnerabilidad natural que tiene un acuífero a la contaminación ante la presencia descargas de contaminantes.

Los estudios sobre vulnerabilidad hidrogeológica son herramientas que constituyen parte de la base técnica para la formulación de un plan general de protección para las aguas subterránea. Para determinar el impacto que tiene una fuente contaminante (histórica, actual o futura) es necesario conocer las condiciones geológicas e hidrogeológicas del acuífero.

En general, se carece de estudios hidrogeológicos en los diferentes departamentos y regiones del país. El acuífero del Achuapa requiere de este tipo de estudio porque presenta deterioro ambiental y de la cuenca hidrográfica, a consecuencia de una inadecuada administración que han sufrido los recursos hídricos por el uso irracional de pesticidas, la masiva deforestación y sobre todo la deposición de desechos sólidos en lugares inadecuados, como el suelo, las aguas superficiales o directamente al subsuelo.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Realizar un estudio de vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero de Achuapa, usando el método DRASTIC.

1.4.2. Objetivos Específicos

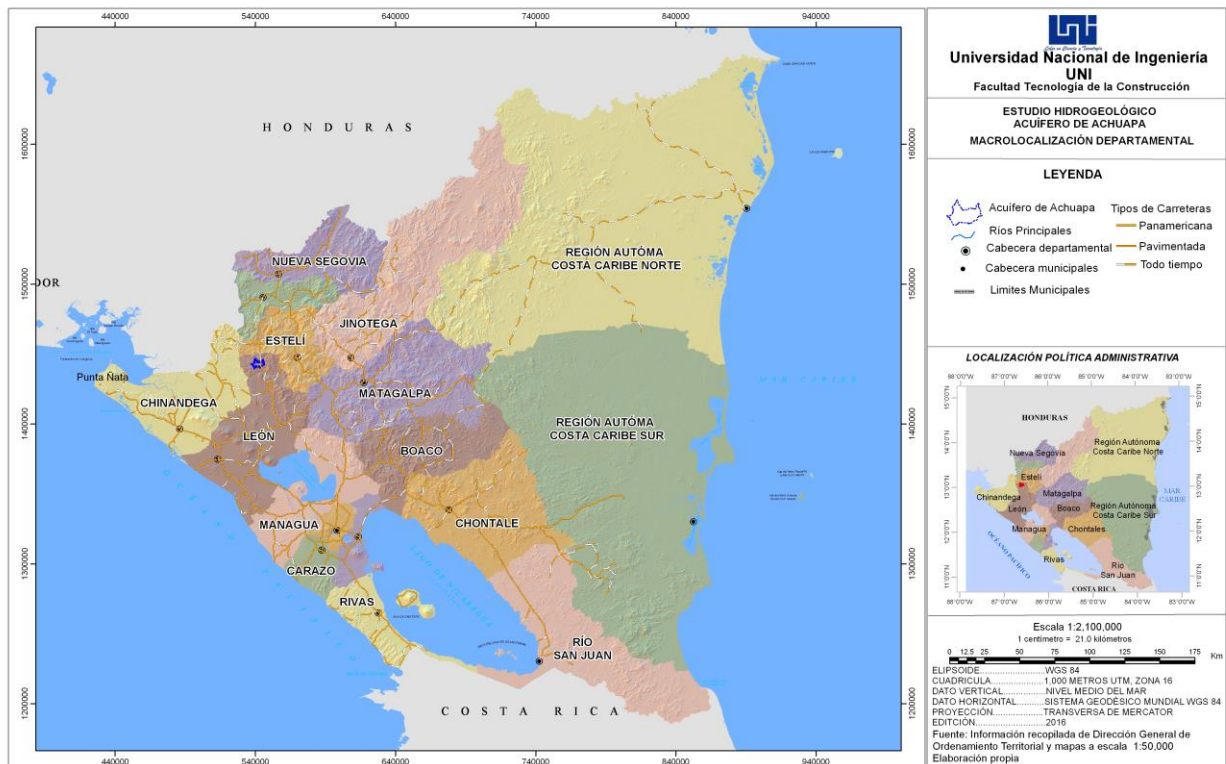
- ✓ Caracterizar los diferentes parámetros hidrogeológicos del acuífero de Achuapa.
- ✓ Identificar los diferentes escenarios hidrogeológicos del acuífero el Achuapa.
- ✓ Determinar las zonas de vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero de Achuapa.

1.5. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.5.1. Macro localización

En la figura No. 1 se puede observar la ubicación del municipio de Achupapa en el norte del departamento de León y al noreste del país.

Figura No. 1: Macro localización del Municipio de Achupapa

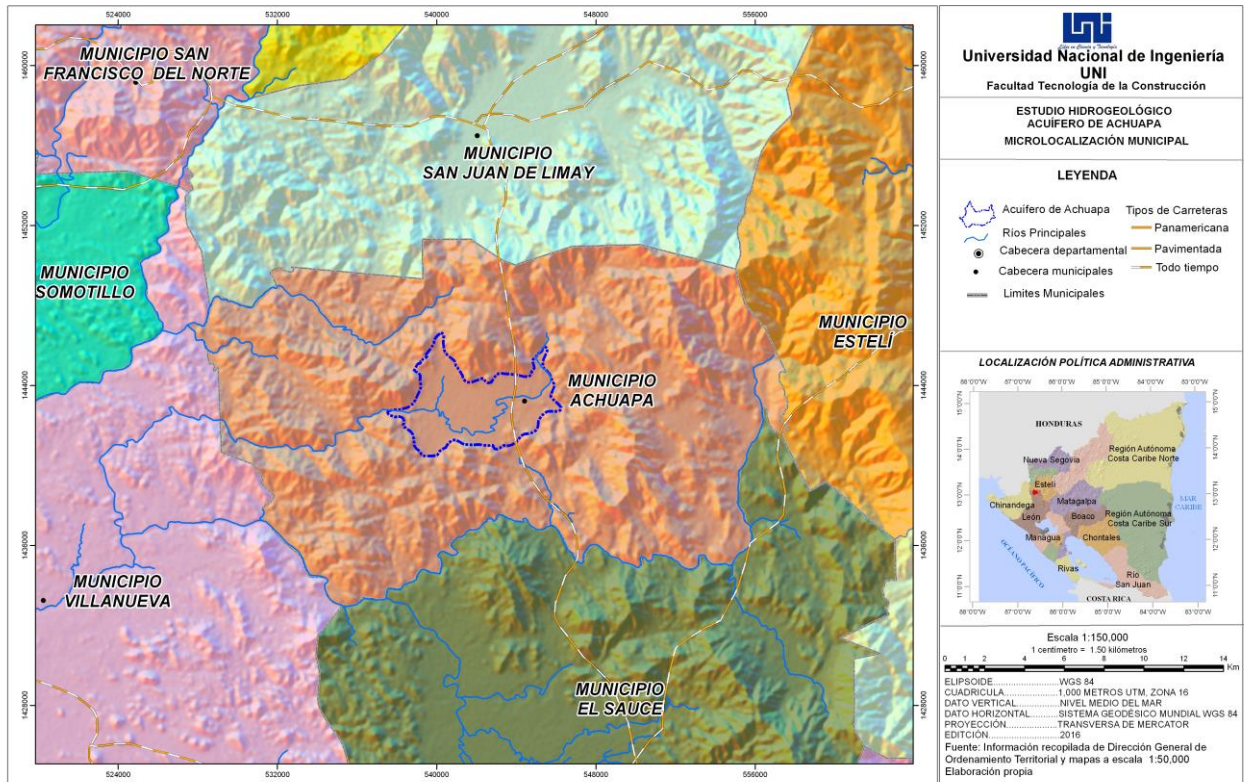


Fuente: Elaboración propia (Información de INETER)

1.5.2. Micro localización

El Municipio de Achupapa está localizado en la parte norte del Departamento de León. Está ubicado entre las coordenadas 13°03' de latitud norte y 86°35' de longitud oeste y a una altitud media de 330.90 metros sobre el nivel del mar. Su extensión territorial es de 416.24 km² y limita 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 Estelí y al oeste con el municipio de Villanueva, del departamento de Chinandega.

Figura No. 2: Micro localización del acuífero de Achuapa



Fuente: Elaboración propia (Información de INETER)

CAPITULO II: DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1. Recursos naturales.

2.1.1. Relieve

Los principales ríos del municipio son: El Coyolar, Río Chiquito, que juntos conforman el río Achupita. Se destaca un valle donde se asienta la zona urbana y una zona montañosa con predominancia de áreas dedicadas al pastoreo, un área de bosque seco tropical y la presencia de bosques de coníferas.

Entre las principales elevaciones 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. Al Oeste, El Cerro la Flor, El Jocote, Cerro Verde, Sulicayan, La Culebra y la Cordillera el Chifle.

Según ordenamiento realizado por la Alcaldía Municipal de Achupapa en el 2010, el municipio según su relieve se ordena en cuatro zonas (Alta, media, baja y valles), describiéndose de la siguiente manera:

Zona alta. Área de protección y conservación, se ubica en una zona ecológica con altitudes que van de 500 a 1300 msnm; lo que determina una variedad de micro climas que condicionan formaciones vegetales con una diversidad de especie de flora y fauna nativas muy valiosas en peligro de extinción y que deben ser protegidas, su topografía es agreste y muy accidentada. Esta zona cuenta con un potencial rico en fuentes de agua naturales, ahí se originan los principales río del municipio y de importancia nacional por formar parte de la cuenca estero real, tales como: Río Grande, El Coyolar Río Chiquito; ver figura No. 2.1).

Figura No. 2.1: Relieve de la parte alta del municipio



Zona media: Esta zona abarca un área geográfica de lomeríos, serranías y colinas con alturas de 300 hasta a 500 msnm, presenta suelos superficiales poco desarrollados, su topografía es fuertemente ondulada con pendientes mayores del 30%.

Figura No. 2.2: Relieve de la planicie del valle de Achuapa



Zona baja: Es una zona geográfica baja con lomeríos ondulados y algunas áreas más planas con pendientes que van del 5% al 30%, con algunas excepciones mayores del 30%; las altitudes varían de 100 a 200 msnm; los suelos de esta zona van de superficiales a profundos con piedras en el perfil bien drenados; existe abundante agua por la presencia de dos ríos; es bordeada en la parte sur por El río grande donde sirve de límite con El Sauce y en la parte Oeste con El río Los quesos el que sirve de límite con El Municipio de Villa Nueva.

Zona de Valles: En esta zona se destaca el valle de Achuapa y el valle de San Nicolás que comprenden un área aproximada de 30 km². En el primero se ubica la cabecera municipal; además comprende las comunidades de Río Arriba, Rodeíto, Ojo de Agua, La perla, Los Caraos, Los Chagüitillos y La Calera. Y en el caso del Valle de San Nicolás se extiende hasta las mesetas de Lagartillo. Se caracterizan por ser áreas planas con suelos profundos de textura franco arcillosas, bien drenados muy fértiles; actualmente ambos son utilizados para la agricultura y la ganadería extensiva (subutilizados); cuenta con un abundante potencial hídrico superficial y subterráneo por contar con la red principal del río chiquito y El Coyolar donde se puede implementar tecnologías intensivas para la producción agropecuaria con la implementación de sistemas de riegos. Esta zona es la de mayor población concentrada en forma de asentamientos, cuenta con buenas vías de acceso vehicular. La mayoría de las comunidades de esta zona cuentan con mayor concentración de población y tienen servicio de energía eléctrica.

2.1.2. Clima

El municipio posee un clima Sub-tropical seco. Presenta un promedio anual de precipitación de 1,200 a 1,800 mm, con una distribución regular principalmente en los meses de Mayo a noviembre.

2.1.3. Flora y Fauna

Flora:

La vegetación del municipio se encuentra ubicada en bosques medianos/altos sub caducifolio y perennifolios de zonas semi húmedas. El despale al que se ha visto

sometido el bosque de pinos y maderas preciosas como caoba, laurel, guanacaste y pochote principalmente. Se ha afectado considerablemente el inventario de recursos naturales ya que con ello disminuye la cantidad de aves y fauna silvestre, así como la biodiversidad.

Fauna:

En la fauna acuática es escasa la presencia de guapote, yegua, tilapia, cuajipal, robalo, y tortuga de llano, principalmente en los ríos Chiquito, Coyolar y los Quesos. Las especies que existen en regular cantidad camarón de río, el zonto y los filines. En mayor cantidad existe el cangrejo, karate, sardina y cuatro ojos. En cuanto a la fauna silvestre existe poca presencia de venado, sahino, coyotes, conejo, guardatinaja, cascabel, gato de cerro, tigrillo, cuyusa, chachalaca, gaviñanes, querque, cuervos, guachirica, coyopipe (zorra), pizotes, león hosco (solitario), tucanes (del pequeño) y . Especies que ya no existen: pavón, pavas (locas), congos, tigres, lapas y loras. En la zona existen en poca cantidad las especies de guatuzá, cusuco, chocoyos, zanates, gorriones o colibríes. En el área existen en grandes cantidades, al mapachín, zorro cola pelada, zorro espín, zorro mión, ardilla, urraca, zenzontle y garrobo.

2.1.4. Uso potencial del suelo

El municipio presenta diversidad de suelos, donde predominan suelos francos y suelos arcillosos con bastante pedregosidad, pero a las veces aptas para la agricultura y otros usos; estos suelos poseen un PH con rangos entre 6 y 7, con altos contenidos en materia orgánica y minerales, capaces de producir todo tipo de cultivo de acuerdo a los requerimientos de los mismos.

El municipio está caracterizado en zonas, donde cada zona posee un ecosistema diferente ya que la temperatura atmosférica varía según la altura; otra característica es la profundidad de la capa fértil que en los suelos del valle es mayor de 40cm.

El tipo de suelo que predomina en Achuapa es moderadamente profundo a superficiales; bien drenado, con una textura franca arcillosa y con abundante piedra en su perfil y superficie.

En cuanto al uso potencial, según la propuesta de ordenamiento ambiental del territorio (POAT) para el departamento de León y Chinandega, existen 998.31 ha.; para el uso agropecuario amplio; para el uso agrícola especial 944.01 ha.; para cultivos anuales en suelos pedregosos existen 673.43ha.; para el cultivo anual en pendientes del 8 a 15 % se identificaron 994.76 ha. La Ganadería intensiva cuenta con 17.72 ha., la Ganadería extensiva con 182 ha.; para pastos asociados con forrajearía se identifican 3.3 ha.; para bosques de protección por severa limitación topográfica se afirma la existencia de 668.12 ha.

2.1.5. Área protegida

Reserva natural el Quiabú - Las Brisas:

Esta cuenta en la actualidad con un Plan de Manejo aprobado por el MARENA y es compartida, además de Achuapa, por los municipios de San Juan de Limay y Estelí. Aunque falta por definir el Organismo Coejecutor del Plan de Manejo, así como el acuerdo con las municipalidades que comparten la Reserva Natural.

El Municipio de Achuapa cuenta con el 11.6 % del territorio municipal (correspondiente a 4,810.31 hectáreas) con áreas destinadas a la protección de bosques, producción de aguas y área de amortiguamiento; solo existen áreas pequeñas cubiertos con cobertura vegetal y éstas se sitúan más en la parte alta; siendo esta zona la que está más cubierta de bosques con especies maderables, como cedro pochote caoba, cedro real, guapinol y pino, pero a la vez es la más vulnerable porque los madereros destruyen los pequeños bosques existentes sin reponer el recurso natural. A pesar que el area protegida cuenta con un plan de manejo integral, esta no cuenta con recurso ni institución que se encargue de la administracion y protección de la misma.

El área protegida está clasificada como zona alta productora de Agua, la cual es muy importante para los pobladores del municipio porque de ella depende el consumo de la mayor parte de la población del municipio.

2.1.6. Cuenca Hidrográfica

Las aguas superficiales drenan por medio de las principales micro cuencas hidrográficas del área: la del Río Coyolar, Río Chiquito y Río Grande desembocan en la cuenca principal del Río Estero Real (3,540 km²). Los niveles de agua subterránea en Achuapa varían entre 4m y 10m.

En cuanto a la disponibilidad de reservas de agua subterránea el municipio no cuenta con grandes cantidades, sin embargo existen manantiales y quebradas, las cuales pueden ser aprovechadas para agua potable y riego a pequeña escala.

Achuapa se ubica en la Vertiente del Pacífico; por su condición hidrográfica se encuentra en una zona con abundante ríos y manantiales. En el Municipio se diferencian 3 micro cuencas principales: la del Río Grande, con un importante caudal que le sirve de límite con el Municipio de El Sauce y ocupa un sector en el Sur del territorio; esta cuenca es compartida, además, con el municipio de Villanueva; la del Río Coyolar que nace en la parte noreste del municipio que atraviesa todo el territorio central municipal de Noreste a Suroeste, encontrándose en la parte central de la comunidad La Perla con el Río Chiquito formando con este la micro cuenca del río Achupita, desembocando en el río grande en el sector de pilas de Villanueva, el cual desemboca en el Estero Real. El Municipio de Achuapa está delimitado por seis micro cuencas que presentan una conformación regular, subdividiendo al Municipio en seis zonas.

- ✓ Microcuenca Río Coyolar,
- ✓ Microcuenca Río Chiquito,
- ✓ Microcuenca Río Achupita,
- ✓ Microcuenca Santa Rosa,
- ✓ Microcuenca Río Varela,
- ✓ Microcuenca Río Grande.

Microcuenca Río Coyolar:

Esta es tributaria de la microcuenca del río Achuapita, sus nacientes se originan en el parte agua de la cordillera Horno Grande y Roblito. Esta microcuenca está altamente deteriorada en cuanto al recurso forestal debido a que es una de las zonas donde se cultiva extensivamente el frijol (Primera y postrera), donde los productores utilizan las áreas de laderas para realizar esta siembra con la práctica tradicional de tala y quema, lo que ha incidido en la pérdida de suelo; cabe mencionar que este deterioro se amplió por efectos del huracán Mitch, provocando el deslizamiento de suelo en toda la parte alta del territorio, donde por efecto de este fenómeno natural se perdió en parte el bosque de galería, quedando desprotegido y vulnerable por el arrastre del sedimento, el cual fue depositado en el cauce del río, el que se amplió considerablemente, por tal razón en la época de verano este río se seca afectando la parte media y baja de su trayecto.

Microcuenca Río Chiquito:

Esta es tributario de la microcuenca del río Achuapita, sus nacientes se originan en la parte sur de la cordillera Horno Grande y comprende las comunidades de San Nicolás, sabana de la villa, Chaguitillo y la Perla. Esta microcuenca a diferencia de la del coyolar está menos degradada, pero al mismo tiempo más vulnerable debido a que los manantiales se ubican en sector donde la parte alta existe reserva de bosques latí foliados maderables y energéticos que se explotan ilegal e irracionalmente; otro factor significativo es el avance progresivo de la siembra de frijol en estas áreas, por lo que estas prácticas se deben restringir acompañado obligatoriamente con obras de conservación para todos los sistemas productivos.

Microcuenca Río Achuapita:

Esta está conformada por las dos microcuencas (río Coyolar y río Chiquito), inicia en la comunidad de la perla y comprende las comunidades del Ojo de agua, la Calera, El Cacao, los Caraos, Los Llanitos, la Flor # 2 y Araditos. Esta microcuenca se encuentra deteriorada ya que el Huracán Mitch amplió su cauce y

a diferencia de las microcuencas antes mencionadas su daño con respecto al bosque de galería para el sector de las comunidades de la Perla y Los Caraos no afecto el bosque de ribera, pero desde la comunidad los Llanitos hasta el sector de los Araditos el impacto fue devastador del bosque de galería.

Microcuenca Santa Rosa:

Las vertientes de esta microcuenca se origina en la comunidad El Portillo y tributa en la microcuenca del río de los Quesos (sector de Villanueva), esta microcuenca cubre las comunidades del Portillo, Las Tablas, la Sandino, Salitre, Santa Rosa, Monte Frío # 1 y 2, Jicarito y Santa Cruz; este río es permanente en invierno y verano y cuenta con una reserva de bosque en la parte media de su recorrido (La Sandino), las afectaciones provocadas por el huracán Mitch provocaron derrumbes en las áreas más irregulares y frágiles principalmente es sus vertientes (Portillo y Caserío El Roble); las pendientes en este sector son mayores de 50 grados y ha sido sometida a la siembra de granos básicos, siendo una zona de vocación forestal. Todas las comunidades de estas microcuenca se encuentran totalmente deforestadas, lo cual las hace vulnerable a deslizamientos y perdida de la capa fértil en época de invierno.

