

**Evaluación de la vulnerabilidad a  
contaminación de las aguas subterráneas del  
Valle del Yeguaire mediante la metodología  
DRASTIC**

**Ana Gabriela Morales Oña**

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano  
Honduras**

Noviembre, 2014

ZAMORANO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN AMBIENTE Y DESARROLLO

**Evaluación de la vulnerabilidad a  
contaminación de las aguas subterráneas del  
Valle del Yeguaré mediante la metodología  
DRASTIC**

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar  
al título de Ingeniera en Ambiente y Desarrollo en el  
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

**Ana Gabriela Morales Oña**

**Zamorano, Honduras**  
Noviembre, 2014

# **Evaluación de la vulnerabilidad a contaminación de las aguas subterráneas del Valle del Yeguaré mediante la metodología DRASTIC**

Presentado por:

Ana Gabriela Morales Oña

Aprobado:

---

Erika Tenorio, M.Sc.  
Asesora Principal

---

Laura Suazo, Ph.D.  
Directora  
Departamento de Ambiente y  
Desarrollo

---

Alexandra Manueles, M.Sc.  
Asesora

---

Raúl H. Zelaya, Ph.D.  
Decano Académico

---

Gloria Arévalo, M.Sc.  
Asesora

# **Evaluación de la vulnerabilidad a contaminación de las aguas subterráneas del Valle del Yeguaré mediante la metodología DRASTIC**

**Ana Gabriela Morales Oña**

**Resumen.** Las fuentes de agua subterránea son menos susceptibles a contaminación que las superficiales, sin embargo, una vez que los acuíferos son contaminados su recuperación puede demorar siglos. El presente estudio se realizó con el objetivo de identificar las zonas vulnerables a contaminación de aguas subterráneas en el suroeste del valle del Yeguaré, Honduras. Para esto se aplicó la metodología DRASTIC, el cual es un modelo espacial que evalúa la vulnerabilidad intrínseca a contaminación de un acuífero con base en siete parámetros que controlan el movimiento del agua (profundidad del nivel freático, recarga del acuífero, material geológico del acuífero, tipo de suelo, topografía, zona de vadosa y conductividad hidráulica). Adicionalmente se realizaron mediciones de nitratos y conductividad eléctrica en 39 pozos de la zona para validar el modelo. Los datos de cada parámetro, obtenidos en visitas a campo y a través de fuentes secundarias, fueron analizados y procesados mediante el programa ArcGIS® 9.3. El mapa final muestra dos categorías de vulnerabilidad en la zona: moderada y alta, siendo la primera la dominante (71% del área). Para conocer qué tanto refleja la realidad se llevó a cabo un análisis de sensibilidad, el cual indicó que el mapa de vulnerabilidad obtenido coincide en un 83% con el mapa de distribución de nitratos del área de estudio. El área total del estudio fue de 24.18 km<sup>2</sup>.

**Palabras clave:** Análisis de sensibilidad, manto acuífero, nivel freático, recarga, sistema paramétrico.

**Abstract.** Groundwater sources are less susceptible to contamination than surface sources. However, once aquifers are contaminated its recovery could take centuries. The purpose of this study was to identify the zones which are vulnerable to groundwater contamination in the southwest of Yeguaré Valley, Honduras with DRASTIC methodology. DRASTIC is a spatial model that evaluates the intrinsic vulnerability to pollution of an aquifer based on seven parameters that affect and control the water movement into the soil: depth to groundwater, net recharge of the, aquifer media, soil media, topography, impact media of the unsaturated zone and hydraulic conductivity. Additionally, information about nitrate concentration and electricity conductance were measured in 39 wells of the study area. Information were obtained from data field and secondary sources and then processed in ArcGIS® 9.3 program. The final map showed two categories of vulnerability in the area: moderate and high. The high vulnerability zone was the largest, covering 71% of the total area. In order to understand the reliability of the aquifer vulnerability, sensitivity analysis was carried out. This analysis indicates that in 83% of the area the vulnerability map corresponds to the higher nitrate concentration in groundwater. The study area was 24.18 km<sup>2</sup>.

**Keywords:** Aquifer, parametric system, recharge, sensitivity analysis, water table.

## CONTENIDO

	Portadilla.....	i
	Página de firmas .....	ii
	Resumen .....	iii
	Contenido .....	iv
	Índice de Cuadros, Figuras y Anexos.....	v
<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>28</b>
<b>5</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>30</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>33</b>

## ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

		Página
<b>Cuadros</b>		
1.	Índices de ponderación para los parámetros que determinan el transporte de contaminantes al manto acuífero con base en su influencia en la contaminación del mismo. ....	4
2.	Grado de vulnerabilidad a contaminación de aguas subterráneas de acuerdo a su índice de vulnerabilidad. ....	5
3.	Valor DRASTIC asignado de acuerdo a la profundidad del nivel freático. ....	7
4.	Coefficientes de infiltración ( $K_p$ ) de acuerdo a pendiente topográfica...	9
5.	Coefficientes de infiltración ( $K_v$ ) de acuerdo a la cobertura vegetal. ....	9
6.	Coefficientes de infiltración ( $K_{fc}$ ) de acuerdo a la textura del suelo ....	9
7.	Coefficientes de infiltración propuestos por cobertura vegetal ( $K_v$ ) de acuerdo al método Recarga Acuifera Subterránea. ....	10
8.	Valor DRASTIC asignado de acuerdo a la recarga del acuífero. ....	10
9.	Valor típico DRASTIC asignado de acuerdo para los tipos de material geológico de acuífero. ....	11
10.	Valor típico DRASTIC asignados de acuerdo a los diferentes tipos de suelo. ....	13
11.	Valor DRASTIC asignado de acuerdo a la pendiente topográfica (%).	13
12.	Valor DRASTIC asignado de acuerdo a los diferentes tipos de material geológico. ....	14
13.	Valor típico DRASTIC asignado de acuerdo a la conductividad hidráulica. ....	15
14.	Características de las clases de suelos presentes en el área de estudio.	20
<b>Figuras</b>		
1.	Ubicación geográfica de la zona de estudio entre los municipios de San Antonio de Oriente y Maraita, Francisco Morazán, Honduras, 2014. ....	3
2.	Obtención del mapa de vulnerabilidad a contaminación de aguas subterráneas a través de los siete parámetros que determinan el transporte de contaminantes al manto acuífero. ....	6
3.	Ubicación geográfica de los pozos en los cuales se llevó a cabo la medición de profundidad de nivel freático en las localidades de	

	Zamorano, El Pedregal de Cacalutepe, San Francisco y El Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Francisco Morazán, Honduras, 2014...	7
4.	Ubicación geográfica de los perfiles de suelo en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepe, San Francisco y El Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Francisco Morazán, Honduras, 2014...	12
5.	Ubicación geográfica de los pozos en los cuales se llevó a cabo la medición de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y conductividad ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepe, San Francisco y El Rincón, Francisco Morazán, Honduras, 2014.....	16
6.	Distribución espacial de la profundidad del nivel freático en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepe, San Francisco y el Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Francisco Morazán, Honduras, 2014.....	17
7.	Distribución espacial de la recarga potencial anual del acuífero en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepe, San Francisco y el Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Francisco Morazán, Honduras, 2014.....	18
8.	Distribución espacial del material geológico en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepe, San Francisco y el Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Francisco Morazán, Honduras, 2014...	19
9.	Ubicación del horizonte de suelo que actúa como capa impermeable en las distintas clases de suelo establecidas. ....	20
10.	Distribución espacial de los tipos de suelos de acuerdo a su limitante hidráulica en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepe, San Francisco y el Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Francisco Morazán, Honduras, 2014. ....	21
11.	Distribución espacial de las pendientes topográficas (%) en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepe, San Francisco y el Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Departamento de Francisco Morazán, Honduras, 2014.....	22
12.	Distribución espacial de la conductividad hidráulica ( $\text{m}\cdot\text{día}^{-1}$ ) con base en la textura de suelo en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepe, San Francisco y el Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Departamento de Francisco Morazán, Honduras, 2014. ....	23
13.	Distribución espacial de la vulnerabilidad de contaminación de aguas subterráneas en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepe, San Francisco y el Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Departamento de Francisco Morazán, Honduras, 2014.....	24
14.	Ubicación geográfica de las áreas que conforman los terrenos de la parte plana de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Departamento de Francisco Morazán, Honduras, 2007. ....	25
15.	Distribución espacial de la de concentración de nitratos ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{NO}_3^-$ ) en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepe, San Francisco y el Rincón, Departamento de Francisco Morazán al suroeste del valle del Yeguaré, Honduras, 2014. ....	26

16.	Distribución espacial de conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepe, San Francisco y el Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Departamento de Francisco Morazán, Honduras, 2014.....	27
-----	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Anexos		Página
1.	Procesos seguidos y el equipo utilizado para la medición de los parámetros de calidad de agua en los pozos del área de estudio. ....	33
2.	Valores DRASTIC asignados a la profundidad del nivel freático del área de estudio, Francisco Morarán, Honduras, 2014. ....	34
3.	Valores DRASTIC asignados a la recarga potencial del acuífero del área de estudio, Francisco Morarán, Honduras, 2014. ....	34
4.	Valores DRASTIC asignados al material geológico del área de estudio, Francisco Morarán, Honduras, 2014.....	35
5.	Valores DRASTIC asignados al tipo de suelo del área de estudio de acuerdo a su limitante hidráulica, Francisco Morarán, Honduras, 2014. ....	35
6.	Valores DRASTIC asignados a la topografía del área de estudio con base a su pendiente (%), Francisco Morarán, Honduras, 2014. ....	36
7.	Valores DRASTIC asignados al tipo de material geológico de la zona de vadosa del área de estudio, Francisco Morarán, Honduras, 2014. ...	36
8.	Valores DRASTIC asignados a la conductividad hidráulica del suelo en el área de estudio, Francisco Morarán, Honduras, 2014.....	37
9.	Profundidad del nivel freático de los pozos medidos en la zona de estudio.....	38
10.	Resultados de análisis de conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) y nitratos ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) de los pozos muestreados en las localidades del área de estudio.....	40
11.	Familias texturales de los perfiles de suelos analizados en las localidades del área de estudio. ....	42
12.	Conductividad hidráulica derivada teóricamente a partir de la textura suelo presente en cada perfil analizado. ....	44



# 1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el agua, tanto superficial como subterránea ha jugado un papel importante como sostén del crecimiento económico y poblacional. En zonas urbanas, los habitantes se abastecen de agua a través de sistemas de agua potable, mientras que en zonas rurales donde el acceso a dicho sistema es limitado, las personas tienden a abastecerse de otras fuentes, entre ellas pozos. Hoy en día, debido al aumento poblacional, las fuentes de agua están siendo sometidas a una gran presión al tener que abastecer a una población creciente. Asimismo, este crecimiento expone a dichas fuentes a mayores riesgos de contaminación y deterioro.

Pese a que las fuentes de agua subterránea son menos susceptibles a contaminación que las superficiales, una vez que los acuíferos son agotados o contaminados, su recuperación puede demorar siglos (OEA 2004). La complejidad de los sistemas subterráneos hace que se requiera de largos periodos de tiempo antes de que la verdadera extensión del problema sea detectable (Freeze y Cherry 1979). En Honduras, las fuentes de contaminación de aguas subterráneas más comunes son los plaguicidas y fertilizantes agrícolas, metales pesados resultantes de la actividad minera y aguas residuales (AQUASTAT 2014). Un estudio de calidad de agua subterránea en Honduras realizado por el Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados (2004), identificó en diferentes puntos a nivel nacional contaminación generada por agroquímicos, metales pesados, salinidad y sulfatos.

La contaminación de agua subterránea ocurre cuando esta se ve expuesta a sustancias peligrosas que entran en contacto con el suelo. Existen contaminantes que se disuelven en el agua y se infiltran hasta llegar al manto acuífero y otros que a pesar de que no se disuelven en el momento, permanecen en el suelo convirtiéndose en un factor de contaminación a largo plazo (EPA 2014). Sin embargo, aunque las fuentes de contaminación se encuentren presentes en la superficie, son las características del acuífero las que determinan la vulnerabilidad del mismo a ser contaminado (Aller *et al.* 1987).

Hoy en día existen diversas metodologías que permiten evaluar la vulnerabilidad de contaminación de las aguas subterráneas, entre ellas GOD, AVI, DRASTIC y SINTACS (Hernandez *et al.* 2012), de las cuales el modelo DRASTIC es uno de los más aceptados al considerar un mayor número de variables (Ramos y Rodríguez 2003). La metodología DRASTIC fue desarrollada en el año 1987 por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA por sus siglas en Inglés) (Aller *et al.* 1987) y consiste en un modelo espacial que toma en cuenta siete parámetros para determinar qué tan vulnerable es un manto acuífero a ser contaminado. A cada parámetro se le asigna un índice de ponderación con base en su importancia y un valor de acuerdo a rangos pre-establecidos. Los parámetros que considera incluyen: profundidad del nivel freático, recarga del manto

acuífero, material geológico de la zona saturada, tipo de suelo, topografía, material geológico de la zona de vadosa y conductividad hidráulica. Estas propiedades son ingresadas y procesadas en un Sistema de Información Geográfica (SIG) el cual permite determinar las áreas en las cuales un acuífero es más vulnerable a ser contaminado intrínsecamente. Hoy en día, países como China (Huan *et al.* 2012), Arabia Saudita (Subyani y Modayan 2012), Malasia (Shirazi *et al.* 2013), Turquía (Ersoy y Gültekin 2013) e Iran (Neshat *et al.* 2014) y otros países más, hacen uso de esta metodología con el fin de obtener una herramienta para prevención y control de contaminación de aguas subterráneas.

En la presente investigación, se aplicó la metodología DRASTIC en el suroeste del Valle del Yeguaré con el fin de identificar las zonas con mayor vulnerabilidad a contaminación de aguas subterráneas. La zona de estudio abarcó los terrenos de la parte plana de la Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano (EAP) y los caseríos de El Pedregal de Cacalutepé, San Francisco y El Rincón, en los cuales predominan las actividades agrícolas y ganaderas. Los habitantes de estas zonas, a excepción de la EAP, dependen en gran medida del uso de fuentes de agua subterránea

En los últimos años, debido al crecimiento poblacional y económico en la zona, las actividades humanas como agricultura y un manejo inadecuado de aguas residuales se han convertido en la principal causa de contaminación de fuentes de agua subterránea en esta zona. El manejo inadecuado de fertilizantes y pesticidas, los residuos provenientes de las actividades ganaderas y las aguas residuales, constituyen un riesgo de contaminación para el manto acuífero de la zona. En el año 2009, un diagnóstico de calidad de agua llevado a cabo en pozos localizados en los caseríos de El Pedregal de Cacalutepé, El Rincón y San Francisco, demostró la presencia de elevadas concentraciones de nutrientes (nitratos, nitritos y fosfatos) e indicadores de contaminación fecal, los cuales constituyen un peligro para la salud de los pobladores de la zona (Montes de Oca 2009).

El objetivo general del estudio fue desarrollar una caracterización hidrogeológica espacial del Valle del Yeguaré con el fin de zonificar la vulnerabilidad a contaminación del manto freático libre. Para ello, se hizo necesaria la caracterización de elementos geológicos y edafológicos propios de la zona que determinan los procesos de infiltración y percolación del agua hacia el manto acuífero. Específicamente el estudio buscó: i) medir la profundidad del nivel freático de la zona, ii) definir la recarga del acuífero través del coeficiente de infiltración potencial, el cual integra infiltración básica del suelo, cobertura de la superficie y topografía de la zona de estudio, iii) caracterizar el manto acuífero haciendo énfasis en el tipo de material geológico de la zona saturada y zona de vadosa, iv) establecer las clases de suelo presentes de acuerdo a su limitante hidráulica, v) definir la conductividad hidráulica, y finalmente vi) validar los resultados obtenidos con la metodología con indicadores de calidad de agua en los pozos ubicados dentro del área de estudio.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

**Descripción de la zona de estudio.** El estudio se realizó en el suroeste del Valle del Yeguaré, entre los municipios de San Antonio de Oriente y Maraita, en el Departamento de Francisco Morazán. Esta zona abarcó los terrenos de la parte plana de la Escuela Agrícola Panamericana y los caseríos de El Pedregal de Cacalutepé, San Francisco y El Rincón. La superficie en estudio tiene un área aproximada de 24 km<sup>2</sup> y comprende elevaciones de 580 hasta 900 msnm (Figura 1).

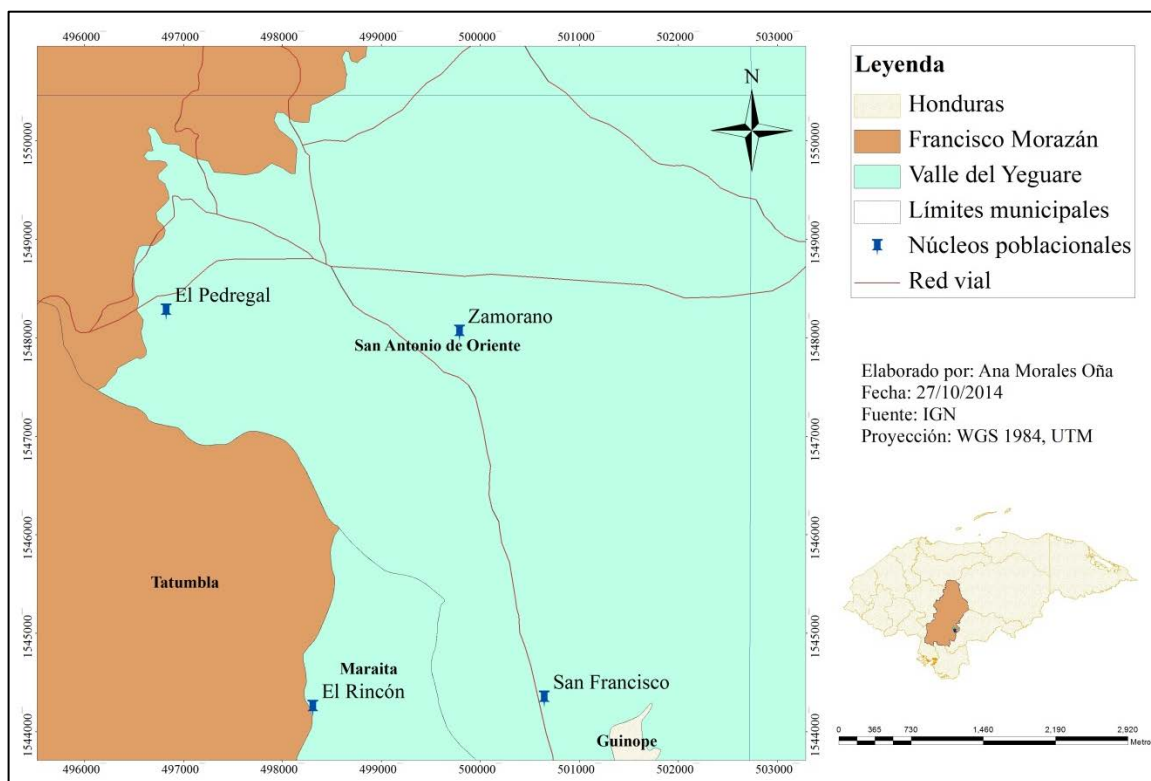


Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio entre los municipios de San Antonio de Oriente y Maraita, Francisco Morazán, Honduras, 2014.

