

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL  
MUNICIPIO DE SAN SEBASTIÁN SALITRILLO  
SANTA ANA**

PRESENTADO POR:

**ANAYA MELÉNDEZ, WUILLIAM JHOVANNY.**

**LINARES LÓPEZ, FLAVIO AMILCAR.**

**MÉNDEZ LUCERO, KATYA ALEJANDRA.**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO DE 2017

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR :

**M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIA GENERAL :

**DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO :

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

SECRETARIO :

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

DIRECTOR :

**ING. JORGE OSWALDO RIVERA FLORES**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO(A) CIVIL**

Título :

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA DEL  
MUNICIPIO DE SAN SEBASTIÁN SALITRILLO  
SANTA ANA**

Presentado por :

**WUILLIAM JHOVANNY ANAYA MELÉNDEZ  
FLAVIO AMILCAR LINARES LÓPEZ  
KATYA ALEJANDRA MÉNDEZ LUCERO**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Directores :

**ING. JOAQUÍN MARIANO SERRANO CHOTO  
M.Sc.ING. LAURA BEATRIZ GIL URRUTIA  
M.Sc.ING. CARLOS VLADIMIR NAJARRO GÁLVEZ**

San Salvador, Junio de 2017

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Directores :

**ING. JOAQUÍN MARIANO SERRANO CHOTO**

**M.Sc.ING. LAURA BEATRIZ GIL URRUTIA**

**M.Sc.ING. CARLOS VLADIMIR NAJARRO GÁLVEZ**

## **AGRADECIMIENTOS**

El grupo de Trabajo de Graduacion agradece a:

Asesores del Trabajo de Graduación, Ing. Joaquín Mariano Serrano Choto, M.Sc.ING.

Laura Gil, M.Sc.ING. Carlos Vladimir Najarro Gálvez, quienes con sus conocimientos en el área de desarrollo de este trabajo de graduación nos apoyaron orientándonos de tal forma que se pudieron cumplir los objetivos planteados.

Decanato, Vicedecanato, Junta Directiva de la Facultad de Ingenieria y Arquitectura por brindarnos el apoyo para poder terminar este trabajo de graduación en el tiempo necesario.

Escuela de ingenieria civil por apoyarnos dandonos el reconocimiento como grupo para poder obtener de otras instituciones informacion para la realización de este trabajo de graduacion.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales por brindarnos la informacion que esta institucion maneja referente al clima de nuestro pais, asi como al laboratorio de esta misma institucion quien tambien nos proporcio la información necesaria para desarrollar este trabajo de investigacion.

## DEDICATORIA

A Dios por darme el entendimiento y la fortaleza en aquellos momentos donde más lo necesité y por hacerme participe de una linda familia a la cual amo mucho.

Dedicó este trabajo de graduación especialmente a mis Padres, Rosa Meléndez y Lorenzo Anaya que sin duda han sido el pilar fundamental de mi formación como profesional, por brindarme su apoyo incondicional a lo largo de mis estudios universitarios, por sus sabios consejos y por la confianza que depositaron en mi creyendo en que lo lograría.

A mis hermanas: Yesenia Anaya, Roxana Anaya, Verónica Anaya y Raquel Anaya porque siempre que las he necesitado han estado para ayudarme y alentarme a culminar con mi carrera.

A mi hermano Cristian Anaya porque a pesar de la distancia, él apoyó mis sueños de culminar mis estudios.

A mis lindas sobrinas: Carla Hernández, Stephanie Hernández, Génesis Ramos y María José Platero, por hacer aquellos días difíciles, más alegres.

A mí querida novia y amiga, Rosario del Carmen Calles porque desde que nos conocimos nunca dejó de creer en mis capacidades y siempre me alentó a alcanzar y luchar por mis sueños y metas.

A mis amigos: Gabriel García, Antonio Lobo y Nelson Azmitia por brindarme su apoyo y amistad en este trayecto de mi vida.

A mis compañeros de tesis, Katya Méndez y Flavio Linares que a pesar de todo el esfuerzo y las diferencias que surgieron en la consecución de este trabajo de graduación, logramos llegar hasta el final.

A mis asesores de tesis: Ing. Joaquín Serrano Choto, Ing. Laura Gil e Ing. Carlos Najarro, que gracias a su ayuda, guía y paciencia logramos culminar nuestro trabajo de graduación.

Por último agradecer a todas aquellas amistades que hice a lo largo de estos años de estudio que sin duda hicieron de esta travesía más amena. Gracias a cada uno de ustedes por formar parte de esta alegría que siento de culminar mi carrera.

**Wuilliam Jhovanny Anaya Meléndez.**

## **DEDICATORIA**

### **A Dios.**

Por permitirme llegar hasta este momento de mi vida, dándome salud, sabiduría, y fortaleza para poder finalizar este trabajo de graduación.

### **A mi madre.**

Mirna Alcira López Gonzales, Que fue pieza fundamental para que haya podido estudiar una carrera universitaria y terminar este trabajo de graduación ya que con sacrificios me apoyo en todo momento, por sus consejos, por la motivación constante que me ha impulsado a seguir y sobre todo por su amor.

### **A mis hermanos.**

Sonia de López y Mario Linares, que me han enseñado con su ejemplo a seguir adelante y no rendirme en este camino que tome para convertirme en un profesional, por brindarme su apoyo y motivarme a terminar este trabajo de graduación;

### **A mis familiares.**

Mi cuñado Jaime López, a mi tía Frida, a mi abuela Alejandra López, a mis primos y demás familiares.

### **A mis amigos.**

Que en algún momento nos apoyamos en nuestra formación y seguimos siendo amigos: Eduardo Anaya, Natalia Portan, Yesenia Recinos, Nohemy Barraza, Silvia Pinto, Moisés Lucero, a Liseette Pérez, Napoleón Alfaro, Rosa Sandoval, que son amigos que



aprecio mucho y me han dado palabras de apoyo para terminar este trabajo de graduación.

**A mis compañeros de tesis.**

Alejandra Lucero y Wuilliam Anaya, que iniciamos este trabajo con las mismas ganas de poder culminar nuestra carrera universitaria y lo logramos.

Y por último a mis profesores y asesores que contribuyeron en mi formación profesional transmitiéndome sus conocimientos, y a todas las demás personas que han formado parte de esta etapa de mi vida.

Gracias.

**Flavio Amilcar Linares López.**

## DEDICATORIA

**A Dios**, por permitirme alcanzar este triunfo, por haberme dado la inteligencia y fortaleza en aquellos momentos difíciles de mi carrera.

**A mi padre**, Gabriel de Jesús Méndez, por ser una de mis mayores motivaciones para culminar mi carrera por su inmenso amor, su confianza depositada en mí, por toda su paciencia y por todos los sacrificios que hizo para que hoy en día lograra mi meta.

**A mi abuela**, Paulina Recinos, porque ella siempre me ha impulsado a ser mejor cada día a luchar hasta conseguir lo que uno desea.

**A mi tía**, Carolina Lucero por su amor y apoyo, eso hace que parte de este logro sea de ella.

**A mis hermanos**, Carla Yanira Méndez y Gabriel Eduardo Méndez, por su apoyo incondicional a lo largo de este camino.

**A mi sobrina**, Camila Méndez por darle luz a mis días difíciles.

**A mi familia**, abuela, a mis tías, tíos y primos que me apoyaron y que con su apoyo me impulsaban a seguir adelante.

**A mis queridos amigos**, Jacqueline Álvarez, Connie Mejía, Pablo Moreno, Jenniffer Duran han sido piezas fundamentales con su ayuda las veces que fuera necesario estaban para apoyarme.

**A mis compañeros de Tesis**, Wuilliam Anaya y Flavio Linares, por soportar mi carácter pero que a pesar de todo logramos culminar con éxito esta última etapa.

**A mis demás amistades**, que indiscutiblemente pasamos los mejores y los peores momentos durante toda la carrera.

**A mis profesores y asesores** que contribuyeron en mi formación profesional transmitiéndome sus conocimientos.

Y finalmente a todas esas personas que de forma directa o indirectamente, colaboraron en el transcurso de toda mi carrera, muchas gracias.

**Katya Alejandra Méndez Lucero.**

## ÍNDICE

CAPITULO I .....	1
ANTEPROYECTO .....	1
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 ANTECEDENTES .....	2
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	5
1.4 OBJETIVOS .....	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
1.5 ALCANCES.....	6
1.6 LIMITACIONES .....	7
1.7 JUSTIFICACIÓN .....	7
CAPITULO II .....	8
MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA.....	8
2.1.1 Caracterización Hidrogeoquímica .....	8
2.1.2 Caracterización Geológica .....	20
2.1.3 Caracterización Hidrográfica .....	21
2.2 TIPOS DE ACUÍFEROS Y PARÁMETROS HIDRÁULICOS.....	22

2.2.1 Clasificación de acuíferos por el grado de confinamiento.....	22
2.2.2 Clasificación de acuíferos según comportamiento hidrodinámico .....	25
2.2.3 Parámetros Hidráulicos.....	27
2.3 VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE ACUÍFEROS.....	33
2.3.1 Método de evaluación de acuíferos .....	34
2.3.2 Metodo GOD .....	35
2.4 RECARGA POTENCIAL EN ACUÍFERO.....	39
2.4.1 Ciclo Hidrológico .....	39
2.4.2 Recarga en un acuífero .....	41
2.4.3 Método para la estimación de recarga acuífera.....	43
2.5 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) COMO HERRAMIENTA PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DIGITALES .....	70
2.5.1 Hardware.....	71
2.5.2 Software .....	72
2.5.3 Datos .....	72
2.5.4 Usuarios.....	73
2.5.5 Información con que trabaja un SIG .....	73
2.5.6 Fuentes principales de datos espaciales.....	76

2.5.7 Bases de datos.....	80
2.5.8 Cartografía y Formatos digitales (Vectorial y ráster) .....	83
2.5.9 Álgebra de mapas.....	92
2.5.10 Tipos de funciones en el álgebra de mapas .....	94
CAPITULO III .....	100
GENERALIDADES.....	100
3.1 UBICACIÓN DEL MUNICIPIO DE SAN SEBASTIÁN SALITRILLO .....	100
3.2 DELIMITACIÓN Y VEGETACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	102
3.2.1 Delimitación de la microcuenca de estudio.....	102
3.2.2 Vegetación de San Sebastián Salitrillo .....	104
3.3 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA.....	104
3.3.1 Geología de la zona de estudio .....	105
3.4 CLIMA DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	110
3.5 CARACTERIZACIÓN HIDROGRÁFICA DE LA ZONA .....	110
3.6 CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DE LA MICROCUENCA EN ESTUDIO.....	112
3.6.1 Acuífero volcánico fisurado de gran extensión y alta producción.....	112
3.6.2 Acuífero poroso de gran extensión y productividad media .....	112
3.6.3 Acuíferos locales de extensión limitada y de productividad mediana a baja...	113

3.6.4 Rocas no acuíferas.....	113
CAPITULO IV .....	115
RECOLECCIÓN DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	115
4.1 RECOLECCIÓN DE DATOS .....	116
4.1.1 Recolección de datos para Mapa de Vulnerabilidad .....	116
4.1.2 Recolección de datos para la Recarga Potencial del Acuífero .....	130
4.1.3 Recolección de datos para Caracterización Hidrogeoquímica del Agua Subterránea.....	142
4.2 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN RECOLECTADA.....	146
4.2.1 Procesamiento de datos para la elaboración de mapa de Vulnerabilidad .....	146
4.2.2 Procesamiento de datos para elaboración de mapa de Recarga Potencial .....	154
4.2.3 Procesamiento de Información para Elaboración de la Caracterización Hidrogeoquímica .....	196
4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS .....	204
4.3.1 Análisis d resultados del mapa de Vulnerabilidad .....	205
4.3.2 Análisis de resultados de mapa de Recarga Potencial.....	207
4.3.3 Análisis de resultados de Caracterización Hidrogeoquímica del Agua .....	208
4.4 MODELO CONCEPTUAL .....	217