Microcuenca Río Varela:

Esta es tributaria de la microcuenca del Rio Grande, sus vertientes se ubican en comunidades del municipio de Estelí y cubre las comunidades de Waylo, San Antonio # 1 y Varela del municipio de Achuapa; este río es permanente en invierno y verano, también conserva fauna acuática. Esta microcuenca presenta un potencial para establecer sistemas de riego pero no es aprovechada por los productores debido a la falta de recursos económicos y la ausencia de organismos que promuevan técnicas de riego y cultivos alternativos.

Microcuenca Río Grande:

Esta es receptora de la microcuenca Varela y cubre las comunidades de San Antonio # 2, Piedra Gorda # 1 y 2, Wiquilí, Consuelo, San Marqueña, Porvenir, Mata Palo, Desecho, Playones, Carrizo, Barro, Caracol, Los Playones, Flor #1; esta microcuenca se junta con la microcuencas Achupita en la comunidad de Las Pilas de Villanueva y es una fuente hídrica de todo tiempo.

2.1.7. Aguas Subterráneas

Según estudio realizado por APSA, en el año 2001 para mejorar el sistema de agua potable urbana determinó que el volumen de agua que fluye anualmente a través del depósito subterráneo conformado por los sedimentos aluviales, se localiza en el área del valle; el acuífero es pequeño, pero suficiente para el abastecimiento actual y futuro de la población de Achupita.

Para este estudio se trazó una la curva isofreática de 315 msnm y de 3,500 m de longitud, que va del cerro Chato a El cerro La Cabrera; se determinó que la profundidad de las aguas subterráneas en este sector varía de 6 a 10 m, con un volumen aprovechable de 6 millones de m³/año. Para el futuro se requiere aprovechar las aguas superficiales para abastecer a la población, dado al limitado potencial del acuífero Achupita.

La demanda anual de agua potable del área urbana para el año 2012 era de 157,768 m³ y que para los próximos 20 años ascenderá a 241,227 m³. En cuanto a la disponibilidad de reservas de agua subterránea el municipio no cuenta con grandes cantidades.

2.1.8. Medio Ambiente

El Municipio de Achupita presenta una diversidad de recursos naturales; aún existen reductos de bosques de pinos y bosques primarios latifoliados que favorecen la recarga de agua que forma las micro cuencas importante del municipio; también existe una variedad de aves, reptiles, mamíferos y fauna acuática, lo que hace atractivo y relevante el tema eco turístico.

Los recursos naturales han sido históricamente afectados por los modelos de desarrollo agropecuarios; Pues en su mayoría estuvieron acompañados de actividades nocivas para la preservación del hábitat natural, que sin duda influyen negativamente en los ecosistemas y por ende en la alteración del equilibrio ecológico.

La deforestación causada principalmente por el desarrollo de las actividades agrícolas, primero y luego el corte de los árboles para madera y leña, han traído como consecuencias la degradación de los suelos por diferentes tipos de erosión, el sobrecalentamiento del suelo, la profundización de las aguas subterráneas y la pérdida de ríos en las épocas secas y por ende la migración de las especies silvestres.

La agricultura tradicional caracterizada por prácticas de siembra en suelos frágiles, ondulados o con elevados niveles de pendientes y con texturas de arena franca o arcillosa, es actualmente la principal causante de la erosión y pérdida de los suelos.

Se han identificado como fuentes de contaminación ambiental, las quemas agrícolas, el humo producido por las fábricas de ladrillos y específicamente para los cuerpos de agua, el lavado de vehículos y baño de animales en los ríos. La contaminación de forma local en la zona urbana es producida por el basurero municipal y los subproductos del destace de reses y cerdos que no se realizan en lugares apropiados.

Así mismo son susceptibles de contaminación las fuentes de agua, por efecto de la inadecuada práctica de medidas de higiene y salud por parte de la población.

2.1.9. Amenazas naturales. (Análisis de los principales riesgos en el municipio de Achuapa).

En el municipio de Achuapa las amenazas o fenómenos naturales con mayor potencial de impacto son: fenómenos lluviosos con alta intensidad que provocan inundaciones, deslizamientos de laderas, derrumbes y aislamiento de las

personas, pérdidas de cultivos, Otro fenómeno que también nos afecta son las sequías provocando escases de alimento y de agua tanto para las personas como para los animales domésticos.

Otro fenómeno que nos puede afectar son los terremotos, ya que en el mapa de sismicidad de INETER, ubica al municipio en un grado medio, por lo tanto un sismo de gran magnitud puede provocar grandes daños a la infraestructura de viviendas urbanas. Este análisis fue realizado por la defensa civil del ejército de Nicaragua con el COMUPRED Municipal los días 3,4 y 5 de junio 2012.

Sim embargo llegamos a la conclusión de que la amenaza más grande en nuestro municipio son los deslizamientos de suelos ya que la topografía es irregular, (lomeríos y serranías), siendo así la población rural la más vulnerable por que las familias ubican sus viviendas al pie de las montañas, No obstante la infraestructura de las viviendas rurales continua siendo deficiente debido a que en su mayoría son de madera y piso de tierra, por lo que, en su gran mayoría, cuando hay períodos de intensas lluvias el agua se infiltra por el suelo provocando anegamiento de las viviendas lo que provoca incomodidad en las personas y sobre todo las pone en riesgos de contraer enfermedades.

2.1.10. Registros de desastres naturales en el municipio.

Huracán Aleta 1982, 24 horas de lluvia intensa provoco la destrucción de dos puentes, se observaron grandes deslizamientos de suelos en todo el municipio, afectando la producción, muerte de animales domésticos, muerte de 6 personas del área rural por deslizamiento de suelo, los caminos quedaron totalmente inaccesibles.

Invierno copioso de alta intensidad (20 de marzo – 11 de noviembre 1995), provoca la aparición de la enfermedad de leptospirosis, provocando la muerte de 9 personas y una morbilidad de 400 personas, las cuales fueron hospitalizados en el centro de salud del municipio y en el hospital de la cabecera departamental.

1998 Huracan Mitch, provoco 6 dias de lluvias intensas, provoco la caida de dos puentes quedando el municipio incomunicado con el municipio de Esteli y León, provoco gran deslizamiento de suelos en cerranias y lomerios principalmente en la zona media y alta del municipio, perdida del bosque de galeria del rio coyolar y el rio achuapita, caminos rurales totalmente incomunicados, destruccion de más de 100 viviendas por deslizamiento, sistemas de agua potables destruidos, grandes pérdidas de animales domesticos y pérdida total de la cosecha y de los cultivos de postrera.

2.1.11. Comunidades Amenazadas

Tomando como referencia el estudio realizado por la secretaria del SINAPRED en el año 2005 y las lluvias ocurridas durante la depresión tropical 12-E en el año 2011, a continuación se listan las comunidades afectadas por inundación y deslizamiento.

Tabla No 2: Tipo de amenaza y ubicación.

| Comunidades | Tipo de Amenaza | Ubicación UTM |
|-----------------------|--|-------------------------|
| La Perla | Inundación y Aislamiento Río Achupita | N 1442625 E 542750 |
| Los Caraos | Inundación y Aislamiento Río Achupita | N 1441752 E 540314 |
| El Cacao | Inundación | N 1440466 E 540068 |
| Los Rodeítos | Inundación Río Coyolar | N 1444435 E 545671 |
| Los Playones | Inundación | N: 1437035 E: 533426 |
| Santa Rosa | Inundación y Deslizamiento | N1446442 E: 537389 |
| Los Llanitos | Inundación y Aislamiento Río Achupita | N 1442339 E 537131 |
| Los Araditos | Inundación | N 1440075 E 531023 |
| Bo San Juan | Aislamiento por el Río Achupita | N 1444250 E 544793 |
| Monte Frío I | Inundación del río Monte Frío | N 1445260 E 531995 |
| Monte Frío II | Inundación el río Monte Frío | N 1443641 E 533091 |
| Sabana de la villa | Aislamiento por el río Chiquito | N 1443260 E 546846 |
| El Desecho | Aislamiento por el río Grande | N1434481 E 536631 |
| Chagütillos | Deslizamiento | N: 1441551 E: 545611 |
| Piedras Gordas I y II | Deslizamiento y Aislamiento por el río Chiquito. | N: 1440911 E: 548691 |
| La Flor I y II | Inundación y deslizamiento en el cerro La Flor. | N: 1438600 E: 533287 |
| Las Tablas | Deslizamiento | N: 1449290 E: 543052 |
| El Portillo | Deslizamiento | N: 1449842 E: 541213 |
| La Calera | Deslizamiento | N: 1444876 E: 540529 |
| Río Arriba | Derrumbes en la loma la zorra, inundación. | N 1447268 E 545394 |

| | | |
|-------------|--|-----------------------|
| Guaylo | Deslizamiento y Aislamiento por el río San Antonio | N1446673 E 553823 |
| El Pajarito | Derrumbes | N 1448530 E 549704 |
| Santa Rosa | Deslizamiento | N1446442 E: 537389 |

2.1.12. Recursos geológicos existentes.

En la actualidad el municipio cuenta con concesiones de exploración y explotación de minas metálica y no metálica, estas concesiones comprenden un 80% del territorio municipal pero aún no se han realizado estudios debido a que el gobierno municipal ha manifestado su negativa antes estas solicitudes de aprovechamiento de recursos naturales, aunque cuentan con la autorización del MIFIC.

2.1.13. Legislación y normativas al medio ambiente del municipio.

El municipio cuenta con una ordenanza aprobada en el año 2006, que describe en lo general el uso y aprovechamiento de los recursos naturales, esta ordenanza cubre el uso y manejo del agua, suelo, caza, y aprovechamiento de los recursos forestales, esta cuenta con 10 capítulos y 105 artículos.

Lo cual facilita la diseminación de agentes diarreicos, como Vibrión cholera, parásitos diversos, a través del no uso de letrinas o su mala ubicación cerca o en sitios superiores al nivel dela agua.

2.2. Aspectos socioeconómicos.

2.2.1. Población y división política y administrativa

En el 2008 el instituto Nacional de Información de desarrollo (INIDE) realizo el VIII censo de población y muestra una tasa de crecimiento de 0.9%.

El Municipio de Achuapa, ha mostrado un crecimiento poblacional ascendente, sin embargo esta situación es preocupante en vista de la planificación comunal, ya

que el incremento poblacional dificulta la atención con respecto a los servicios sociales existente en el municipio y más preocupante a un es que la gente que se ubica en extrema pobreza continué sin planificar el tamaño de la familia.

La proyección de crecimiento de la población según el INIDE, para el año 2020 será aproximadamente de 18,959 habitantes.

La población se distribuye de manera uniforme, las comunidades se asientan en lugares con el acceso a caminos, servicios básicos y principalmente el agua. El sistema de asentamientos del municipio de Achuapa responde a unos parámetros de colonización del territorio derivados básicamente del sistema productivo. La juventud del municipio, la explosión demográfica y la dispersión de la población sobre el territorio ha impedido la formación de una estructura de los asentamientos que asegure una dotación de equipamientos comunitarios y una estructura urbana mínima.

El Municipio tiene una extensión territorial de 397.229 km²., con una población de 13,797 habitantes y una densidad de 34 Hab./km². La población está asentada en 48 comunidades rurales y el área urbana, que a la vez se divide en cuatro zonas y un barrio.

2.2.2. Población económicamente activa

Según el INIDE la (PEA) o población económicamente activa va de los 15 a los 64 años y equivale a 8339 personas, de las cuales 4230 son hombres y 4109 son mujeres y la población dependiente está entre las edades de menores de 15 y mayores de 65 años, lo que corresponde a un total de 5458 personas.

2.2.3. Principales Actividades económicas

En el sector primario se destaca la actividad agrícola, ganadera y forestal, siendo estas el principal motor de la economía de este municipio, el cual garantiza la seguridad alimentaria y la posibilidad de ingresos en las familias. En la actividad agrícola se destaca la producción de granos básicos y el cultivo de ajonjolí; la actividad ganadera es extensiva y con la modalidad de doble propósito (leche y

carne) y la actividad forestal, de la cual se obtiene madera preciosa para la construcción y mueblería y como fuente de energía (leña).

En el sector secundario compuesto por la industria y la construcción, el sector de la agroindustria se destaca la producción de aceite de ajonjolí, el cual es producido por la Cooperativa JFPS, que desde hace 19 años se dedica a darle valor agregado al rubro de ajonjolí, el cual exporta en toneladas de aceite a Europa. También existe en el municipio un centro de acopio de leche, el cual es comercializada entera a la empresa PARMALAC; una gran cantidad de leche es procesada de forma artesanal y comercializada a nivel local y en municipios aledaños. En el municipio existen 5 tejas, 4 panaderías, 3 molinos, 1 talabartería y 1 rastro. En el sector terciario, el comercio y los servicios, existen 20 pulperías, 8 misceláneas, 1 ferretería, 1 distribuidora, 2 farmacias, 1 mini súper y una gasolinera.

2.2.4. Servicios básicos

Educación:

Las Tasas de Escolarización en el municipio indican un comportamiento generalmente muy inferior a las tasas del Departamento de León. Así se observa que el nivel de preescolar, solo treinta y siete de cada cien niños estaban incorporados como alumno en algún centro del sistema educativo;

En el nivel de primaria es donde se presentan mejores indicadores en el municipio, al estar el 79 % de los niños en edad de primaria en algún centro educativo de este nivel.

En el nivel de Secundaria, se observa una mejora significativa en la tasa de escolarización en los últimos cinco años. Existen seis centros de enseñanza secundaria, situados dos en la Cabecera Municipal y el resto en las comunidades rurales de Los Caraos, El Lagartillo, El Barro y Monte Frio.

Salud:

En el Municipio existen 5 unidades de salud: un Centro de Salud ubicado en el área urbana y 4 Puestos de Salud en el área rural. Las atenciones brindadas son a nivel primario. Las consultas médicas son atendidas por médicos generales, que muchas veces cumplen su servicio social.

Existe la necesidad de ampliar la cobertura de saneamiento mediante letrinas en todo el municipio, principalmente en el área rural y de sistemas de agua potable en las comunidades.

Energía eléctrica:

Hace unos años la cobertura de energía eléctrica en el municipio era el 18%, actualmente se ha logrado la ampliación de la red de energía eléctrica en siete comunidades; por lo tanto la cobertura de energía eléctrica por vivienda corresponde a 980 equivalente a un 33.18 %, (incluyendo energía convencional y con paneles solares).

Servicio de Transporte:

En la actualidad 8 medios de transporte colectivo intermunicipal cubren la ruta Achuapa -Sauce - León y Estelí- Achuapa- Sauce; estas unidades de transporte están en regular estado, pero los horarios de salida son muy distantes y el recorrido de Achuapa a León se toma varias horas.

Telecomunicaciones:

En la actualidad el Municipio de Achuapa cuenta con un sistema satelital instalado en el año 2005, brindando servicio de telefonía celular, el cual ha resuelto el problema de la comunicación, aunque esta no sea la opción más económica.

La mayoría de las comunidades tienen acceso al servicio satelital pero esta es limitada por el relieve del municipio, ya que para obtener señal en algunas comunidades se debe de estar situado en las alturas de los cerros y en otros casos la señal es suministrada por otra compañía que corresponde a MOVISTAR,

pero se limita a las comunidades de la parte oeste del municipio, que limitan con Villanueva.

Agua potable y alcantarillado Sanitario:

El abastecimiento de agua potable en el municipio es suministrado por diferentes sistemas, entre los que se mencionan mini acueductos por bombeo eléctrico, mini acueductos por gravedad, pozos perforados, pozo escavado a mano y captación de manantial. En la cabecera municipal sólo existe un sistema de bombeo con tres fuentes de abastecimiento, una línea de conducción, tanques y una red de distribución y un sistema de bombeo con panel solar en la comunidad el Lagartillo.

En el área rural los sistemas, no logran cubrir el 100% de las viviendas de las comunidades, en vista que la inversión está dirigida donde hay mayor concentración de población, por lo tanto hay limitación para atender las áreas dispersas.

Con relación al agua, las comunidades poseen una estructura administrativa que se encarga de recaudar, reparar y garantizar el mantenimiento del sistema de agua potable y en algunos casos de gestionar recursos para su ampliación y mejora. En el municipio de Achuapa se encuentran conformados 76 comités de agua potable (CAPS) de los cuales solo 31 comités funcionan y le dan mantenimiento a los sistemas de agua.

CAPITULO III: MARCO TEORICO

3.1. PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

3.1.1. Acuíferos

Un acuífero es aquel estrato o formación geológica que permite la circulación del agua a través de sus poros y/o grietas. Dentro de estas formaciones se pueden encontrar materiales muy variables como grava de rio, calizas muy agrietadas, areniscas porosas poco cementada, arena de playa, algunas formaciones volcánicas y depósitos de dunas.

Un acuífero es un almacén geológico a variadas profundidades en el que se deposita el agua que puede ser bombeada a la superficie. El agua forma parte del suelo que lo satura completamente. En la imagen No. 3.1 se puede observar los componentes principales de un acuífero.

Figura No. 3.1: Componentes de un acuífero



El material presente en un acuífero puede estar compuesto de diversos depósitos como arenas, gravas, limos y arcillas, o también por formaciones geológicas tales como rocas fracturadas y/o fisuras provocadas por fallas o material calcáreo (calizas) con grietas producto de la disolución.

Dependiendo del caudal y característica del estrato, las aguas subterráneas pueden generar por erosión auténticos canales subterráneos por donde circulan libremente. En función de la presión hidrostática del agua encerrada en estos reservorios de agua es posible clasificar a los distintos tipos de acuíferos existentes. Por otro lado, reconocer el acuífero según su presión, se traduce en una circunstancia práctica muy útil que facilita determinar el tipo de captaciones de agua subterránea.

3.1.2. Condiciones de la superficie freática

En ciertos acuíferos el agua subterránea se manifiesta bajo condiciones freáticas. Ello significa que es el límite superior del acuífero queda definido por la superficie freática misma o sea el plano superior de la porción saturada en la formación geológica el agua contenida en los poros del acuífero se encuentra sometida a presión atmosférica tal como si estuviese contenida en un recipiente abierto.

En estas condiciones el acuífero mismo se denomina acuífero freático. Otros terminos sé que también se utilizan para definir este estado de agua del agua subterránea son los de acuífero no confinado y agua subterránea libre.

En cualquier nivel dentro de un acuífero freático o libre la presión hidrostática es equivalente a la profundidad media desde la superficie libre hasta el punto de cuestión y puede expresarte en metros de agua. Así por ejemplo una partícula de agua subterránea que se halle a una profundidad de 50 pies por debajo de la superficie freática está sometida a una presión estática de 50 pies. Cuando se perfora un pozo dentro de un acuífero freático, el nivel estático dentro del pozo se halla a la misma elevación que en nivel freático.

La zona de saturación incluye tanto estratos permeables como impermeable de materiales terrestre. Los permeables constituyen acuífero. Cuando un acuífero yace entre estratos impermeable situado por encima y por debajo se dice que tanto el acuífero como el agua contenida están confinados. Debido a la presión del estrato confinante superior, el agua del acuífero no se encuentra expuesta a la presión atmosférica. Así pues el agua se halla dentro de los poros del acuífero a una mayor presión que la atmosférica.

3.1.3. Condiciones de artesianismo.

Cuando el agua subterránea en una situación actual, se dice que se manifiesta en condiciones de artesianismo o artesianismo el acuífero se denomina acuífero artesiano. Los termino de acuífero confinado y agua subterránea confinada se aplican para describir esta condición.