El valle del Yeguaré posee una temperatura media anual de 24°C y una precipitación promedio anual de 1096 mm. Existe una temporada lluviosa que abarca los meses de junio a octubre y un temporada seca que va de noviembre a abril (Unidad de riego de Zamorano 2014).

**Descripción de la metodología.** El acrónimo DRASTIC se deriva de las iniciales en inglés de los siete parámetros que la metodología utiliza, D (“depth to wáter”): profundidad del nivel freático, R (“net recharge”): recarga neta, A (“aquifer media”): tipo de material de la zona saturada, S (“soil media”): tipo de suelo de la superficie que cubre al manto acuífero, T (“topography”): topografía, I (“vadose zone impact”): tipo de material de la zona de vadosa y C (“hydraulic conductivity”): conductividad hidráulica del acuífero.

Esta metodología posee tres componentes principales: índices de ponderación, valores y valores típicos. El índice de ponderación, que va en un rango de 1 a 5, se da a cada parámetro de acuerdo a su influencia en la contaminación del manto acuífero, siendo 5 el índice dado al parámetro con mayor influencia y 1 al de menor (Cuadro 1).

Cuadro 1. Índices de ponderación para los parámetros que determinan el transporte de contaminantes al manto acuífero con base en su influencia en la contaminación del mismo.

<b>Parámetro</b>	<b>Índice de ponderación (W)</b>
Profundidad del manto acuífero	5
Recarga neta del manto acuífero	4
Tipo de material del manto acuífero	3
Tipo de suelo de la superficie	2
Topografía	1
Tipo de material de la zona de vadosa	5
Conductividad hidráulica	3

Fuente: Aller *et al.* 1987.

Los valores, que van de 1 a 10, se asignan a los parámetros D, R, T y C de acuerdo a rangos numéricos establecidos por la influencia de los mismos en la contaminación del manto acuífero. Por ejemplo, en el parámetro (D) se le asigna un valor de 10 a datos de profundidad que se encuentren en un rango de 1-1.64 metros, ya que a menor profundidad hay una mayor vulnerabilidad del manto acuífero a ser contaminado, por lo tanto entre mayor es la influencia en la contaminación mayor es el valor que reciben los datos de cada parámetro. Por otro lado, los parámetros A, S e I, al no poder asignarles un valor en base a una clasificación numérica, se les asigna un valor típico, el cual va de 1-10 de acuerdo a las características de los mismos y su influencia en la vulnerabilidad de contaminación del manto subterráneo.

En la presente investigación, la información obtenida para cada parámetro, se extrapoló para toda el área de estudio mediante la herramienta “Kriging” del programa ArcGIS® 9.3. Posteriormente, con ayuda de la herramienta “Reclassify” del mismo programa, se reclasificó las capas creadas de los 7 parámetros de acuerdo a los valores y valores típicos mencionados anteriormente. El tamaño de pixel seleccionado fue de 10 metros por lado.

Una vez obtenidas las capas reclasificadas de cada parámetro y en formato raster se aplicó la ecuación que establece la metodología DRASTIC para determinar los índices de vulnerabilidad de contaminación de la zona de estudio

$$I_v = D_{Ip}D_W + R_{Ip}R_W + A_{Ip}A_W + S_{Ip}S_W + T_{Ip}T_W + I_{Ip}I_W + C_{Ip}C_W \quad [1]$$

Donde:

- $I_v$  = índice de vulnerabilidad
- $I_p$  = índice de ponderación de cada parámetro.
- $W$  = valor o valor típico dado de acuerdo a los rangos establecidos para cada parámetro.

La nueva capa creada se reclasificó mediante rangos establecidos (Cuadro 2), obteniendo como resultado final una capa de la zona de estudio en la cual se puede identificar los diferentes grados de vulnerabilidad presentes y sus respectivas zonas (Figura 2).

Cuadro 2. Grado de vulnerabilidad a contaminación de aguas subterráneas de acuerdo a su índice de vulnerabilidad.

<b>Índice de vulnerabilidad</b>	<b>Grado de vulnerabilidad</b>
<50	Muy baja
51-100	Baja
101-150	Moderada
151-200	Alta
>200	Muy alta

Fuente: Aller *et al.* 1987.

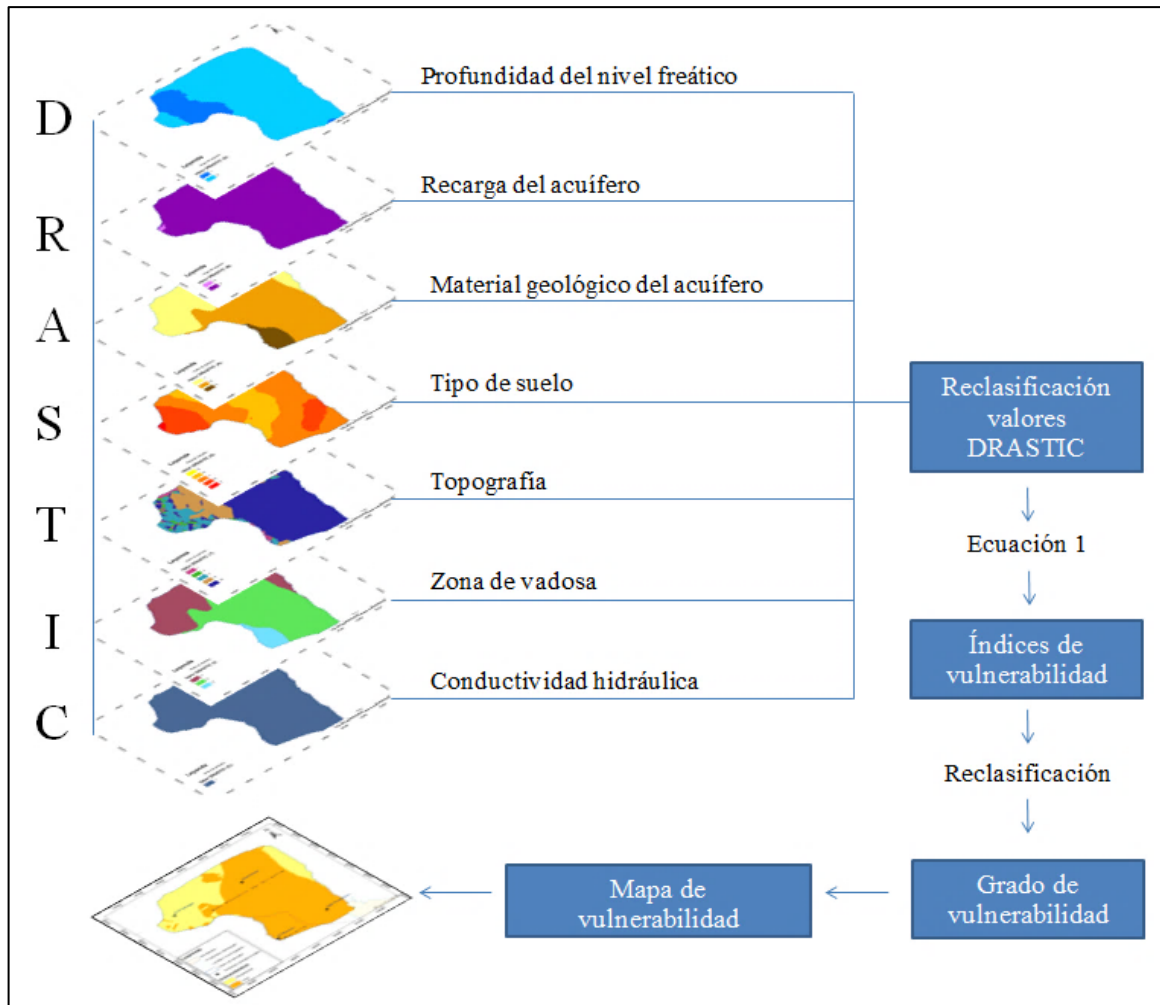


Figura 2. Obtención del mapa de vulnerabilidad a contaminación de aguas subterráneas a través de los siete parámetros que determinan el transporte de contaminantes al manto acuífero.

**Profundidad del nivel freático (D).** La distancia entre la superficie de la tierra y el manto acuífero es un factor significativo, ya que controla el tiempo en el cual los contaminantes superficiales pueden alcanzar las aguas subterráneas. Es así que, entre menor es la profundidad del manto acuífero mayor es su vulnerabilidad a ser contaminado (Aller *et al.* 1987).

Para obtener este parámetro se midió la profundidad del nivel freático de 50 pozos de agua distribuidos en toda el área de estudio mediante un medidor de profundidad de agua Testwell Instruments® WLM Series. Las coordenadas de los pozos muestreados fueron obtenidas y registradas mediante un GPS (Garmin eTrex 10®) (Figura 3).

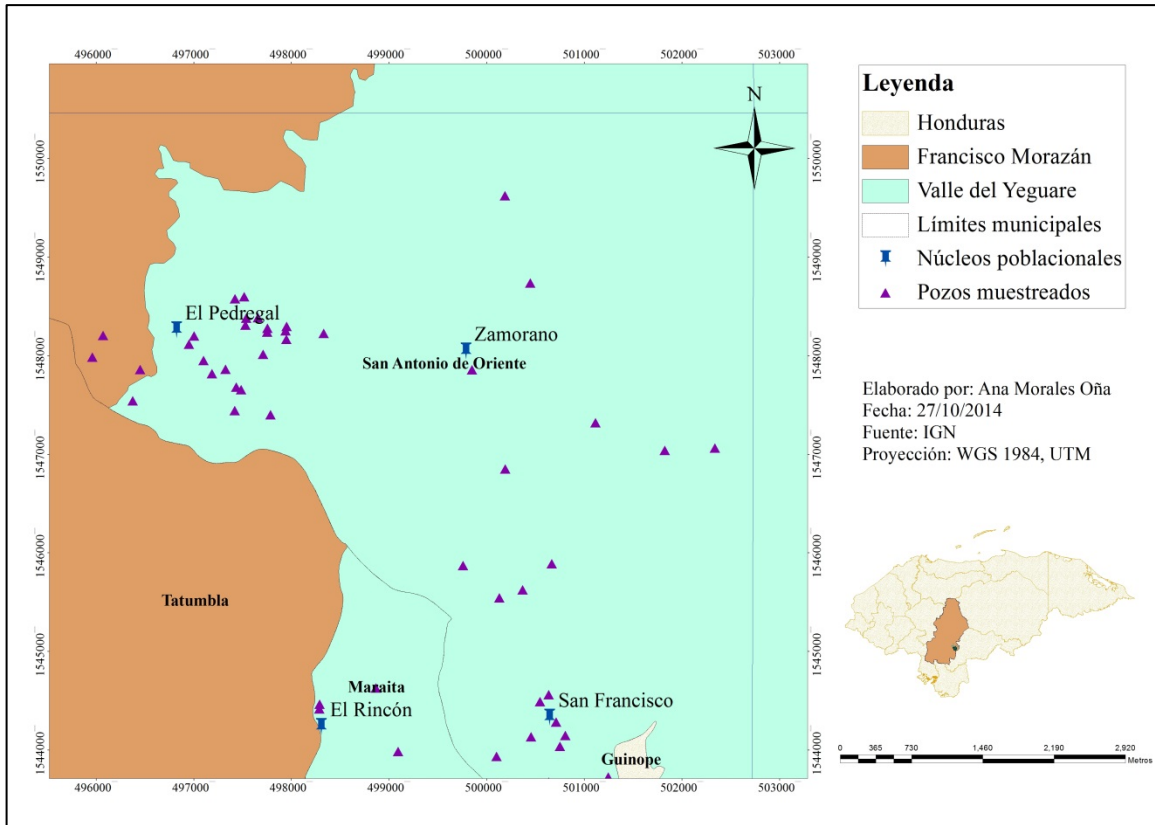


Figura 3. Ubicación geográfica de los pozos en los cuales se llevó a cabo la medición de profundidad de nivel freático en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutpe, San Francisco y El Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Francisco Morazán, Honduras, 2014.

Una vez obtenidos los datos de profundidad se interpoló la información para toda el área y se reclasificó la capa creada (Cuadro 3).

Cuadro 3. Valor DRASTIC asignado de acuerdo a la profundidad del nivel freático.

Rango (m)	Valor
0-1.64	10
1.64-4.92	9
4.92-9.84	7
9.84-16.40	5
16.40-24.61	3
24.61-32.81	2
>32.81	1

Fuente: Aller *et al.* 1987.

**Recarga del manto acuífero (R).** La recarga es la cantidad de agua disponible en la superficie del suelo que se infiltra a través de la zona no saturada y se acumula por debajo del nivel freático (Firat y Gütlekin 2013). La tasa de infiltración varía dependiendo, entre otros factores, de la textura de suelo. En suelos arcillosos la infiltración es inferior ( $10^{-9}$ - $10^{-6}$  cm.s<sup>-1</sup>) comparando con suelos de texturas arenosas, en los que su cantidad de espacios porosos permite que el agua infiltre a mayores tasas ( $10^{-3}$ - $10^{-1}$  cm.s<sup>-1</sup>) (Fetter 2001). La recarga representa el principal factor determinante del transporte de los contaminantes hacia el manto acuífero, por lo que zonas con suelos de texturas gruesas son más propensas a contaminación de aguas subterráneas que zonas con texturas finas (Ckkraborty *et al.* 2007).

Para determinar la recarga de la zona de estudio se utilizó la metodología propuesta por Schosinsky y Losilla (2000), la cual se basa en datos de pendiente topográfica, cobertura vegetal, intercepción de lluvia, textura de suelo y precipitación para conocer la fracción de lluvia que se infiltra hacia el acuífero en un periodo de tiempo determinado. Para este modelo se asume que la fracción de lluvia interceptada por el follaje corresponde al 12% de la lluvia anual (Ecuación 2) y que precipitaciones mensuales inferiores a 5 mm no generan infiltración al ser interceptadas por el follaje. Además no se analiza la evaporación de las gotas de agua, por considerarse que al estar lloviendo la atmósfera dispone de una humedad relativa saturada o casi saturada, lo que limita la evaporación (Schosinsky y Losilla 2000).

$$I = (1 - K_i) \times C \times P \quad [2]$$

$$C = (K_p + K_v + K_{fc}) \quad [3]$$

$$I = 0.88 \times C \times P \quad [4]$$

Donde:

C (tanto por uno) = Coeficiente de infiltración

I (mm×año<sup>-1</sup>) = Infiltración

P (mm)= Precipitación media anual

K<sub>i</sub> (tanto por uno) = 0.12, fracción interceptada por el follaje

K<sub>p</sub> (tanto por uno) = Coeficiente de infiltración por efecto de pendiente

K<sub>v</sub> (tanto por uno) = Coeficiente de infiltración por efecto de cobertura vegetal

K<sub>fc</sub> (tanto por uno) = Coeficiente de infiltración por textura de suelo

Los datos correspondientes a pendiente topográfica se obtuvieron mediante las curvas a nivel de San Antonio de Oriente, digitalizadas por la Unidad de Sistemas de Información Geográfica de Zamorano, la distancia entre curvas es de 20 metros. Mediante el programa ArcGis® 9.3 se creó la capa de pendientes topográficas del área de estudio y se la reclasificó (Cuadro 4) con el fin de obtener el coeficiente de infiltración por efecto de la pendiente topográfica (K<sub>p</sub>).



Cuadro 4. Coeficientes de infiltración ( $K_p$ ) de acuerdo a pendiente topográfica.

<b>Rango de pendiente (%)</b>	<b><math>K_p</math></b>
0.02-0.06	0.30
0.06-0.4	0.20
0.4-2	0.15
2-7	0.10
>7	0.06

Fuente: Schosinsky y Losilla 2000.

La información de cobertura vegetal de la zona de estudio se adquirió a partir de la investigación desarrollada por Vélez (2013) e imágenes satelitales de Google Earth® validadas en campo. Una vez obtenidos los datos se creó la capa correspondiente a cobertura vegetal, la cual se reclasificó (Cuadro 5) para obtener el coeficiente de infiltración por efecto de este parámetro.

Cuadro 5. Coeficientes de infiltración ( $K_v$ ) de acuerdo a la cobertura vegetal.

<b>Cobertura vegetal</b>	<b><math>K_v</math></b>
Cobertura con pasto menor al 50%	0.09
Terrenos cultivados	0.10
Cobertura con pastizal	0.18
Bosques	0.20
Cobertura con zacate más de 75%	0.21

Fuente: Schosinsky y Losilla 2000.