CAPITULO V .....	223
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	223
5.1 CONCLUSIONES .....	223
5.1.1 Conclusiones sobre el análisis químico del agua .....	223
5.1.2 Conclusiones sobre la recarga potencial del acuífero .....	224
5.1.3 Conclusiones sobre la vulnerabilidad del acuífero .....	225
5.2 RECOMENDACIONES .....	225
BIBLIOGRAFÍA .....	228
ANEXOS .....	232



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación fisicoquímica del agua .....	9
Tabla 2.2 Valores de conductividad hidráulica .....	29
Tabla 2.3 Valores de Transmisividad .....	31
Tabla 2.4 Categorías de vulnerabilidad para el método GOD .....	38
Tabla 2.5 Definición practica de las clases de vulnerabilidad .....	38
Tabla 2.6 Componentes del coeficiente de infiltración (ONU, 1974).....	53
Tabla 2.7 Coeficientes de infiltración propuestos .....	53
Tabla 2.8 Radiación solar extraterrestre en mm/día (Allen et al., 1998) .....	61
Tabla 2.9 Valores para punto de marchitez y capacidad de campo .....	62
Tabla 2.10 Profundidad de raíces.....	63
Tabla 3.1 Área de los diferentes miembros de Formación San Salvador .....	108
Tabla 4.1 Profundidades de pozos medidas en campo .....	117
Tabla 4.2 Información para el cálculo de Nivel del Agua subterránea .....	123
Tabla 4.3 Niveles de agua Subterránea en msnm.....	124
Tabla 4.4 Precipitaciones mensuales por cada estación meteorológica (2010 – 2016)....	137
Tabla 4.5 Promedio de precipitaciones mensuales para un periodo de siete años .....	138
Tabla 4.6 Datos de temperaturas máximas mensuales para cada estación meteorológica en estudio (2010-2016) .....	139
Tabla 4.7 Datos de temperaturas mínimas mensuales para cada estación meteorológica en estudio (2010-2016) .....	140

Tabla 4.8 Datos de temperaturas promedio mensuales para cada estación meteorológica en estudio (2010-2016).....	141
Tabla 4.9 Resultados fisicoquímicos del agua para la época seca.....	144
Tabla 4.10 Resultados fisicoquímicos agua para la época lluviosa.....	145
Tabla 4.11 Evapotranspiración, Estación Finca Los Andes, periodo (2010-2016) .....	158
Tabla 4.12 Evapotranspiración, Estación Santa Ana UNICAES, periodo (2010-2016) .....	159
Tabla 4.13 Evapotranspiración, Estación Los Naranjos, periodo (2010-2016) .....	159
Tabla 4.14 Rangos de pendientes modificados .....	162
Tabla 4.15 Pruebas de infiltración en Centro escolar Cantón San Luis .....	171
Tabla 4.16 Pruebas de infiltración en Planta de bombeo Municipal colonia San Juan .....	172
Tabla 4.17 Pruebas de infiltración en Finca San Luis La Loma .....	172
Tabla 4.18 Pruebas de infiltración en Finca Gabiota .....	173
Tabla 4.19 Velocidades de infiltración en mm/día de las pruebas de infiltración y valores de Kfc .....	174
Tabla 4.20 Parámetros de cada una de las sub zonas de Zona I.....	180
Tabla 4.21 Parámetros de cada una de las Sub zonas de Zona II .....	181
Tabla 4.22 Parámetros de cada una de las Sub zonas de Zona III .....	182
Tabla 4.23 Recarga por cada sub zona.....	195
Tabla 4.24 Peso de un miliequivalentes para Cationes y aniones .....	196
Tabla 4.25 Iones mayoritarios en miliequivalentes para la época seca .....	197
Tabla 4.26 Iones mayoritarios en miliequivalentes para la época lluviosa. ....	197

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Escala de pH .....	12
Figura 2.2 Grafica de la actividad de los iones mayoritarios según el pH en el agua pura ...	15
Figura 2.3 Diagrama de Stiff clásico .....	18
Figura 2.4 Distribución de diagrama de Stiff.....	18
Figura 2.5 Diagrama de Piper .....	20
Figura 2.6 Acuífero libre .....	23
Figura 2.7 Acuífero confinado .....	24
Figura 2.8 Acuífero semiconfinado .....	25
Figura 2.9 Representación de Acuitardo y Acuífugo.....	27
Figura 2.10 Representación de la conectividad entre poros de suelos .....	29
Figura 2.11 Transmisividad .....	31
Figura 2.12 Coeficiente de Almacenamiento.....	32
Figura 2.13 Diagrama de evaluación de método GOD.....	37
Figura 2.14 Descripción del ciclo hidrológico .....	41
Figura 2.15 Esquema del modelo de balance hídrico para el municipio de San Sebastián Salitrillo .....	46
Figura 2.16 Mapa de registro de lluvia diaria .....	49
Figura 2.17 Formas de representar datos espaciales .....	85
Figura 2.18 Almacenamiento del atributo en el formato ráster .....	86
Figura 2.19 Almacenamiento de atributos del sistema vectorial .....	87

Figura 2.20 Representación de datos ráster y vectorial .....	91
Figura 2.21 Ráster (Modelo digital del terreno) y vectorial (Curvas de nivel) .....	92
Figura 2.22 Caso práctico de álgebra de mapas .....	94
Figura 2.23 Función locales .....	96
Figura 2.24 Función focal .....	96
Figura 2.25 Ventana de análisis .....	97
Figura 2.26 Función regional.....	98
Figura 2.27 Función global .....	99
Figura 3.1 Distancia entre San Salvador y el Municipio en estudio.....	100
Figura 3.2 División administrativa de San Sebastián Salitrillo. ....	101
Figura 3.3 Delimitación de la zona de estudio .....	103
Figura 3.4 Características geológicas de la zona de estudio.....	107
Figura 3.5 Mapa geológico de la zona en estudio.....	109
Figura 3.6 Mapa hidrográfico de la zona en estudio .....	111
Figura 3.7 Mapa hidrogeológico de la zona en estudio .....	114
Figura 4.1 Red de pozo de monitoreo.....	118
Figura 4.2 Medición de niveles del pozo.....	119
Figura 4.3 Distancia en metros entre los pozos El Rosario-San José y San José-Las Marías	120
Figura 4.4 Distancia en metros entre los pozos El Rosario-San Juan.....	122
Figura 4.5 Medición de Profundidad mediante una Sonda Eléctrica .....	124
Figura 4.6 Perfil de nivel piezométrico Longitudinal 1 .....	125

Figura 4.7 Perfil de nivel piezométrico Longitudinal 2 .....	126
Figura 4.8 Perfil de nivel piezométrico Transversal .....	126
Figura 4.9 Dirección de perfiles.....	127
Figura 4.10 Perfil de nivel piezométrico Longitudinal 1 .....	128
Figura 4.11 Perfil de nivel piezométrico Longitudinal 2 .....	129
Figura 4.12 Perfil de nivel piezométrico Transversal .....	129
Figura 4.13 Perfil Transversal.....	130
Figura 4.14 Excavación en zona de estudio para prueba de infiltración .....	131
Figura 4.15 Precipitación mensual por cada estación meteorológica para el año 2010.....	133
Figura 4.16 Precipitación mensual por cada estación meteorológica para el año 2011.....	134
Figura 4.17 Precipitación mensual por cada estación meteorológica para el año 2012.....	134
Figura 4.18 Precipitación mensual por cada estación meteorológica para el año 2013.....	135
Figura 4.19 Precipitación mensual por cada estación meteorológica para el año 2014.....	135
Figura 4.20 Precipitación mensual por cada estación meteorológica para el año 2015.....	136
Figura 4.21 Precipitación mensual por cada estación meteorológica para el año 2016.....	136
Figura 4.22 Preservación de especímenes para ensayo .....	142
Figura 4.23 Mapa geológico de la zona de estudio.....	147
Figura 4.24 Asignación de valores G y O conforme a la geología. ....	148
Figura 4.25 Distribución de áreas conforme a índice D.....	149
Figura 4.26 Elaboración de cada índice a ráster. ....	150
Figura 4.27 Resultado de la elaboración de los ráster .....	151

Figura 4.28 Algebra de mapas.....	152
Figura 4.29 Reclasificación de valores .....	153
Figura 4.30 Ubicación de Estaciones meteorológicas para el análisis.....	155
Figura 4.31 Polígonos de Thiessen para la zona de estudio .....	156
Figura 4.32 Áreas definidas por Polígonos de Thiessen para el análisis de recarga.....	157
Figura 4.33 Ráster zona de Santa Ana donde se ubica el área de estudio .....	160
Figura 4.34 Rangos de pendientes sin reclasificar .....	161
Figura 4.35 Rangos de pendientes reclasificados .....	163
Figura 4.36 Archivo ráster transformado a vectorial .....	164
Figura 4.37 Unión de zona de estudio con el resultado de pendientes .....	165
Figura 4.38 Mapa de vegetación del Depto. De Santa Ana .....	166
Figura 4.39 Digitalización de parte del mapa de vegetación en el programa ArcGis .....	167
Figura 4.40 División del área de estudio por vegetación.....	168
Figura 4.41 Área urbana del municipio San Sebastián Salitrillo .....	169
Figura 4.42 Unión del área urbana con el área de estudio.....	170
Figura 4.43 Representación en la zona de estudio de los diferentes valores de Kfc.....	175
Figura 4.44 Representación de los valores de coeficiente de infiltración en la zona de estudio .....	177
Figura 4.45 Representación de los valores de coeficiente de infiltración ya reclasificados	178
Figura 4.46 Zonificación debido a características geológicas y coeficiente de infiltración	179
Figura 4.47 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IA .....	183

Figura 4.48 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IB .....	184
Figura 4.49 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IC .....	185
Figura 4.50 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona ID .....	186
Figura 4.51 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IIA .....	187
Figura 4.52 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IIB .....	188
Figura 4.53 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IIC .....	189
Figura 4.54 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IID .....	190
Figura 4.55 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IIE .....	191
Figura 4.56 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IIIA .....	192
Figura 4.57 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IIIB .....	193
Figura 4.58 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IIIC .....	194
Figura 4.59 Modelación de resultados fisicoquímicos para el agua en época Seca .....	199
Figura 4.60 Modelación de resultados fisicoquímicos para el agua en época Seca .....	200
Figura 4.61 Modelación de resultados fisicoquímicos para el agua en época Lluviosa .....	201
Figura 4.62 Modelación de resultados fisicoquímicos para el agua en época Lluviosa .....	202
Figura 4.63 Iones mayoritarios para el cálculo de diagramas de Stiff para época seca .....	203
Figura 4.64 Iones mayoritarios para el cálculo de diagramas de Stiff para época Lluviosa .	204
Figura 4.65 Mapa de vulnerabilidad de la zona de estudio. ....	205
Figura 4.66 Mapa de recarga de la zona de estudio. ....	207
Figura 4.67 Diagrama de Piper para la época seca. ....	209
Figura 4.68 Diagrama de Piper para la época Lluviosa. ....	210

Figura 4.69 Diagrama de Stiff para pozo Las Marías (SALI-01) época seca .....	211
Figura 4.70 Diagrama de Stiff para pozo San Juan (SALI-02) época seca .....	211
Figura 4.71 Diagrama de Stiff para pozo Galicia (SALI-03) época seca.....	212
Figura 4.72 Diagrama de Stiff para pozo San José (SALI-04) época seca .....	212
Figura 4.73 Diagrama de Stiff para pozo El Rosario (SALI-05) época seca.....	213
Figura 4.74 Diagrama de Stiff para pozo Las Marías (SALI-01) época lluviosa .....	213
Figura 4.75 Diagrama de Stiff para pozo San Juan (SALI-02) época lluviosa .....	214
Figura 4.76 Diagrama de Stiff para pozo Galicia (SALI-03) época lluviosa.....	214
Figura 4.77 Diagrama de Stiff para pozo San José (SALI-04) época lluviosa .....	215
Figura 4.78 Diagrama de Stiff para pozo El Rosario (SALI-05) época lluviosa.....	215
Figura 4.79 Escala de pH .....	216
Figura 4.9 Dirección de perfiles.....	219
Figura 4.7 Perfil de nivel piezométrico Longitudinal 2 .....	219
Figura 4.80 Identificación de Zona de Mayor Recarga y de Descarga .....	222



## RESUMEN

En el presente trabajo de graduación, se realiza un análisis de las aguas subterráneas en el cual se pretende determinar las zonas de mayor recarga y descarga del municipio de San Sebastián Salitrillo (Santa Ana), además busca establecer que zonas poseen mayor vulnerabilidad para ser afectadas por contaminantes, con la finalidad, de que los resultados, a través de una buena gestión, puedan ser empleados para desarrollar planes de ordenamiento territorial y zonas de protección a las áreas de mayor recarga del acuífero. Además, se determinará la calidad del agua del acuífero en estudio mediante pruebas fisicoquímicas.