Cuando se perfora un pozo a través de un estrato confinante superior y se presenta dentro de un acuífero artesiano el agua ascienda dentro del pozo hasta alcanzar algún nivel cuya elevación se halla por encima del techo del acuífero. El nivel del agua dentro el pozo equivale a la presión artesianas del acuífero. La carga hidráulica expresada en pies o metro de columna de agua y para cualquier punto dentro del acuífero viene dada por la distancia vertical desde ese nivel al punto en cuestión.

La elevación a que ascendería el agua dentro de un pozo que penetra dentro un acuífero artesianos se define por el termino técnico nivel piezométrico, la cual viene a ser una superficie imaginaria que representa la presión o carga hidráulica existente.

3.1.4. Acuíferos semiconfinados

Constituyen una variedad de los confinados y se caracterizan por tener el techo (parte superior) y/o la base (parte inferior) sellado por materiales que no son totalmente impermeables, que corresponde a un material que permite una filtración vertical que alimenta muy lentamente al acuífero principal.

En estos casos, habrá situaciones en las que la recarga podrá hacerse en ambos sentidos en función de la diferencia de potencial.

Los acuíferos son explotados a través de varios tipos de captaciones, entre las cuales, las más comunes son:

- ✓ **Pozos profundos:** perforados a través de muchas técnicas y generalmente requieren de grandes equipos de perforación.
- ✓ **Aljibes:** son pozos poco profundos, generalmente excavados a mano y algunas veces revestidos en piedra, ladrillo o cemento.
- ✓ **Manantiales:** son exposiciones naturales de las aguas subterráneas en superficie y que son aprovechados directamente, sin necesidad de grandes obras.

La elección de alguna de estas formas de acceder a los acuíferos dependerá tanto de las características hidrogeológicas de la zona en particular, como de las necesidades de abastecimiento del agua y de las condiciones socioeconómicas de la región. Una de las grandes ventajas de las aguas subterráneas es que generalmente son de buena calidad para consumo humano por estar protegidas naturalmente por capas de suelos o rocas que tienen la capacidad para atenuar, retardar o retener algunos contaminantes, además de ser menos susceptibles que las aguas superficiales a cambios climáticos.

Por otro lado, una vez contaminadas las aguas subterráneas como consecuencia de alguna actividad en la superficie (agrícola, industrial, disposición de residuos o de afluentes, etc.).

Será casi imposible o demasiado costosa su recuperación. Por lo anterior, cuando accedemos a estos recursos hídricos, implícitamente nos debemos comprometer con su protección y conservación para garantizar su aprovechamiento

3.1.5. Factores de infiltración.

En algunos lugares, los depósitos de agua subterránea son recargados rápidamente por la lluvia. En sitio en que el nivel de agua de lagos y ríos se halla más alto que la superficie freática y sus lechos son permeables, el depósito es recargado por esos cuerpos líquidos. Cuando una corriente o un tramo de esta brindan su contribución de agua a la zona de saturación se dice que es una corriente afluyente respecto al agua subterránea. Si por el contrario el agua subterránea se halla a una elevación superior a la de un río y percola hacia este se dice que la corriente es efluente de aquella.

La razón de recarga de un depósito de agua subterránea depende del régimen de precipitación de la escorrentía superficial y del caudal de los ríos; así mismo varía de acuerdo a la permeabilidad de los suelos.

La oportunidad de infiltrar depende en mucho de la condición del suelo, su contenido de humedad y la duración de la lluvia y del patrón de drenaje en la cuenca asimismo la pendiente de la superficie puesto que muy inclinada favorecen a la escorrentía superficial y si son menos fuertes retiene por más tiempo el agua favoreciendo la infiltración.

3.1.6. Los procesos geológicos originan acuíferos

Los procesos geológicos crean rocas y acuíferos, pero a su vez otros procesos posteriores los pueden destruir. Nuevas rocas se forman y se extienden sobre las anteriores en una sucesión de capas. Una vez que cualquier roca sedimentaria, ígnea o metamórfica queda constituida, los continuos eventos geológicos la alteran de varias maneras, lo que eventualmente mejora o daña sus propiedades acuíferas.

Las rocas que forman la corteza terrestre se han venido acumulando desde tiempos inmemorables.

Su historia ha sido reunida pieza por pieza por los geólogos mediante el estudio de los fósiles que se han encontrado atrapados en su seno. La tabla 1 que sigue muestra las más importantes divisiones de tiempos y de estratigrafía que utiliza el servicio geológico.

Los acuíferos ostentan una variedad de formas y estructuras. Algunos depósitos marinos de arenisca se extienden sobre grandes áreas, son de textura uniforme y la variación de su espesor es muy poca.

Las disyunciones y las fracturas de ciertas rocas metamórficas tales como el granito, el gneis y la cuarcita, rinden algunas veces pequeñas cantidades de agua. Los acuíferos presentes en estos tipos de rocas no aparentan un tamaño o forma particulares, pero el agua subterránea generalmente tiene lugar cerca de la parte superior de la formación. La cantidad y el tamaño de las aberturas disminuyen rápidamente conforme aumenta la profundidad. Sería un desperdicio de tiempo, esfuerzo y dinero tratar de perforar más de unos cuantos metros en este tipo de materiales.

3.1.7. Las funciones de un acuífero

Dos son las funciones importantes que realizan un acuífero; almacenadora y otra transmisora. Este almacena agua, sirviendo como depósito y trasmite agua como lo hace un conducto. Las aberturas o poros de una formación acuífera sirven tanto de espacio para almacenamiento como de red de conductos.

El agua subterránea se mueve constantemente a través de distancias extensas y desde las áreas de recarga hacia las de descarga. El desplazamiento es muy lento, con velocidades que se miden en metros por día y a veces en metros por año. Como consecuencia de ello y del gran volumen que su porosidad representa, un acuífero retiene enormes cantidades de agua en almacenamiento inestable.

La discusión previa ha expuesto que las aberturas en las formaciones geológicas subsuperficiales son de tres clases generales:

- Aberturas comprendidas entre las partículas individuales, como en las formaciones constituidas por arena y grava.
- Fisuras, disyunciones o facturas en las rocas duras y que se han desarrollado al quebrarse estas.
- Canales de disolución y cavernas en las calizas y aberturas resultantes de la contracción y de la evolución de los gases en las lavas.
- Las dos propiedades de un acuífero que tienen relación con su capacidad de almacenar agua, son su porosidad y rendimiento específico.

3.1.8. Porosidad

La porosidad de un acuífero es aquella parte del su volumen que consiste de aberturas o poros o sea la proporción de su volumen no ocupado por material sólido. Es un índice que indica cuánta agua puede ser almacenada en el material saturado.

3.1.9. Permeabilidad

Se denomina permeabilidad a la propiedad de una formación acuífera en lo referente a su función transmisora o de conducto. La permeabilidad se define como la capacidad de un medio poroso para transmitir agua.

El movimiento de agua de un punto del material tiene lugar cuando se establece una diferencia de presión o carga entre dos puntos.

3.1.10. Espesor del acuífero

Corresponde a la distancia que existe entre el estrato impermeable y el nivel freático en acuíferos libres, siendo variables, en función de los cambios del nivel freático, de pocos metros a decenas de metros de magnitud. En acuíferos confinados y semiconfinados, corresponde a la distancia que existe entre los estratos impermeables que lo encierran, en este caso el valor es constante y

puede variar en órdenes de magnitud de unos pocos metros, a cientos o miles de metros.

3.2. CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS

3.2.1. Contaminación Hidrogeológica

La contaminación del agua subterránea puede ser producida por agentes biológicos (organismos patógenos) y por sustancias químicas, introducidas al suelo por las diferentes actividades antropogénicas, deforestación, cambio de uso de la tierra, al igual que el uso disperso de agroquímicos utilizados en la agricultura.

Debido al lento ritmo de renovación de las aguas subterráneas, una vez contaminadas, su depuración es complicada, lenta y costosa. Los procesos naturales de auto depuración son limitados, consistiendo en filtración a través del subsuelo, además de procesos naturales de neutralización, oxidación, reducción, etc. Estos procesos dependen de la geomorfología del terreno.

3.2.2. Contaminación Agrícola

Las prácticas agrícolas siempre ejercen una gran influencia sobre la calidad del agua superficial y subterránea, causando problemas serios bajo ciertas circunstancias. Su influencia es grande porque normalmente se realiza sobre áreas de recarga de los acuíferos (Faustino).

La diferencia esencial entre otras fuentes de contaminantes y la de prácticas agrícolas es que éstas son fuentes no puntuales. Los contaminantes potenciales son: los residuos animales, las sales en el agua de irrigación y toda la gama de diferentes compuestos químicos, aplicados a las cosechas. Entre éstos se encuentran los pesticidas y los compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos, de nitrógeno, fósforo y potasio, todo ellos presentes en fertilizantes comerciales.

3.2.3. Modelos de Contaminación del agua subterránea

Las condiciones óptimas para la contaminación de los reservorios de agua subterránea se dan en los escenarios geológicos donde el nivel freático intercepta o está próximo a la superficie. Esto le permite al contaminante estar en contacto directo con el agua subterránea.

Otro aspecto sensible a la contaminación lo constituyen las zonas de fallas, debido a que favorecen la rápida infiltración y/o desplazamiento de los contaminantes, los que eventualmente entran al sistema a medida que en las zonas de fallas el flujo del agua subterránea muestra tendencia de ir hacia arriba. Asimismo el recurso del suelo urbano y suburbano está sujeto a la influencia de las actividades humanas afectando los reservorios de agua.

La urbanización acelerada promueve la impermeabilización del suelo aumentando así la escorrentía superficial y con esto la contaminación en las zonas de descarga por sedimentos y materia orgánica como subproducto de la reducción en la tasa de infiltración, lo que a su vez impacta en el agua subterránea al no permitir la renovación del recurso en los reservorios.

3.2.4. Transporte de la contaminación en el acuífero

El transporte de contaminante está en función de las características hidrogeológicas de cada medio, de las propiedades de retardación y degradación del contaminante desde el momento de su disposición hasta su llegada al agua subterránea.

Existe una variedad de sustancias provenientes de diferentes actividades que pueden contaminar el agua subterránea. Estas pueden llegar hasta el agua al ser colocadas sobre la superficie del suelo, enterrada en el suelo o depositada directamente en el acuífero. Al depositar el contaminante en la superficie de la tierra, se puede infiltrar a través del suelo llegando a la zona vadosa y posteriormente penetrar al acuífero.

Una vez que el contaminante alcanza el acuífero, éste puede desplazarse con el agua subterránea, viajar más despacio que el agua, flotar sobre la superficie de agua ó sumergirse a través del acuífero hasta alcanzar el fondo, según las características físicas del contaminante, como es el caso de su densidad.

A medida que el contaminante se desplaza a través del sistema, sufre una atenuación mediante los procesos de dilución, dispersión, filtración mecánica, volatilización, descomposición, precipitación, intercambio de iones etc. La atenuación de un contaminante está en función del tiempo que el contaminante permanece en contacto con el material litológico, la granulometría, al igual que las características físicas, químicas y biológicas de los materiales que componen los estratos de la formación geológica por donde pasa el contaminante.

Cuando los materiales litológicos tienen propiedades desfavorables para el transporte de contaminante con un espesor significativo por encima del nivel freático, hay un incremento en la probabilidad de la atenuación.

Los procesos de dilución, atenuación y dispersión están en dependencia de la tasa y recarga del contaminante aplicado, al igual que de las características propias del contaminante y de las propiedades hidrogeológicas de los materiales que se encuentran en el área de estudio.

La zona vadosa o no saturada es de vital importancia porque constituye el principal frente de defensa natural que protege de la contaminación a las aguas subterráneas, por su posición espacial entre la superficie del suelo y manto acuífero.

Los procesos de atenuación de los contaminantes disminuyen progresivamente a medida que se profundiza en la zona no saturada.

Esta protección natural al igual que el transporte de contaminación estará siempre en función de las características de las formaciones geológicas presentes en el área.

El impacto de un episodio de contaminación móvil y persistente es un proceso lento que puede tardar desde años hasta décadas antes de que llegue a ser aparente. La infiltración, la permeabilidad, la porosidad y las propiedades fisicoquímicas del contaminante son las que determinan la capacidad de transporte en la zona saturada y en la zona no saturada.

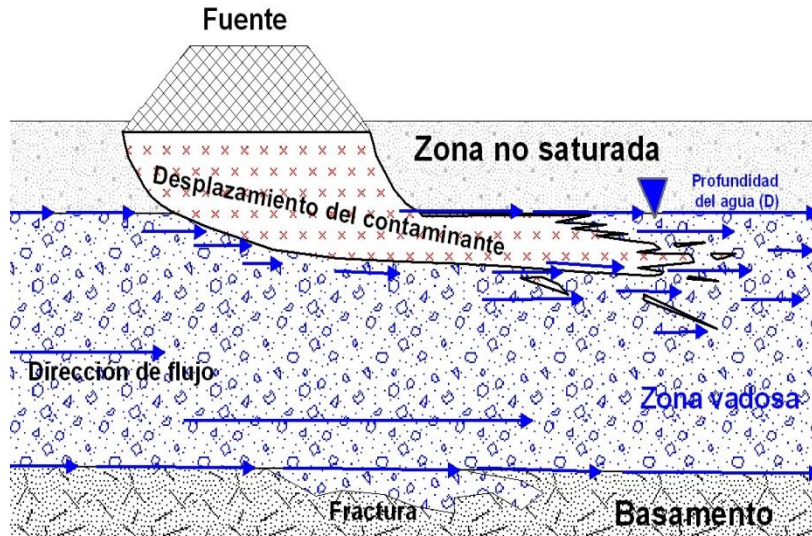
El impacto de un episodio de contaminación móvil y persistente es un proceso lento que puede tardar desde años hasta décadas antes de que llegue a ser aparente. La infiltración, la permeabilidad, la porosidad y las propiedades fisicoquímicas del contaminante son las que determinan la capacidad de transporte en la zona saturada y en la zona no saturada.

Otro aspecto a considerar es la densidad y solubilidad de un contaminante con relación al agua, lo que puede determinar la capacidad de este a ser miscible (capacidad de mezclarse) con la misma.

Pueden presentarse tres casos típicos de transporte de contaminantes, que dependen de la densidad del mismo respecto al agua:

Cuando el contaminante es menos denso que el agua, éste se transportaría sobre la capa freática y flotaría. (Figura No. 3.1).

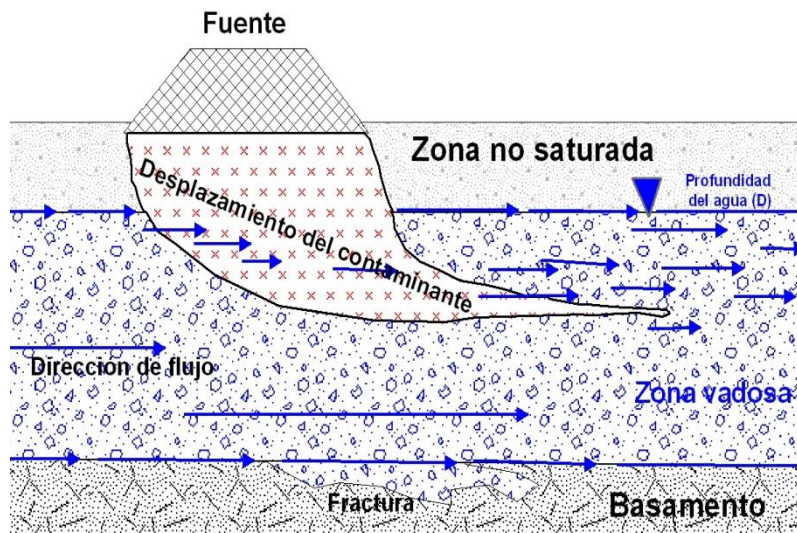
Figura No. 31: Desplazamiento del contaminante menos denso que el agua subterránea



Fuente: Elaboración propia

2) Cuando el contaminante tiene igual densidad respecto al agua, se podría mezclar y viajar a la misma velocidad del agua. (Figura No. 3.2).

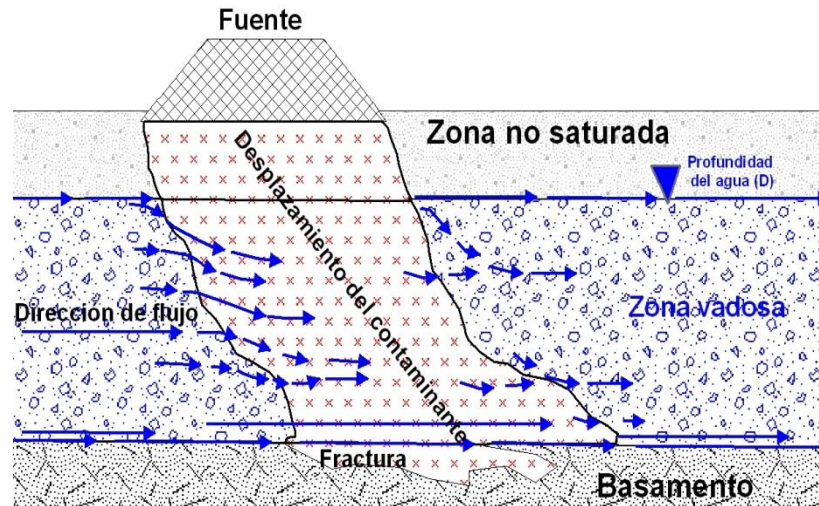
Figura No. 3.2: Desplazamiento del contaminante con la misma densidad del agua



Fuente: Elaboración propia

3) Cuando el contaminante es más denso que el agua, este se sumerge hasta el fondo del acuífero (Figura No. 3.3).

Figura No. 3.3: Desplazamiento del contaminante más denso que el agua



Estos casos están en función de:

- La tendencia a ser degradados o transformados.
- La concentración relativa del contaminante.
- La profundidad a que el contaminante es depositado bajo la superficie del suelo.
- El tiempo durante el cual se ha aplicado la carga contaminante.

Un ejemplo es el comportamiento de las sales en el agua subterránea, que por su movilidad y persistencia tiene mayores posibilidades de alcanzar el manto acuífero. Una de las causas de salinidad es el lixiviado y la disolución de las rocas que integran la formación geológica; Otra causa, son los efectos de irrigación y aplicación de fertilizantes en la agricultura, que contribuyen a la salinización del suelo y el agua subterránea.

3.3. VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS

3.3.1. Concepto de Vulnerabilidad

La vulnerabilidad a la contaminación es una característica de los acuíferos 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 y otros factores. Alrededor del mundo se han propuesto diferentes modelos para la determinación de la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero. Estos son modelos matemáticos y hacen uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para generar los mapas de vulnerabilidad y de esta forma, tomando en cuenta la amenaza, estimar el riesgo de contaminación. Estos mapas forman parte de un conjunto mayor de información, necesaria para el manejo racional de los recursos hídricos, tomando en cuenta tanto la administración como la protección de dicho recurso.

Alrededor del mundo se han llevado a cabo muchos análisis de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica. Mapas de vulnerabilidad se han desarrollado a diferentes escalas y en diferentes países y regiones, entre los cuales se puede citar EUA, Canadá, Portugal, Sudáfrica, Nicaragua y otros.

La palabra vulnerabilidad hace referencia a una debilidad en un sistema, permitiendo a un atacante violar la confidencialidad, integridad, disponibilidad, control de acceso y consistencia del sistema o de sus datos y aplicaciones.

Las vulnerabilidades son el resultado de fallas en el del sistema. Aunque en sentido más amplio, también pueden ser el resultado de las propias limitaciones del medio, porque, en principio, no existe sistema 100% seguro.

3.3.2. Vulnerabilidad Hidrogeológica

La vulnerabilidad es una propiedad intrínseca del medio que determina la sensibilidad a ser afectado negativamente por un contaminante externo. Es una propiedad relativa, no medible y adimensional, su evaluación se realiza admitiendo que es un proceso dinámico e iterativo. La vulnerabilidad puede ser intrínseca (condicionada por las características hidrogeológicas del suelo) y específica (cuando se consideran factores externos, como la climatología o el propio contaminante), (Foster, 1987).

Este concepto de vulnerabilidad puede ser asociado a vulnerabilidad a la contaminación de aguas subterráneas, si se sustituye "falla del sistema" por "carga contaminante". Por supuesto la severidad de las consecuencias se mide en términos del deterioro de la calidad del agua.