Los datos de texturas de suelo se obtuvieron tanto de fuentes primarias como secundarias, mediante barrenaciones en campo e información de investigaciones previas realizadas en el área de estudio (Velásquez 2007). Dichos datos se interpolaron y reclasificaron (Cuadro 6) para obtener el coeficiente de infiltración por textura de suelo ( $K_{fc}$ ).

Cuadro 6. Coeficientes de infiltración ( $K_{fc}$ ) de acuerdo a la textura del suelo

<b>Textura del suelo</b>	<b><math>K_{fc}</math></b>
Arcilla compacta impermeable.	0.10
Combinación de limo y arcilla.	0.15
Suelo limo arenoso no muy compacto.	0.20

Fuente: Schosinsky y Losilla 2000.

Dada la variabilidad de usos y coberturas del área de estudio, se complementó la información para reclasificar a los mismos mediante los coeficientes propuestos por el método de “Recarga Acuífera Subterránea” (Cuadro 7). Este método, RAS por sus siglas en español, fue desarrollado en el año 2005 por el proyecto de Fortalecimiento de la Gestión Ambiental de El Salvador (FORGAES) y la Unión Europea (2005) basándose en los principios de Schosinsky y Losilla para determinar la recarga de un acuífero.

Cuadro 7. Coeficientes de infiltración propuestos por cobertura vegetal (Kv) de acuerdo al método Recarga Acuífera Subterránea.

<b>Cobertura</b>	<b>Kv</b>
Tejido urbano, zonas comerciales	0.30
Árboles frutales	0.20
Bosques	0.20
Vegetación arbustiva baja	0.20
Hortalizas	0.15
Cultivos anuales	0.15
Bosques de coníferas	0.15
Zonas verdes urbana	0.15
Pastos cultivados	0.10
Lagos, lagunas	0.00

Fuente: FORGAES 2005.

Una vez que se dispuso de las capas correspondientes a los coeficientes de infiltración por pendiente, cobertura vegetal y textura de suelo se aplicaron las ecuaciones 3 y 4 para determinar la fracción de lluvia que infiltra anualmente hacia el acuífero, es decir la recarga potencial. La precipitación media anual fue calculada con base en registros de 66 años (1942-2008) de una estación meteorológica situada en la EAP Zamorano. La nueva capa obtenida fue reclasificada acuerdo a los rangos establecidos por la metodología DRASTIC (Cuadro 8).

Cuadro 8. Valor DRASTIC asignado de acuerdo a la recarga del acuífero.

<b>Recarga del acuífero (mm)</b>	<b>Valor DRASTIC</b>
0-51	1
51-102	3
102-178	6
178-254	8
>254	9

Fuente: Aller *et al.* 1987.

**Tipo de material de la zona saturada (A).** El tipo de material del acuífero corresponde a la roca consolidada y no consolidada que funciona como depósito del agua que se infiltra desde la superficie del suelo (Ersoy y Gültekin 2013). Entre más grande el tamaño de los materiales y más fracturas o aberturas existan dentro de los acuíferos, el potencial de contaminación será mayor debido a su menor capacidad de atenuación (Rahman 2008).

Los datos correspondientes a este parámetro fueron obtenidos a partir del Mapa Geológico de Honduras, digitalizado en el año 1998 por el Instituto Geográfico Nacional. La escala del mapa es de 1:50000. A los diferentes materiales geológicos encontrados en la zona de estudio se les asignó un valor de acuerdo a sus propiedades (Cuadro 9).

Cuadro 9. Valor típico DRASTIC asignado de acuerdo para los tipos de material geológico de acuífero.

<b>Tipo de material geológico</b>	<b>Valor típico DRASTIC</b>
Arcillas, margas, limos	2
Ígneas/metamórficas	3
Ígneas/metamórficas alteradas	4
Alternancia de areniscas, arcillas y calizas	6
Areniscas masivas	6
Calizas masivas	6
Arenas, gravas y conglomerados	8
Volcánicas	9
Calizas carstificadas	10

Fuente: Aller *et al.* 1987.

**Tipo de suelo de la superficie que cubre al manto acuífero (S).** El suelo es la capa superficial de la zona no saturada que se caracteriza por las actividades biológicas dadas en la misma (Ckakraorty *et al.* 2007). La contaminación del manto acuífero está influenciada por las características del suelo, especialmente por las texturas que lo conforman. La presencia de texturas finas como arcillas y limos reduce la permeabilidad del suelo, haciendo más lento el transporte de contaminantes al acuífero. Por otro lado, suelos con texturas gruesas tales como arena, aceleran el transporte de contaminantes al acuífero, aumentando así su vulnerabilidad a ser contaminado (Rahman 2008). Con el fin de evaluar la vulnerabilidad de contaminación de aguas subterráneas, se considera una capa de suelo con un espesor promedio inferior o igual a 1.83 metros (Aller *et al.* 1987).

La información correspondiente a los tipos de suelo de la Escuela Agrícola Panamericana se obtuvo de la tesis de Velásquez (2007). En cuanto a El Pedregal de Cacalutepé, San Francisco y El Rincón, la información de los diferentes tipos de suelo se obtuvo mediante barrenaciones, las cuales fueron llevadas a cabo siguiendo una línea base establecida sobre las carreteras y senderos existentes en el área de estudio. En cada barrenación se describió el espesor y textura de los horizontes de suelo presentes. El total, se analizaron 62 perfiles de suelos distribuidos en toda el área de estudio (Figura 4).

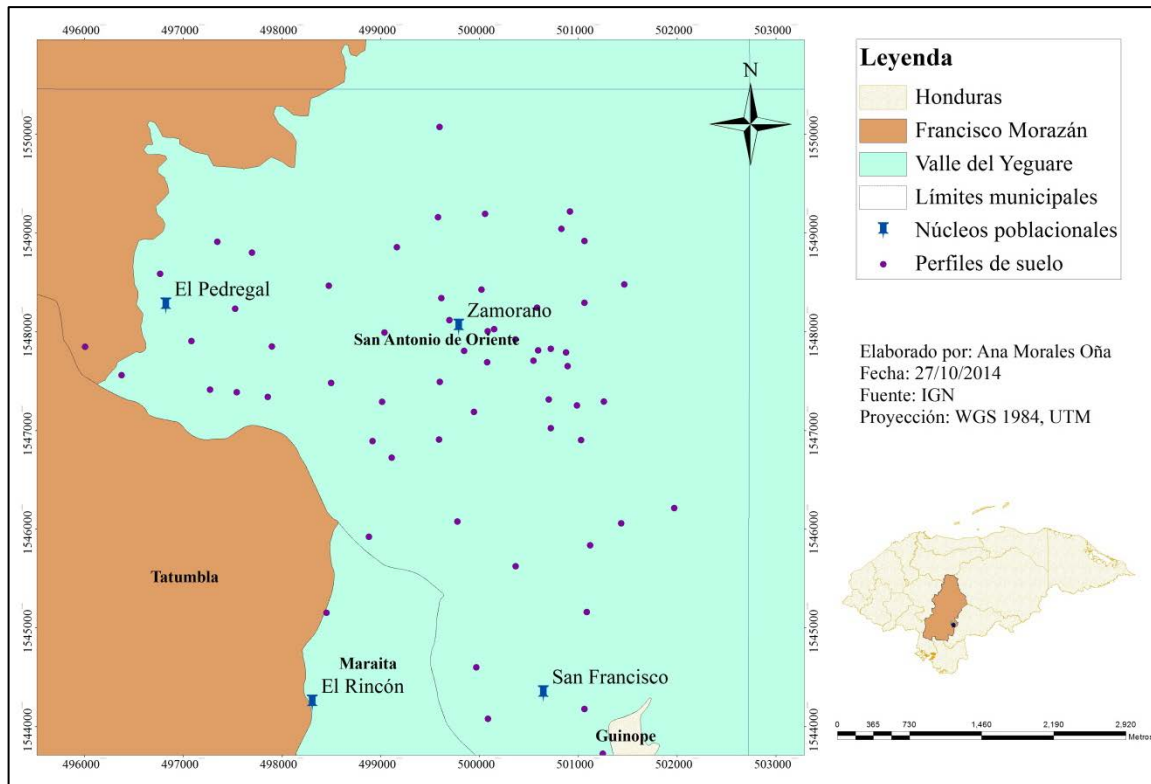


Figura 4. Ubicación geográfica de los perfiles de suelo en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepé, San Francisco y El Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Francisco Morazán, Honduras, 2014.

Los datos obtenidos se interpolaron y de acuerdo al tipo de suelo se asignó un valor típico determinado de acuerdo a la metodología DRASTIC (Cuadro 10).

Cuadro 10. Valor típico DRASTIC asignados de acuerdo a los diferentes tipos de suelo.

<b>Tipos de suelo</b>	<b>Valor típico DRASTIC</b>
Arcilla no expansiva ni agregada	1
Suelo orgánico	2
Franco arcilloso	3
Franco limoso	4
Franco	5
Franco arenoso	6
Arcilla expansiva y/o agregada	7
Turba	8
Arena	9
Grava	10
Suelo delgado o ausente	10

Fuente: Aller *et al.* 1987.

**Topografía del área de estudio (T).** La topografía es la variación de la pendiente de la superficie de la tierra. Esta influye en la extensión de la escorrentía y su infiltración. Áreas con pendientes altas transforman rápidamente la precipitación en escorrentía, reduciendo así la infiltración. Por otro lado, en áreas planas la precipitación tiende a anegarse, lo que favorece la infiltración y aumenta la vulnerabilidad de contaminación del manto acuífero (Rahman 2008).

La capa correspondiente a este parámetro se obtuvo a partir de las curvas a nivel de San Antonio de Oriente (Unidad de SIG Zamorano 2006) las cuales fueron previamente utilizadas para el cálculo de recarga del acuífero. Una vez que se dispuso de la capa de pendientes del área de estudio fue reclasificada (Cuadro 11).

Cuadro 11. Valor DRASTIC asignado de acuerdo a la pendiente topográfica (%).

<b>Rango de pendiente (%)</b>	<b>Valor DRASTIC</b>
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

Fuente: Aller *et al.* 1987.

**Tipo de material de la zona de vadosa o no saturada (I).** La zona de vadosa es la capa no saturada de agua que se encuentra por encima del nivel freático. La textura de esta zona determina el tiempo que los contaminantes se tardan en llegar al manto acuífero. Texturas gruesas poseen una alta permeabilidad, lo que favorece a que exista una mayor

vulnerabilidad de contaminación de aguas subterráneas mientras que en zonas de texturas finas, su baja permeabilidad limita el paso de agua contaminada al manto acuífero, disminuyendo así su vulnerabilidad (Ckakraorty *et al.* 2007).

La información correspondiente al material geológico de la zona no saturada fue extraída del Mapa Geológico de Honduras (Instituto Geográfico Nacional 1998) el cual dispone de una escala de 1:50000. Una vez extraída la capa de la zona de estudio correspondiente a este parámetro, fue reclasificada (Cuadro 12).

Cuadro 12. Valor DRASTIC asignado de acuerdo a los diferentes tipos de material geológico.

<b>Tipo de material geológico</b>	<b>Valor típico DRASTIC</b>
Capa confinada	1
Limo/arcilla	3
Esquistos, pizarras	3
Calizas	6
Areniscas	6
Alternancia de calizas, areniscas y arcillas	6
Arenas y gravas con contenido arcilla y limo	6
Metamórficas/ígneas	4
Arenas y gravas	8
Volcánicas	9
Calizas carstificadas	10

Fuente: Aller *et al.* 1987.

**Conductividad hidráulica del acuífero (C).** Este factor hace referencia a la tasa a la cual el agua se moviliza a través del perfil de suelo. Se ve influenciada por la cantidad de espacios porosos de las texturas que componen el suelo. La tasa a la cual se moviliza el agua es la misma tasa a la cual se transportan los contaminantes, por lo cual a mayor conductividad mayor vulnerabilidad del acuífero a ser contaminado (Aller *et al.* 1987).

La conductividad hidráulica del área de estudio, se estimó a partir de la textura de los 62 perfiles de suelos de la zona de estudio mediante el programa SPAW Hidrology, el cual fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés) en conjunto con el Departamento de Ingeniería de Sistemas Biológicos de la Universidad estatal de Washington. Una vez estimados los datos de conductividad hidráulica, se elaboró una capa de dicho parámetro y se reclasificó (Cuadro 13).

Cuadro 13. Valor típico DRASTIC asignado de acuerdo a la conductividad hidráulica.

Conductividad hidráulica (m.día <sup>-1</sup> )	Valor típico DRASTIC
<4	1
4-12	2
12-28	4
28-40	6
40-80	8
>80	10

Fuente: Aller *et al.* 1987.

**Validación de los resultados.** Con el objetivo de validar la información proporcionada por el mapa de vulnerabilidad de contaminación de aguas subterráneas, se llevó a cabo un análisis de calidad de agua en 39 pozos distribuidos en el área de estudio (Figura 5). Los parámetros evaluados fueron conductividad ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) y concentración de nitratos ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{NO}_3^-$ ), siendo el último el más importante al ser un parámetro clave en la determinación del grado de contaminación en el agua (Hind y Alraggad 2010). Los nitratos son altamente solubles en agua y en la zona de estudio se originan de actividad agrícola y pecuaria, por lo que su presencia en el agua pudiera asociarse a la presencia de otros contaminantes presentes en la zona. Por otro lado la conductividad eléctrica es un parámetro que se puede asociar a la presencia de otros contaminantes en el agua.

El agua contaminada con concentraciones de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) superiores a la recomendada por la OMS ( $45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) genera un gran riesgo a la salud humana. Esto debido a que el estómago es capaz de transformar nitratos a nitritos, los cuales al ser absorbidos por la sangre convierten a la hemoglobina en metahemoglobina, inhibiendo así el transporte de oxígeno a la sangre. De igual manera los nitratos pueden ser convertidos a nitrosaminas y nitrosamidas, compuestos cancerígenos peligrosos para los seres humanos.

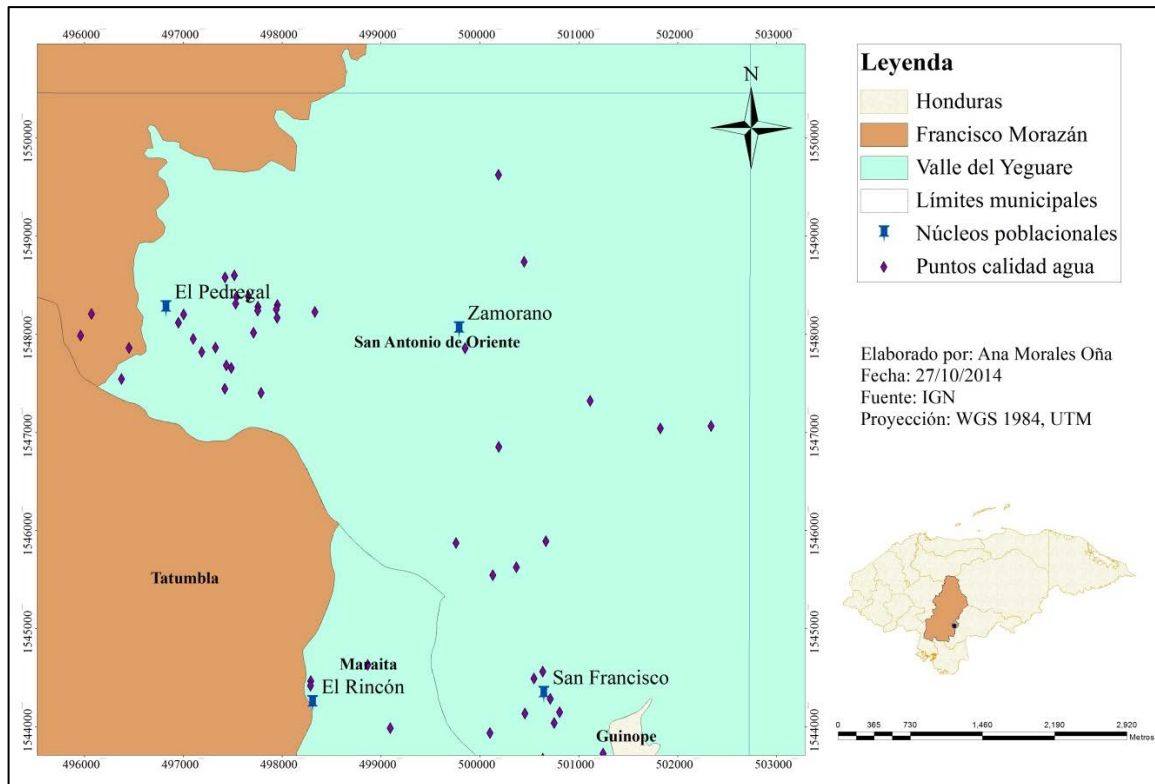


Figura 5. Ubicación geográfica de los pozos en los cuales se llevó a cabo la medición de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y conductividad ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepé, San Francisco y El Rincón, Francisco Morazán, Honduras, 2014.

**Análisis de sensibilidad.** Para conocer en qué grado, el mapa de vulnerabilidad de contaminación refleja la realidad, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad. Para esto se utilizó la herramienta calculadora raster del programa ArcGIS® 9.3 con el fin de multiplicar las capas correspondientes a la distribución de nitratos y la de índices de vulnerabilidad de contaminación. La nueva capa generada mostró el porcentaje en el cual coinciden las dos capas.



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Profundidad del nivel freático (D).** La superficie exacta del área en estudio fue de 24.18 km<sup>2</sup>, en la que la profundidad promedio del nivel freático fue 4.39 m, siendo 0.58 y 13.29 los valores mínimo y máximo respectivamente. En la zona del caserío El Pedregal de Cacalutepe se encontraron las mayores profundidades; mientras que en San Francisco, el Rincón y el sureste de los terrenos de la parte plana de Zamorano se encontraron los más superficiales (Figura 6). Dadas estas cifras y considerando que la distancia entre la superficie de la tierra y el manto acuífero controla el tiempo en el cual los contaminantes superficiales pueden alcanzar las aguas subterráneas (Aller *et al.* 1987), toda el área de estudio obtuvo los valores DRASTIC más altos (9 y 7). Esto indica que con base en el parámetro de profundidad del nivel freático, el manto acuífero de la zona de estudio es vulnerable a contaminación, especialmente en lugares con profundidades inferiores a 4.94 m, es decir el 84% del área total.