En el primer capítulo, se describe las razones de la investigación; la importancia de cuidar las zonas de recarga de los acuíferos en el país, se plantea la problemática y se establecen los objetivos. El segundo capítulo contiene la parte teórica, se establecen las metodologías de análisis a emplear en el trabajo. El capítulo tres contiene las generalidades del lugar en estudio, en el cual se describen la ubicación del municipio de San Sebastián salitrillo su vegetación, la geología y el clima del lugar, etc.

El capítulo cuatro corresponde a la parte medular de este trabajo de graduación es donde se encuentra la recolección de datos, el procesamiento y el análisis de los resultados. Para finalizar con el capítulo cinco el cual son las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

# **CAPITULO I**

## **ANTEPROYECTO**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

En nuestro país el agua es un recurso valioso limitado para la generación de productividad y la vida de las personas, es por esta razón que debemos de preservar la calidad de esta.

Las aguas subterráneas en el territorio nacional son de mejor calidad en comparación a las aguas superficiales, su alta calidad se debe a que han sufrido una larga y lenta filtración por el subsuelo hasta llegar al acuífero, a la vez que han adquirido de la tierra sales y minerales esenciales para la vida. Es por esta razón que el agua subterránea se ha convertido en un recurso estratégico debido a la amplia gama de utilidades que se le pueden dar, por ejemplo, estas sirven para riego agrícola, como también para el abastecimiento urbano e industrial, por lo que deben mantener una calidad apropiada en función del uso al que se destinen, teniendo en cuenta que las aguas subterráneas para el consumo humano deben ser tratadas correctamente.

El agua subterránea como ya se mencionó es un recurso importante, pero de difícil gestión, por su sensibilidad a la contaminación. Y es en este sentido de gran importancia generar una investigación que proporcione criterios que sirvan de base

para la elaboración de normativas ambientales preventivas, en caminadas a la preservación y sostenibilidad del acuífero.

La presente investigación busca hacer la caracterización hidrogeológica del acuífero del municipio de San Sebastián Salitrillo en el departamento de Santa Ana, de tal manera que dicha investigación sea una herramienta de la cual se pueda auxiliar el municipio para la adecuada gestión del recurso hídrico y particularmente la del agua subterránea.

El estudio contendrá la información general del municipio tales como: Ubicación y delimitación de la zona de estudio. Así como la Metodología usada para la caracterización hidrogeológica del lugar; e información específica contenida en las secciones: Caracterización del medio físico, Tipos de acuíferos y parámetros hidráulicos, Caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas, Vulnerabilidad de acuíferos, así como las respectivas conclusiones del análisis de toda la información generada producto de la investigación.

## **1.2 ANTECEDENTES**

La preocupación existente a nivel mundial y regional sobre la situación del recurso agua nos da la pauta para recordar que éste es un recurso finito y vulnerable, de suma importancia para la vida, para el desarrollo y para la sostenibilidad ambiental; por lo que su gestión debe basarse en un enfoque participativo y multidisciplinario, involucrando a los usuarios, planificadores y tomadores de decisión a todos los niveles.

El agua es un bien escaso, con limitada disponibilidad y con una demanda creciente, cuya sostenibilidad depende de una adecuada gestión. Juega un rol vital en la calidad de vida de las comunidades, es necesaria para la agricultura, se usa en la mayoría de los procesos productivos y provee la base para la vida de los ecosistemas. El 70% del planeta está cubierto de este vital líquido, pero solo un 2.5 % de esta corresponde a agua dulce; y apenas el 0.01 % del total del agua existente se considera apta para el consumo humano. (FUNDE, 2009)

Se han realizado numerosas reuniones nacionales e internacionales, tales como el 3er foro mundial del agua que se llevó a cabo en el año 2003 en Kyoto; con el fin de conocer y discutir a fondo la problemática de los recursos hídricos, para saber qué está sucediendo y prever qué va a suceder en caso de continuar con las tendencias actuales de desarrollo.

A nivel nacional, muchas son las instituciones que exigen que se apruebe la Ley General de Agua, una de estas es, el Foro del Agua El Salvador que el pasado 12 de mayo de 2016, entregó a la Asamblea Legislativa una pieza de correspondencia dirigida a la Comisión de Medioambiente y Cambio Climático donde piden reanudar la discusión de la Ley General de Agua. Cabe destacar que desde hace diez años el Foro viene previniendo al país y a la Asamblea sobre la gravedad de la crisis del agua.

La situación de la calidad del agua en la mayoría de cuerpos superficiales y subterráneos en el país es alarmante. La mayoría de aguas servidas residenciales e industriales (Una de las principales fuentes de contaminación) son arrojadas a los ríos

prácticamente sin ningún tratamiento. Solamente el 2 % de las aguas residuales del país reciben algún tipo de tratamiento.

El agua constituye un elemento indispensable para el desarrollo económico y superación de la pobreza de un país. Este recurso genera importantes aportaciones a los sectores industrial, residencia, agrícola, energía, turismo, entre otros. En este sentido, la disponibilidad y acceso al agua contribuye a fortalecer el clima de negocios y la competitividad del país.

Por lo anterior, es importante hacer una investigación sobre las condiciones hidrogeológicas que puedan presentar las aguas subterráneas en nuestro País, con la finalidad de conocer la calidad del agua y si estas están aptas para el consumo humano. De acuerdo al balance hídrico presentado por la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA, 2005), la precipitación pluvial promedio del territorio nacional es de 1,784 milímetros de lluvia, lo cual representa cerca de 56 mil millones de metros cúbicos. Sin embargo, el balance también muestra una mala distribución y aprovechamiento de esta dotación natural de agua: el volumen de las aguas subterráneas ha disminuido un 19 % en los últimos 23 años.

Las áreas de recargas de los acuíferos están disminuyendo porque tienden a poblarse o por la pérdida de cobertura vegetal. Las más importantes son la zona del Playón del Volcán de San Salvador (La más amenazada), el sur de “Los Volcanes” en Santa Ana, la cuenca del río Grande de Sonsonate, el borde norte del Cerrón Grande y la zona sur del

“Puente Viejo”. Todas las áreas de recarga infiltran el 16 % del total de la precipitación promedio anual. ([http://fusades.org/sites/default/files/investigaciones/parte\\_2.pdf](http://fusades.org/sites/default/files/investigaciones/parte_2.pdf))

## **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los estudios hidrogeológicos son de especial interés no solo para la provisión de agua a la población sino también para evaluar la presencia de sustancias contaminantes y la manera en que afectan al medio ambiente, por lo que esta especialidad se ha convertido en una ciencia básica para la evaluación del agua subterránea, ya que desde las últimas décadas el problema de la contaminación debido a la industrialización así como también a la disminución de los niveles de agua por deforestación, ha venido en aumento por lo que es necesario realizar estos estudios, ya que con ellos se puede caracterizar un cuerpo de agua subterránea y determinar el estado en que se encuentra.

Nuestro país utiliza principalmente las fuentes de agua subterránea para abastecer a la población. No hay una ley que proteja a las aguas subterráneas de cualquier alteración, que pueda causarles graves daños, por intervención del ser humano, por otra parte, existe la posibilidad que el agua en los acuíferos sea contaminada y no deba ser utilizada para el consumo humano debido a la alteración de sus propiedades fisicoquímicas.

Es necesario tener un control más detallado sobre el agua subterránea de nuestro país ya que es un recurso limitado, por lo que resulta relevante realizar estudios

hidrogeológicos, en este caso específicamente en el municipio de San Sebastián Salitrillo departamento de Santa Ana, para determinar las características que posee el acuífero.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo general**

- ✓ Elaborar la caracterización hidrogeológica del municipio de San Sebastián Salitrillo, Santa Ana.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- ✓ Obtener el modelo conceptual preliminar del acuífero.
- ✓ Identificación de unidades hidrogeológicas presentes en la zona, y sus principales características.
- ✓ Elaborar un mapa de estimación de recarga natural potencial del acuífero.
- ✓ Caracterización físico-química del agua subterránea en la zona de estudio.
- ✓ Elaborar un mapa de la vulnerabilidad a la contaminación intrínseca del acuífero.

## **1.5 ALCANCES**

Obtener la caracterización Hidrogeológica predominante de la zona de estudio del municipio de San Sebastián Salitrillo, para las épocas, lluviosa y seca correspondiente al

año 2016, a través de las principales características físicas del medio; además, se obtendrá la caracterización fisicoquímica actual de la zona en estudio.

El estudio hidrogeológico estará basado en el análisis de los datos recolectados de las pruebas que se realizaran en el lugar.

## **1.6 LIMITACIONES**

La caracterización hidrogeológica del municipio de San Sebastián Salitrillo responde, únicamente, a las condiciones del medio físico actuales de la zona de estudio y durante el período que dure la investigación de campo. Cabe recalcar que la información recolectada corresponde a los pozos ya existentes en la zona de estudio.

## **1.7 JUSTIFICACIÓN**

En la actualidad, aunque existen esfuerzos por diferentes entidades dirigidos a la protección y preservación del recurso hídrico, no hay una evaluación de la recarga potencial, ni de las características fisicoquímicas actuales del acuífero del municipio de San Sebastián Salitrillo departamento de Santa Ana, que pueda brindar un insumo a los habitantes, para poder establecer lineamientos encaminados a la protección del acuífero. La investigación realizada sobre el acuífero del municipio de San Sebastián Salitrillo, constituye una fuente de información apropiada para ayudar a la gestión del recurso hídrico del municipio, en base a los resultados obtenidos.



# **CAPITULO II**

## **MARCO TEÓRICO**

### **2.1 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA**

La Hidrogeología es la ciencia que estudia el origen y formación de las aguas subterráneas su interacción con los suelos y rocas, sus propiedades físicas y químicas; en base a lo anterior la caracterización hidrogeológica se auxilia de otras ciencias como la geología, la hidrografía y la hidrogeoquímica, para describir o caracterizar el medio físico.