Específicamente en el caso de riesgo a la contaminación de un acuífero; Foster (1991) lo define como la carga contaminante, que es, que será o pudiera ser aplicada al subsuelo como resultado de una actividad humana. La vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación, está en dependencia de las características naturales de los substratos que lo separan de la superficie.

Debe tenerse claro que el riesgo de contaminación es entendido como la probabilidad de que las aguas subterráneas alcancen niveles químicos, bacterias, virus, etc. por encima de los cuales peligró la salud humana.

La vulnerabilidad por su parte puede entenderse como la sensibilidad en la calidad del agua subterránea ante una carga contaminante impuesta, la cual es determinada por las características intrínsecas del acuífero. Por lo tanto la vulnerabilidad es inversa a la capacidad de atenuación de contaminantes del acuífero.

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

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

Este concepto es equivalente a la definición de Foster 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 tampoco 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 aumento de su tamaño.

3.3.3. Métodos para determinar la vulnerabilidad de un acuífero.

Método DRASTIC:

Existen diversos métodos para determinar la vulnerabilidad de la contaminación de un acuífero. Internacionalmente son utilizados los métodos DRASTIC, GOD, SINTACS entre otros. Estos métodos buscan determinar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero de la manera más objetiva posible, por lo que suelen utilizar rangos de clasificación definidos para cada una de las variables. En este estudio se usará únicamente el método DRASTIC.

El método DRASTIC es un método empírico desarrollado por Aller et al. en 1987 y patrocinado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés). Existen dos índices DRASTIC, el pesticida y el no pesticida; este trabajo se elaborará con el DRASTIC no pesticida. Este método

busca sistematizar la determinación del potencial de los contaminantes a alcanzar la zona saturada. Esta técnica es denominada así por los siete factores que se toman en cuenta para la determinación de la vulnerabilidad por sus siglas en inglés.

Este es un método de uso difundido, tanto para la calificación (evaluación cualitativa) como para el mapeo y se basa en la asignación de índices que van de 1 a 10, de acuerdo a las características y el comportamiento de las variables consideradas en el acrónimo, además a cada variable se le asigna un peso o ponderación, de acuerdo a la influencia respecto a la vulnerabilidad.

Para el peso ponderado se emplean índices entre 1 y 5, adoptando el mayor (5) para la profundidad de agua (D) y la litología de la zona vadosa (I) y el menor (1) para la topografía.

Este método es denominado así, por los siete parámetros que se toman en cuenta para la determinación de la vulnerabilidad:

D (depth to wáter): profundidad del agua.

R (net recharge): recarga neta.

A (aquifer): formación geológica que constituye el acuífero.

S (soil): cubierta edáfica bajo la superficie del terreno.

T (topography): pendiente del terreno.

I (impact of vadose zone): tipo de material geológico de la zona no saturada.

C (hydraulic conductivity): conductividad hidráulica del acuífero.

Parámetro D (Profundidad del agua freática):

Este parámetro considera la profundidad del nivel pizométrico en el caso de un acuífero libre o del techo del acuífero para uno confinado. La vulnerabilidad disminuye con la profundidad. En su valoración pueden emplearse datos de puntos de agua, estudios hidrogeológicos y medidas de campo.

Parámetro R (Recarga neta):

Considera la recarga anual, se puede determinar con métodos convencionales de balance y en general se puede emplear la documentación existentes cuando las áreas estudiadas afectan a Unidades Hidrogeológicas o acuíferos definidos.

Parámetro A (Medio del acuífero):

Valora la litología que constituye el acuífero, considerándose que a mayor granulometría y fracturación, mayor permeabilidad y por tanto un grado de vulnerabilidad más elevado. Cuando existen varios acuíferos superpuestos siempre se valora el superior.

Parámetro S (Medio del suelo):

El suelo influye en el desplazamiento vertical del contaminante hacia el acuífero. Para este parámetro se considera la porción alterada del suelo que soporta la actividad biológica.

Parámetro T (topografía):

Se conoce como topografía a la variación de la pendiente, la cual está expresada en porcentaje. Su influencia consiste en que permite que un contaminante depositado sobre la superficie del suelo se escurra o permanezca el tiempo suficiente en la superficie para lograr infiltrarse a través de la zona no saturada y llegar al manto acuífero.

Parámetro I (Impacto de la zona no saturada):

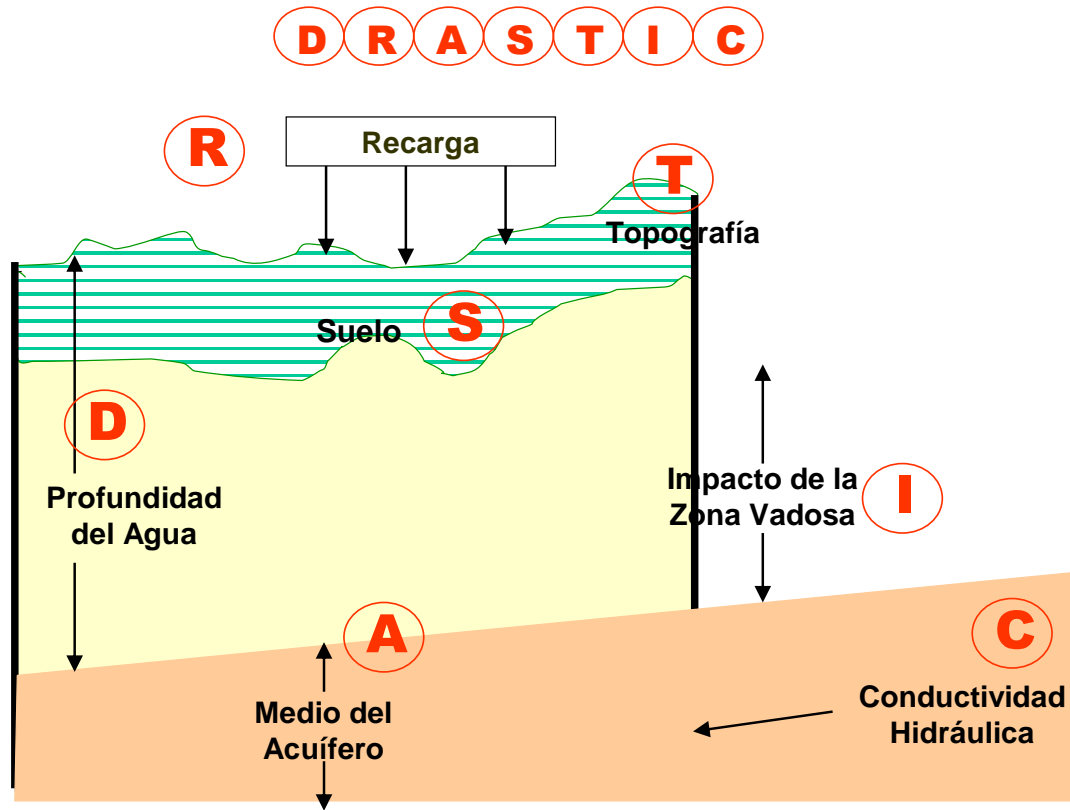
La zona no saturada se localiza entre la parte inferior del suelo y el nivel estático del agua subterránea. La zona no saturada influye en los procesos de atenuación en la trayectoria del agua hacia la zona saturada.

Parámetro C (conductividad hidráulica):

La conductividad hidráulica, es la propiedad que tiene un medio poroso y/o fracturado, en permitir la circulación del agua a través del mismo por unidad de tiempo y bajo un gradiente hidráulico determinado.

En la figura 3.4 se muestra de forma esquemática los parámetros del método
DRASTIC

UBICACIÓN ESPACIAL DE LOS PARÁMETROS



Fuente: Elaboración propia

Métodos basados en procedimientos:

Están basados en modelos matemáticos para analizar y simular los procesos que gobiernan el transporte de contaminantes en la sub-superficie.

Métodos Estadísticos:

Utilizan grupos de variables que condicionan la vulnerabilidad de la contaminación de los acuíferos, proporcionando conclusiones según la asociación que presentan estas áreas.

Métodos de Indexación y superposición:

Combinan un conjunto de características o atributos físicos del suelo, zona no saturada y los acuíferos, a los cuales se asigna un valor numérico según su importancia en la evolución de la vulnerabilidad.

Son los más usados por su mayor flexibilidad, en cuanto al conocimiento básico de la zona, aceptando ciertas estimaciones de contar con información insuficiente.

A continuación, una descripción general de los métodos de superposición que determinan la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos, dentro de los cuales están: DRASTIC, GOD, AVI, SINTACS, DhT, EPIK, EKs.

Los métodos son análogos siendo la cantidad de variables la diferencia entre ellos, se busca determinar la vulnerabilidad intrínseca del acuífero de la manera más objetiva posible, por lo que suelen utilizar rangos de clasificación definidos para cada una de las variables que se utilizan en cada método.

Método GOD:

El método GOD (por sus siglas en inglés: Groundwater hydraulic confinement, Overlaying Strata, Depth to groundwater table. En el método se consideran dos componentes o factores básicos: 1) el grado de inaccesibilidad hidráulica de la zona saturada al ser alcanzado por un contaminante; 2) la capacidad de atenuación de los estratos suprayacentes a la zona saturada del acuífero, por retención y reacción química con los contaminantes.

Método SINTACS:

Desarrollado por Civita et al. (1990) para adecuarlo a las diversificadas características hidrogeológicas de Italia y al requerimiento de un mapeo de mayor detalle. El acrónimo SINTACS comprende: S (soggiancenga – profundidad del agua); I (infiltrazione – infiltración); N (non saturo – sección subsaturada – zona no saturada); T (tipología de la cobertura – tipo de suelo); A (acquifero – características hidrogeológicas del acuífero); C (conducibilita – conductividad hidráulica); S (superficie topográfica – pendiente topográfica).

El método presenta una estructura compleja, tanto para la entrada de datos como para la salida, por lo que su operación se realiza mediante un programa preparado especialmente para el mismo. A las variables mencionadas, que influyen en la

vulnerabilidad intrínseca, se les puede añadir la incidencia del agua superficial y el uso del suelo.

Método AVI:

El AVI es uno de los métodos más sencillos, fáciles y rápidos de cuantificar la vulnerabilidad, tan solo utiliza la conductividad hidráulica y el espesor de las capas de diferente material que se encuentra sobre el nivel del agua (Auge, 2001). Es un índice para cuantificar la vulnerabilidad de un acuífero por medio de la resistencia hidráulica c al flujo vertical del agua al pasar por los diferentes materiales sobre el acuífero. La resistencia hidráulica c se calcula por la expresión: $c = \sum (b_i / K_i)$ para las capas 1, 2, 3, ..., i . Donde; b_i es el espesor de la capa sobre el acuífero; K_i , es la conductividad hidráulica de cada capa y c es la resistencia hidráulica total (inverso de la conductividad hidráulica, tiene dimensiones de tiempo), indica el tiempo aproximado de flujo por unidad de gradiente de carga, que atraviesa el agua hacia abajo al pasar por varias capas de sedimentos, por encima del acuífero. A mayor resistencia hidráulica c , menor vulnerabilidad.

Método Epik:

Es un método paramétrico desarrollado por Doerfligen y Zwahlen (1997) para acuíferos kársticos. El acrónimo significa: Epikarst (E), Protective cover (P), Infiltration conditions (I), Karst network development (K), que son caracteres trascendentes en flujo y el transporte a través de sistemas kársticos.

Método EKs:

Considera que la vulnerabilidad es un concepto cualitativo, que en la generalidad se refiere al grado de protección o defensa natural de un acuífero frente a la contaminación. Por ello también se le conoce como protección o defensa natural. En relación a los acuíferos libres desarrolla una clasificación basada en la profundidad de la superficie freática (E) y en la permeabilidad vertical de la zona subsaturada (K_s), parámetros que también considera el método AVI. Ambas asignan índices que van de 1 (menos vulnerabilidad) a 5 (mayor vulnerabilidad).

Método DhT (Relación de potencial hidráulico):

La vulnerabilidad la controlan las propiedades físicas y geométricas del acuífero que conforman su techo (permeabilidad vertical, porosidad, espesor y continuidad) y también por las diferencia de potencial hidráulico. Esta diferencia, que bajo condiciones de no alteración generalmente es pequeña (algunos pocos metros), se magnifica en los ámbitos bajo explotación donde puede alcanzar decenas y aún centena de metros. (Auge, 2001).

CAPITULO IV: DISEÑO METODOLÓGICO

4.1. SISTEMA NUMÉRICO DRASTIC.

El sistema numérico que se emplea es el Método DRASTIC, permite la identificación relativa de la vulnerabilidad del acuífero en el ámbito de un escenario hidrogeológico. Este sistema numérico consta de tres partes principales: Peso, Escala y Calificación. Haciendo uso de estos tres elementos evaluativos, se puede llevar a obtener el Valor Numérico DRASTIC (VND) y posteriormente el Índice DRASTIC (ID).

Peso o ponderación: El peso es un valor numérico relativo que se le asigna a cada parámetro con relación a otro de acuerdo a la importancia que tiene en el proceso de mitigación de la contaminación de un acuífero. Se otorga el máximo peso a los de mayor incidencia y menor peso a los menos significativos. Estos pesos ya están establecidos por la metodología y no pueden ser modificados.

Escala: La escala son los rangos en que se subdivide cada parámetro en base a las condiciones físico natural en que se presenta el parámetro en el medio y el impacto relativo que esta condición juega en la sensibilidad natural del acuífero a la contaminación. Estos rangos se encuentran establecidos por el método y son los que redefinen el comportamiento areal de un parámetro.

Calificación: La calificación son los valores que se asigna a las subdivisiones por rangos que se realizan en cada parámetro, estos valores pretenden pesar la importancia del parámetro en la condición físico – natural en que se encuentra el medio.

El valor numérico DRASTIC (VND) (Índice DRASTIC) en cada parámetro se obtiene multiplicando el peso por la calificación que se le asigne a cada área. Este proceso permite obtener un mapa de valor numérico DRASTIC para cada parámetro. Los valores de vulnerabilidad se agrupan en rangos que van de 23 a 230, según cuadro No. 4.1. Y el peso asignado a cada parámetro de acuerdo a su importancia se muestra en el cuadro 4.2.

En términos matemáticos el índice DRASTIC se expresa así:

$$\text{Valor DRASTIC} = Dr \cdot Dw + Rr \cdot Rw + Ar \cdot Aw + Sr \cdot Sw + Tr \cdot Tw + Ir \cdot Iw + Cr \cdot Cw$$

En donde:

r: Corresponde a la Calificación,

w: Corresponde al Peso y/o Ponderación,

D: Profundidad del agua,

R: Recarga neta,

A: Formación geológica que constituye el acuífero,

S: Cubierta edáfica bajo la superficie del terreno,

T: Topografía (pendiente del terreno),

I: Tipo de material geológico de la zona no saturada,

C: Conductividad hidráulica del acuífero

Cuadro Nº 4.1: Valores de Vulnerabilidad

| Rangos de vulnerabilidad | | |
|--------------------------|------------------------|--------------|
| Grado de Vulnerabilidad | Rango de Valor DRASTIC | Calificación |
| Muy bajo | 23 – 64 | 1 |
| Bajo | 64 – 105 | 2 |
| Moderado | 105 -146 | 3 |
| Alto | 146 – 187 | 4 |
| Muy alto | 187 – 230 | 5 |

Fuente: Aller, L; Lerh, J; Petty, R; Hackett, G.1987.

Cuadro 4.2: Ponderación o Peso asignado a cada parámetro

| Ponderación o Peso asignado a cada parámetro | | |
|--|---|------|
| PARAMETRO | | PESO |
| Profundidad del Agua | D | 5 |
| Recarga Neta | R | 4 |
| Medio del Acuífero | A | 3 |
| Medio del Suelo | S | 2 |
| Topografía | T | 1 |
| Impacto de la Zona Vadosa | I | 5 |
| Conductividad Hidráulica | C | 3 |

Fuente: Aller, L; Lerh, J; Petty, R; Hackett, G.1987.

4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DRASTIC

4.2.1. Profundidad del agua subterránea (D).

Este parámetro está referido a la profundidad a la que se encuentra la superficie de agua, por debajo del suelo, a partir de la cual todos los espacios porosos están completamente llenos de agua. La importancia de este parámetro radica en que determina el espesor de material que un contaminante tiene que atravesar antes de alcanzar el acuífero y puede ayudar a determinar el tiempo durante el cual el contaminante va a estar en contacto con el agua.

En el Cuadro No. 4.3 se pueden observar los rangos de profundidades y sus respectivas calificaciones (Dr). “D” corresponde al parámetro de la profundidad del agua y “r” corresponde a la calificación o valoración interna del parámetro mencionado de acuerdo a la variación de la propiedad; “w” corresponde a la ponderación del parámetro señalado.

Cuadro No. 4.3: Profundidad del agua y calificación

| PROFUNDIDAD DEL AGUA (D) | | |
|--------------------------|------|-----------------|
| Profundidad (m) | | Calificación 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 | 30.5 | 1 |

Fuente: Aller, L; Lerh, J; Petty, R; Hackett, G.1987.

4.2.2. Recarga (R).

Se denomina recarga al proceso de incorporación de agua al acuífero procedente del exterior del mismo; igualmente se llama recarga al volumen de agua que penetra en el acuífero durante un intervalo de tiempo dado (Custodio, 1998). El origen de la misma puede ser muy diverso: recarga difusa originada por agua meteórica; concentrada a partir de cauces o lagos; retorno de regadíos, pérdida de los sistemas de distribución agrícola o urbana; acuífera vecina; artificial.

En el Cuadro No.4.4 se pueden observar los rangos para la recarga y su respectiva calificación (Rr). La clasificación "R" corresponde al parámetro de la Recarga Neta y "r" corresponde a la calificación o valoración interna del parámetro mencionado de acuerdo a la variación de la propiedad; "w" corresponde a la ponderación del parámetro señalado.

Cuadro No. 4.4: Recarga

| RECARGA (R) | | |
|--------------|-----|-----------------|
| Recarga (mm) | | Calificación Rr |
| 0 | 50 | 1 |
| 50 | 103 | 3 |
| 103 | 178 | 6 |
| 178 | 254 | 8 |
| 254 | 254 | 9 |

Fuente: Aller, L; Lerh, J; Petty, R; Hackett, G.1987.

4.2.3. Medio Acuífero (A).

Corresponde a aquella parte del subsuelo que se encuentra con los poros ocupados completamente de agua. El tipo de material constituyente ejerce un notable control sobre el camino que los contaminantes siguen para llegar al agua subterránea.

En el Cuadro No.4.5 se pueden observar los Tipo de acuífero y sus respectivos Rangos de calificación (Ar). "A" corresponde al parámetro del Medio Acuífero, "r" corresponde a la calificación o valoración interna del parámetro mencionado de acuerdo a la variación de la propiedad; "w" corresponde a la ponderación del parámetro señalado.

Cuadro No.4.5: Medio del Acuífero

| MEDIO ACUÍFERO (A) | | | |
|--|--------------------------|----|--------------|
| Tipo de acuífero | Rango de calificación Ar | | Valor típico |
| Lutita masiva | 1 | 3 | 2 |
| Metamórfica/Ígnea | 2 | 5 | 3 |
| Metamórfica/Ígnea 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 kárstica | 9 | 10 | 10 |

Fuente: Aller, L; Lerh, J; Petty, R; Hackett, G.1987

4.2.4. Medio del Suelo (S)

Capa de la corteza terrestre, formada por elementos de origen mineral y orgánico. Esto se debe a la alteración o meteorización de las rocas de la litosfera (denominada roca madre) y al aporte de los restos de materia orgánica de las plantas y de los animales. El suelo tiene una considerable influencia en la cantidad de agua de recarga que se puede infiltrar hacia el acuífero, por lo tanto, en la capacidad de un contaminante para moverse vertical y horizontalmente en la zona vadosa.

En el Cuadro No.4.6 se puede observar el Tipo de suelo y su respectiva calificación (Sr). "S":

Corresponde al parámetro del Medio del Suelo y “r” corresponde a la calificación o valoración interna del parámetro mencionado de acuerdo a la variación de la propiedad; “w” corresponde a la ponderación del parámetro señalado.