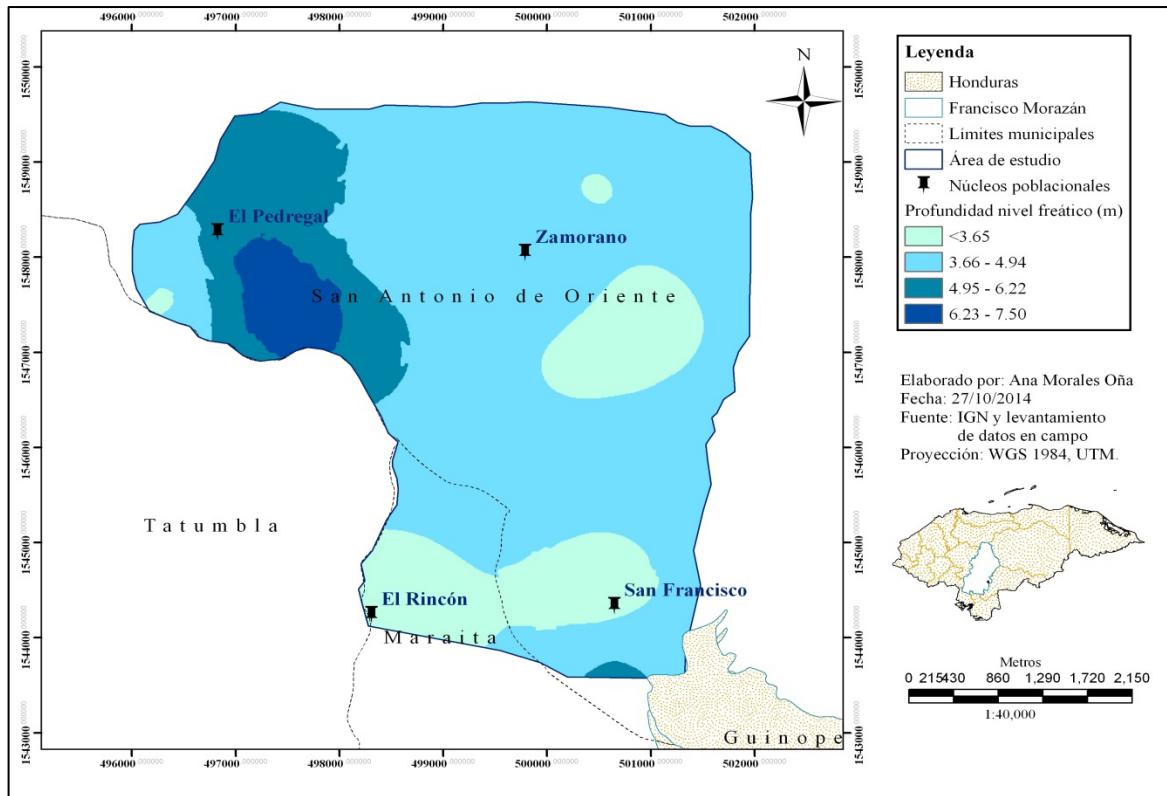


Figura 6. Distribución espacial de la profundidad del nivel freático en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepe, San Francisco y el Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Francisco Morazán, Honduras, 2014.

**Recarga potencial del acuífero (R).** Los rangos de recarga potencial anual que en conjunto abarcan el mayor porcentaje del área de estudio (30% y 46%) van de 385 a 535 mm y 536 a 685 mm respectivamente (Figura 7). Pese a que los suelos presentes en la zona poseen texturas finas que limitan la infiltración, los valores de recarga obtenidos se ven influenciados por la pendiente topográfica del área de estudio, ya que al estar ubicada dentro de un valle, cuando hay precipitación el agua tiende a infiltrarse más en comparación con lugares de pendientes pronunciadas. Por otro lado la cobertura vegetal, en su mayoría cultivos anuales (Vélez 2013), también favorece la infiltración.

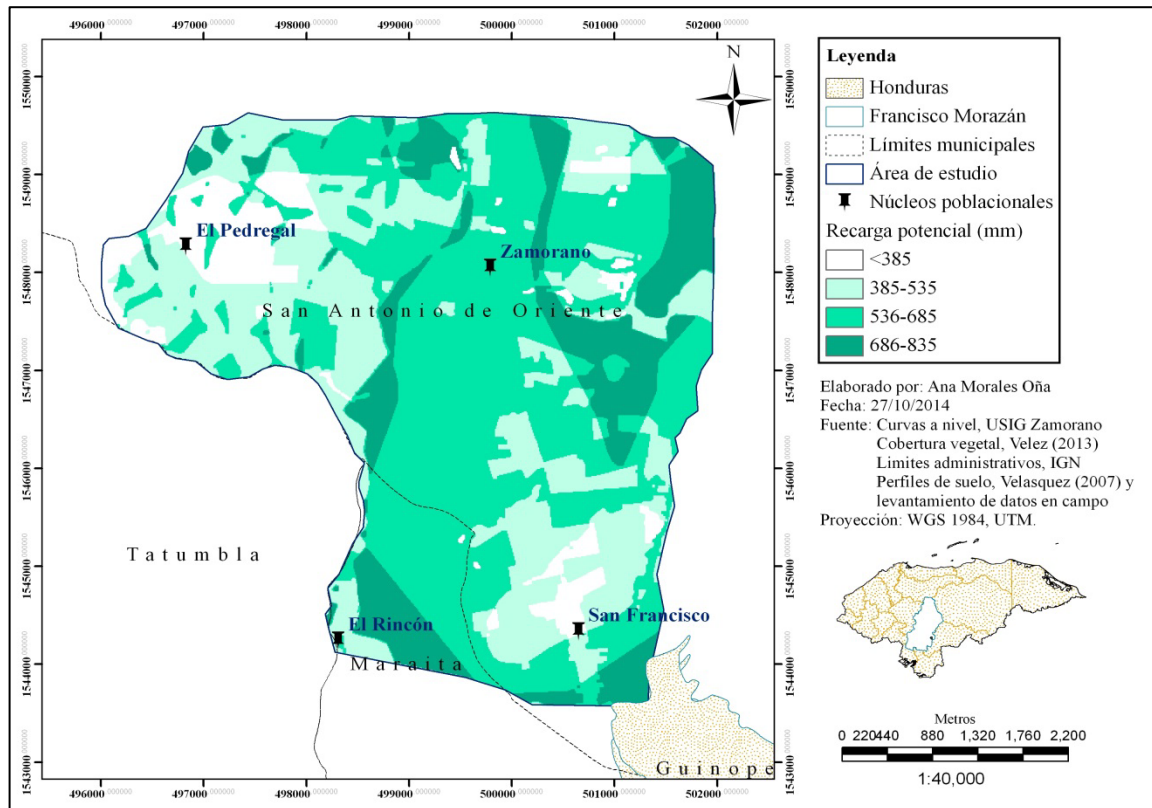


Figura 7. Distribución espacial de la recarga potencial anual del acuífero en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepé, San Francisco y el Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Francisco Morazán, Honduras, 2014.

**Geología del acuífero (A) (I).** En el área de estudio se identificaron tres tipos de rocas: aluviones, tobas y basaltos (Figura 8), las cuales funcionan como depósito del agua que se infiltra desde la superficie del suelo. Al analizar el acuífero libre, estos materiales también conforman la zona de vadosa que se ubica por encima del nivel freático. El material geológico predominante es el aluvión el cual cubre alrededor del 65% (15.62 km<sup>2</sup>) de toda el área de estudio, abarcando al caserío de San Francisco y los terrenos conocidos como Zona III, Colindres el Este del Lote A y San Nicolas dentro de la E.A.P. Zamorano. Al caracterizarse por una alta porosidad (Gascón *et al.* 2005), la zona conformada por aluviones posee un mayor potencial de contaminación debido a su menor capacidad de atenuación cuando el agua ingresa. Este hecho hace que tanto el parámetro de material del

acuífero así como el material de la zona no saturada reciban valores DRASTIC ocho y seis respectivamente (Rahman 2008) al presentar características que hacen al acuífero más vulnerable a contaminación. El segundo material geológico predominante, con un 30% (7.27 km<sup>2</sup>) de la superficie total, corresponde a las tobas las cuales se componen de cenizas volcánicas y conglomeradas (SANAA e IGN 1995). Debido a su permeabilidad baja y media, las zonas que contienen este tipo de material son menos vulnerables a contaminación gracias a su mayor capacidad de atenuación, recibiendo valores DRASTIC siete y cuatro para los parámetros de material del acuífero y zona no saturada respectivamente. Finalmente los basaltos constituyen el material menos predominante de la zona (6% aproximadamente), el cual se distribuye en el caserío El Rincón y una parte de San Francisco. En general los basaltos se caracterizan por su permeabilidad secundaria, la cual se genera por las fracturas que poseen en su estructura (Gastón *et al* 2005). Dado que su permeabilidad es alta, el valor DRASTIC que reciben los dos parámetros es nueve respectivamente.

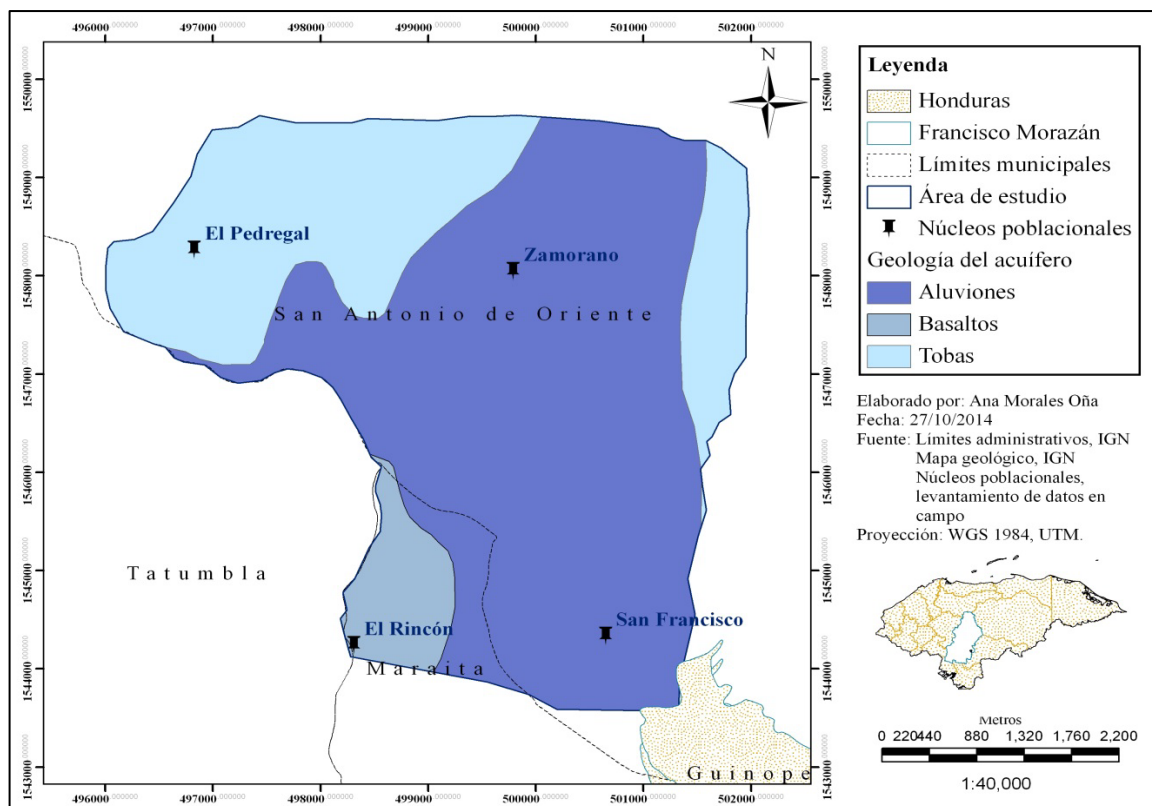


Figura 8. Distribución espacial del material geológico en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepe, San Francisco y el Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Francisco Morazán, Honduras, 2014.

**Tipo de suelo (S).** En cuanto al tipo de suelo, se determinaron cinco clases con base en su limitante hidráulica (Cuadro 14). La clase predominante fue la C, la cual abarcó el 51.55% (12.46 km<sup>2</sup>) del área de estudio, seguida por la clase b con un 9.53% (7.24 km<sup>2</sup>), mientras que la clase a fue la de menor predominancia con 1.57% (0.38 km<sup>2</sup>).

Cuadro 14. Características de las clases de suelos presentes en el área de estudio.

Clases	Descripción	Área (km <sup>2</sup> )	Área de estudio (%)
a	Suelos con ausencia de capa impermeable a lo largo del perfil.	0.38	1.57
b	Suelos con presencia de capa impermeable a los 90 cm de profundidad.	7.24	29.93
c	Suelos con presencia de capa impermeable a los 60 cm de profundidad.	12.46	51.55
d	Suelos con presencia de capa impermeable a los 30 cm de profundidad.	3.98	16.47
e	Suelos con presencia de capa impermeable a lo largo de todo el perfil.	0.11	0.47

A excepción de la clase a, las demás clases están conformadas por un horizonte de suelo compuesto de texturas muy finas (>35% de arcilla) que actúa como una capa impermeable (Figura 9). Esta característica hace que el transporte de contaminantes desde la superficie del suelo hacia el manto acuífero sea más lento en comparación a suelos que no disponen de esta capa (suelos de clase a) (Rahman 2008).

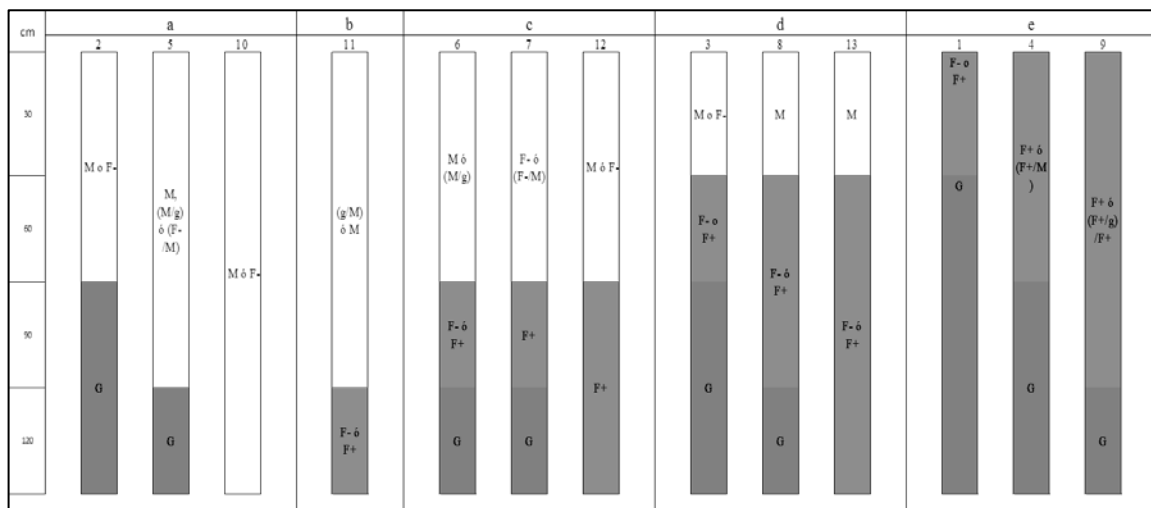


Figura 9. Ubicación del horizonte de suelo que actúa como capa impermeable en las distintas clases de suelo establecidas.

Familia textural: (00-30/30-60)/(60-90/90-120) cm. g:gruesa, M: media, F-: fina, F+: muy fina, G: material parental.

De acuerdo a esto, el 98.23% (23.8 km<sup>2</sup>) del área de estudio es menos vulnerable a contaminación de aguas subterráneas gracias a la presencia de la capa impermeable (Figura 10).