#### **2.1.1 Caracterización Hidrogeoquímica**

La caracterización hidrogeoquímica de un sistema hidrogeológico, es de gran aporte para definir el modelo de circulación del flujo subterráneo y de cómo, se da el proceso de interacción agua-roca. Las características físicas y químicas forman parte de la caracterización Hidrogeoquímica de las aguas subterráneas ya que de ellas depende en gran medida la clasificación que se le da al agua y si esta es adecuada para el consumo humano. En la tabla (2.1) se mencionan dichas características por separado.

Tabla 2.1 Clasificación fisicoquímica del agua

Fuente "Elaboración propia".

<i>Caracterización Física del Agua</i>	<i>Caracterización Química del Agua</i>
<i>Color</i>	<i>Dureza</i>
<i>Olor</i>	<i>pH</i>
<i>Turbiedad</i>	<i>Alcalinidad</i>
<i>Conductividad</i>	<i>Acidez</i>
<i>Sabor</i>	<i>Iones Mayoritarios</i>
<i>Solidos</i>	<i>Metales Pesados</i>
<i>Temperatura</i>	

A continuación, se presentan algunas definiciones de las características físicas y químicas del agua sobre las cuales nuestro estudio dará mayor importancia.

### **2.1.1.1 Conductividad Eléctrica del agua (CE)**

Según Barrio y Andrés Cabrerizo (Barrio y Andrés Cabrerizo, 2008), la conductividad eléctrica (CE) es una propiedad característica que sirve para averiguar si una sustancia es un compuesto iónico, un metal o una sustancia covalente pues los metales conducen electricidad en estado sólido, los compuestos iónicos solo lo hacen fundidos o disueltos y las sustancias covalentes no conducen electricidad.

Al determinar la conductividad eléctrica se evalúa la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica, es una medida indirecta de la cantidad de iones en solución (Fundamentalmente cloruro, nitrato, sulfato, fosfato, sodio, magnesio y calcio).

Descargas de aguas residuales suelen aumentar la conductividad debido al aumento de la concentración de  $\text{Cl}^{-1}$ ,  $\text{NO}_3^{-1}$  y  $\text{SO}_4^{-2}$ , u otros iones. Debe tenerse en cuenta que derrames de hidrocarburos (Aceites, petróleo), compuestos orgánicos como aceites, fenol, alcohol, azúcar y otros compuestos no ionizables (Aunque contaminantes), no modifican mayormente la conductividad. La unidad básica para medir la conductividad es el Siemens<sup>1</sup> por centímetro (S/cm) o el micro siemens<sup>2</sup> por centímetro ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). (RED MAPSA, 2007).

El agua destilada tiene una conductividad eléctrica en el rango de 0.5 a 3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

La conductividad eléctrica de nuestros sistemas continentales generalmente es baja, variando entre 50 y 1,500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En sistemas de agua dulce, conductividades por fuera de este rango pueden indicar que el agua no es adecuada para la vida de ciertas especies de peces o invertebrados. Es por esto que la conductividad eléctrica es una medida generalmente útil como indicador de la calidad de aguas dulces. Cada cuerpo de agua tiene un rango relativamente constante de conductividad eléctrica, que una vez conocido, puede ser utilizado como línea de base para comparaciones con otras determinaciones puntuales (RED MAPSA, 2007).

---

<sup>1</sup>Unidad de conductancia en el Sistema Internacional, de símbolo *S*, que equivale a la conductancia de un conductor con resistencia eléctrica de 1 ohm.

<sup>2</sup>La unidad  $\mu\text{S}$ , es conocida como micro siemens que es, la millonésima parte de un Siemens

### **2.1.1.2 Potencial de Hidrogeno (pH)**

De acuerdo con Guarnizo y Martínez (Guarnizo y Martínez, 2007) El potencial de hidrogeno es una medida de la acidez o basicidad de una solución, en otras palabras, es la concentración de iones (Cationes o aniones) de Hidrogeno ( $H^+$ ) presentes en una determinada sustancia.

Es una de las pruebas más comunes para conocer la calidad del agua. El pH indica la acidez o alcalinidad, en este caso de un líquido como es el agua, pero es en realidad una medida de la actividad del potencial de iones de hidrógeno ( $H^+$ ). Las mediciones de pH se ejecutan en una escala de 0 a 14, con 7.0 considerado neutro.

Las soluciones con un pH inferior a 7.0 se consideran ácidos. Las soluciones con un pH por encima de 7.0, hasta 14.0 se consideran bases o alcalinos. Todos los organismos están sujetos a la cantidad de acidez del agua y funcionan mejor dentro de un rango determinado.

La escala de pH (Figura 2.1) es logarítmica, por lo que cada cambio de la unidad del pH en realidad representa un cambio de diez veces en la acidez. En otras palabras, pH 6.0 es diez veces más ácido que el pH 7.0; pH 5 es cien veces más ácido que el pH 7.0.



Figura 2.1 Escala de pH

Fuente: (<http://www.carbotecnia.info/encyclopedia/que-es-el-ph-del-agua/>)

En general, un agua con un pH < 7 se considera ácido y con un pH > 7 se considera básica o alcalina. El rango normal de pH en agua superficial es de 6.5 a 8.5 y para las aguas subterráneas 6.0 a 8.5. La alcalinidad es una medida de la capacidad del agua para resistir un cambio de pH por debajo donde este es neutro. Es necesaria la medición del pH para determinar la corrosividad del agua. El pH del agua pura (H<sub>2</sub>O) es 7 a 25 °C, pero cuando se expone al dióxido de carbono en la atmósfera este equilibrio resulta en un pH de aproximadamente 5.2. Debido a la asociación de pH con los gases atmosféricos y la temperatura.

En general, un agua con un pH bajo < 6.5 podría ser ácida y corrosiva. Por lo tanto, el agua podría disolver iones metálicos, tales como: hierro, manganeso, cobre, plomo y zinc, accesorios de plomería y tuberías. Por lo tanto, un agua con un pH bajo corrosiva podría causar un daño prematuro de tuberías de metal, y asociado a problemas estéticos tales como un sabor metálico o amargo.

Un agua con un pH > 8.5 podría indicar que el agua es alcalina. Puede presentar problemas de incrustaciones por dureza, aunque no representa un riesgo para la salud, pero puede causar problemas estéticos. Estos problemas incluyen, la formación de sarro que precipita en tuberías y accesorios que causan baja presión del agua y disminuye el diámetro interior de la tubería.

Típicamente se encuentran estos problemas cuando la dureza excede de 100 a 200 miligramos (mg) / litro (L) o partes por millón (ppm), que es equivalente a 12 gramos por galón. El agua puede ser suavizada mediante el uso del intercambio iónico, aunque este proceso puede aumentar el contenido de sodio en el agua.

### **2.1.1.3 Alcalinidad**

Es la medida de la capacidad para neutralizar ácidos, contribuyen a la alcalinidad principalmente los iones bicarbonatos ( $\text{CO}_3\text{H}^{-1}$ ), carbonato ( $\text{CO}_3^{-2}$ ) e hidróxidos ( $\text{OH}^{-1}$ ), pero también los fosfatos y ácido silícico. Los bicarbonatos y los carbonatos pueden producir Bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). La alcalinidad se mide en mg/L, en ppm de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (APHA, 1996).

El bicarbonato constituye la forma química de mayor contribución a la alcalinidad. Dicha especie iónica y el hidróxido son particularmente importantes cuando hay gran actividad fotosintética de algas o cuando hay descargas industriales en un cuerpo de agua.

La alcalinidad, no sólo representa el principal sistema amortiguador del agua dulce, sino que también desempeña un rol principal en la productividad de cuerpos de agua naturales, sirviendo como una fuente de reserva para la fotosíntesis.

Los carbonatos y bicarbonatos presentes en cuerpos naturales de agua dulce se originan generalmente del desgaste y disolución de rocas en la cuenca que contienen carbonatos tales como la piedra caliza. A pesar de que la piedra caliza no es muy soluble en agua pura, su disolución es promovida por la presencia de  $\text{CO}_2$  disuelto en el agua ( $\text{CO}_2$  generado en sedimentos ricos en materia orgánica). El  $\text{CO}_2$  reacciona con el agua para generar pequeñas cantidades de ácido carbónico, el cual disuelve entonces las rocas de carbonato en la cuenca, lo que a su vez contribuye a la alcalinidad del agua. (<http://www.uprm.edu/biology>).

En el rango del pH en el que se suelen encontrar las aguas subterráneas (6.0 a 8.5), la cantidad de carbonato ( $\text{CO}_3^{-2}$ ) es depreciable por lo que la alcalinidad carbonatada se asume como la concentración de Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^{-1}$ ), y es lo que se denomina alcalinidad TAC. Si el pH es mayor de 8.3 la cantidad de carbonato ( $\text{CO}_3^{-2}$ ) puede ser significativa. En este caso la alcalinidad carbonatada se mide como la concentración de ( $\text{CO}_3^{-2}$ ) es lo que se denomina alcalinidad TA.

A continuación, se muestra el gráfico sobre el efecto del pH en agua pura y la actividad de los iones  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^{-1}$  y  $\text{CO}_3^{-2}$  (Figura 2.2).

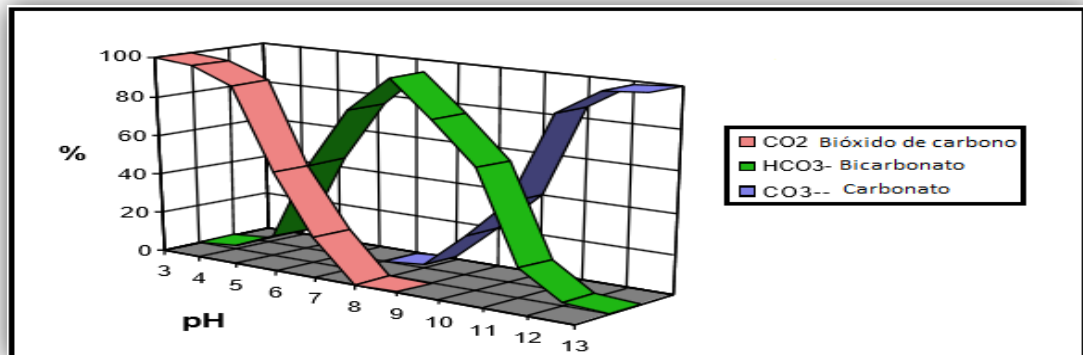


Figura 2.2 Grafica de la actividad de los iones mayoritarios según el pH en el agua pura

Fuente: (<http://www.uprm.edu/biology>)

Es evidente que las proporciones de las especies iónicas de bióxido de carbono son alteradas significativamente por cambios en el pH. A un pH < 6, el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es la especie dominante. A valores de pH entre 7 y 9, el bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-1</sup>) predomina, mientras que carbonato (CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>) comienza a aumentar su concentración significativamente a valores de pH > 9.

### 2.1.1.4 Iones Mayoritarios

La mayoría de las sustancias disueltas en el agua subterránea se encuentran en estado iónico. Algunos iones están presentes casi siempre y su suma representa casi la totalidad de los iones disueltos. Estos iones mayoritarios son los cationes: calcio, magnesio, sodio y potasio; y los aniones: bicarbonato, sulfato y cloruro. Es frecuente que el anión nitrato se considere dentro del grupo de iones mayoritarios, aun cuando su concentración es pequeña, si los efectos antrópicos son poco importantes. La presencia del ión carbonato está condicionada a un pH > 8.3, lo cual es poco frecuente.