Cuadro No.4.6: Medio Suelo

| MEDIO DEL SUELO (S) | |
|-------------------------------------|-----------------|
| Tipo de suelo | Calificación Sr |
| 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: Aller, L; Lerh, J; Petty, R; Hackett, G.1987

4.2.5. Topografía (T).

Conjunto de procedimientos para determinar las posiciones relativas de los puntos sobre la superficie de la tierra, mediante la combinación de las medidas según los tres elementos del espacio: distancia, elevación y dirección. Según sea la pendiente del terreno así será la probabilidad de que un contaminante permanezca en el sitio donde ha sido depositado o se aleje del lugar por efecto de la escorrentía superficial.

En el Cuadro No.4.7 se puede observar los rangos de pendientes porcentuales y la calificación (Tr). “T” corresponde al parámetro de Topografía, “r” corresponde a la calificación o valoración interna del parámetro mencionado, de acuerdo a la variación de la propiedad y “w” corresponde a la ponderación del parámetro señalado.

Cuadro No.4.7: Topografía

| TOPOGRAFÍA (T) | | |
|----------------|-----|-----------------|
| Pendiente (%) | | Calificación Tr |
| 0 | 2 | 10 |
| 2 | 6 | 9 |
| 6 | 12 | 5 |
| 12 | 18 | 3 |
| > 18 | >18 | 1 |

Fuente: Aller, L; Lerh, J; Petty, R; Hackett, G.1987

4.2.6. Impacto en la Zona Vadosa (I).

La zona vadosa es aquella que se encuentra por encima de la superficie del agua subterránea y por debajo del nivel del suelo. El tipo de zona vadosa determina las características que van a acondicionar la atenuación de los contaminantes en el espacio comprendido entre el suelo y el nivel freático.

En el Cuadro No.4.8 se puede observar el Tipo de medio, rango de calificación (Ir), y su Valor típico (Ir). “I” corresponde al parámetro Impacto de la Zona no Saturada, “r” corresponde a la calificación o valoración interna del parámetro mencionado de acuerdo a la variación de la propiedad y “w” corresponde a la ponderación del parámetro señalado.

Cuadro No.4.8: Impacto en la zona vadosa

| IMPACTO DE LA ZONA VADOSA (I) | | | |
|--|--------------------------|----|-----------------|
| Tipo de medio | Rango de calificación Ir | | Valor típico Ir |
| Capa confinante | 1 | 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/Ígnea | 2 | 8 | 4 |
| Arena y grava | 6 | 9 | 8 |
| Basalto | 2 | 10 | 9 |
| Caliza kárstica | 8 | 10 | 10 |

Fuente: Aller, L; Lerh, J; Petty, R; Hackett, G.1987.

4.2.7. Conductividad Hidráulica (C)

La conductividad hidráulica es la capacidad que tiene el agua de circular o atravesar los estratos o capas de un acuífero en la unidad de tiempo, bajo un gradiente hidráulico determinado por las condiciones topográficas en las cuales se mueve, debido a la fuerza de gravedad.

En el Cuadro No.4.9 se puede observar los rangos Conductividad Hidráulica y la calificación (Cr). “C” corresponde al parámetro de la Conductividad Hidráulica, “r” corresponde a la calificación o valoración interna del parámetro mencionado de acuerdo a la variación de la propiedad y “w” corresponde a la ponderación del parámetro señalado.

Cuadro No.4.9: Conductividad Hidráulica

| CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (C) | | | | |
|------------------------------|-------|------------------------|------------------------|-----------------|
| Conductividad Hidráulica | | | | Calificación Cr |
| (m/día) | | (cm/s) | | |
| 0.04 | 4.08 | 4.6×10^{-5} | 4.7×10^{-3} | 1 |
| 4.08 | 12.22 | 4.7×10^{-3} | 1.4×10^{-2} | 2 |
| 12.22 | 28.55 | 1.4×10^{-2} | 3.4×10^{-2} | 3 |
| 28.52 | 40.75 | 3.4×10^{-2} | 4.7×10^{-2} | 6 |
| 40.75 | 81.49 | 4.7×10^{-2} | 9.5×10^{-2} | 8 |
| 81.49 | 81.49 | $> 9.5 \times 10^{-2}$ | $> 9.5 \times 10^{-2}$ | 10 |

Fuente: Aller, L; Lerh, J; Petty, R; Hackett, G.1987

Para la realización del trabajo monográfico Vulnerabilidad Hidrogeológica de la Cuenca de Achuapa, primero se realizará la etapa de obtención de la información, relacionada actividades de gabinete: recopilación bibliográfica, exploración en INTERNET y visita a instituciones. La información recopilada, procesada y analizada está relacionada con la geología, litología, hidrología, hidrogeología, topografía, recarga, tipo de suelos; así como con datos de pozos (niveles estáticos, piezométricos, transmisividad y pruebas de bombeo).

Esta información será la base fundamental para la comprensión y la elaboración del método DRASTIC; para lo cual se parte de un modelo conceptual.

Las visitas de campo están orientadas a la obtención de datos actualizados, para interpretar el modelo conceptual, y comparar la información ya existente del área de estudio con la recopilada en campo.

Utilizando los sistemas de información geográfica ArcGis se elaborarán los mapas de los diferentes parámetros y el modelo digital. Se utilizará el software ArcGis para hacer la caracterización de las diferentes variables que corresponden al método DRASTIC.

4.3. OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DRASTIC.

La obtención de la información para cada parámetro se hará de la siguiente manera:

Profundidad del agua (D):

Para la determinación del nivel del agua subterránea se utilizará la información de pozos que posee INETER en el departamento de Hidrogeología. Esta información contiene la profundidad a la que fueron detectados los niveles del agua subterránea y la ubicación geográfica del pozo.

Recarga neta (R):

La estimación de la recarga se elaborará en base a estudios previos de unidades geológicas del área de estudio, la precipitación media anual y un coeficiente de infiltración para cada unidad geológica.

Medio del acuífero (A):

Como base se tomará la descripción litológica de los pozos perforados, así como la geología superficial para conocer el material geológico del área en estudio, luego se hará comparación con el material geológico propuesto en la metodología DRASTIC.

Medio del Suelo (S):

La información de suelos será buscada en la Dirección de Ordenamiento Territorial de INETER, la cual resultará apropiada para los fines de este estudio; describe características del suelo, tales como la textura. Luego se hará comparación con los suelos propuestos en la metodología DRASTIC.

Topografía (T):

La determinación de la topografía se hará analizando las hojas cartográficas existentes en INETER y las correspondientes curvas de nivel reflejadas en los mapas. Cabe mencionar que las pendientes son muy importantes en la evaluación del método DRASTIC.

Impacto de la zona no saturada (zona vadosa) (I):

El análisis de la zona vadosa se realizara sobre el mapa geológico y de la litología de los pozos. Se considera que el nivel freático del acuífero sería el límite inferior y como límite superior la superficie del terreno o la parte inferior del suelo.

4.4. IDENTIFICACIÓN DE LOS ESCENARIOS HIDROGEOLÓGICOS.

Después de elaboración de los mapas de cada parámetro se convierten en imágenes raster, lo que se hace en la interfaz de ArcMap utilizando la caja de herramientas ArcToolbox, que es parte del software ArcGis y se utilizará la extensión “feature clase” que convierte vectores a imágenes raster; ya que se trabaja con mayor homogeneidad y precisión cuando se utilizan imágenes raster y no con vectores por que originalmente los mapas se elaboraran como vectores, para su debida digitalización y georreferenciación.

La determinación de escenarios hidrogeológicos se hará a través del proceso de sobre-posición de los mapas de valores numéricos obtenidos para cada parámetro, se van delimitando las áreas que formaran un escenario definido por los siete parámetros. Posteriormente se realizarán agrupaciones de escenarios hidrogeológicos para obtener escenarios de mayor comprensión espacial en base a los siguientes criterios.

Se agruparan escenarios con características geológicas e hidrogeológicas muy similares y con baja diferencia en sus índices DRASTIC, desde el punto de vista cualitativo de las condiciones geológicas e hidrogeológicas.

El proceso de sobre-posición se hará con la ayuda del software ArcGis; se trabajará en la interfaz de ArcMap, se realizará una comparación de tablas para determinar valores de escenarios hidrogeológicos similares. La comparación de tablas se hará con la ayuda de una extensión de ArcMap llama “Joins and Relates”, la cual se utiliza para hacer comparaciones, uniones y confrontaciones de tablas.

Se hará una confrontación de tablas de los de los índices DRASTIC de los diferentes parámetros; se reagruparán escenarios con índices DRASTIC similares o iguales; esto se hará con el propósito de simplificar escenarios hidrogeológicos. Se delimitaran zonas con escenarios geológicos e hidrogeológicos similares según sus índices DRASTIC.

4.5. ELABORACIÓN DE ZONAS DE VULNERABILIDAD HIDROGEOLÓGICA.

Después de la agrupación de los diferentes parámetros hidrogeológicos se conformarán las zonas de vulnerabilidad hidrogeológica. Estas zonas quedarán compuestas por tres rangos de vulnerabilidad, los cuales son: alta vulnerabilidad, modera vulnerabilidad y baja vulnerabilidad. Los valores para cada rango estarán dependiendo de los índices DRASTIC calculados.

Cada zona de vulnerabilidad quedará compuesta por una o más caracterizaciones hidrogeológicas propias de la zona de estudios. La elaboración del mapa de vulnerabilidad se hará con la ayuda del software ArcGis utilizando la interfaz de ArcMap. Se empezará a digitalizar cada una de las zonas de vulnerabilidad en un polígono según la forma de la cuenca de Achuapa ya debidamente georreferenciada.

Para la digitalización de las zonas de vulnerabilidad se hará en la interfaz de ArcMap, usando la extensión Editor, que es la extensión que se utiliza para la digitalización grafica de todos los mapas. Se utilizarán todas las herramientas necesarias del Editor para dibujar y plasmar las diferentes áreas de vulnerabilidad hidrogeológica en el mapa. Se irá digitalizando cada área de forma individual,

hasta completar todas las áreas del polígono y así obtener el mapa de vulnerabilidad hidrogeológica de la cuenca de Achuapa.

Este mapa se elaborará a una escala adecuada para tener una mejor visualización de las áreas de vulnerabilidad y así poder hacer un adecuado análisis y comprensión por parte de los planificadores del agua para el manejo adecuado de este recurso vital.

El formato y tamaño del mapa también será ajustado para obtener una mejor apreciación de las zonas de vulnerabilidad hidrogeológica de la cuenca de Achuapa.

CAPITULO V: CALCULOS Y RESULTADOS

5.1. Características de los parámetros hidrogeológicos del acuífero de Achuapa.

5.1.1. Profundidad del Agua.

La profundidad del agua en el proceso de atenuación de un contaminante. Este es importante porque determina el espesor del suelo y subsuelo que el contaminante debe de atravesar hasta llegar al acuífero. Dicho de otra manera esto implica que las posibilidades de degradación del contaminante aumentan con la profundidad del agua ya que significa más contacto con las formaciones geológicas en dependencia del medio.

Para la obtención de las áreas con diferentes profundidades, primeramente se interpoló el dato del NEA (Nivel estático del agua) de los pozos perforados y excavados, ver cuadro A de anexo.

La interpolación se generó por varios métodos para comparar resultados; los métodos usados fueron los siguientes: IDW (inverse Distance Weighted)), Kriging, Natural Neighbor, Spline; todos estos con la ayuda del software ArcGis 9.3. Estos datos obtenidos fueron únicamente comparativos con el resultado final, el cual fue generado con la herramienta de Geostatistical Analyst.

Se utilizó esta herramienta de interpolación debido a que utiliza mejores algoritmos de relación de datos y distribuye mejor los resultados en la superficie a interpolar. Se utilizó el método Ordinary Kriging; la escogencia de los datos se realizó analizando el valor de los cinco datos más próximos al valor a interpolar.

En el acuífero de Achuapa se presentaron dos diferentes rangos de profundidades de agua subterránea, los cuales se describen a continuación. En el cuadro No. 5.1 se presentan las profundidades y valores DRASTIC y en la figura 5.1 (mapa) se presenta la delimitación espacial de cada una de ellas.

Profundidad D1

Estas áreas se encuentran ubicadas en la mayor parte del valle, varían entre 5 y 10 metros de profundidad. Desde el punto de vista de profundidad, estas áreas son de menor atenuación por la poca profundidad de esta agua. Se le asigna una calificación de 7, con un peso de 5 obteniendo como resultado un VND de 35. En estas zonas se encuentra las siguientes comunidades: Los carao, los chagüitillo, La Perla, el casco urbano y parte de la Calera.

Los cuales corren un riesgo potencial de que sus fuentes de agua potable se contaminen rápidamente por la somera profundidad de ésta; además estas áreas presentan pendientes casi planas, por lo que el agua permanece más tiempo en la superficie del suelo, permitiendo mayores infiltraciones.

Profundidad D2.

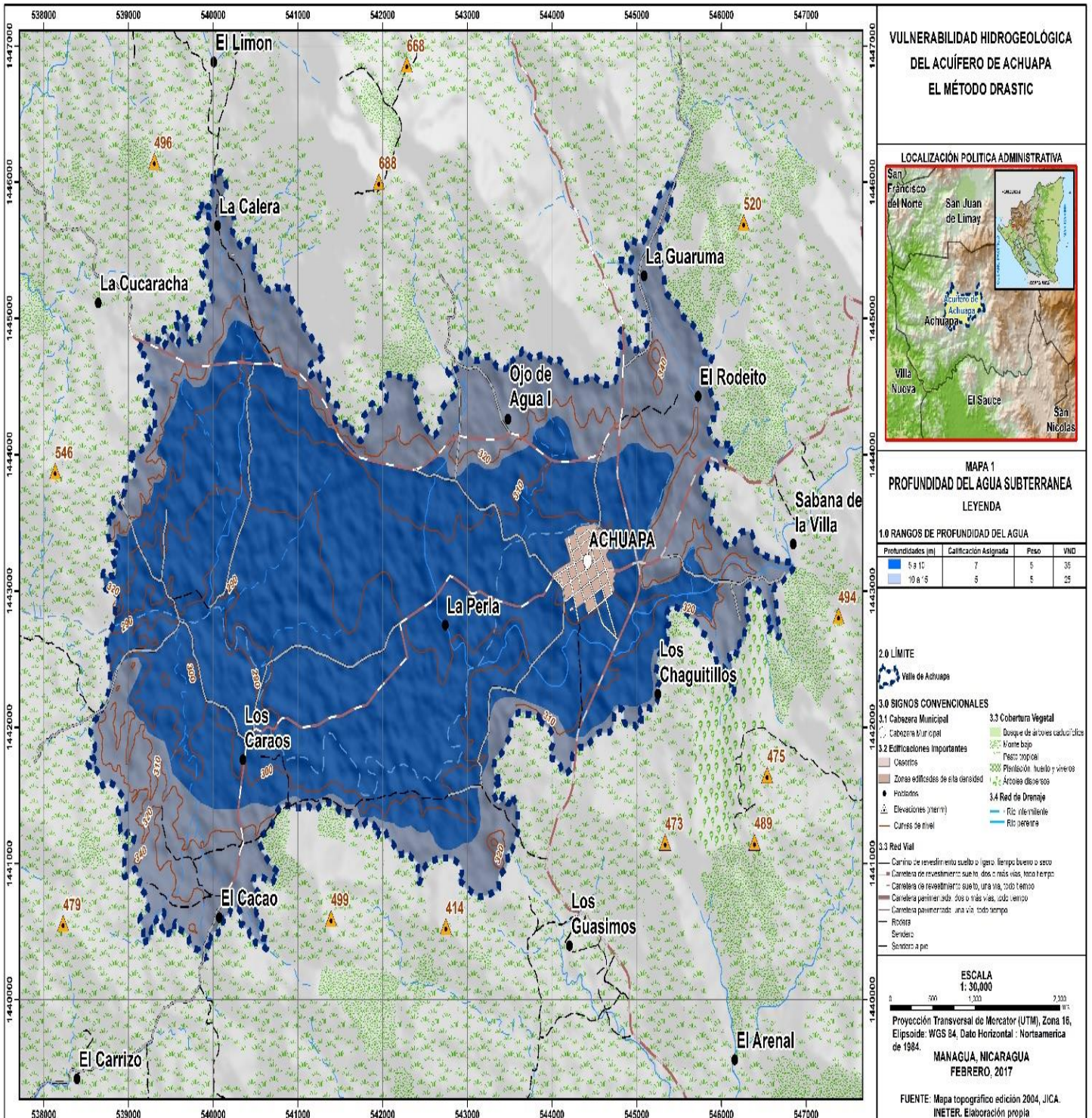
Esta área con estas profundidades son las que se encuentran en menores dimensiones, cubriendo la menor parte del valle, cuyos valores oscilan entre 10 y 15 metros de profundidad; se le asignó una calificación de 5, con un peso de 5 obteniendo como resultado un VND de 25. Aunque estas aguas están un poco más profundas que el escenario anterior, siempre están expuestos al riesgo de contaminación. En esta zona se encuentran las siguientes comunidades: Los Caraos, El Cacao, El Barro, Consuelo, Piedra Gorda No. 1, Saban de Villa, Rodehito, Ojo de agua. Las profundidades presentes en esta área son mayores relativamente a las otras del acuífero.

Cuadro 5.1: Profundidad del Agua y valor DRASTIC

| CODIGO | ESCALA DE PROFUNDIDAD (m) | CALIFICACION | PESO | VALOR NUMÉRICO DRASTIC |
|---------------|----------------------------------|---------------------|-------------|-------------------------------|
| D1 | 5 - 10 | 7 | 5 | 35 |
| D2 | 10 - 15 | 5 | 5 | 25 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 5.1: Profundidad del Agua subterránea



Fuente: Elaboración propia

5.1.2 Recarga neta.

La recarga principal de las aguas subterráneas es la que proviene de las lluvias; de éstas una parte es retenida por la vegetación, otra parte escurre sobre la superficie del terreno y evapora, otra parte se infiltra y se almacena en el acuífero.

Las características de los materiales de la cuenca de Achuapa, la cantidad de fallas y fracturas, permiten mayor infiltración de la precipitación, incrementando los valores de recarga en estas zonas. A continuación se presentan las zonas de recarga por cada unidad geológica.

Zona de Recarga ZRD1

En esta zona se encuentra la siguiente Litología: Intrusivo Intermedio, Inferior indiferenciados, Aglomerado y/o Andesita, Ingnimbrita Dacítica y Toba, Aglomerado y/o Andesita. La recarga promedio estimada corresponde a 200 mm. Se le asigna una calificación de 8, con un peso de 4 obteniendo como resultado un VND de 32. Esta zona está en la mayor parte de la cuenca de Achuapa, ubicándose los poblados de: Los carao, los chagüitillo, La Perla, el casco urbano y parte de la Calera.

Zona de Recarga ZRD2

En esta zona se encuentra la siguiente Litología: Indiferenciado del cuaternario. La recarga promedio estimada corresponde a 400 mm. Esta zona ZRD2 cubre la menor parte del valle de la cuenca de Achuapa. Se le asigna una calificación de 9, con un peso de 4 obteniendo como resultado un VND de 36. En esta zona de recarga se encuentran las siguientes comunidades: Los Caraos, El Cacao, El Barro, Consuelo, Rodehito, Ojo de agua.