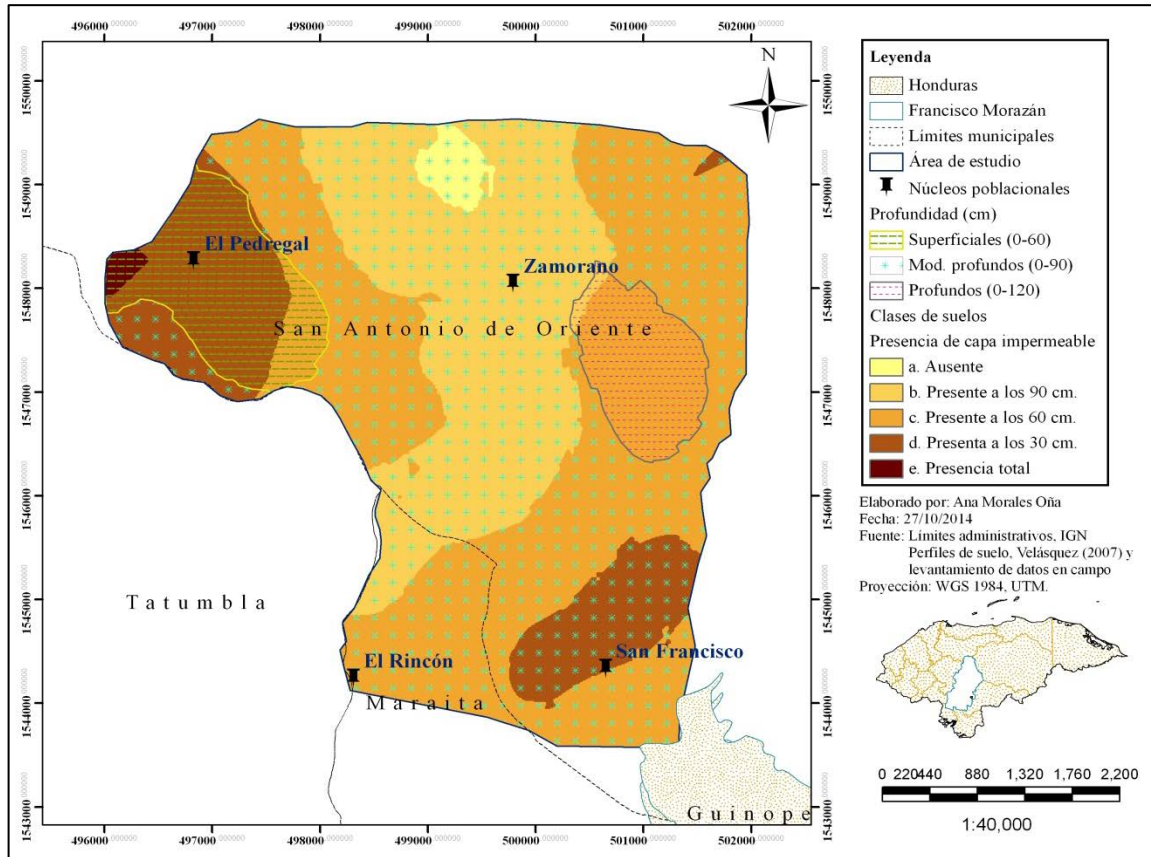


Figura 10. Distribución espacial de los tipos de suelos de acuerdo a su limitante hidráulica en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepé, San Francisco y el Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Francisco Morazán, Honduras, 2014.

**Topografía (T).** Los rangos de pendientes que predominan en el área de estudio van de 0 a 2% y de 2 a 6% con un 61.37% (14.84 km<sup>2</sup>) y 26,67% (6.45 km<sup>2</sup>) del área total respectivamente. Dado que áreas planas favorecen la infiltración, estas zonas obtuvieron los valores DRASTIC más altos (9 y 10) al ser más vulnerables a que los contaminantes ingresen al manto acuífero mediante infiltración (Figura 11). Por el contrario zonas con pendientes superiores a 6%, es decir el 11.96% (2.89 km<sup>2</sup>) del área de estudio, son menos vulnerables a contaminación ya que la precipitación tiende a transformarse en escorrentía, reduciendo así la infiltración (Rahman 2008).



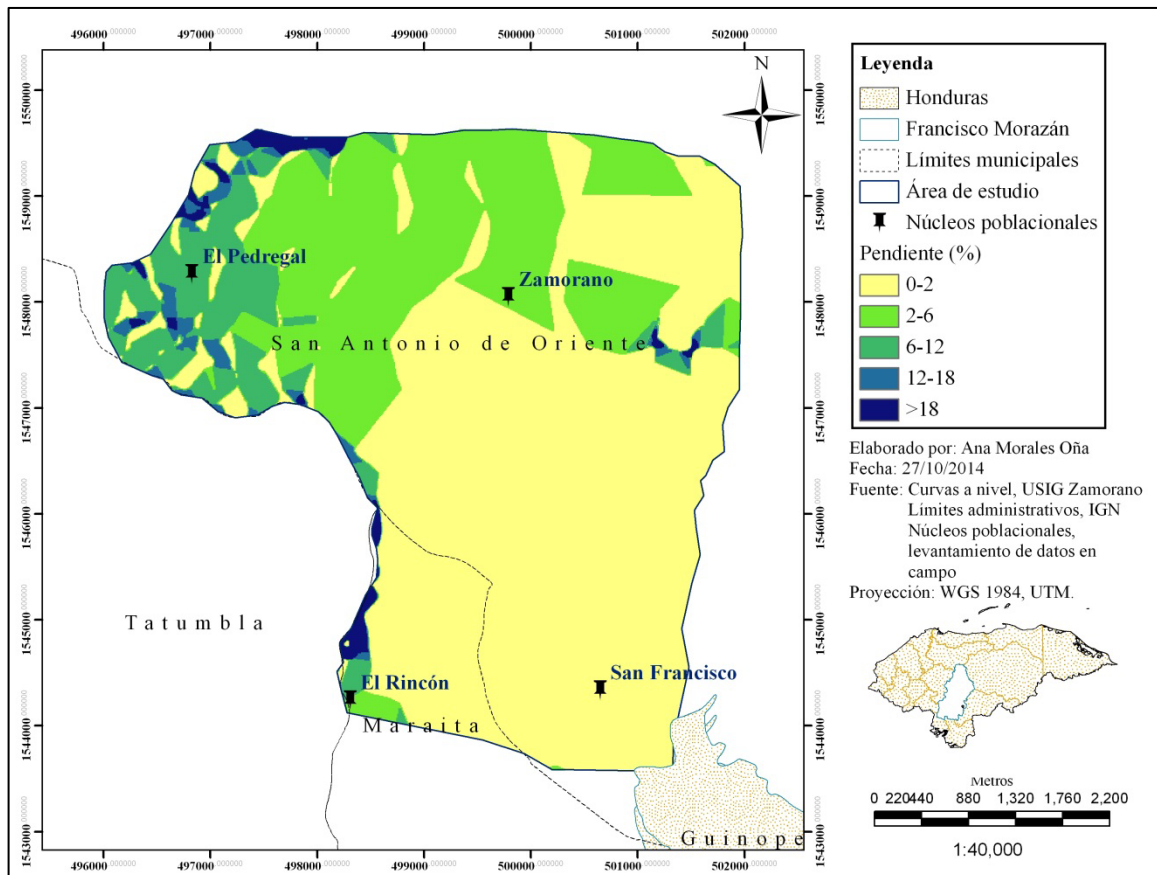


Figura 11. Distribución espacial de las pendientes topográficas (%) en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutpe, San Francisco y el Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Departamento de Francisco Morazán, Honduras, 2014.

**Conductividad hidráulica (C).** La conductividad hidráulica del área de estudio está dada por la textura de los suelos presentes en la misma. Como se mencionó previamente, el 98.23% del área de estudio dispone de suelos, que en algún horizonte poseen texturas finas, las cuales por naturaleza tienen valores bajos de conductividad hidráulica. El valor máximo derivado teóricamente a través de las texturas del suelo fue de 1.51 m por día (Figura 12), por lo cual el valor DRASTIC asignado para este parámetro fue el más bajo (1), ya que a menor conductividad menor vulnerabilidad del manto acuífero a ser contaminado (Aller *et al.* 1987).

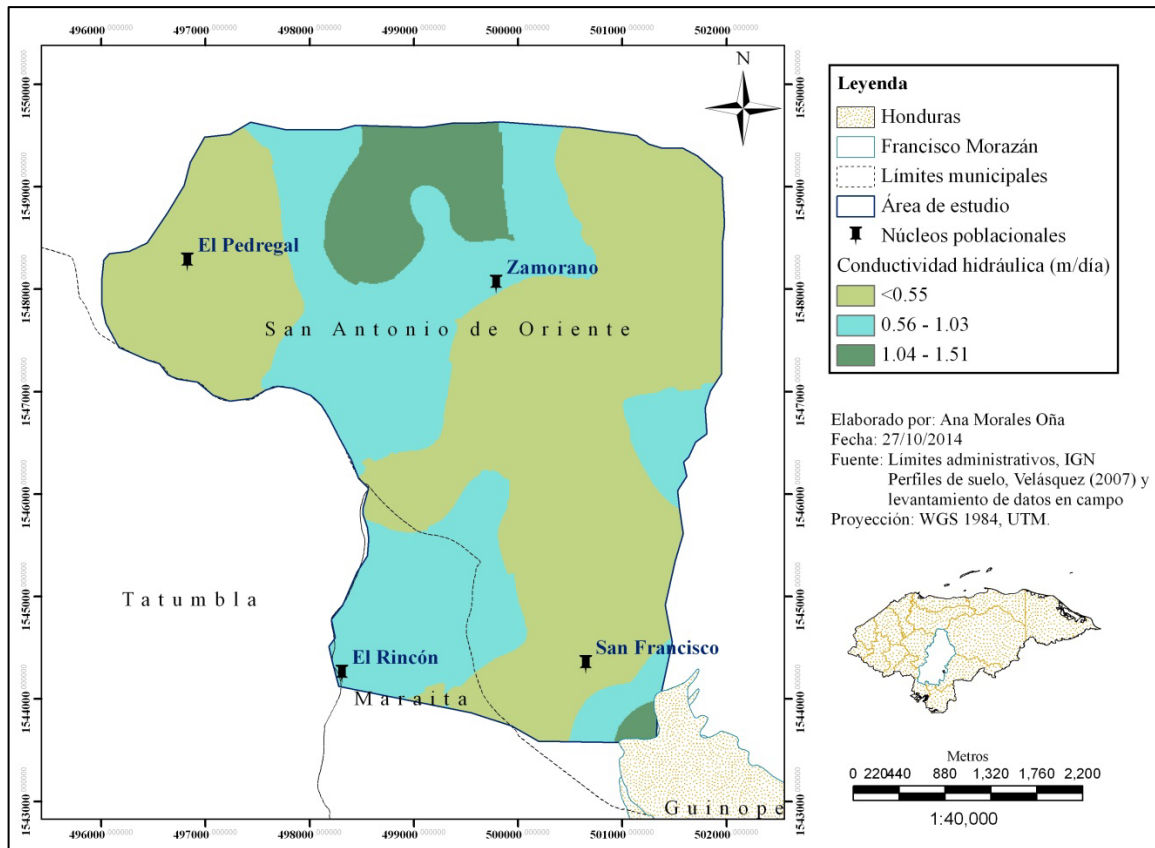


Figura 12. Distribución espacial de la conductividad hidráulica ( $\text{m}\cdot\text{día}^{-1}$ ) con base en la textura de suelo en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepé, San Francisco y el Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Departamento de Francisco Morazán, Honduras, 2014.

Los datos de cada parámetro fueron reclasificados de acuerdo a la metodología DRASTIC para asignarles su valor correspondiente. Una vez que se contó con las siete capas reclasificadas se corrió el modelo mediante el programa ArcGIS® 9.3. Se obtuvo un rango de índices de vulnerabilidad de 128 a 180, siendo 23 y 226 los valores extremos posibles (Aller *et al.* 1987). Al clasificar los índices obtenidos de acuerdo a lo establecido por la metodología DRASTIC se determinaron dos zonas de vulnerabilidad: moderada y alta (Figura 13).

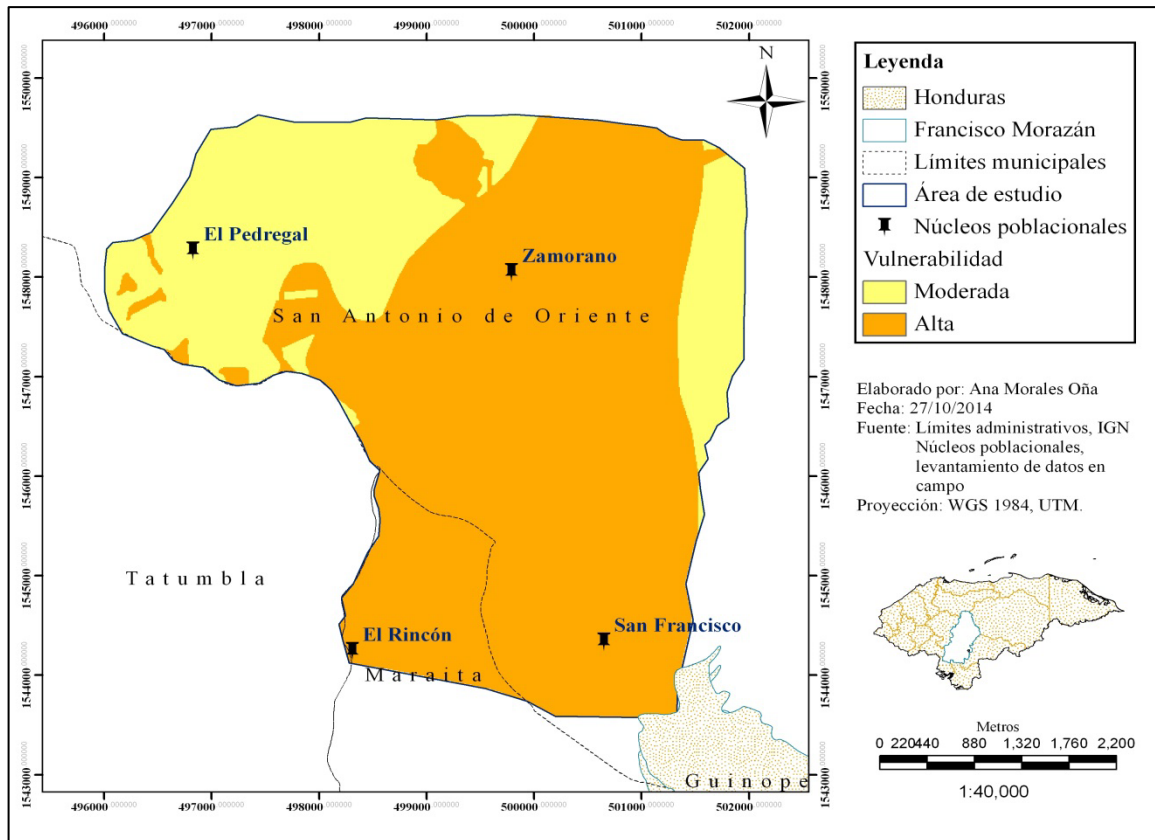


Figura 13. Distribución espacial de la vulnerabilidad de contaminación de aguas subterráneas en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepé, San Francisco y el Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Departamento de Francisco Morazán, Honduras, 2014.

**Validación de los resultados.** La zona de vulnerabilidad moderada abarca el 28.78% del área de estudio (6.96 km<sup>2</sup>), la cual incluye los asentamientos humanos del caserío El Pedregal de Cacalutepé, la zona oeste del Lote A y la zona que colinda al este con los terrenos de Zona III, Colindres y Lote A. Por otro lado la zona de vulnerabilidad alta, con un 71,22% (17.22 km<sup>2</sup>), abarca la mayor parte del área de estudio. Esta zona incluye los caseríos de San Francisco, El Rincón y el sureste de El Pedregal de Cacalutepé, y en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano la parte este del Lote A, Zona III, Colindres y San Nicolás (Figura 14).



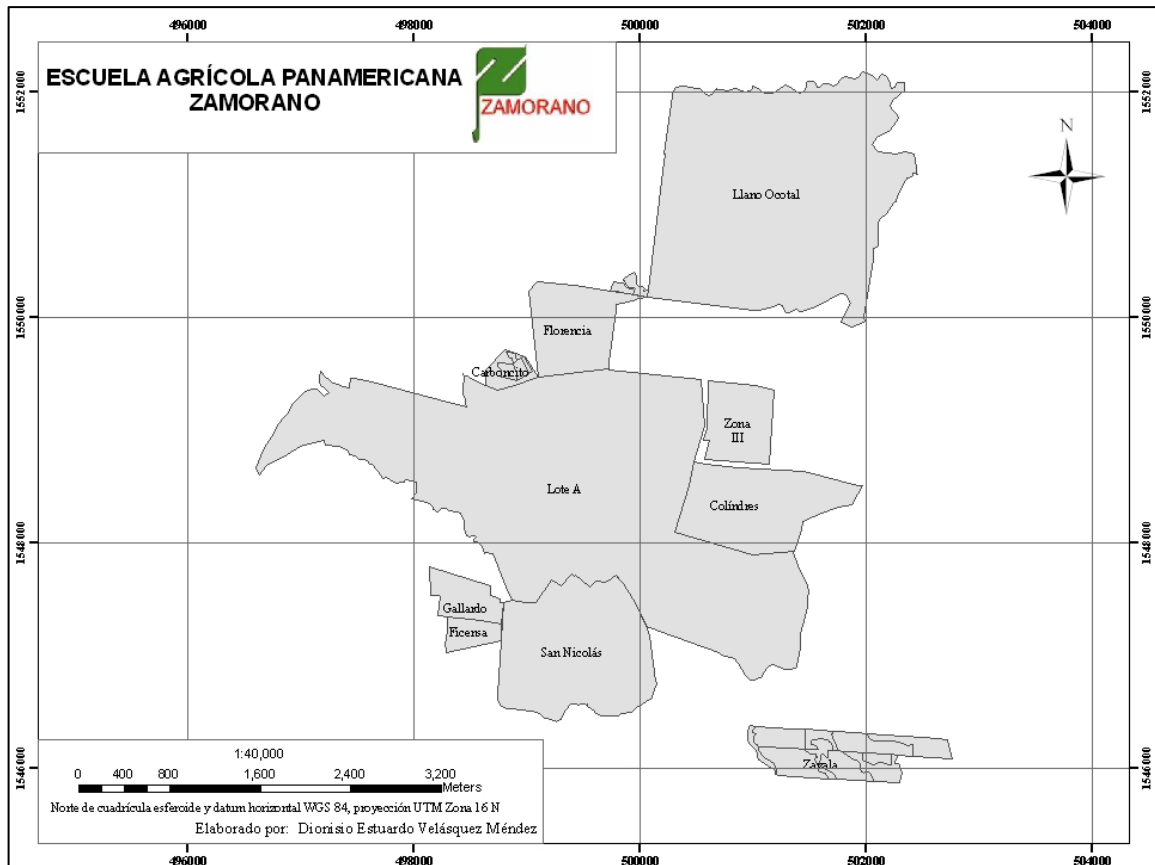


Figura 14. Ubicación geográfica de las áreas que conforman los terrenos de la parte plana de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Departamento de Francisco Morazán, Honduras, 2007.

Fuente: Velásquez 2007.