A pH bajo, una parte importante del carbono inorgánico disuelto está como ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) ó  $\text{CO}_2$  disuelto. Además, las aguas subterráneas suelen contener cantidades apreciables de ácido silícico no disociado, que se suele expresar como sílice disuelta. ([www.fundacionbotin.org](http://www.fundacionbotin.org))

Las especies químicas disueltas en las aguas subterráneas van a estar condicionadas, entre otros factores, por el pH, la temperatura y el oxígeno disuelto del agua subterránea. El pH suele variar entre 6.5 y 8.0. Respecto al oxígeno disuelto, la mayoría de las aguas subterráneas tienen entre 0 y 5 mg/L. Las aguas superficiales y subterráneas, en función de la concentración de sustancias disueltas pueden ser clasificadas como dulces (Contienen como máximo 1,000 – 2,000 mg/L de sustancias disueltas).

### **2.1.1.5 Temperatura**

La temperatura es uno de los parámetros físicos más importantes del agua, ya que influye en el retardo o aceleración de alguna actividad biológica, en la precipitación de compuestos, en la desinfección, en la floculación, sedimentación y filtración.

### **2.1.1.6 Diagramas para clasificación hidrogeoquímica del agua**

El agua se puede clasificar en diversas categorías, teniendo en cuenta su composición química, dependiendo del parámetro que se utilice (Salinización, pH e Iones mayoritarios) y de las propiedades (Físicas o químicas) o características de la muestra de agua que se analice.

Los diagramas utilizan la concentración de los iones mayoritarios para la clasificación del agua y entre estos diagramas podemos encontrar: Piper, Stiff, Schoeller y Durov, a continuación, se describe el uso de algunos de estos diagramas.

#### **2.1.1.6.1 Diagrama de Stiff**

Hay dos características que sobresalen en este tipo de diagrama, la primera es que por un lado permite visualizar claramente diferentes tipos de agua (Cada una con una configuración particular) y la segunda, de forma simultánea, permite dar idea del grado de mineralización (Ancho de la gráfica).

El diagrama de Stiff es una gráfica compuesta por tres ejes horizontales, cada uno de estos ejes está uniendo un catión y un anión. Todos los cationes se disponen al costado izquierdo del diagrama, y los aniones al derecho. Siempre el Sodio ( $\text{Na}^{+1}$ ) se confronta con el Cloro( $\text{Cl}^{-1}$ ), el Calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) con el Bicarbonato( $\text{HCO}_3^{-1}$ ) y el Magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ) con el Sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ), Todos los ejes horizontales están a la misma escala lineal y las concentraciones están dadas en miliequivalentes por litro (meq/l). En la gráfica siguiente se muestran algunas apreciaciones de este diagrama que caracterizan varios tipos de aguas (Figura2.3).

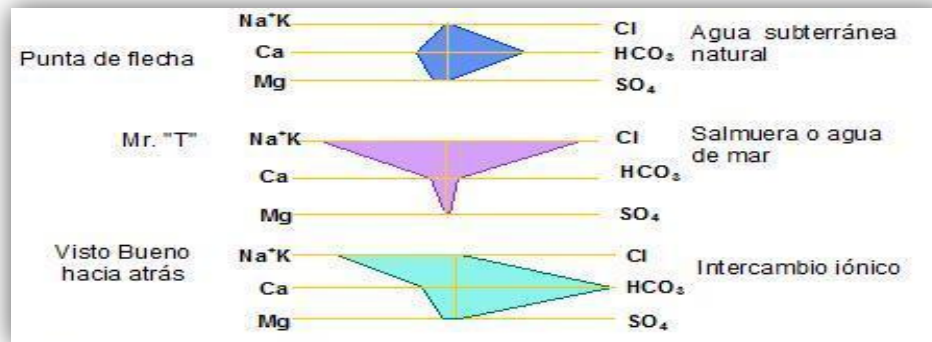


Figura 2.3 Diagrama de Stiff clásico

Fuente: (<http://www.aguaysig.com>)

El gráfico anterior permite apreciar los valores de las relaciones iónicas con respecto a la unidad y la variación de las relaciones entre cationes y entre aniones de una muestra.

También pueden representarse en un mapa, con lo que se visualiza rápidamente la variación espacial de la mineralización del agua en el acuífero (Figura 2.4).

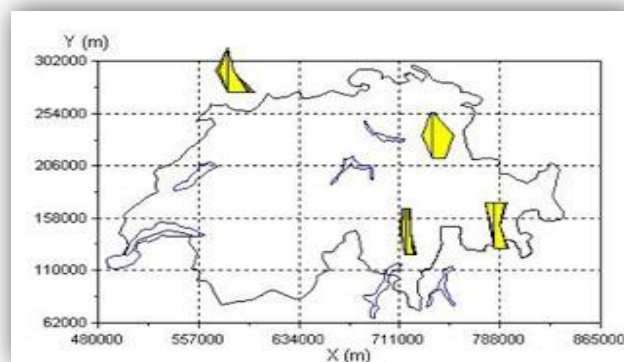


Figura 2.4 Distribución de diagrama de Stiff

Fuente: (<http://www.aguaysig.com>)

### 2.1.1.6.2 Diagrama de Piper

El Diagrama de Piper es de los más utilizados para el estudio de interpretación de datos derivados de los análisis de hidroquímica, en él se incluyen aniones y cationes en forma simultánea. Este gráfico permite representar muchos análisis sin dar origen a confusiones. Las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas. (<http://www.aguaysig.com>)

El diagrama de Piper está formado por dos triángulos equiláteros, donde se representan los cationes y aniones mayoritarios. Los vértices del triángulo de cationes son  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^{++} \text{K}^{+}$ . Los vértices del triángulo de aniones son  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^{-1}$  y  $\text{HCO}_3$ . Los datos de los diagramas triangulares se proyectan en un rombo central en el que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes.

Las concentraciones de los iones dadas en meq/l se expresan como porcentaje con respecto a la suma de aniones y cationes respectivamente. En cada triángulo se reúnen solo tres aniones y tres cationes. A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión (Figura 2.5). (<http://www.aguaysig.com>)

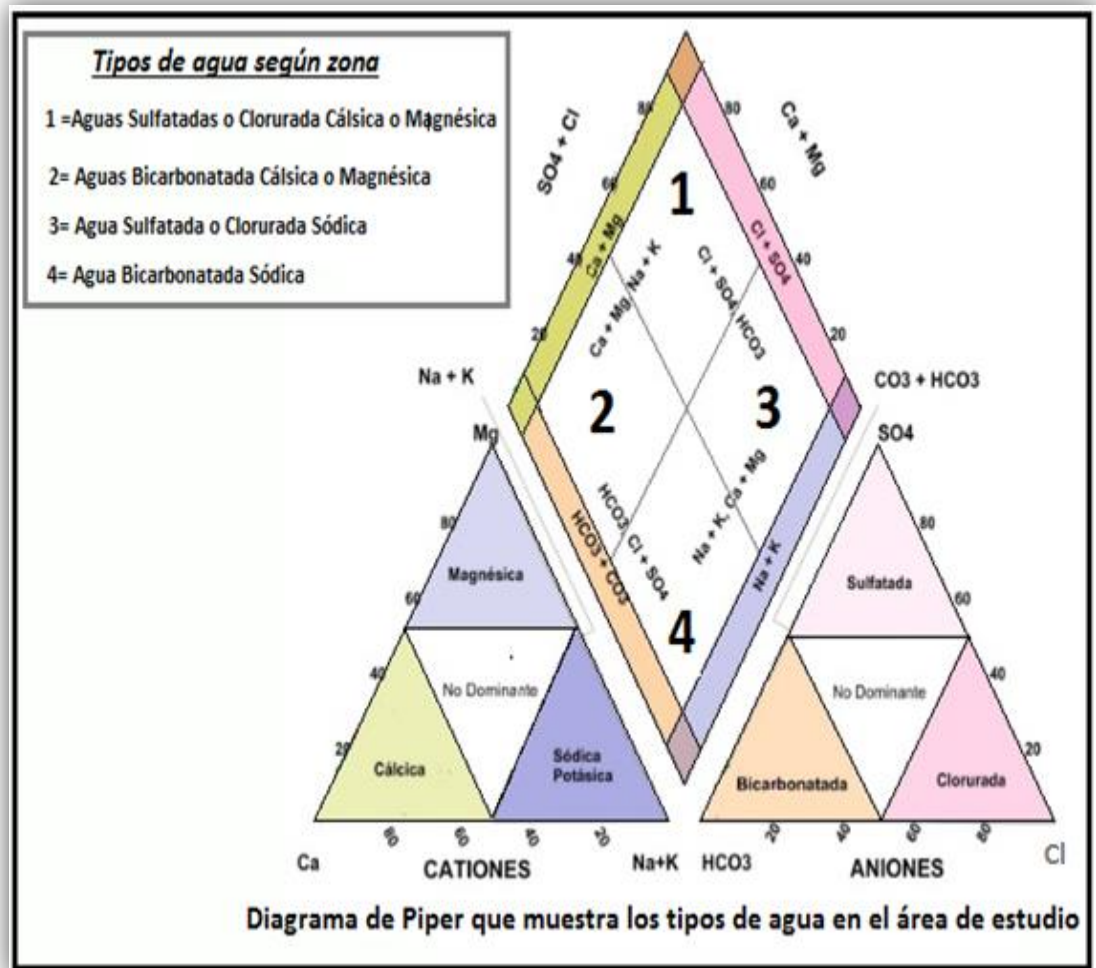


Figura 2.5 Diagrama de Piper

Fuente: <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx>

## 2.1.2 Caracterización Geológica

La caracterización geológica consiste definir los materiales que conforman la superficie terrestre de acuerdo a su tipo, las rocas pueden ser: ígneas, sedimentarias y metamórficas, además definir su composición y edad.

### **2.1.2.1 Geología**

De acuerdo con Pérez y Merino (Pérez y Merino, 2009), la geología es la ciencia que estudia la forma de la tierra, la materia que la compone, su mecanismo de formación, los cambios o alteraciones que esta ha experimentado desde sus orígenes, y la textura y estructura que tiene en el actual estado.

La información geológica del terreno se presenta sobre un mapa geológico en el cual se definen los diferentes tipos de materiales como rocas y sedimentos que afloran en la superficie terrestre y las relaciones espaciales del terreno en estudio.

### **2.1.3 Caracterización Hidrográfica**

La caracterización hidrográfica está dirigida fundamentalmente a cuantificar todos los parámetros que describen la estructura física y territorial de una cuenca, con el fin de establecer las posibilidades y limitaciones de recursos naturales, pero también para identificar los problemas presentes y potenciales. La delimitación del territorio, la forma, tamaño, área y drenaje son parámetros fundamentales para la correcta caracterización hidrográfica.

#### **2.1.3.1 Hidrografía**

La Hidrografía es una rama de la Geografía Física que se ocupa de la descripción de los mares y las corrientes de agua que existen en el planeta. Se encarga de estudiar características como el drenaje y la cuenca, y están representadas en un mapa hidrográfico.

## **2.2 TIPOS DE ACUÍFEROS Y PARÁMETROS HIDRÁULICOS**

Los acuíferos se pueden clasificar de dos maneras una es por el grado de confinamiento que poseen sus aguas y la otra es por la facilidad con que el acuífero puede transmitir el agua a través de las formaciones geológicas.