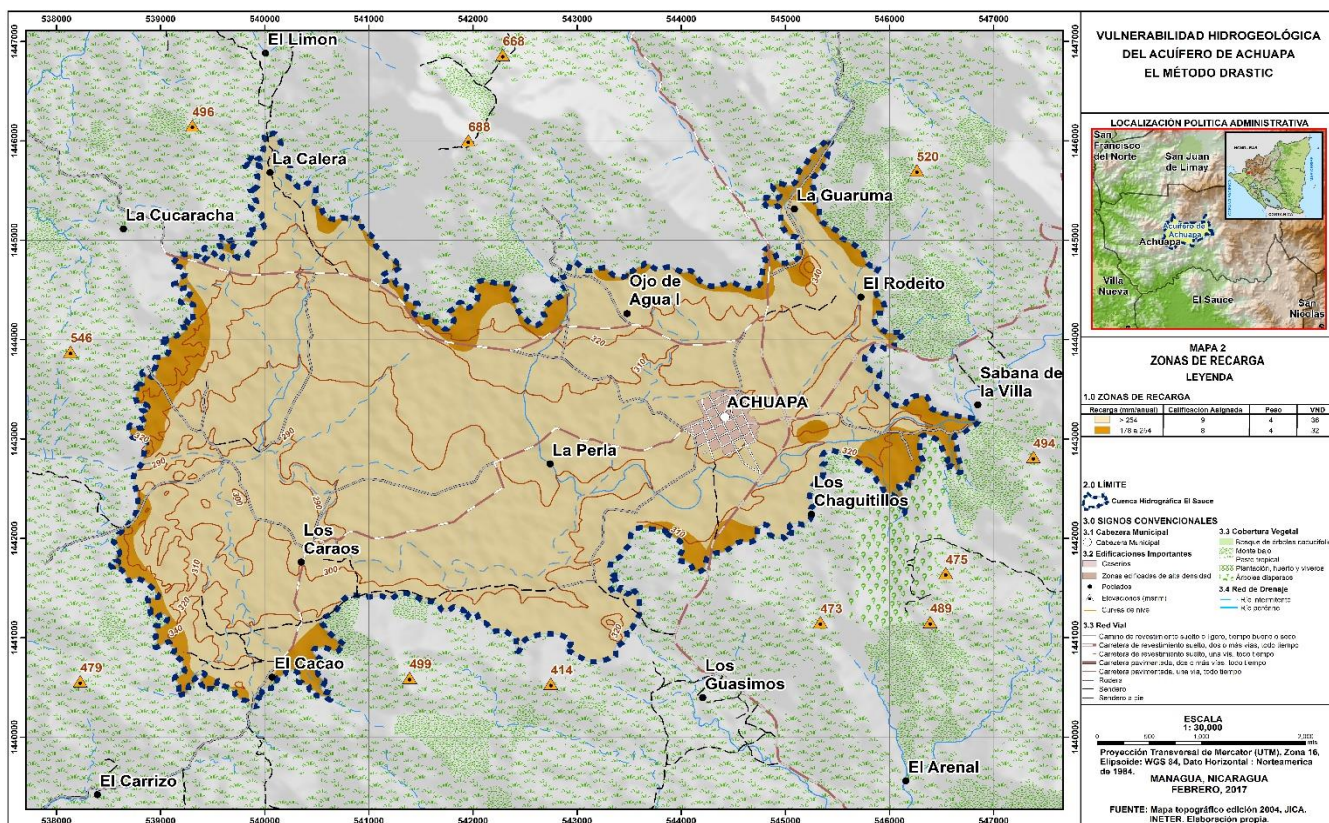
En el cuadro No. 5.2 se presenta la recarga media anual de la cuenca de Achuapa y los valores DRASTIC y en la gráfica 5.2 (mapa) se presentan la distribución areal de la recarga de estas zonas.

Cuadro 5.2: Recarga Media Anual

| EDAD | GRUPO | LITOLOGIA | Shape_Leng | % de infiltr. | Precip (mm/a) | Recarga (mm/a) | Clasif. | Peso | VND |
|---------------------|---------------------|----------------------------|-------------|---------------|---------------|----------------|---------|------|-----|
| Terciario Intrusivo | | Intrusivo Intermedio | 0.309786005 | 10 % | 2000 | 200 | 8 | 4 | 32 |
| Terciario Volcánico | Matagalpa y/o Coyal | Inferior indiferenciados | 0.893757293 | 10 % | 2000 | 200 | 8 | 4 | 32 |
| Terciario Volcánico | Coyal Inferior | Aglomerado y/o Andesita | 0.208466001 | 10 % | 2000 | 200 | 8 | 4 | 32 |
| Terciario Volcánico | Coyal Inferior | Ingimbrita Dacítica y Toba | 0.960870075 | 10 % | 2000 | 200 | 8 | 4 | 32 |
| Terciario Volcánico | Coyal Inferior | Aglomerado y/o Andesita | 0.452252275 | 10 % | 2000 | 200 | 8 | 4 | 32 |
| Cuaternario (ZDR2) | Cuaternario | indiferenciado | 21.97789672 | 20 % | 2000 | 400 | 9 | 4 | 36 |

Fuente: Elaboración propia

Gráfico No. 5.2: Distribución areal de la recarga



Fuente: Elaboración propia

5.1.3 Medio del acuífero.

Su importancia radica por el grado de influencia en la atenuación de un contaminante a través de los procesos de la absorción, dispersión y dilución. Dicha influencia se mide por el recorrido de la pluma de contaminación. El Medio del acuífero es determinado por el sistema de flujo o por el nivel de interconexión entre poros o fracturas del medio saturado. En la cuenca de Achuapa se identificaron las siguientes áreas:

Medio Acuífero A1

Esta zona está compuesta por material Aluvial (Arena y grava). Esta zona está ubicada al centro de la cuenca de Achuapa, principalmente al oeste y sur de la misma. Estos tipos de materiales presentes en esta área, son muy permeables, por lo que facilita la circulación de cualquier contaminante. En esta zona se encuentran las comunidades siguientes: Los Carao, La perla, los chagüitillo y el Barro. Se le asigna una calificación de 6, con un peso de 4 obteniendo como resultado un VND de 24.

Medio del Acuífero A2

Esta zona está compuesta por la litología del Grupo Coyol (Andesitas, Dacitas y Basalto fracturados). Esta zona está ubicada al contorno de la cuenca de Achuapa, principalmente al norte y al este de la misma. En esta zona se encuentran las comunidades siguientes: El casco urbano y parte de la Calera, Los Caraos, El Cacao, El Barro, Consuelo, Rodeito, Ojo de agua. Se le asigna una calificación de 8, con un peso de obteniendo como resultado un VND de 32.

Esta es una zona de mayor elevación (material terciario) aunque es una zona muy fracturada, no tienen la capacidad para que el agua penetre por ellas, su almacenamiento es muy pobre, son rocas duras impermeables, casi imposibles de penetrar por el agua.

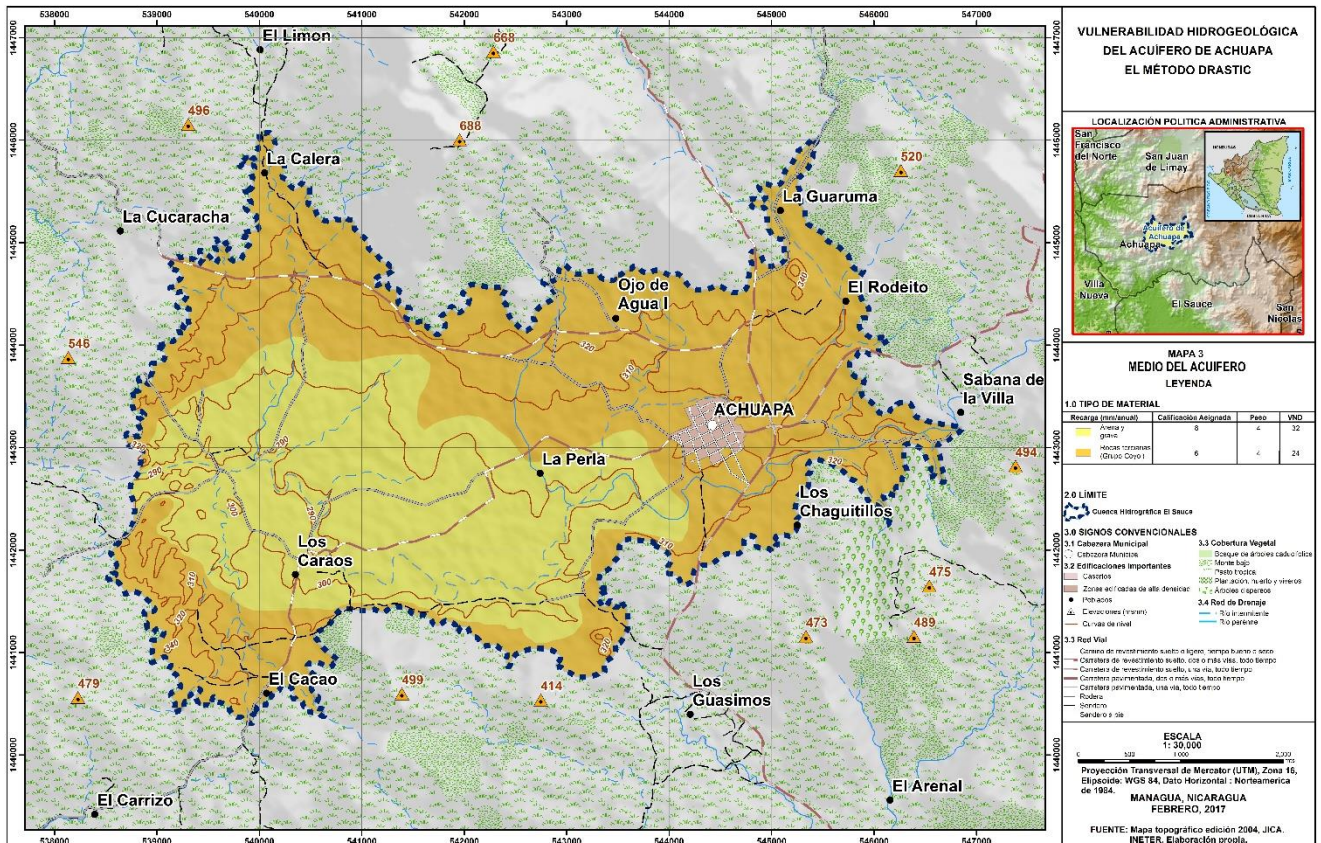
En el cuadro No. 5.3 se presentan el resumen del resultado para este parámetro y los valores DRASTIC y en la figura 5.3 se refleja la distribución areal de este parámetro.

Cuadro 5.3: Medio del Acuífero y valor DRASTIC

| Código | Litología | Material | Clasif. | Peso | VND |
|--------|--|-------------|---------|------|-----|
| A1 | Grupo Coyal (Andesitas, Dacitas y Basalto fracturados) | Grupo Coyal | 6 | 4 | 24 |
| A2 | Aluvial | Aluvial | 8 | 4 | 32 |

Fuente: Elaboración propia

Figura No. 5.3: Distribución areal del Medio del Acuífero



5.1.4 Suelo.

El suelo lo conforma la parte superior de la zona vadosa; la característica más importante del suelo está definida por su textura. La existencia de suelo con textura fina, como en los suelos residuales, reduce la permeabilidad relativa, lo cual también limita la migración de los contaminantes. Por el contrario suelos, de textura gruesa como en los suelos transportados coluviales y/o aluviales, son más susceptibles a la filtración y absorción de los contaminantes, por tener mayores permeabilidades.

Se realizó un análisis comparativo entre las características de los suelos propuestos por el método DRASTIC, y las condiciones específicas del área de estudio a fin de hacer una calificación más adaptada a los suelos del área, obteniéndose un área principal que se describe a continuación.

Suelo S1

Cubre la mayor parte del valle, estos suelos son franco arcillo arenosos con moderadas permeabilidades, con espesores de somera de profundidad. Esta zona es sensible a la contaminación por la cualidad propia del medio, aumentando aún más el riesgo de contaminación ya que en este escenario hidrogeológico. Se asignó una calificación de 7 y un peso de 2 obteniendo como resultado un VND de 14. Este tipo de suelo está presente en todo el territorio de la cuenca de Achuapa y en ella están ubicadas las siguientes comunidades: Los Carao, los chagüitillo, La Perla, el Casco urbano, parte de la Calera, El Cacao, El Barro, Consuelo, Piedra Gorda No. 1, Saban de Villa, Rodehito y Ojo de agua.

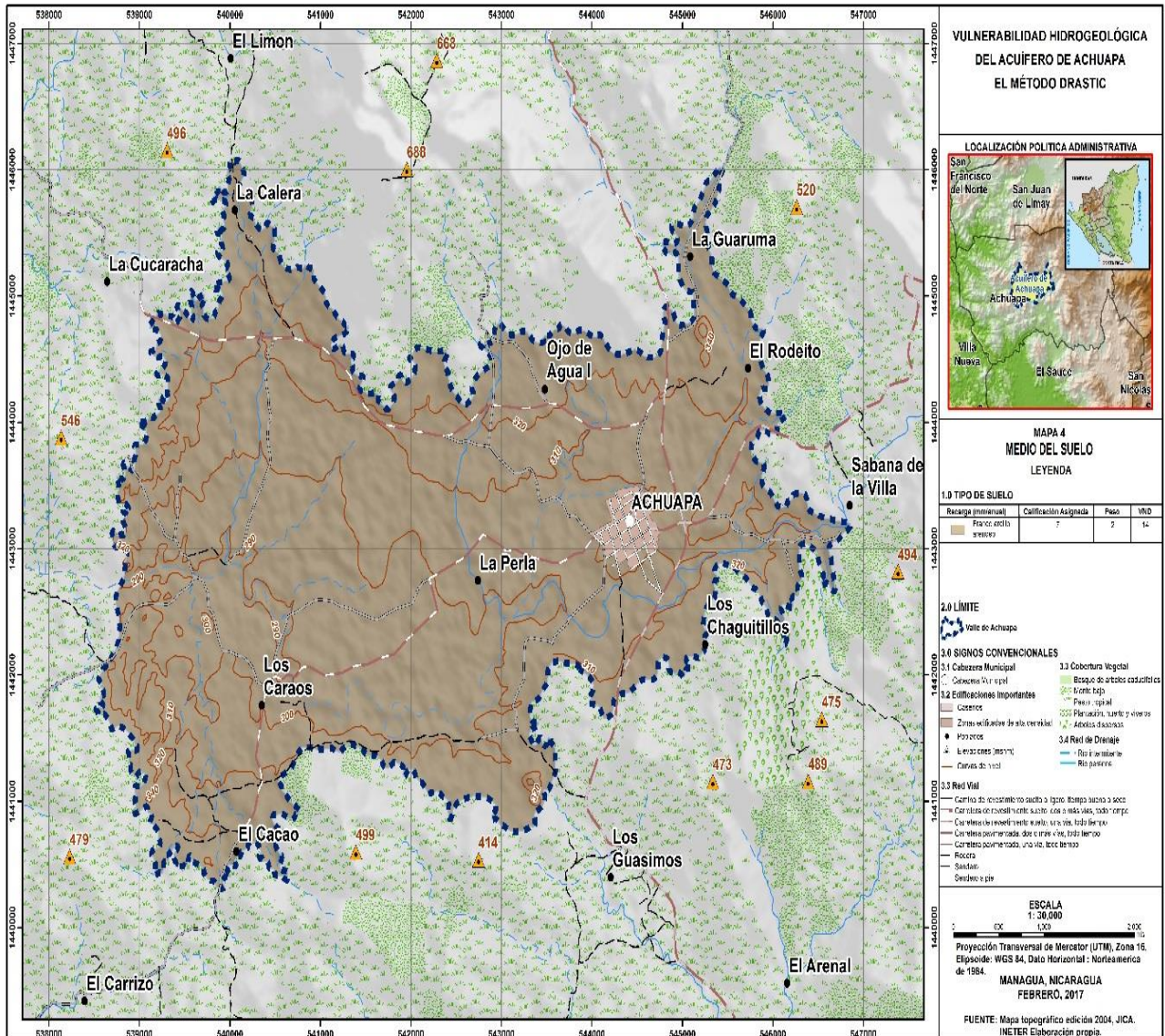
En el cuadro No. 5.4 se presenta el tipo de suelo y el valor DRASTIC y en la figura No. 5.4 se refleja la distribución areal del tipo de suelo.

Cuadro No. 5.4: Tipo de suelo y valor DRASTIC

| Tipo de suelo | Calificación | Peso | VND |
|------------------------|--------------|------|-----|
| Franco Arcillo Arenoso | 7 | 2 | 14 |

Fuente: Elaboración propia

Figura No. 5.4: Distribución areal del tipo de suelo



Fuente: Elaboración propia

5.1.5 Topografía.

El análisis de la topografía se realizó con el propósito de establecer los rangos de pendientes del área y asignar valores de acuerdo a las escalas DRASTIC. Los valores más altos corresponden a las zonas más planas y los valores más bajos a las zonas con mayor inclinación. Con este parámetro se explica que en áreas planas el agua permanece más tiempo en la superficie del suelo que las partes con mayor pendiente y por lo tanto tiene mayor posibilidad de infiltrarse con contaminantes incorporados.

En el análisis de este parámetro se obtuvieron 3 rangos de pendientes, los cuales se describen en el cuadro No. 5.5 y figura No. 5.5 (mapa).

Topografía T1

Este rango de pendientes oscilan entre 0 y 5 %, es la de mayor presencia en el valle, es una área consolidada cubriendo la mayor parte de la sub cuenca. En esta área se encuentran ubicadas las siguientes comunidades: La Calera, Los Carao, La Perla, el casco urbano, los chaguittillos y Ojo de agua.

Estas pendientes favorecen la infiltración, debido a la permanencia de agua en el área, causada por la casi horizontalidad del terreno. Se le asignó una calificación de 8, multiplicado por el peso del parámetro que es 1 y se obtuvo un VND de 8 para esta área.

Topografía T2

Las áreas con estas pendientes que oscilan entre 5% y 10%, están ubicadas principalmente en todo el borde de la cuenca de estudio; en donde se encuentran las siguientes comunidades: La Calera, Cacao, Ojo de Agua, Rodeito y El Carao. Se le asignó una calificación de 6 multiplicado por 1 que es el peso del parámetro obteniéndole un VND de 6.

Topografía T3

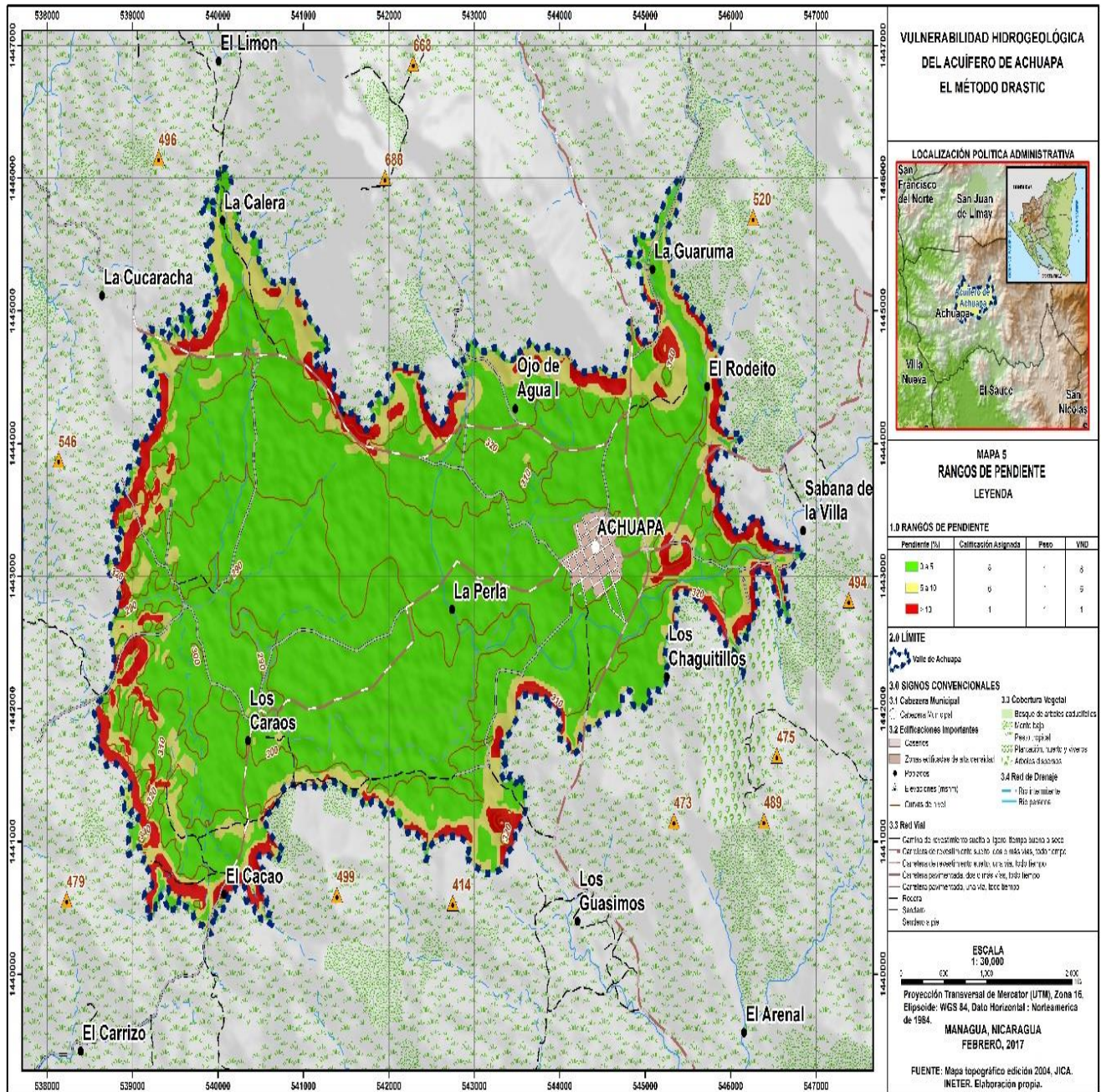
Estas áreas con pendientes mayores a 10%, son rocas tercerías, que rodean todo el valle, también se encuentran afloramientos de ellas dentro de éste. Estas pendientes por su alto grado de inclinación no favorecen a la retención de agua en la superficie; además estos materiales son impermeables. Las comunidades ubicadas en esta zona son las siguientes: La Calera, El Cacao, Ojo de Agua, Rodeito, El Carao.