Los mapas de vulnerabilidad describen el potencial de un acuífero a ser contaminado con base en sus características físicas (Jasém *et al* 2010). Para conocer qué tanto refleja la realidad se llevó a cabo un análisis de sensibilidad, el cual entre otras funciones se aplica para la comprobación de la solidez de los resultados de un modelo o sistema en presencia de la incertidumbre. Este análisis indicó que el mapa de vulnerabilidad obtenido coincide en un 83% con el mapa de distribución de nitratos del área de estudio. Se puede apreciar como la zona en la cual se ubica Zamorano, El Rincón y San Francisco posee concentraciones de nitratos más elevadas ( $5-15 \text{ mg.L}^{-1} \text{ NO}_3^-$ ) en sus aguas subterráneas en comparación con la zona de El Pedregal de Cacalutepé ( $0-5 \text{ mg.L}^{-1} \text{ NO}_3^-$ ) (Figura 15). De igual manera, los rangos de conductividad eléctrica más elevados ( $200-400 \mu\text{S.cm}^{-1}$ ) se encuentran principalmente en la zona de vulnerabilidad alta, es decir en Zamorano y los caseríos de El Rincón y San Francisco (Figura 16). Esto indica la influencia real de los siete parámetros que considera DRASTIC en la contaminación del manto acuífero.

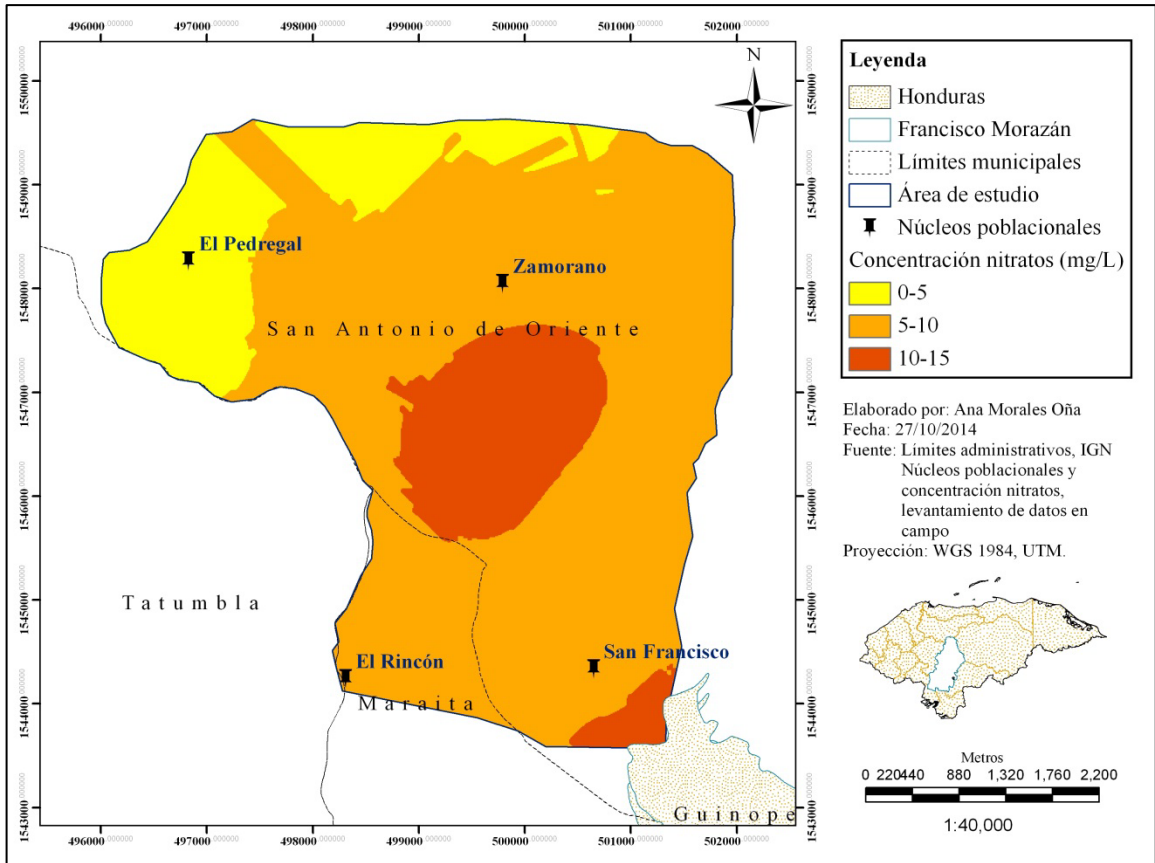


Figura 15. Distribución espacial de la de concentración de nitratos ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{NO}_3^-$ ) en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepé, San Francisco y el Rincón, Departamento de Francisco Morazán al suroeste del valle del Yeguaré, Honduras, 2014.

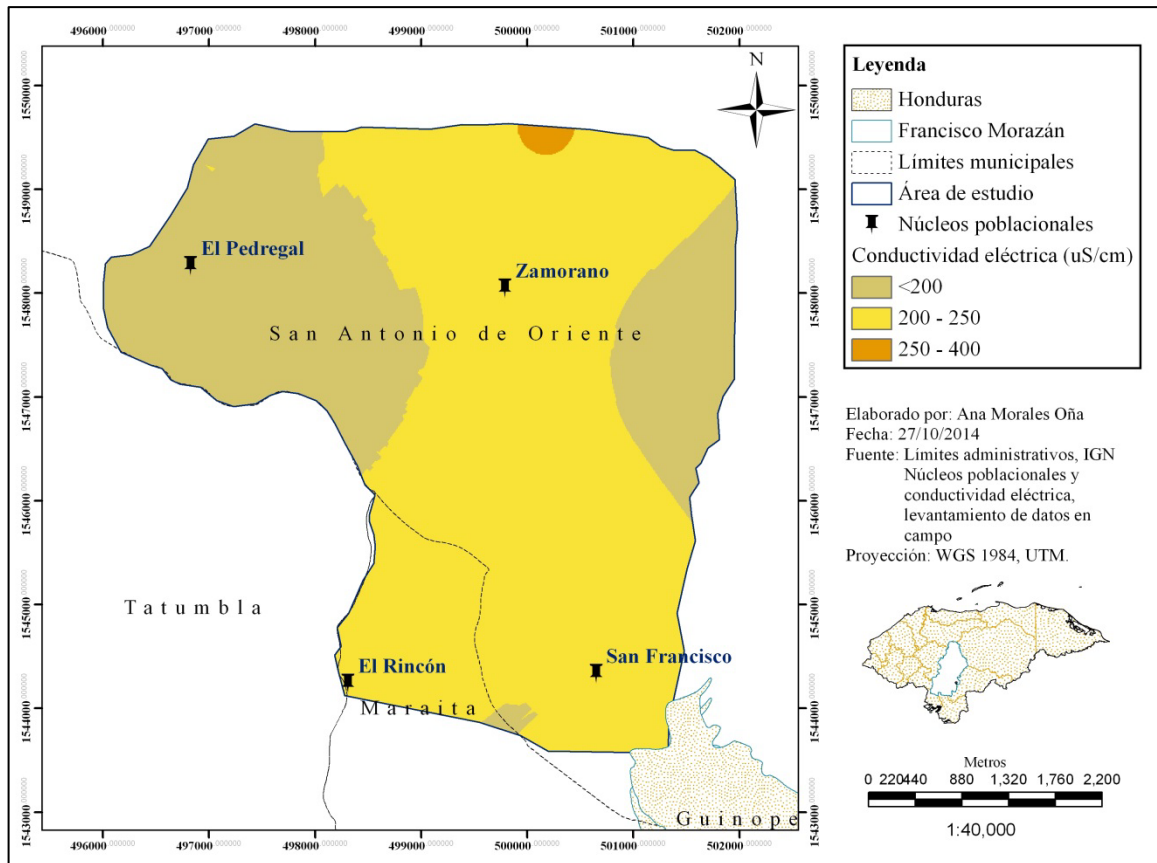


Figura 16. Distribución espacial de conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) en las localidades de Zamorano, El Pedregal de Cacalutepé, San Francisco y el Rincón al suroeste del valle del Yeguaré, Departamento de Francisco Morazán, Honduras, 2014.

## 4. CONCLUSIONES

- Las características hidrogeológicas del área de estudio propician el ingreso de contaminantes a las aguas subterráneas. La vulnerabilidad a dicha contaminación va de moderada a alta, siendo alta la predominante al ocupar el 71% de toda el área. A pesar de que cinco de los siete parámetros que considera la metodología DRASTIC hacen vulnerable a la contaminación del acuífero del valle del Yeguaré, el tipo de suelo y por ende la conductividad hidráulica de la zona evitan que la vulnerabilidad sea aún mayor.
- La profundidad del nivel freático es el factor más influyente en la vulnerabilidad de contaminación del manto acuífero en el área de estudio, dado que el 84% posee profundidades inferiores cinco metros. En cuanto a este parámetro el caserío de San Francisco, El Rincón y el sureste de los terrenos de la parte plana de Zamorano son los más vulnerables a contaminación de agua subterránea.
- La recarga potencial anual del manto acuífero en el área de estudio se encuentra en un rango de 202 a 835 mm, siendo el rango de 536-685 mm el que más predomina con un 46% del área. Esta situación hace que el manto acuífero sea vulnerable, ya que existe un medio que movilice los contaminantes desde la superficie del suelo al acuífero. Sin embargo, gracias a las texturas que conforman el suelo de la zona de estudio, el factor recarga se contrarresta ya que el agua se infiltra a una tasa baja por la presencia de texturas finas como arcillas.
- Una vez que los contaminantes logran pasar el horizonte de suelo, el material geológico que compone la zona saturada y no saturada en su mayoría favorecen a la contaminación de las aguas subterráneas. Esto dado que el 71% de la zona se compone de aluviones y basaltos, los cuales poseen una permeabilidad alta.
- Las texturas que componen los suelos de la zona contrarrestan la vulnerabilidad a contaminación de aguas subterráneas a la que someten los otros parámetros. El 98.23% de los suelos del área de estudio poseen un horizonte compuesto de texturas muy finas, el cual actúa como capa impermeable.
- El análisis de sensibilidad indicó que el mapa de vulnerabilidad al compararlo con el mapa de distribución de nitratos, refleja en un 83% la realidad de la zona. Esto indica la aplicabilidad del modelo espacial DRASTIC para el área de estudio.

## 5. RECOMENDACIONES

- Ampliar el estudio a nivel de municipios, con el fin de que se pueda disponer de una herramienta clave en el desarrollo de proyectos y toma de decisiones. Se sugiere recolectar información acerca de los diferentes parámetros que requiere la metodología DRASTIC alrededor del área de estudio, de manera que la información de esta investigación pueda servir de base para futuras investigaciones.
- Realizar un diagnóstico en la zona de estudio mediante el cual se pueda identificar las fuentes de contaminación de aguas subterráneas. Esto con el fin de establecer acciones específicas que contrarresten la contaminación del manto acuífero.
- Llevar a cabo una evaluación de los contaminantes bacteriológicos en los pozos del área de estudio con el fin de identificar posibles factores que afecten la salud de los habitantes de la zona.
- Establecer piezómetros dentro del campus de la EAP con el fin de monitorear el nivel y la composición físico-química del manto freático subyacente, el cual es una potencial fuente de agua para diferentes usos en el campus.
- Socializar los resultados de la investigación con las autoridades de Zamorano, las juntas de agua y autoridades municipales, con el fin de que puedan utilizar esta información como herramienta para la toma de decisiones en proyectos futuros. Además se sugiere llevar a cabo capacitaciones y talleres en los cuales se concientice a los habitantes de la zona acerca de la importancia de conservar y proteger las fuentes de agua subterránea.

## 6. LITERATURA CITADA

- Aller, L., T. Bennett, J. Lehr, R. Petty y G. Hackett. 1987. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. Ada, Oklahoma, Estados Unidos, Environmental Protection Agency. 58 p.
- AQUASTAD. 2014. Global Water Information System (en línea). Consultado 26 de abril de 2014. Disponible en [http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water\\_use/indexesp.stm](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/indexesp.stm).
- Banco Mundial. 2012. Población rural (% de la población total) (en línea). Consultado 26 de abril de 2014. Disponible en: <http://datos.bancomundial.org/indicador/SP.RUR.TOTL.ZS>
- Barrera, P. y C. Torres. 2010. Estudio sobre la generación de escorrentía en microcuencas de páramo con énfasis en la hidrofísica de suelos. Tesis Ing. Civil. Cuenca, Ecuador, Universidad de Cuenca. 219 p.
- Carrera, E. y M. Estribí. 2013. Evaluación del agua subterránea en puntos de captura y consumo en cinco municipios del departamento de San Antonio de Oriente, Honduras. Tesis Ing. Desarrollo Socioeconómico y Ambiente. El Zamorano, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana. 19 p.
- Ckakraorty, S., P. Paul y P. Sikdar. 2007. Assessing aquifer vulnerability to arsenic pollution using DRASTIC and GIS of North Bengal Plain: A case study of English Bazar Block, Malda District, West Bengal India. *Journal of Spatial Hydrology* 7(1): 101-121 p.
- Ersoy, A. y F. Gültekin. 2013. DRASTIC-based methodology for assessing groundwater vulnerability in the Gümüşhacıköy and Merzifon basin (Amasya, Turkey). *Earth Sciences Research Journal* 17(1): 33-40 p.
- FORGAES (Fortalecimiento de la Gestión Ambiental en El Salvador). 2005. Método RAS para determinar la recarga de aguas subterráneas. San Salvador, SV. 40 p.
- Freeze, R. y J. Cherry. 1979. *Groundwater*. New Jersey, Estados Unidos, Prentice-Hall. 604 p.

- Gascón, M., N. Ahumada, E. Fernández y J. Mitchell. 2005. Vientos, terremotos, tsunamis y otras catástrofes naturales: historia y casos latinoamericanos. Buenos Aires, Argentina, Editorial Biblos. 159 p.
- Hernandez, L., J. Haro y D. Jürgen. 2012. Generación de los índices de vulnerabilidad para acuíferos: comparación de métodos. *Sistemas Nacionales Estadístico y de Información Geográfica*. 18 p.
- Hind, H. y M. Alraggad. 2010. Assessing Groundwater Vulnerability in Azraq Basin Area by a Modified DRASTIC Index. *Journal of Water Resource and Protection* 2: 944-951 p.
- Huan, H., J. Wang y Y. Teng. 2012. Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate based on a modified DRASTIC model: A case study in Jilin City of northeast China. *Science of the Total Environment* 440: 14-23 p.
- Montes de Oca, J. 2009. Diagnóstico de Calidad de Agua en Pozos Excavados de Tres Comunidades del Valle del Yeguaré. Tesis Ing., Desarrollo Socioeconómico y Ambiente. El Zamorano, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana. 30 p.
- Neshat, A., B. Pradhan, S. Pirasteh y H. Zuhaid. 2014. Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran. *Environmental Earth Sciences* 71(7): 3119-3131 p.
- Organización de los Estados Americanos (OEA). 2004. El recurso invisible Acuíferos transfronterizos: una oportunidad de cooperación internacional. *Series sobre elementos de políticas* (3): 4 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2014. Reutilizando el agua para alimentar el mundo (en línea). Consultado 26 de abril de 2014. Disponible en <http://www.rlc.fao.org/es/prensa/opinion/reutilizando-el-agua-para-alimentar-al-mundo/>
- Rahman, A. 2008. A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography* 28: 32-53 p.
- Ramos, J. y R. Rodríguez. 2002. Aquifer vulnerability mapping in the Turbio river valley, México: A validation study. *Geofísica Internacional* 42 (1): 141-156 p.
- Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillado e Instituto Geográfico Nacional. 1995. Mapa hidrogeológico de la República de Honduras. 59 p.
- Schosinsky, G. y M. Losilla. 2000. Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central* 23: 43-55 p.

- Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados. 2004. Gestión en aguas subterráneas de Honduras por SANAA, periodo 1988-2003. División de Investigación y Análisis Técnico 440: 69 p.
- Shirazi, S., H. Imran, S. Akib, Z. Yusop y Z. Harun. 2013. Groundwater vulnerability assessment in the Melaka State of Malaysia using DRASTIC and GIS techniques. *Environmental Earth Sciences* 70(5): 2293-2304 p.
- Vélez, C. 2013. Cartografía de las coberturas y los usos de la tierra para una evaluación de la fragmentación en el municipio de San Antonio de Oriente, Francisco Morazán. Tesis Ing., Desarrollo Socioeconómico y Ambiente. El Zamorano, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana. 19 p.