### **2.2.1 Clasificación de acuíferos por el grado de confinamiento**

Los acuíferos de acuerdo con el grado de confinamiento que poseen las aguas se pueden clasificarse en tres tipos:

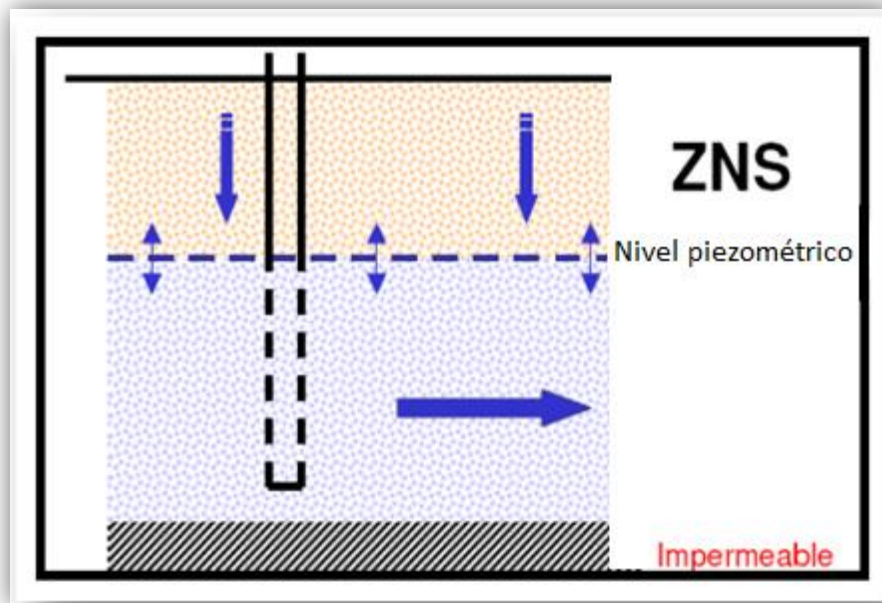
#### **2.2.1.1 Acuíferos libres**

Los acuíferos libres también llamados, no confinados o freáticos (Figura 2.6). Son formaciones Geológicas en las cuales el agua que satura los poros se encuentra almacenada sobre un estrato impermeable y la parte superior constituye el nivel freático.

El agua contenida en los poros en la parte superior del acuífero se encuentra sometida a presión atmosférica, tal como si estuviera contenida en un recipiente abierto.

En cualquier nivel dentro de un acuífero libre, la presión hidrostática es equivalente a la profundidad desde la superficie libre hasta el punto en cuestión, y puede expresarse en metros de columna de agua. El nivel freático define el límite de saturación del acuífero

libre y coincide con la superficie piezométrica. Su posición no es fija, sino que varía en función de las épocas secas o lluviosas. (<http://ri.ues.edu.sv/458/1/10136842.pdf>)



*Figura 2.6 Acuífero libre*

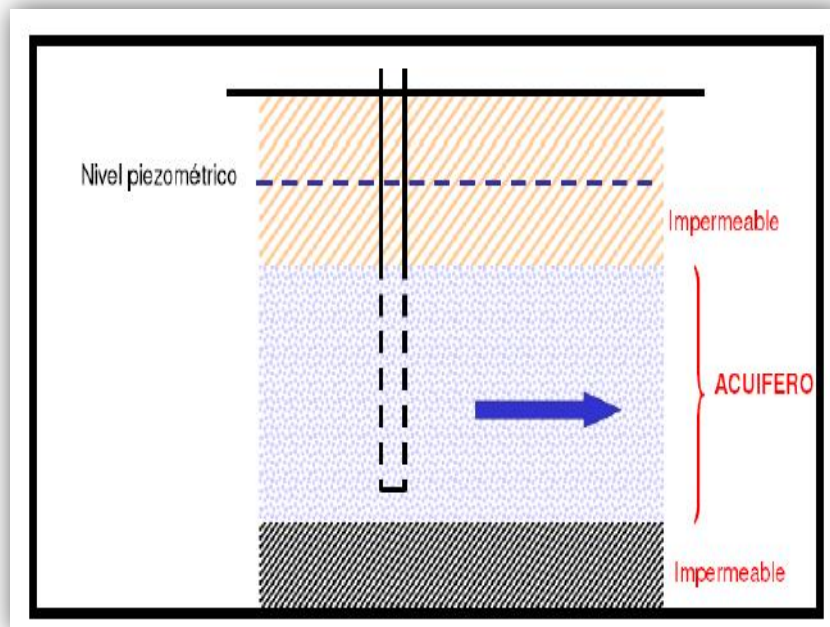
*Fuente: José García et al., 2011, Noel López et al., 2011, José Muñoz et al., 2011*

### **2.2.1.2 Acuíferos confinados**

Los acuíferos confinados son formaciones geológicas en las cuales el agua que satura los poros del estrato permeable se encuentra sometida a una presión hidrostática superior a la presión atmosférica, por lo tanto, al perforarles el agua fluye hacia afuera del mismo. En este caso el acuífero yace entre estratos impermeables situados por encima y debajo del acuífero (Figura 2.7), es decir se halla confinado y no existe zona no saturada.



En muchos casos, las formaciones que confinan a un acuífero de este tipo poseen alguna permeabilidad de manera que cuando el nivel piezométrico cae por debajo del acuitardo, ocurre recarga por percolación vertical desde los acuíferos superiores. (<http://ri.ues.edu.sv/458/1/10136842.pdf>)



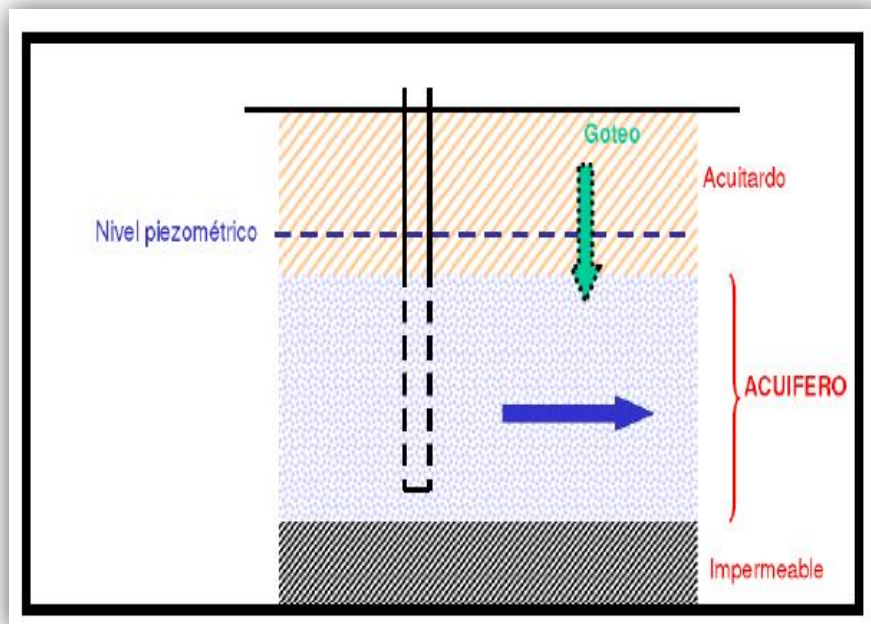
*Figura 2.7 Acuífero confinado*

*Fuente: José García et al., 2011, Noel López et al., 2011, José Muñoz et al., 2011*

### **2.2.1.3 Acuíferos semiconfinados**

Los acuíferos semiconfinados (Figura 2.8), son acuíferos completamente saturados sometidos a presión mayor que la atmosférica, están limitados en su parte superior por una capa semipermeable (Acuitardo) y en su parte inferior por una capa impermeable (Acuicierre o acuífugo) o también por otro acuitardo. Por lo tanto, en los acuíferos

semiconfinados es posible la filtración vertical muy lenta a través del material confinante semipermeable. Un mismo acuífero puede ser libre, confinado y semiconfinado según sectores. (<http://ri.ues.edu.sv/458/1/10136842.pdf>)



*Figura 2.8 Acuífero semiconfinado*

*Fuente: José García et al., 2011, Noel López et al., 2011, José Muñoz et al., 2011*

## **2.2.2 Clasificación de acuíferos según comportamiento hidrodinámico**

Los acuíferos de acuerdo con la facilidad que poseen para transmitir el agua se clasifican en tres tipos:

### **2.2.2.1 Acuicludos**

Los acuicludos son formaciones que contienen agua en su interior pero que no la pueden transmitir. Esto sucede por ejemplo en las arcillas que, aunque pueden llegar a contener grandes cantidades de agua porque son materiales sumamente porosos, hasta un 50 %, no la transmiten dado el pequeño tamaño de sus poros.

(<https://pendientedemigracion.ucm.es/info>)

### **2.2.2.2 Acuitardos**

El acuitardo (Figura 2.9), es una formación que puede almacenar agua, pero que la transmiten con lentitud. Como el agua fluye lentamente hacia los pozos, estos tardarán mucho tiempo en recuperar de nuevo su nivel después de una extracción. Por esto el caudal que se podría extraer es considerablemente menor que en el caso de un acuífero, de manera que resulta poco rentable para el abastecimiento humano, aunque podrían ser suficientes para abastecimiento a pequeñas comunidades. Un ejemplo de este tipo serían los materiales detríticos mal clasificados, como una mezcla de arenas y arcillas. (<https://pendientedemigracion.ucm.es/info>)

### **2.2.2.3 Acuífugos**

Los Acuífugos (Figura 2.9), son aquellas formaciones geológicas absolutamente impermeable que no pueden almacenar agua, ni transmitirla, como ocurre por ejemplo en un macizo granítico no alterado, o unas rocas metamórficas sin apenas meteorización ni fracturación. (<http://ri.ues.edu.sv/458/1/10136842.pdf>)

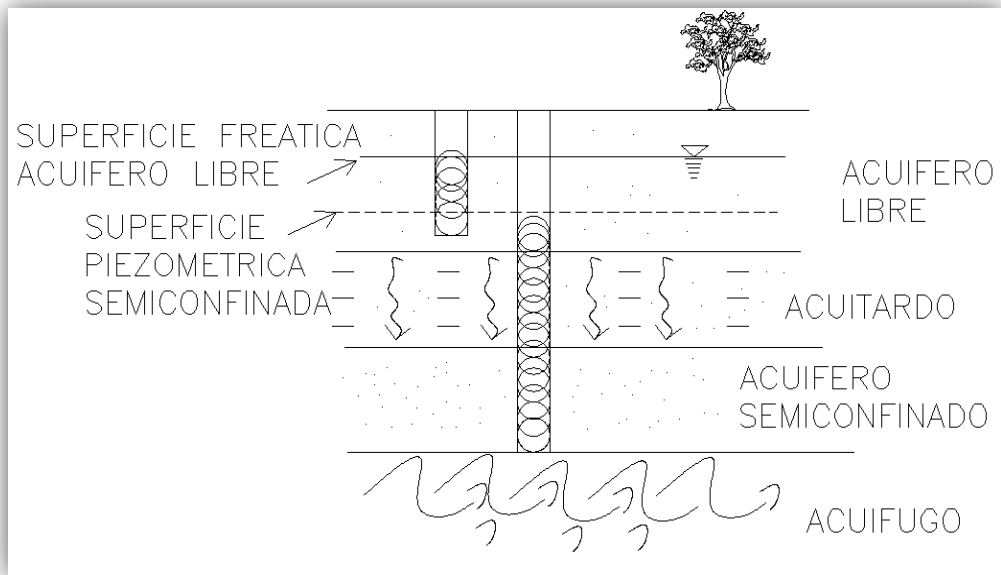


Figura 2.9 Representación de Acuitardo y Acuífugo

Fuente: <http://gea.ciens.ucv.ve/geoquimi/hidro/wpcontent/uploads/2011/07/fundamentales>

### 2.2.3 Parámetros Hidráulicos

Las características hidráulicas importantes para caracterizar a un acuífero es la capacidad del acuífero para almacenar el agua y poder transmitirla a través de él, también el coeficiente de almacenamiento el cual determina dicha capacidad de almacenamiento; mientras que la conductividad hidráulica ayuda a identificar el transporte del agua dentro del mismo. Para poder entender más acerca de los parámetros hidráulicos y en que ayudan éstos para caracterizar y clasificar un acuífero se definen a continuación.