Se le asignó una calificación de 1 con un peso de 1, dando como resultado un VND de 1.

Cuadro No. 5.5: La Topografía de la cuenca

| Código | Pendiente (%) | Calificación | Peso | VND |
|---------------|----------------------|---------------------|-------------|------------|
| T1 | 0 -5 | 8 | 1 | 8 |
| T2 | 5 -10 | 6 | 1 | 6 |
| T3 | > 10 | 1 | 1 | 1 |

Figura No. 5.5: Ubicación espacial de la Topografía



Fuente: Elaboración propia

5.1.6 Zona vadosa.

La importancia de la zona vadosa en la estimación de la vulnerabilidad natural del acuífero dependen de las características del espesor, composición litológica, propiedades químicas de las rocas, las que determinan las condiciones de atenuación del material que se encuentra por debajo del horizonte del suelo y por encima de la capa freática. La biodegradación, neutralización, filtración mecánica, reacción química, volatilización y la dispersión son fenómenos que pueden ocurrir y contribuyen al proceso de atenuación dentro de la zona vadosa. Del análisis de este parámetro se obtuvo como resultado dos zonas vadosas, las cuales se presentan a continuación.

Zona de Vadosa I1

Esta zona se caracteriza por sedimentos cuaternarios indiferenciados y residuales constituidos por arenas y gravas; se localiza en el suroeste del valle, en las comunidades de Los Carao, La perla, Chagüitillo y El Barro. Estos materiales se consideran con alta permeabilidad, lo que facilitaría a alguna carga contaminante penetrar sin que estos materiales opongan mucha resistencia. Se le asignó una calificación de 7 y un peso de 5, obteniendo como resultado un VND de 35.

Zona Vadosa I2

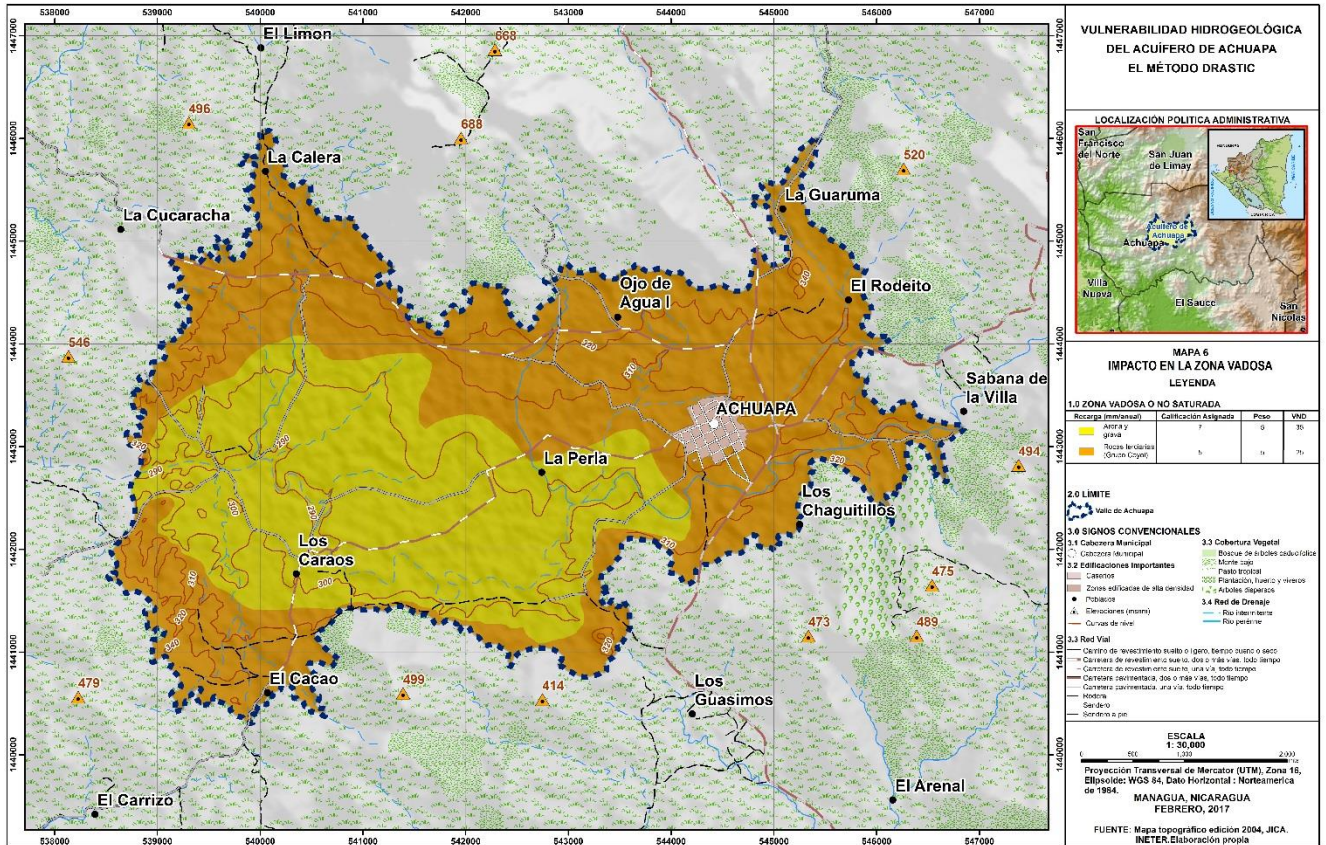
Esta zona se caracteriza por sedimentos cuaternarios indiferenciados y residuales en su mayoría constituido por arcillas y arcillas pesadas. Se localiza en la parte norte y este del acuífero. En esta área se encuentran las comunidades del El casco urbano y parte de la Calera. Se le asignó una calificación de 5 y un peso de 5, obteniendo un VND de 25.

En el cuadro No. 5.6 se presenta el consolidado de los resultados para este parámetro, y en la figura 5.6 (mapa) se observa la distribución espacial de estas áreas descritas.

Cuadro No. 5.6: Zona Vadosa

| Código | Litología | Calificación | Peso | VND |
|--------|-------------|--------------|------|-----|
| I1 | Aluvial | 7 | 5 | 35 |
| I2 | Grupo Coyol | 5 | 5 | 25 |

Figura No. 5.6: Ubicación espacial de la Zona Vadosa



Fuente: Elaboración propia

5.1.7 Conductividad hidráulica.

La conductividad hidráulica se refiere a la forma y/o modo en que el agua atraviesa las capas y materiales del acuífero, lo que a su vez controla la velocidad a la que está fluye considerando una pendiente dada.

De esta manera la velocidad a la que fluye el agua subterránea también controla la velocidad del movimiento de un contaminante una vez que alcanza el manto acuífero.

Como resultado del análisis de este parámetro se obtuvieron dos áreas con diferentes rangos de conductividad hidráulica, las cuales se describen a continuación.

Conductividad hidráulica C1

Esta área está ubicada en casi todo el valle, es ahí donde se encuentran las mayores profundidades de basamento hidrogeológico y ahí es donde se encuentran las mayores conductividades. Ahí están ubicados las comunidades de Los carao, los Chagüitillo, La Perla, el casco urbano y parte de la Calera Los Caraos, El Cacao, El Barro, Consuelo, Ojo de agua, Piedra Gorda No. 1, Saban de Villa y el Cacao. Los rangos de conductividad hidráulica en esta área varían de 14 a 25 m/d, la calificación asignada fue 3, por un peso de 2, se obtuvo un valor numérico DRASTIC de 6.

Conductividad hidráulica C2

Estas áreas cubren las rocas terciarias que se ubican en la parte noroeste del valle (en las comunidades de Piedra Gorda y el Rodeito), y los afloramientos que se encuentran dentro de éste; con rangos de conductividad hidráulica entre 0.04 a 5 m/d. Se le asignó una calificación de 1 y un peso 2 para obtener un VND de 2.

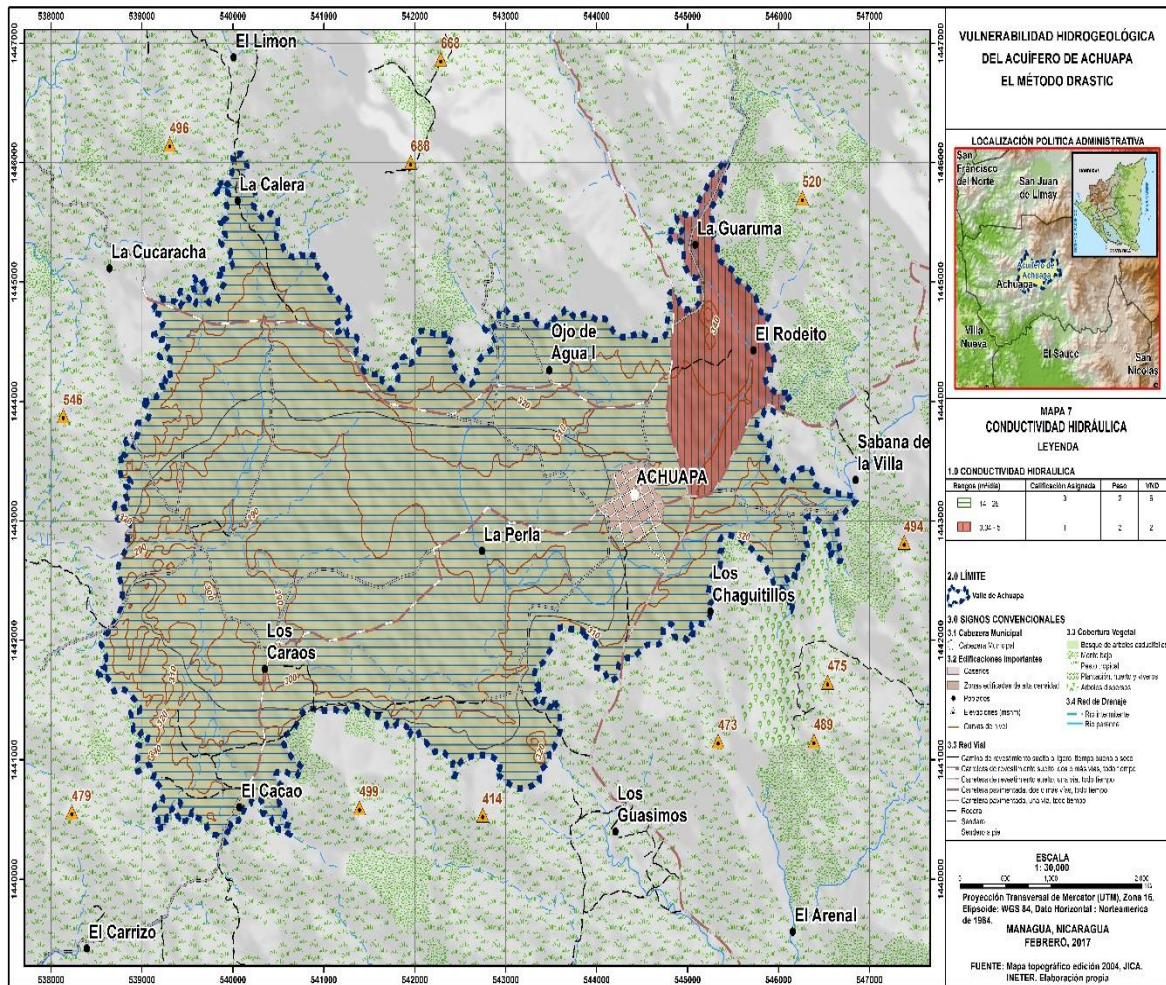
En el cuadro No. 5.7 se presentan los resultados obtenidos para este parámetro y el valor DRASTIC, y en la figura No. 5.7 (mapa) se presentan las áreas descritas.

Cuadro No. 5.7: Conductividad Hidráulica

| Código | Conductividad hidráulica (m/d) | Calificación | Peso | VND |
|--------|--------------------------------|--------------|------|-----|
| C1 | 14 - 25 | 3 | 2 | 6 |
| C2 | 0.04 - 5 | 1 | 2 | 2 |

Fuente: Elaboración propia

Grafico No. 5.7: Distribución espacial de la conductividad hidráulica



Fuente: Elaboración propia

5.2. Escenarios Hidrogeológicos.

Como resultado de la sobre posición de las siete capas temáticas, se obtuvieron los escenarios hidrogeológicos con diferentes índices DRASTIC de vulnerabilidad. Los escenarios hidrogeológicos con valores similares o aproximados se agruparon, obteniéndose escenarios con áreas de influencia más amplia. En los casos de escenarios con valores iguales o próximos se tomó el más representativo de manera que no se altere la calificación de vulnerabilidad de estos.

En el cuadro No. 5.8. Se presentan los índices promedios de los escenarios agrupados con su índice representativo obtenido.

Cuadro No. 5.8: Agrupación de los escenarios hidrogeológicos

| Escenarios | Rango de VND agrupados |
|------------------------|-------------------------------|
| Escenario No. 1 | 123-140 |
| Escenario No. 2 | 140-150 |
| Escenario No. 3 | 150-166 |

Fuente: Elaboración propia

5.3. Vulnerabilidad Hidrogeológica del acuífero de Achuapa.

Con los escenarios obtenidos se hizo una agrupación de estos, para determinar los niveles de vulnerabilidad. En el cuadro No. 5.9 se muestra los rangos de vulnerabilidad establecidos de acuerdo a criterios obtenidos y establecidos por el método DRASTIC. En la tabla fueron asociados los diferentes escenarios en tres grandes niveles de vulnerabilidad., los cuales son los siguientes: a) Área de Alta vulnerabilidad, para índices de 166 a 150, b) Área de Moderada vulnerabilidad, para índices entre 150 a 140 y c) Área de Baja vulnerabilidad para índices entre 140 y 123.

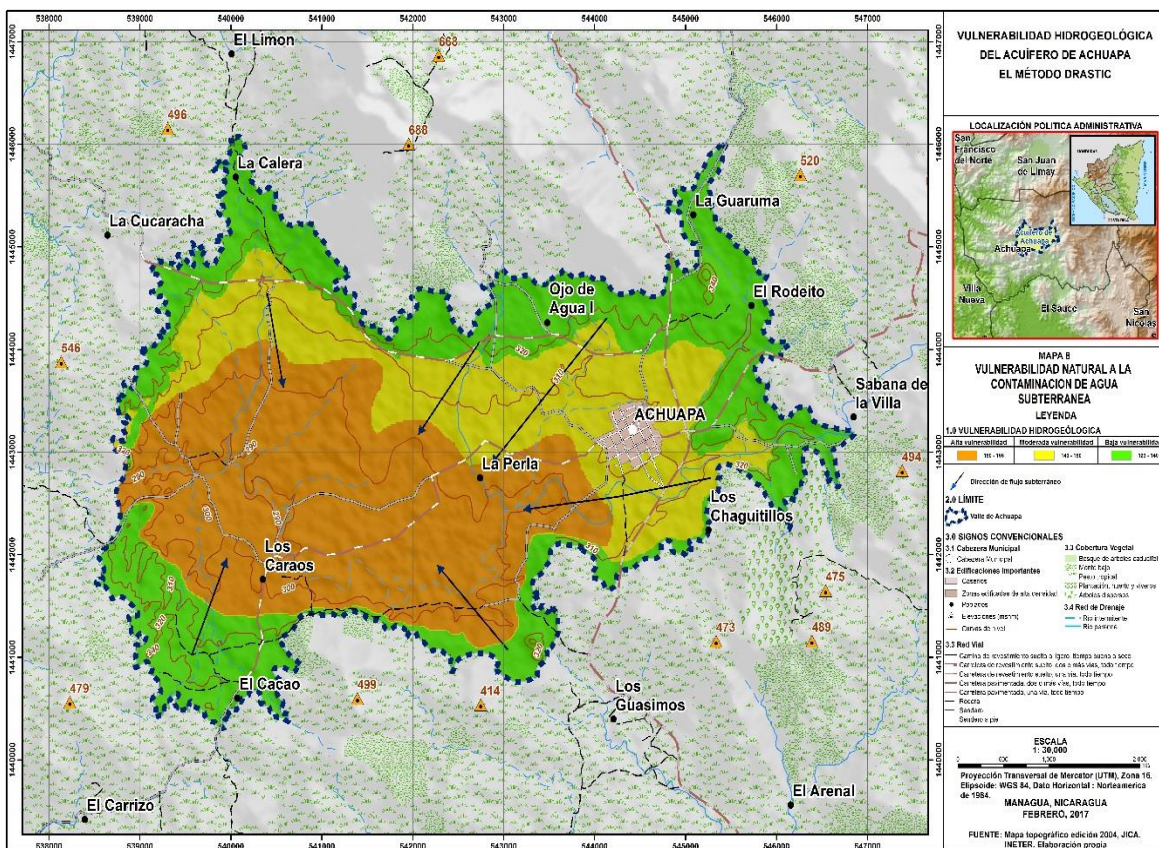
En la figura No. 5.8 se expresan de forma espacial las diferentes zonas de vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero de Achuapa.

Cuadro No. 5.9: Vulnerabilidad hidrogeológica

| VULNERABILIDAD | RANGOS DE VDN AGRUPADOS | COLOR |
|---------------------------------|-------------------------|------------|
| Área de alta vulnerabilidad | 166 – 150 | Anaranjado |
| Área de moderada vulnerabilidad | 150 – 140 | Amarillo |
| Área de baja vulnerabilidad | 140 - 123 | Verde |

Fuente: Elaboración propia

Figura 5.8: Distribución espacial de la vulnerabilidad hidrogeológica



Fuente: Elaboración propia

5.3.1 Descripción del área de Alta Vulnerabilidad.

El área de **ALTA VULNERABILIDAD** quedó constituida por diferentes escenarios hidrogeológicos que se caracterizan por las zonas donde los perfiles naturales del suelo están compuestos por materiales porosos, permeables, poca profundidad del agua y con fracturas considerables. Este conjunto de condiciones es favorable al paso de cualquier clase de contaminantes depositados sobre o debajo de la superficie del suelo.

Los siete escenarios que constituyen esta área de alta vulnerabilidad tienen como índices DRASTIC (ID) los valores correspondientes del 166 al 150. Estos índices coinciden con las condiciones geológicas que se observan en el área como favorable al transporte de contaminantes. Estas condiciones determinaron el grado de alta vulnerabilidad especialmente por la presencia de grava, arena, bolones, sedimentos y arcilla.