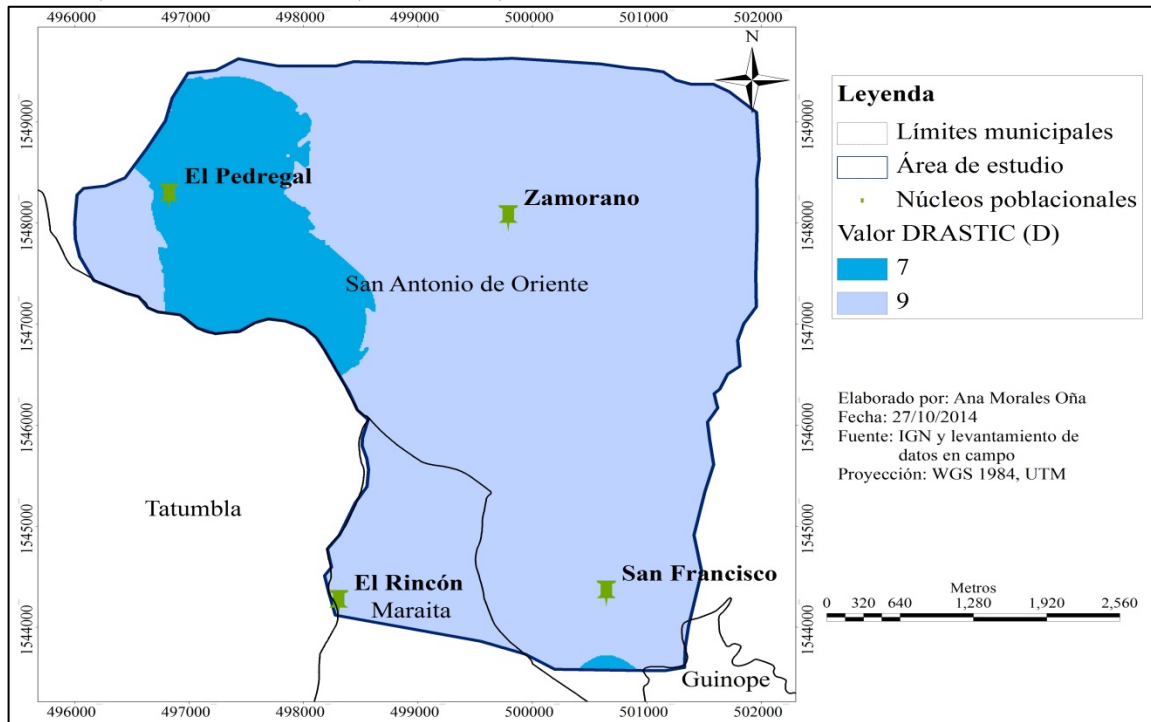


## 7. ANEXOS

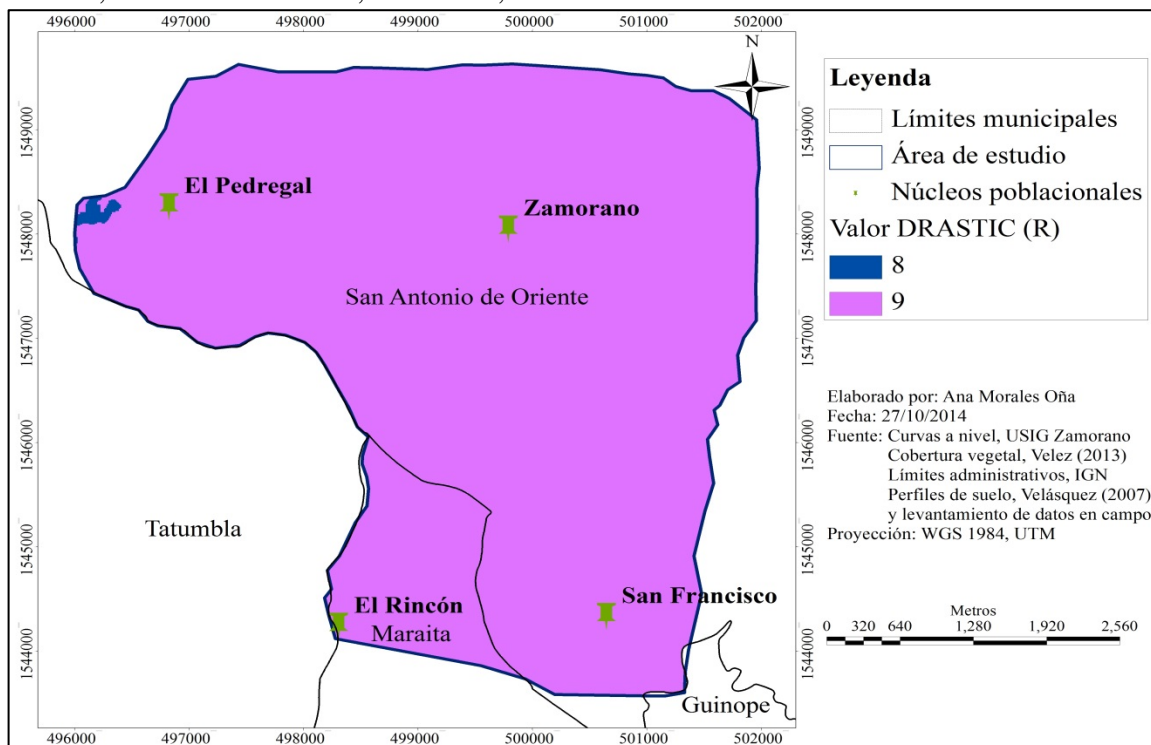
Anexo 1. Procesos seguidos y el equipo utilizado para la medición de los parámetros de calidad de agua en los pozos del área de estudio.

<b>Parámetro</b>	<b>Equipo a utilizar</b>	<b>Procedimiento</b>
Conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	Multiparámetro Oakton (PCS Testr 35)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Seleccionar el modo necesario de medición de conductividad.</li> <li>2. Tomar una muestra de agua en un recipiente que permita sumergir el multiparámetro.</li> <li>3. Sumergir el multiparámetro y presionar la tecla READ.</li> <li>4. Esperar a que la lectura del multiparámetro se estabilice.</li> <li>5. Registrar el valor de conductividad (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>) que provee el multiparámetro una vez finalizado el proceso.</li> </ol>
Nitratos ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{NO}_3^-$ )	Colorímetro Portable (DR/890)  Almoadillas con reactivo NITRAVER 5 (mid-range 0 a $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \text{NO}_3^- \text{N}$ )	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ingresar el número de programa indicado para la medida de nitratos mediante el uso del reactivo NITRAVER 5 (mid-range 0 a <math>5.0 \text{ mg}/\text{L} \text{NO}_3^- \text{N}</math>).</li> <li>2. Llenar ambas celdas con 10 mL de muestra. Una celda será el blanco y la otra corresponderá a la muestra preparada con el reactivo NITRAVER 5.</li> <li>3. En la preparación de la celda correspondiente a la celda preparada, añadir una almoadilla con el reactivo NITRAVER 5 a una de las dos celdas, posteriormente agitar durante un minuto y esperar 5 minutos más hasta que la muestra preparada haya reaccionado completamente.</li> <li>4. Una vez transcurridos los 5 minutos, ubicar el blanco (previamente limpio) en el colorímetro, cubrir con la tapa y presionar la tecla ZERO.</li> <li>5. Posteriormente ubicar la muestra preparada (previamente limpia) en el colorímetro, tapar y se presionar la tecla READ.</li> <li>6. Registrar el valor de nitratos (<math>\text{mg}/\text{L} \text{NO}_3^-</math>) que provee el colorímetro una vez finalizado el proceso</li> </ol>

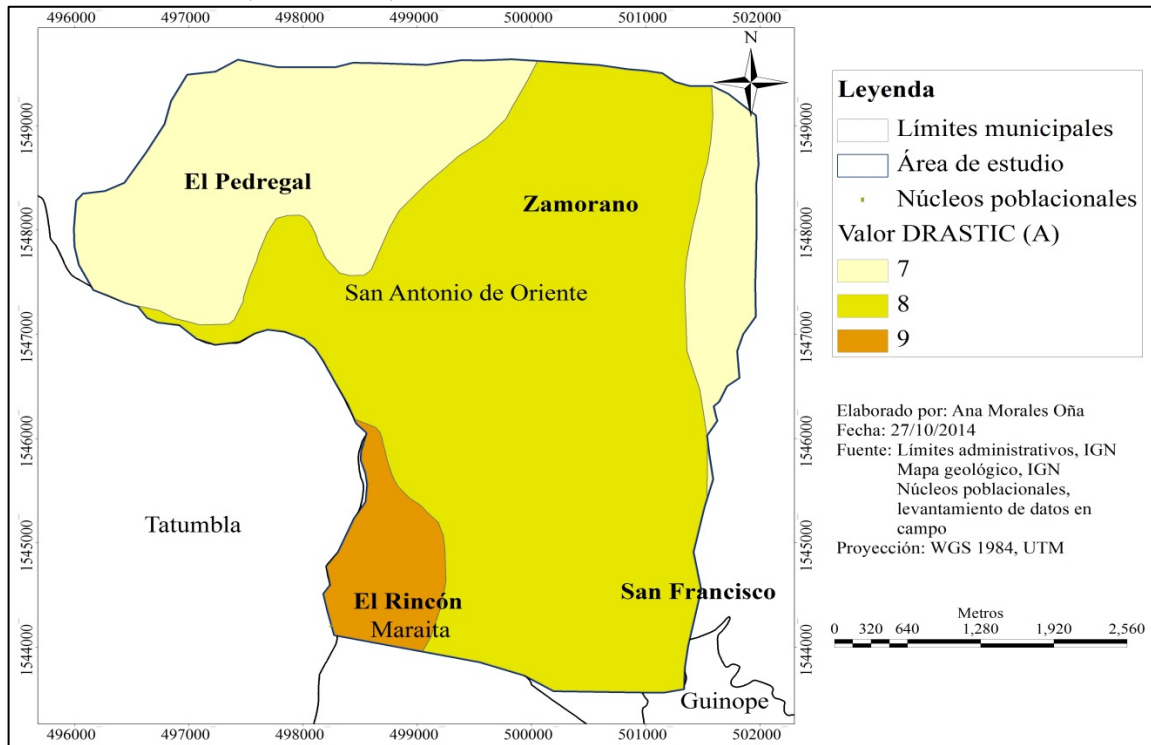
Anexo 2. Valores DRASTIC asignados a la profundidad del nivel freático del área de estudio, Francisco Morarán, Honduras, 2014.



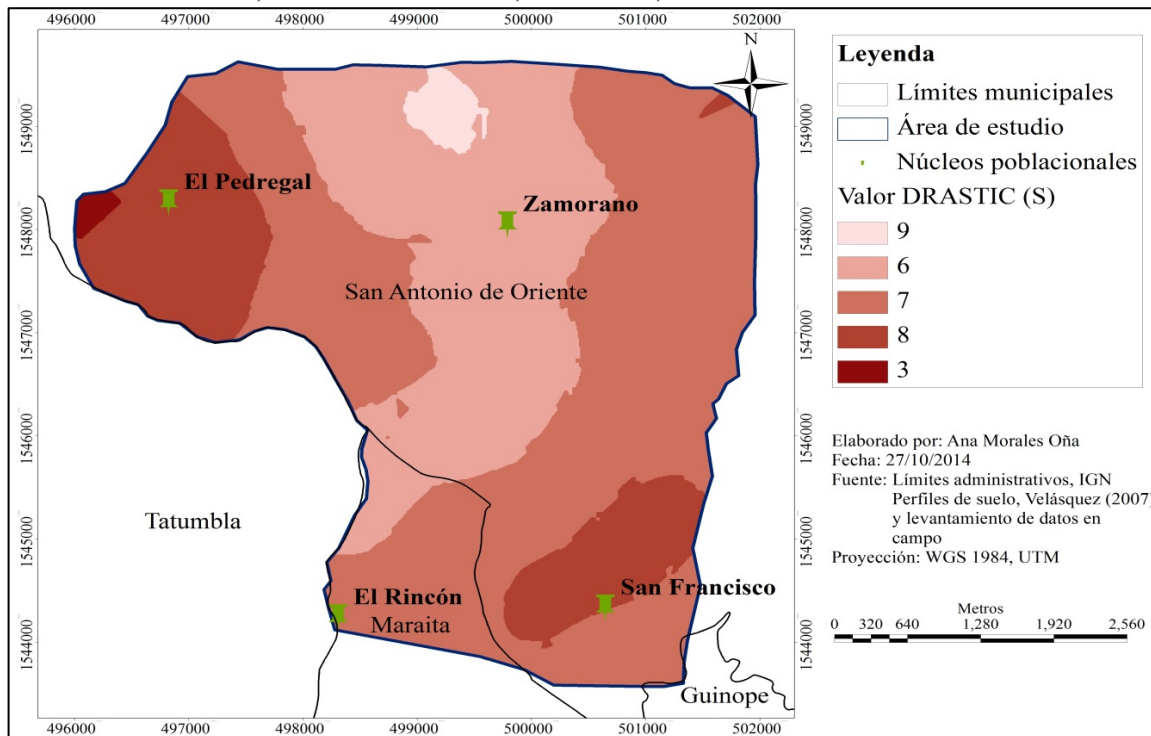
Anexo 3. Valores DRASTIC asignados a la recarga potencial del acuífero del área de estudio, Francisco Morarán, Honduras, 2014.



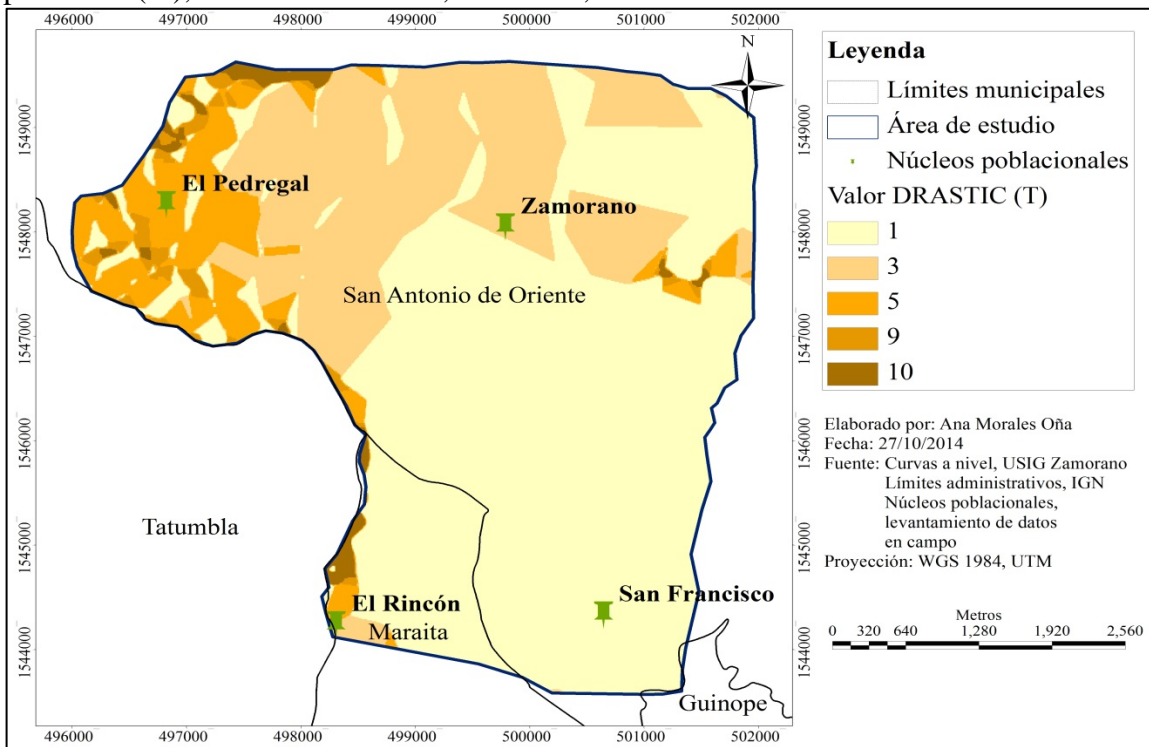
Anexo 4. Valores DRASTIC asignados al material geológico del área de estudio, Francisco Morarán, Honduras, 2014.



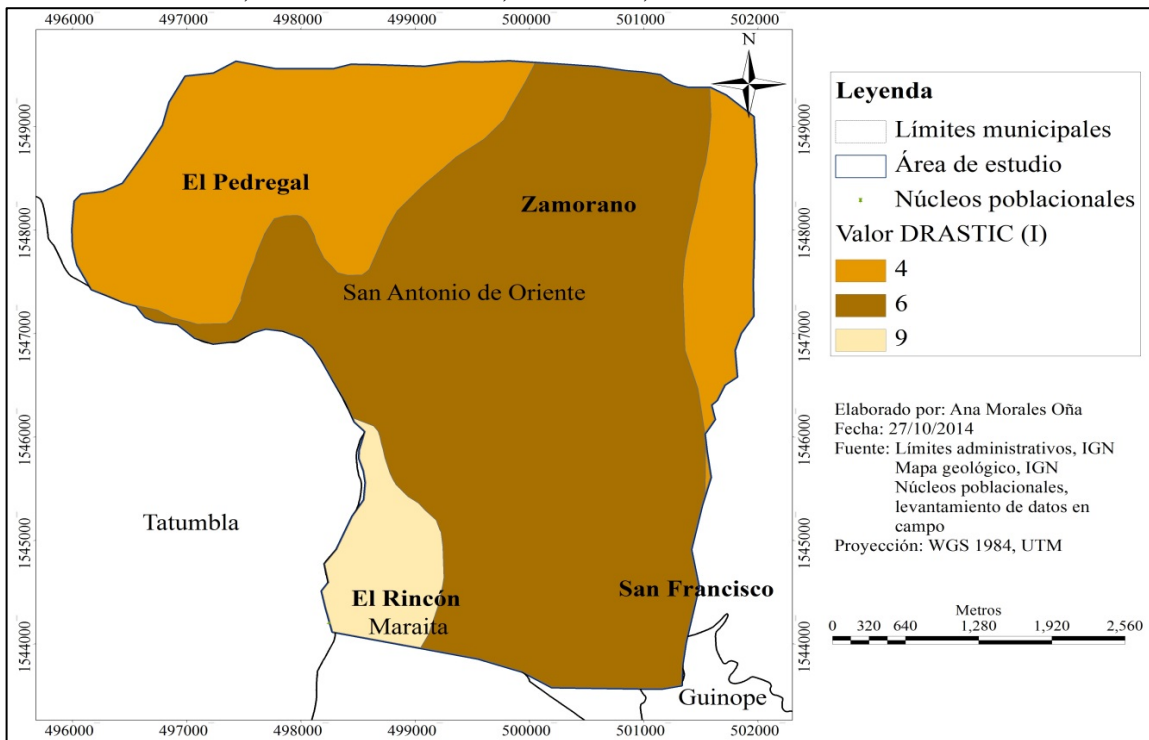
Anexo 5. Valores DRASTIC asignados al tipo de suelo del área de estudio de acuerdo a su limitante hidráulica, Francisco Morarán, Honduras, 2014.