### **2.2.3.1 Conductividad Hidráulica**

La conductividad hidráulica es una propiedad tensorial del medio que refleja la capacidad del mismo a que el agua circule a través suyo (Conceptos básicos de hidrología subterránea, 2009).

La conductividad hidráulica constituye un concepto más general que la permeabilidad, de la que se diferencia porque depende no sólo de las características del espacio poroso, sino también de la condición misma del agua y de la conectividad de los poros. Por tanto, la conductividad hidráulica del suelo depende principalmente de su estructura, de la conectividad de los poros, del contenido de humedad del suelo y de la temperatura del agua.

La conductividad disminuye cuando también lo hace el contenido de humedad. Por otra parte, por ser los poros mayores los primeros en vaciarse, las moléculas de agua quedan más próximas a las superficies de las paredes de los poros y con ello se produce un incremento de la resistencia viscosa a la filtración. Por estas razones la conductividad hidráulica se considera como una función del contenido de agua del suelo Klute y Dirksen (Klute y Dirksen, 1986), y dos medios con la misma porosidad pueden mostrar distinta conductividad hidráulica.

En la siguiente (Figura 2.10), se puede observar la representación de la conectividad entre poros del suelo, si estos poros no estuvieran más conectados la facilidad de circulación del agua disminuiría considerablemente.

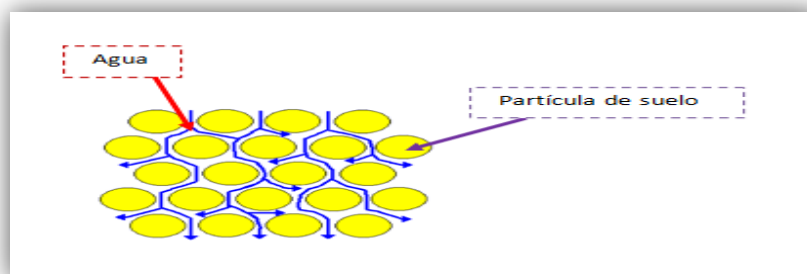


Figura 2.10 Representación de la conectividad entre poros de suelos

Fuente: <http://gea.ciens.ucv.ve/geoquimi/hidro/wpcontent/uploads/2011/07/.pdf>

En la tabla (2.2) se muestran los valores de la conductividad hidráulica (Custodio y Llamas, 1983).

Tabla 2.2 Valores de conductividad hidráulica<sup>3</sup>

<b>Rango</b>	$10^{-7} a$ $3 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4} a$ $5 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-2} a$ $5 \times 10^0$	$5 \times 10^0 a$ $4 \times 10^2$	$4 \times 10^2 a$ $3 \times 10^5$
<b>Calificación</b>	Impermeable	Poco Permeable	Algo Permeable	Permeable	Muy Permeable
<b>Calificación de la formación</b>	Acuícludos	Acuitardo	Acuífero Pobre	Acuífero Regular	Acuífero Excelente
<b>Ejemplos de materiales</b>	Arcilla compacta, Pizarra, Granito	Limo arenoso, Limo, Arcilla Limosa	Arena fina, Arena limosa, Caliza fracturada	Arena limpia, Grava, Arena Fina	Grava Limpia

<sup>3</sup>Conceptos básicos de hidrología subterránea, 2009

### **2.2.3.1 Transmisividad (T)**

La Transmisividad es el caudal que circula en un acuífero por unidad de amplitud bajo un gradiente unidad. En un acuífero homogéneo es igual al producto de conductividad hidráulica y el espesor de la zona saturada. Sus unidades son ( $m^2/día$ ) (Conceptos básicos de hidrología subterránea, 2009).

De acuerdo a Theis (Theis ,1935), la transmisividad representa la capacidad que tiene un acuífero de transmitir agua.

Para una mejor comprensión del concepto de transmisividad nos auxiliaremos de la (Figura 2.11). En esta figura se puede observar que los dos estratos acuíferos deben dar el mismo caudal, uno de ellos tiene la mitad de permeabilidad, pero el doble de espesor que el otro; por tanto, la transmisividad es el parámetro que nos indique la facilidad del agua para circular horizontalmente por una formación geológica será una combinación de la permeabilidad y del espesor.

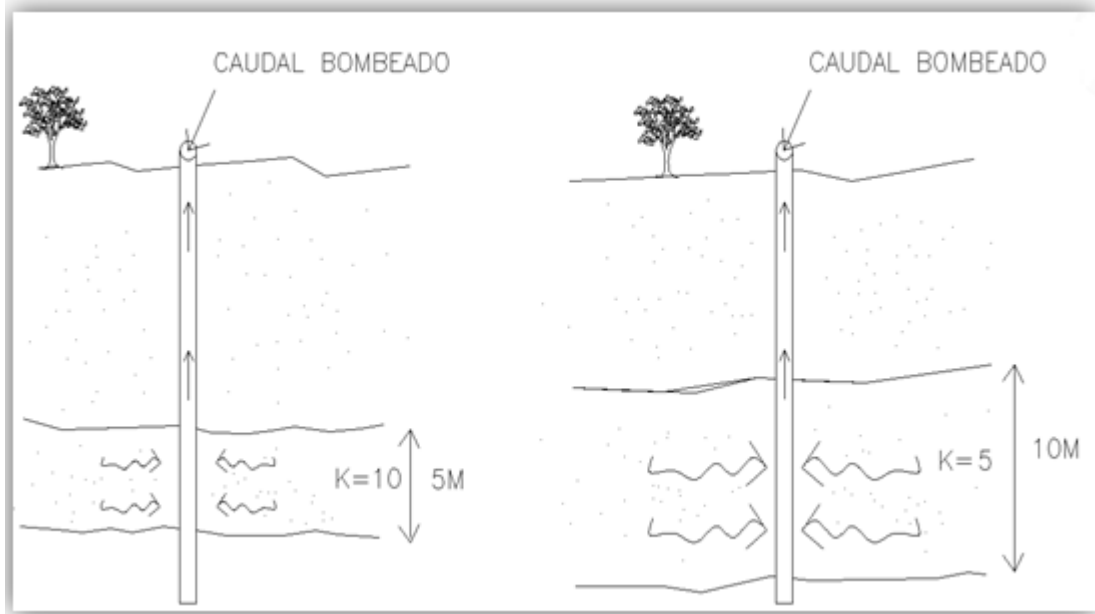


Figura 2.11 Transmisividad

Fuente:<http://gea.ciens.ucv.ve/geoquimi/hidro/wpcontent/uploads/2011/07/fundamentales.pdf>

La tabla (2.3) muestra los rangos típicos que se pueden obtener para la transmisividad.

Tabla 2.3 Valores de Transmisividad <sup>4</sup>

<b>T(m<sup>2</sup>/Día)</b>	<b>Calificación Estimada</b>
T<10	Muy Baja
10<T<100	Baja
100<T<500	Mediana
500<T<1000	Alta
T>1000	Muy Alta

<sup>4</sup><http://www.agua.uji.es/pdf/presentacionHQ4.pdf>



### 2.2.3.3 Coeficiente de Almacenamiento (S)

El coeficiente de almacenamiento (Figura 2.12), es el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero de sección igual a la unidad y altura igual a la del acuífero saturado, si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico o de carga hidráulica (Custodio y Llamas, 1983). El coeficiente de almacenamiento es adimensional y siempre menor que 1.

El valor del Coeficiente de Almacenamiento dependerá del tipo de acuífero en que se encuentren las aguas subterráneas, de la siguiente manera:

- Acuíferos libres de  $3.1 \times 10^{-1}$  a  $10^{-2}$ .
- Acuíferos semiconfinados de  $10^{-3}$  a  $10^{-4}$ .
- Acuíferos confinados de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$ .

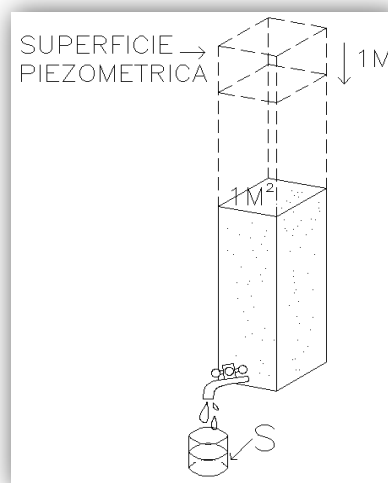


Figura 2.12 Coeficiente de Almacenamiento

Fuente: <http://gea.ciens.ucv.ve/geoquimi/hidro/wpcontent/2011/07/fundamentales>.

## 2.3 VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DE ACUÍFEROS

El concepto vulnerabilidad de acuíferos tiene diversas definiciones, calificaciones y metodologías para ser evaluada. A continuación, brindamos algunas definiciones de autores que han profundizado mucho en la temática de vulnerabilidad intrínseca de acuíferos.

Según Foster Y Hirata (Foster Y Hirata, 1991), la “Vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, representa su sensibilidad para ser adversamente afectado por una carga contaminante impuesta”.

De acuerdo con Environmental Protection Agency (EPA ,1991) hace referencia a la vulnerabilidad subterránea respecto a un plaguicida, como la facilidad con que un contaminante aplicado en la superficie, puede alcanzar el acuífero en función de las prácticas agrícolas empleadas, las características del plaguicida y la susceptibilidad hidrogeológica. Esta definición incorpora, además de las condiciones del medio, las propiedades del contaminante y las prácticas de cultivo (Vulnerabilidad específica).

De acuerdo a Carbonell (Carbonell ,1993), define la vulnerabilidad a la contaminación, como la tendencia de los contaminantes a localizarse en el sistema de agua subterránea, luego de ser introducidos por encima del acuífero más somero. En este caso el autor considera solamente la acción de los contaminantes.

De acuerdo con Vrba Y Zaporozec (Vrba Y Zaporozec, 1994), definen a la vulnerabilidad como “Una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad del mismo a los impactos humanos y/o naturales”.

De acuerdo con Balairón (Balairón, 2000), la vulnerabilidad intrínseca: Depende exclusivamente de las características hidrogeológicas del acuífero. Estas determinarán la mayor o menor accesibilidad del medio a la penetración de los contaminantes, así como la capacidad de atenuación del medio como resultado de la retención físico-química o de la reacción de los polucionantes con el terreno.

En esta tesis nos referiremos a determinar la vulnerabilidad intrínseca de un acuífero. A continuación, indicamos algunos de los métodos que se utilizan para determinar la vulnerabilidad intrínseca.

### **2.3.1 Método de evaluación de acuíferos**

Existen diferentes metodologías utilizadas en la valoración de la vulnerabilidad intrínseca de un acuífero a la contaminación. En esencia, la mayoría coinciden en determinar la vulnerabilidad en función de las características intrínsecas del medio. A continuación, se citan las metodologías más empleadas para la evaluación de la vulnerabilidad:

1. **DRASTIC**
2. **SINTACS**
3. **GOD**

4. **EPIK**

5. **BGR**

En este trabajo para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero sólo se utilizará uno de estos métodos: **MÉTODO GOD**. El cual se detallará en el apartado siguiente.

### **2.3.2 Método GOD**

La metodología GOD (Figura 2.13), es un método muy usado en la gestión de recursos hídricos para determinar la vulnerabilidad del acuífero; fue desarrollado por Foster (1987) y es un método sencillo y sistemático ya que en este método sólo es necesario delimitar 3 índices, por lo que se usa cuando se cuenta con escasos datos.

Por su estructura simple y pragmática, es el método utilizado en primer lugar para estimar la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero.