5.3.2 Área de Moderada Vulnerabilidad.

El área de **MODERADA VULNERABILIDAD**, está constituida por 10 escenarios hidrogeológicos (del 150 al 140). El material presente en estos suelos está compuesto por vertisoles arcillosos y franco arcilloso respectivamente, los cuales presentan una moderada permeabilidad, por las propiedades de la arcilla; permitiendo el paso a contaminantes móviles y persistente en un mediano plazo, con relación al área de alta vulnerabilidad.

En esta área existen dos áreas con considerables variaciones de pendientes. En la parte noroeste se encuentran rangos de pendientes que varían de 5 a 10%, las cuales se encuentran entre en los límites del material cuaternario y terciario, la otra se ubica en la zona céntrica del valle, donde las pendientes varían entre 0 y 5%.

Con relación a la zona vadosa, en el área de moderada vulnerabilidad se presentan dos áreas, una compuesta por sedimentos arcillosos, lo que podría complicar que una carga contaminante tenga acceso a la zona saturada y la otra

área está compuesta por arena y grava; este tipo de material presente, facilita el paso de contaminante hacia el acuífero.

En el área de moderada vulnerabilidad, los parámetros que marcan la diferencia de los escenarios hidrogeológicos son: Impacto en la Zona Vadosa, Medio del Suelo, y profundidad del agua subterránea. Al realizar la interrelación de todos los parámetros, sus índices se encuentran dentro del rango definido como de moderada vulnerabilidad.

5.3.3 Área de Baja Vulnerabilidad.

Esta área quedo caracterizada por valores de índices DRASTIC comprendidos entre 140 123. Los valores de estos escenarios hidrogeológicos son bajos y puntuales; localizados prácticamente en el material terciario, en los límites del valle.

Las profundidades de las aguas subterráneas son mayores en comparación con las otras zonas de vulnerabilidad. El material litológico presente posee mayores elementos de atenuación a alguna carga contaminante, baja conductividad hidráulica y las altas pendientes topográficas contribuyen positivamente en la atenuación de la posible carga contaminante.

5.3.4. Usos del mapa de Vulnerabilidad.

El mapa de Vulnerabilidad Hidrogeológica es un instrumento auxiliar para orientar adecuadamente las decisiones relacionadas con la protección de las aguas subterráneas de la cuenca analizada. La vulnerabilidad no es el único criterio para la toma de decisión, pero es un parámetro importante en la administración adecuada de este recurso. Este conocimiento asociado con el peligro potencial de las fuentes de contaminación, puede permitir establecer estrategias de protección más adecuada acorde a la realidad. Sin embargo es muy importante señalar que en ausencia de una evaluación de la carga contaminante y el valor relativo del agua, la vulnerabilidad hidrogeológica es un instrumento muy útil para:

- ✓ priorizar áreas donde la protección del agua subterránea es de vital importancia.
- ✓ Identificar áreas donde se justifique una atención especial o esfuerzos encaminados a la protección del agua subterránea.
- ✓ Identificar áreas donde los plaguicidas representen una mayor amenaza para el agua subterránea.
- ✓ Priorizar áreas con fines de monitoreo.
- ✓ Identificar características hidrogeológicas especiales que por lo general influyen sobre las actividades de descontaminación.
- ✓ Para la justificación de estudios hidrogeológicos más detallados.
- ✓ Identificar vacíos en los datos que afecten la evaluación del potencial de contaminación.
- ✓ Como instrumento de estudio para determinar si una instalación está ubicada (o se está ubicando) en un área vulnerable a la liberación de contaminantes en la superficie.

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones.

- La información en la base de datos de la Dirección de Hidrogeología del INETER ha sido de gran importancia; para la elaboración del presente estudio, debido a que en estos registros se describen la mayoría parámetros hidrogeológicas necesarias para desarrollar este tipo de estudio.
- Con la información recopilada, analizada y posteriormente procesada se elaboraron los mapas temáticos de cada uno de los parámetros hidrogeológicos que utiliza la metodología DRASTIC, los cuales son:, Profundidad de Agua, Recarga neta, Medio Acuífero, Tipo de suelo, Impacto en la zona vadosa, Pendiente, Conductividad hidráulica.
- En lo referente a la profundidad del agua, se identificaron profundidades que oscilan entre 5m a 10m. Estas profundidades nos indican que al depositarse un contaminante sobre el suelo o subsuelo este puede llegar al agua subterránea en un corto plazo.
- La zona vadosa se cuantificó en base a las formaciones existentes. Para obtener estos resultados se seleccionaron pozos con litologías que describen los materiales presentes en la zona vadosa. Esta zona se caracteriza principalmente por materiales como lo son la arena, grava, escoria, arcilla y limo con mayor presencia.
- El mapa espacial de vulnerabilidad de la subcuenca de Achuapa, es un instrumento auxiliar para orientar adecuadamente las decisiones relacionadas a la protección de las aguas subterráneas de la subcuenca.
- La metodología DRASTIC es una herramienta cada vez más usada para realizar mapas de vulnerabilidad de aguas subterráneas y es confiable gracias a las variables relacionadas a considerar. Es así como los resultados obtenidos con este estudio se convierten en una base de información para la gestión ambiental, así como para el uso del recurso hídrico.

- Con relación a la zona vadosa, en el área de moderada vulnerabilidad se presentan dos áreas, una compuesta por sedimentos arcillosos y la otra área está compuesta por arena y grava; este tipo de material presente, facilita el paso de contaminante hacia el acuífero.
- La conductividad de valor más alto está localizada en la mayor parte del acuífero. Esto indica que el riesgo de la contaminación es más grande.

6.2 Recomendaciones.

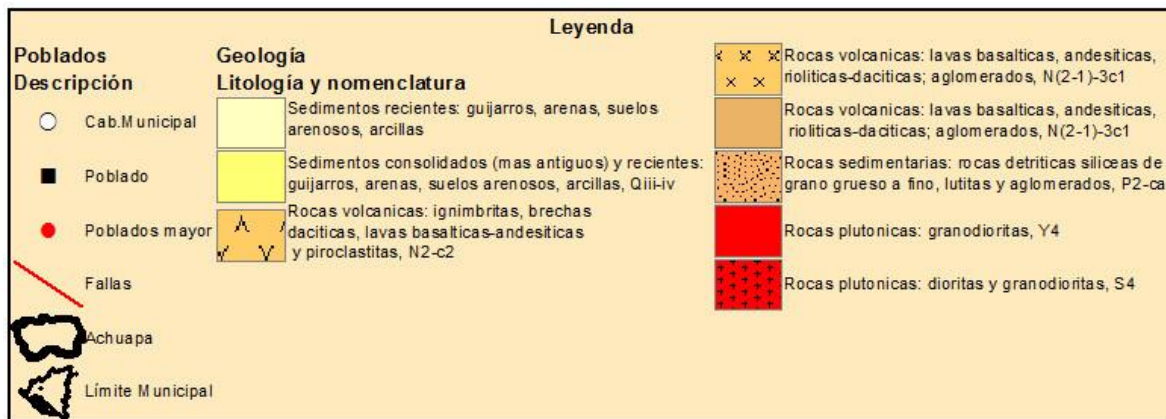
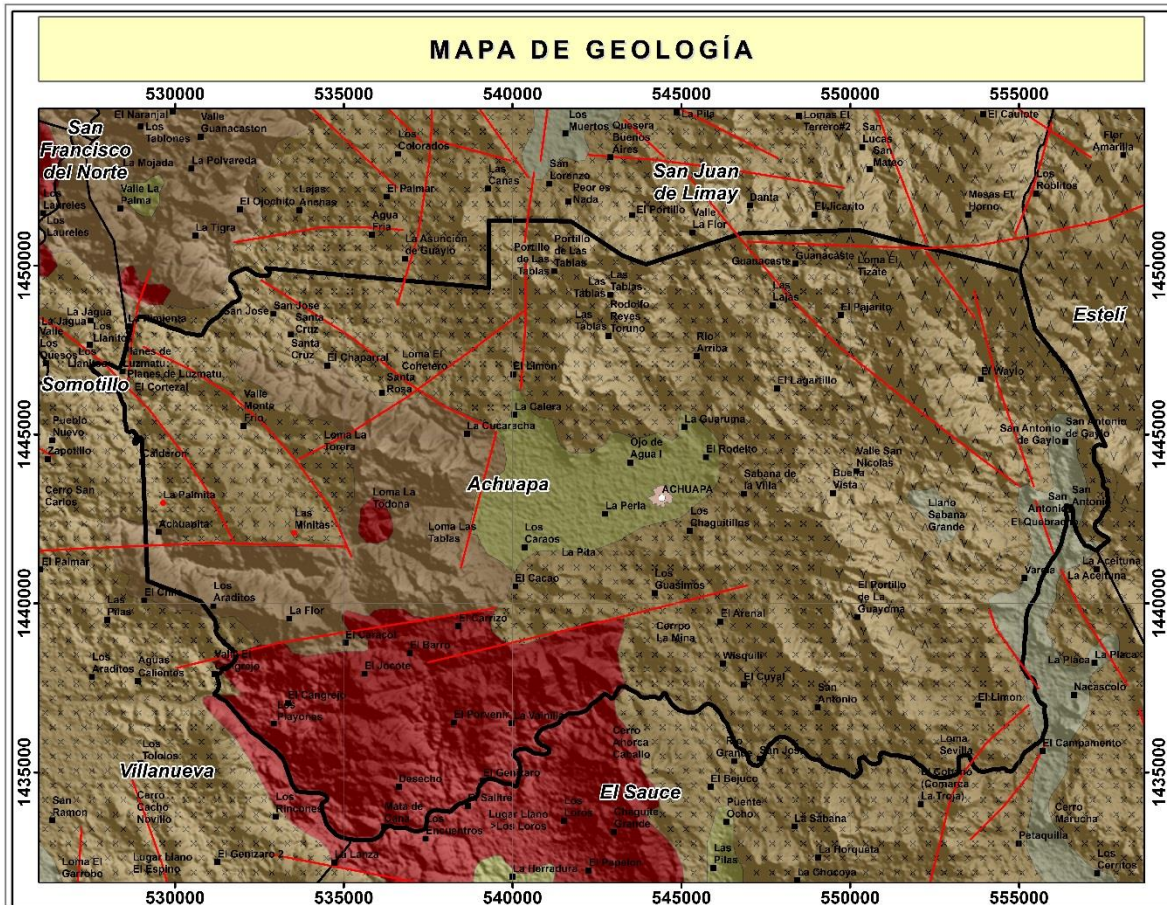
- Como aporte principal de este estudio se recomienda el uso del mapa de zonas de vulnerabilidad hidrogeológica de la subcuenca Ahuapa, para cualquier construcción de empresas o industrias; sobre todo en aquellas áreas, que por sus características propias del medio, son de mayor vulnerabilidad a la contaminación antropogénica.
- Elaborar programas de seguimiento y control que incluya las diferentes disciplinas de la geociencias para monitorear la calidad del agua subterránea y superficial.
- Las autoridades responsables del manejo del recurso subterráneo, deben llevar a cabo un estricto control de todas las posibles fuentes contaminantes, para evitar episodios de contaminación que puedan afectar la calidad del agua en el futuro.
- Que las alcaldías municipales definan la planificación territorial del recurso hídrico, debido a la presión demográfica y a la urbanización desordenada.
- Implementar un programa de reforestación (en general), en toda el área de la subcuenca, en especial en las zonas que han sido afectadas por diferentes causas naturales y zonas altas para evitar la disminución de las recargas hídricas.
- Mejorar las zonas de recarga de la subcuenca a través de un ordenamiento y reforestación de las áreas afectadas, en la orilla y margen del río, así como en las zonas altas del área de estudio; para prevenir la erosión y sedimentación.
- Establecer coordinación con autoridades gubernamentales y locales para realizar educación ambiental en escuelas y colegios, con el objetivo de crear conciencia ambiental sobre el manejo del recurso hídrico en la subcuenca.

BIBLIOGRAFIA

1. Alfredo Puente Palazuelo. 2008. Evaluación de la Vulnerabilidad Acuifera en la Ciénega de Michoacán México.
2. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) Julio 2001, Estudios Hidrológicos e Hidrogeológicos de la región del pacifico de Nicaragua.
3. Daniel Corrales, 2005. Estudio hidrogeológico del funcionamiento del Acuífero de Estelí.
4. Jorge Luís Guatemala Herrera. 2002, Caracterización de la estela de contaminación del basurero la Joya en granada, Nicaragua. Centro par al investigación de los recursos acuáticos de Nicaragua (CIRA / UNAN).
5. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE). Managua, Nicaragua, 2008, Estudio de Potenciales y Calidad de los Acuíferos del Norte de León y Chinandega.
6. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), 2001. Estudios Hidrológicos e Hidrogeológicos de la región del Pacífico.
7. Jonathan Agüero Valverde. 2004, Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del valle Central de costa Rica.
8. Maximina Altamirano, 2005. Distribución de la Contaminación Natural por Arsénico en las Aguas Subterráneas de la sub cuenca del valle de Sebaco Nicaragua.
9. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). Dirección de Recursos Hídricos Departamento de hidrogeología, consultas a base de datos y SIG de hidrogeología.
10. Norbert Fenzl. 1989. Geografía, Clima, Geología e hidrogeología de Nicaragua.
11. Auge, M. 2004. Vulnerabilidad de Acuíferos conceptos y métodos.
12. Agüero, J. 2000. Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica.

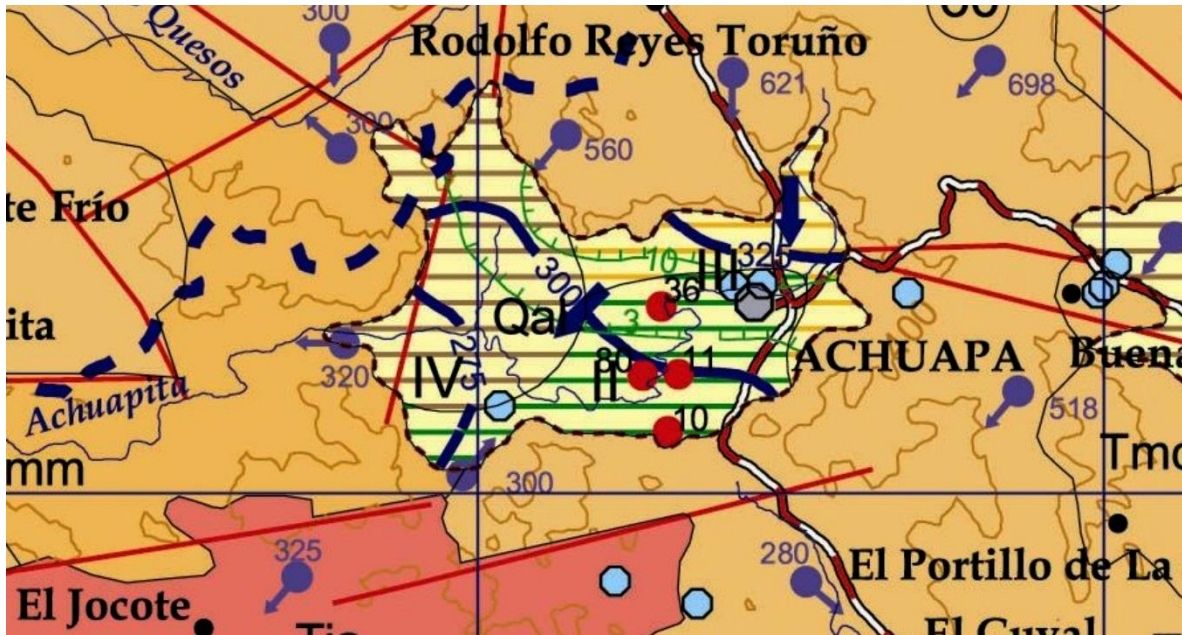
ANEXOS

Cuadro N°1: Geología del acuífero de Achuapa.

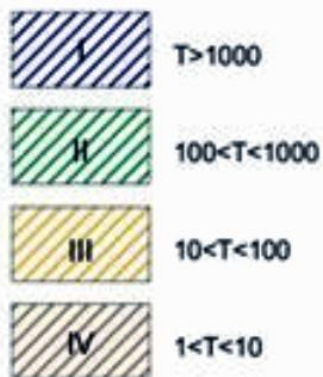


Fuente: INETER

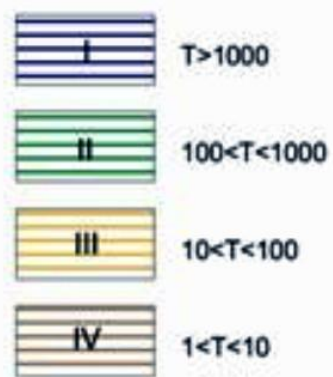
Cuadro No. 2: Transmisividad del acuífero de Achuapa.



En áreas con datos suficientes, con tratamiento estadístico, nivel de veracidad bueno.



En áreas con datos muy escasos, aislados o sin datos, nivel de veracidad dudoso.



Cuadro N°3: Niveles de agua en los pozos del acuífero de Achuapa

| Propietarios | PR | COOR_X | COOR_Y | NEA (m) | ELEV | CONDOC | TEMP_°c | SAL | PH | Tipo_Pozo |
|-----------------------------------|------|--------|---------|-------------|------|--------|---------|-----|------|-----------|
| SALVADORA GUTIERREZ | 0.91 | 541161 | 1444525 | 13.81 | 334 | 485 | 27.5 | 0.2 | 8.2 | PE |
| JULIO RODOLFO LOPEZ VALLE | 1.15 | 540704 | 1444701 | 9.3 | 325 | 394.7 | 28 | 0.2 | 8 | PE |
| EFRAIN VALENZUELA | 0.84 | 540450 | 1444641 | 5.22 | 331 | 0 | 0 | 0 | 0 | PE |
| MARIA ERNESTINA TORREZ | 0.75 | 540263 | 1445389 | 9.85 | 333 | 265 | 27.2 | 0.1 | 8 | PE |
| EL BLOQUE INTERCOMUNITARIO | 0.75 | 545073 | 1443196 | 15.35 | 324 | 647 | 27.5 | 0.3 | 8.02 | PE |
| POZO COMUNAL SAN PEDRO | 0.37 | 539391 | 1443083 | 9.68 | 301 | 340 | 28.1 | 0.2 | 8.1 | PE |
| MARIA EUGENIA | 0.85 | 539813 | 1442559 | 9.1 | 301 | 229.9 | 28.7 | 0.1 | 7.69 | PE |
| CARMELINA SANCHEZ | 0.9 | 540188 | 1442106 | 7.08 | 301 | 370.4 | 28.5 | 0.2 | 8.25 | PE |
| POZO COMUNAL LOS CARAOS | 0.62 | 540394 | 1441892 | 10.45 | 307 | 299.9 | 28.9 | 0.1 | 7.8 | PE |
| LUISA FERNADEZ | 0.8 | 540920 | 1442032 | 7.37 | 303 | 299.1 | 27.7 | 0.1 | 7.8 | PE |
| MARIA ISABEL GONZALEZ (PROPUESTO) | 0.62 | 541571 | 1442128 | 7.74 | 315 | 302.2 | 28.4 | 0.1 | 7.6 | PE |
| BLASS ESPINOZA CASCO | 0.95 | 542653 | 1442930 | 8.34 | 313 | 302 | 28.5 | 0.1 | 7.65 | PE |
| JOHANA MARTINEZ | 0.74 | 543668 | 1443325 | 4.19 | 310 | 252.3 | 27.8 | 0.1 | 8 | PE |
| EQUIPO No. 2 COYOLAR No. 2 | 0 | 544216 | 1443434 | 7.49 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PP |
| EQUIPO No.3 TAMAGAS | 0 | 543957 | 1443778 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PP |
| COPERATIVA TAMAGAS | 0 | 543955 | 1443798 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PE |
| EQUIPO No. 2 COYOLAR No. 1 | 0 | 544891 | 1443531 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | PP |
| POZO IMPRODUCTIVO ENACAL | 0 | 0 | 0 | 9.54 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| POZO EXPLORATORIO | 0 | 0 | 0 | 8.56 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

Fuente: INETER