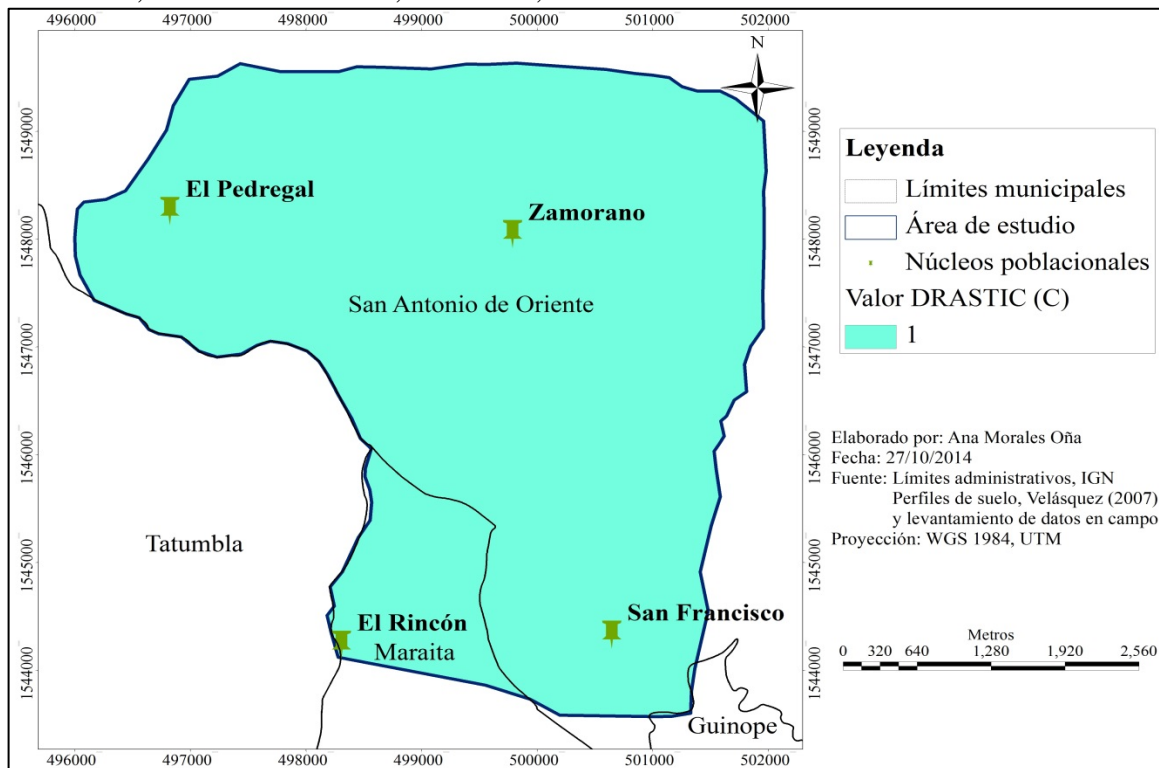
Anexo 6. Valores DRASTIC asignados a la topografía del área de estudio con base a su pendiente (%), Francisco Morarán, Honduras, 2014.



Anexo 7. Valores DRASTIC asignados al tipo de material geológico de la zona de vadosa del área de estudio, Francisco Morarán, Honduras, 2014.



Anexo 8. Valores DRASTIC asignados a la conductividad hidráulica del suelo en el área de estudio, Francisco Morarán, Honduras, 2014.



Anexo 9. Profundidad del nivel freático de los pozos medidos en la zona de estudio.

<b>Ubicación</b>	<b>Punto</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Profundidad (m)</b>
El Pedregal de Cacalutepe	1	497420	1547444	12.26
El Pedregal de Cacalutepe	2	497485	1547655	3.75
El Pedregal de Cacalutepe	3	497435	1547681	4.82
El Pedregal de Cacalutepe	4	497712	1548014	5.13
El Pedregal de Cacalutepe	5	497787	1547402	9.67
El Pedregal de Cacalutepe	6	497187	1547818	2.95
El Pedregal de Cacalutepe	7	497101	1547951	11.22
El Pedregal de Cacalutepe	8	497004	1548200	7.17
El Pedregal de Cacalutepe	9	497539	1548382	4.16
El Pedregal de Cacalutepe	10	497659	1548386	3.30
El Pedregal de Cacalutepe	11	497530	1548312	4.28
El Pedregal de Cacalutepe	12	497423	1548578	7.92
El Pedregal de Cacalutepe	13	497516	1548600	6.89
El Pedregal de Cacalutepe	14	496951	1548118	3.35
El Pedregal de Cacalutepe	15	497953	1548297	5.31
El Pedregal de Cacalutepe	16	497942	1548254	4.39
El Pedregal de Cacalutepe	17	497756	1548280	7.14
El Pedregal de Cacalutepe	18	497754	1548241	6.41
El Pedregal de Cacalutepe	19	497950	1548167	5.46
El Pedregal de Cacalutepe	20	497326	1547862	13.29
El Pedregal de Cacalutepe	21	496374	1547543	0.91
El Pedregal de Cacalutepe	22	495960	1547987	5.49
El Pedregal de Cacalutepe	23	496072	1548206	4.11
El Pedregal de Cacalutepe	24	496451	1547860	3.05
San Francisco	25	501248	1543726	3.66
San Francisco	26	500637	1543675	6.04
San Francisco	27	500620	1543573	7.10
San Francisco	28	500457	1544137	3.17
San Francisco	29	500103	1543937	3.35
San Francisco	30	500751	1544038	4.33
San Francisco	31	500713	1544284	2.83
San Francisco	32	498866	1544632	2.26
San Francisco	33	500370	1545627	4.15

Continuación del Anexo 9. Profundidad del nivel freático de los pozos medidos en la zona de estudio.

<b>Ubicación</b>	<b>Punto</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Profundidad (m)</b>
San Francisco	34	500130	1545544	3.72
El Rincón	35	498290	1544467	1.10
El Rincón	36	498288	1544419	0.58
Vía al Rincón	37	499758	1545872	5.18
San Francisco	38	500548	1544493	1.07
San Francisco	39	500637	1544562	1.77
Monteredondo	40	500191	1546851	1.04
Camino al relleno	41	500190	1549622	5.18
Camino al rodeo	42	498331	1548226	1.68
Santa Inés	43	502338	1547065	6.25
Santa Inés	44	501827	1547040	3.63
San Francisco	45	500667	1545891	4.97
San Francisco	46	500806	1544149	4.82
Suelos	47	501115	1547322	0.61
San Francisco	48	499093	1543986	2.04
Zona II	49	500447	1548739	1.43
Ordeño	50	499852	1547857	5.55

Anexo 10. Resultados de análisis de conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) y nitratos ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) de los pozos muestreados en las localidades del área de estudio.

<b>Ubicación</b>	<b>Punto</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Conductividad eléctrica (<math>\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}</math>)</b>	<b>Nitratos (<math>\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}</math>)</b>
El Pedregal de Cacalutepe	1	497252	1547421	114.20	4.30
El Pedregal de Cacalutepe	2	497420	1547444	98.90	15.30
El Pedregal de Cacalutepe	3	497365	1547434	90.50	0.00
El Pedregal de Cacalutepe	4	497485	1547655	115.60	8.10
El Pedregal de Cacalutepe	5	497712	1548014	127.40	20.10
El Pedregal de Cacalutepe	6	497821	1547817	126.20	6.70
El Pedregal de Cacalutepe	7	497787	1547402	158.90	3.80
El Pedregal de Cacalutepe	8	497101	1547951	113.50	2.20
El Pedregal de Cacalutepe	9	497004	1548200	319.00	0.00
El Pedregal de Cacalutepe	10	497539	1548382	178.90	9.00
El Pedregal de Cacalutepe	11	497659	1548386	240.00	14.60
El Pedregal de Cacalutepe	12	497530	1548312	179.30	2.00
El Pedregal de Cacalutepe	13	497516	1548600	160.60	3.40
El Pedregal de Cacalutepe	14	496951	1548118	142.00	2.70
El Pedregal de Cacalutepe	15	497942	1548254	157.50	5.70
El Pedregal de Cacalutepe	16	497326	1547862	110.00	0.00
El Pedregal de Cacalutepe	17	496374	1547543	87.90	0.00
El Pedregal de Cacalutepe	18	495960	1547987	159.50	5.50
El Pedregal de Cacalutepe	19	496072	1548206	84.10	2.30
El Pedregal de Cacalutepe	20	496451	1547860	273.00	3.90
San Francisco	21	501248	1543726	239.00	24.30
San Francisco	22	500637	1543675	210.00	13.70
San Francisco	23	500620	1543573	235.00	16.50
San Francisco	24	500457	1544137	228.00	11.70
San Francisco	25	500103	1543937	118.40	4.10
San Francisco	26	500713	1544284	281.00	9.20
San Francisco	27	500130	1545544	371.00	5.20
El Rincón	28	498290	1544467	299.00	4.90
Vía al Rincón	29	499758	1545872	296.00	21.90
San Francisco	30	500548	1544493	137.40	6.60
Monteredondo	31	500191	1546851	245.00	22.60
Florencia	32	500190	1549622	448.00	0.60
Camino al rodeo	33	498331	1548226	229.00	3.00
Santa Inés	34	502338	1547065	134.00	5.80



Continuación del Anexo 10. Resultados de análisis de conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y nitratos ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) de los pozos muestreados en las localidades del área de estudio.

<b>Ubicación</b>	<b>Punto</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Conductividad eléctrica (<math>\mu\text{S.cm}^{-1}</math>)</b>	<b>Nitratos (<math>\text{mg.L}^{-1}</math>)</b>
Santa Inés	35	501827	1547040	97.50	9.00
San Francisco	36	500667	1545891	217.00	1.30
San Francisco	37	500806	1544149	288.00	0.00
El Zarsal	38	498484	1549952	0.00	0.00

Anexo 11. Familias texturales de los perfiles de suelos analizados en las localidades del área de estudio.

<b>Ubicación</b>	<b>Perfil</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Familia</b>
Florencia	1	499593	1550077	M/(M/G)
Zona I	2	500054	1549197	(F-/F+)/G
Colindres	3	501465	1548480	F-/F+
Colindres	4	501061	1548296	M/(F+/G)
Colindres	5	500582	1548246	M
Zavala	6	501970	1546216	(M/F+)/G
Zavala	7	501433	1546061	(M/F-)/(F-/G)
Zorrales	8	500075	1547692	F-/M
Vacas secas	9	499037	1547995	(M/F+)/(F+/G)
Gallardo	10	498496	1547482	(M/F+)/G
Ganado de engorde	11	498473	1548468	(M/g)/g
Adrás IAD	12	497694	1548803	M/(M/F-)
Zona II	13	499612	1548342	(M/g)/(F-/G)
Cítricos	14	501027	1546905	(g/M)/(M/F+)
Vega 2 3 Plátano	15	501258	1547294	F-
Lote 38, Zona III	16	500829	1549044	(M/F-)/G
Cafetal	17	499163	1548858	F-
Zona I	18	499578	1549162	(M/g)/(g/G)
Lote 38 zona III	19	500018	1548429	(M/g)/(g/G)
Zorrales 5	20	500891	1547653	F+/(F+/G)
Zorrales 1	21	499694	1548120	M/(M/F+)
Zorrales 1	22	499844	1547807	M/(F+/G)
Zorrales 2	23	500080	1548008	(F-/M)/(F+/G)
Zorrales 2	24	500148	1548027	F-/G
Zorrales 3	25	500361	1547923	F-/(F+/G)
Zorrales 4	26	500546	1547709	(M/F+)/F+
Zorrales 4	27	500592	1547812	M/F+
Zorrales 4	28	500720	1547828	M/F+
Zorrales 5	29	500875	1547791	(M/F+)/(F+/G)
Monteredondo 6	30	500984	1547254	(M/F-)/(F+/G)
Monteredondo 6	31	500720	1547024	F+/(F+/G)
Monteredondo 5	32	500700	1547315	(M/F+)/F+
San Nicolas	33	499013	1547293	M/(M/G)
San Nicolas	34	498917	1546895	(F-/G)/G
San Nicolas	35	499943	1547190	F-/G
San Nicolas	36	499596	1547493	(F-/G)/G
San Nicolas	37	499109	1546725	(M/F+)/G
San Nicolas	38	499589	1546910	F-/G
Zona III	39	500913	1549219	F+/G

Continuación del Anexo 11. Familias texturales de los perfiles de suelos analizados en las localidades del área de estudio.

<b>Ubicación</b>	<b>Perfil</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Familia</b>
Zona III	40	501060	1548922	F+/(F+/G)
San Francisco	41	498879	1545924	F-/(F+/G)
San Francisco	42	499774	1546078	(F-/M)/(M/G)
San Francisco	43	500365	1545627	(F-/F+)/G
San Francisco	44	498449	1545154	M/G
San Francisco	45	501118	1545838	(M/F+)/(F+/F-)
San Francisco	46	501084	1545163	F+/(F+/G)
San Francisco	47	499967	1544602	(F+/g)/(F+/G)
San Francisco	48	501248	1543726	(M/g)/(g/G)
San Francisco	49	498179	1543669	(F+/M)/G
San Francisco	50	501061	1544181	F+/(F+/G)
San Francisco	51	500083	1544082	F+/G
San Francisco	52	500271	1543549	F-/F+
El Pedregal de Cacalutepé	53	497525	1548236	(F+/G)/G
El Pedregal de Cacalutepé	54	497540	1547389	(F+/G)/G
El Pedregal de Cacalutepé	55	497271	1547414	(F-/G)/G
El Pedregal de Cacalutepé	56	497854	1547343	M/(M/G)
El Pedregal de Cacalutepé	57	497896	1547852	(F-/G)/G
El Pedregal de Cacalutepé	58	497081	1547908	(F-/G)/G
El Pedregal de Cacalutepé	59	496006	1547849	(F-/G)/G
El Pedregal de Cacalutepé	60	496766	1548588	(F-/G)/G
El Pedregal de Cacalutepé	61	497344	1548913	(F+/G)/G
El Pedregal de Cacalutepé	62	496374	1547563	F+/(F+/G)

Fuente: desde el perfil 1 al 40 (Velásquez 2007), del 41 al 62 descripción del autor.

**Familia textural:** (00-30/30-60)/(60-90/90-120)cm. g: gruesa, M: media, F-: fina, F+: muy fina, G: material parental.

Anexo 12. Conductividad hidráulica derivada teóricamente a partir de la textura suelo presente en cada perfil analizado.

<b>Ubicación</b>	<b>Perfil</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Conductividad (m.día<sup>-1</sup>)</b>
Florencia	1	499593	1550077	1.21
Zona I	2	500054	1549197	0.16
Colindres	3	501465	1548480	0.10
Colindres	4	501061	1548296	0.26
Colindres	5	500582	1548246	0.97
Zavala	6	501970	1546216	0.88
Zavala	7	501433	1546061	0.74
Zorrales	8	500075	1547692	0.34
Vacas secas	9	499037	1547995	0.83
Gallardo	10	498496	1547482	0.29
Ganado de engorde	11	498473	1548468	2.32
Adrás IAD	12	497694	1548803	0.52
Zona II	13	499612	1548342	1.14
Cítricos	14	501027	1546905	0.83
Vega 2 3 Plátano	15	501258	1547294	0.36
Lote 38, Zona III	16	500829	1549044	0.18
Cafetal	17	499163	1548858	0.13
Zona I	18	499578	1549162	2.36
Lote 38 zona III	19	500018	1548429	1.48
Zorrales 5	20	500891	1547653	0.06
Zorrales 1	21	499694	1548120	0.63
Zorrales 1	22	499844	1547807	0.49
Zorrales 2	23	500080	1548008	0.38
Zorrales 2	24	500148	1548027	0.16
Zorrales 3	25	500361	1547923	0.10
Zorrales 4	26	500546	1547709	0.22
Zorrales 4	27	500592	1547812	0.66
Zorrales 4	28	500720	1547828	0.69
Zorrales 5	29	500875	1547791	0.34
Monteredondo 6	30	500984	1547254	0.47
Monteredondo 6	31	500720	1547024	0.06
Monteredondo 5	32	500700	1547315	0.15
San Nicolas	33	499013	1547293	1.21
San Nicolas	34	498917	1546895	0.60
San Nicolas	35	499943	1547190	0.19
San Nicolas	36	499596	1547493	0.19
San Nicolas	37	499109	1546725	0.77
San Nicolas	38	499589	1546910	0.19
Zona III	39	500913	1549219	0.15
Zona III	40	501060	1548922	0.03
San Francisco	41	498879	1545924	0.09
San Francisco	42	499774	1546078	0.87
San Francisco	43	500365	1545627	0.13

Continuación del Anexo 12. Conductividad hidráulica derivada teóricamente a partir de la textura suelo presente en cada perfil analizado.

<b>Ubicación</b>	<b>Perfil</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Conductividad (m.día<sup>-1</sup>)</b>
San Francisco	44	498449	1545154	1.21
San Francisco	45	501118	1545838	0.21
San Francisco	46	501084	1545163	0.14
San Francisco	47	499967	1544602	0.88
San Francisco	48	501248	1543726	2.20
San Francisco	49	498179	1543669	0.42
San Francisco	50	501061	1544181	0.06
San Francisco	51	500083	1544082	0.12
San Francisco	52	500271	1543549	0.22
El Pedregal de Cacalutepé	53	497525	1548236	0.10
El Pedregal de Cacalutepé	54	497540	1547389	0.10
El Pedregal de Cacalutepé	55	497271	1547414	0.21
El Pedregal de Cacalutepé	56	497854	1547343	1.40
El Pedregal de Cacalutepé	57	497896	1547852	0.24
El Pedregal de Cacalutepé	58	497081	1547908	0.13
El Pedregal de Cacalutepé	59	496006	1547849	0.22
El Pedregal de Cacalutepé	60	496766	1548588	0.13
El Pedregal de Cacalutepé	61	497344	1548913	0.10
El Pedregal de Cacalutepé	62	496374	1547563	0.10