Entre las desventajas es que toma simplificaciones muy grandes como: no tener en cuenta el tipo de suelo, la infiltración efectiva ni la dispersión/dilución de contaminantes dentro del acuífero, por lo que se pierde definición y no es posible diferenciar un tipo de contaminante de otro.

El método GOD se basa en la asignación de índices entre 0 y 1 a tres variables, que son las que nominan el acrónimo **GOD**:

**G**: groundwater occurrence. Tipo de acuífero o modo de confinamiento u ocurrencia del agua subterránea.

**O:** overall aquifer class. Litología de la zona no saturada. Se evalúa teniendo en cuenta el grado de consolidación y las características litológicas y como consecuencia, de forma indirecta y relativa, la porosidad, permeabilidad y contenido o retención específica de humedad de la zona no saturada.

**D:** depth to groundwater. Profundidad del agua subterránea o del acuífero.

El índice de vulnerabilidad GOD se obtiene, entonces, de multiplicar los valores asignados a cada parámetro:  $iV_{GOD} = G * O * D$  Ecuación (2.1)

La lógica en la asignación de índices a cada variable es el resultado de un estudio previo del autor con respecto a las características de tipo de acuífero, litología de la zona no saturada y profundidad del agua subterránea. Estos índices fueron establecidos considerando la característica y la facilidad que permite ésta, para un desplazamiento más rápido de cualquier contaminante hacia aguas subterráneas.

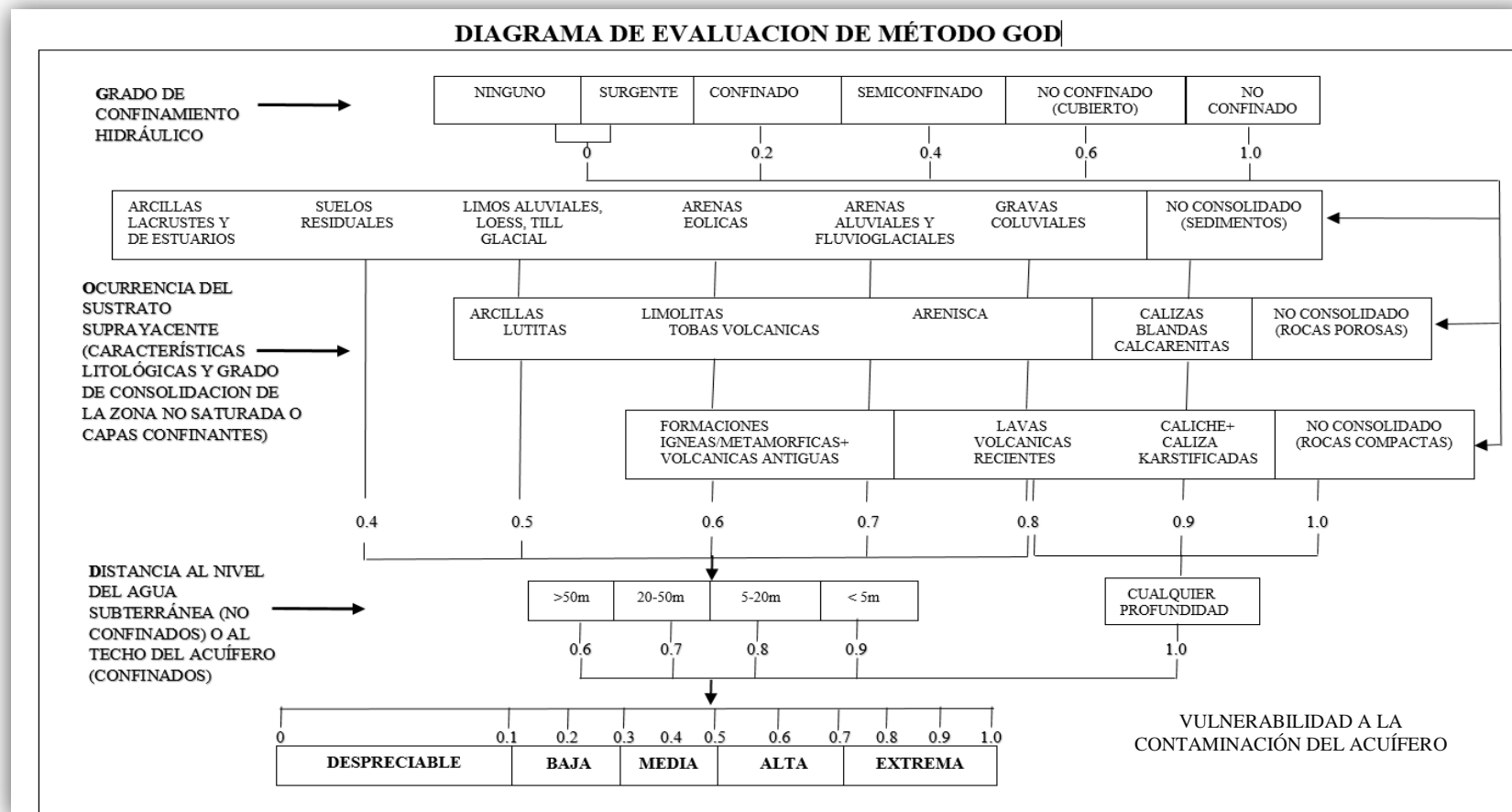


Figura 2.13 Diagrama de evaluación de método GOD

Fuente: <http://revistas.ufpr.br/hidrogeologia/article/download/2652/2193> modificada (19/09/16)

Los resultados  $iV_{GOD}$  pueden variar  $<0.1$  y  $1.0$ ; en la tabla (2.4) se observan las categorías de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación:

*Tabla 2.4 Categorías de vulnerabilidad para el método GOD<sup>5</sup>*

<b>Puntaje</b>	<b>Vulnerabilidad</b>
0.7-1.0	Extrema
0.5-0.7	Alta
0.3-0.5	Media
0.1-0.3	Baja
$<0.1$	Despreciable

*Tabla 2.5 Definición práctica de las clases de vulnerabilidad<sup>6</sup>*

<b>Clase de vulnerabilidad</b>	<b>Definición</b>
Extrema	Vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto en muchos escenarios de contaminación.
Alta	Vulnerable a mucho a contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados en muchos escenarios de contaminación).
Media	Vulnerable a algunos contaminantes solo cuando son continuamente descargados o lixiviados.
Baja	Solo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo.
Depreciable	Presencia de capas confinadas en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante.

<sup>5</sup><http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/acuiferos/Propuesta-metodologica-Vulnerabilidad-Intrinseca-de-lo-Acuiferos-a-la-Contaminacion.pdf>

<sup>6</sup><http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/acuiferos/Propuesta-metodologica-Vulnerabilidad-Intrinseca-de-lo-Acuiferos-a-la-Contaminacion.pdf>

## **2.4 RECARGA POTENCIAL EN ACUÍFERO**

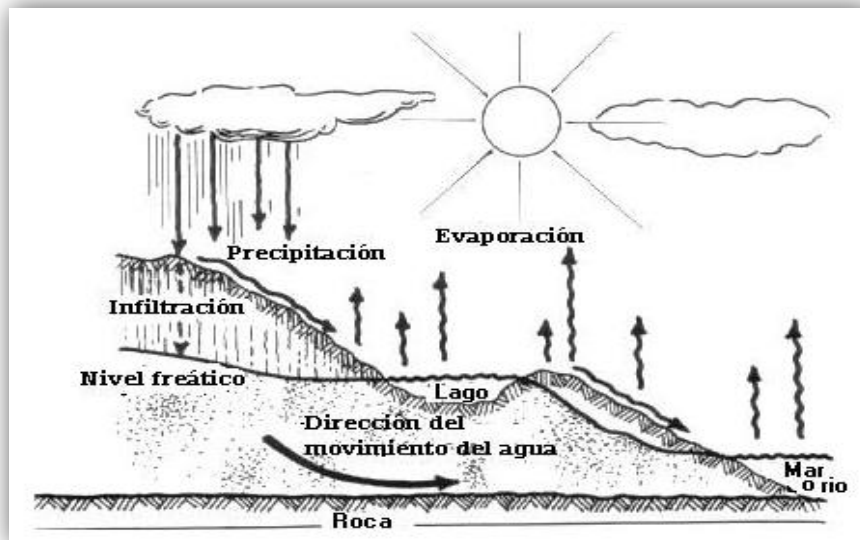
A continuación, se presentan algunos conceptos importantes que serán utilizados en el trabajo de investigación relacionados con la recarga acuífera.

### **2.4.1 Ciclo Hidrológico**

El ciclo hidrológico (Figura 2.14) comprende una serie de procesos continuos e interdependientes, de movimiento y transferencia de agua en la tierra, el océano, cuerpos de agua y en la atmósfera. Por ser un ciclo, no tiene punto de partida, sin embargo, para explicarlo, se puede comenzar por la evaporación que se produce en el océano, en lagos, embalses, y todo tipo de cuerpos de agua, y la evapotranspiración de las plantas, la cual es la combinación del agua que se pierde por evaporación en el suelo y transpiración en el material vegetal. Esta evaporación y evapotranspiración, son producidas por la energía suministrada por el sol e influenciadas por las condiciones climáticas e hídricas de temperatura, radiación, viento y humedad. De esta forma, el agua cambia de un estado líquido a un estado gaseoso. El agua en forma de vapor pasa a la atmósfera, y en este ascenso, pierde calor y se produce el proceso de condensación alrededor de núcleos de condensación, los cuales pueden ser partículas de polvo que flotan en el aire, creando pequeñas gotas de agua. Estas pequeñas gotas de agua, crean nubes, y en su circulación se van uniendo entre ellas, creando gotas más grandes, las cuales, por su peso, se precipitan finalmente en forma de lluvia, nieve o granizo.



Parte de la precipitación es interceptada por la vegetación, otra parte cae al suelo y dependiendo de las condiciones de cobertura del suelo, del tipo de suelo y de la pendiente del terreno, esta agua puede quedar encharcada, escurrir superficialmente o infiltrarse. El agua que escurrir superficialmente corre hacia los cuerpos de agua y finalmente al mar. Una parte del agua que se infiltra es retenida por el suelo, cuya capacidad de retención depende de su textura y estructura que forman la porosidad; otra parte del agua infiltrada se convierte también en esorrentía superficial al ser saturada la capacidad de almacenamiento del suelo; otra parte se convierte en flujo sub-superficial, y por último otra parte percola, hacia capas inferiores produciendo la recarga de aguas subterráneas. El agua que se infiltra, viaja lentamente y llega a alimentar a ríos y manantiales, y finalmente al mar.



*Figura 2.14 Descripción del ciclo hidrológico*

*Fuente <http://www.jmarcano.com/nociones/ciclo1.html>*

## 2.4.2 Recarga en un acuífero

El agua del subsuelo se alimenta de las lluvias, ya sea directamente o indirectamente a través de las corrientes superficiales y lagos. El agua de lluvia sufre primero interceptación debido a la vegetación, y almacenamiento en las depresiones del terreno y en la zona vadosa. Del resto, una parte sufre escorrentía y otra llega eventualmente a la zona de agua subterránea. Quiere decir que sólo las lluvias prolongadas de fuerte magnitud alimentan el agua del subsuelo.

La recarga natural del agua del subsuelo es un proceso irregular e intermitente, en que intervienen la geología y el perfil del terreno, entre otros factores.

La recarga a un acuífero puede definirse entonces como el agua que se infiltra desde la superficie proveniente principalmente de la lluvia que alcanza las reservas subterráneas.

Es importante prestar atención en la estimación de la recarga de los acuíferos, ya que es necesario determinar la cantidad de agua que llega a ellos, su calidad, procedencia y las zonas donde se presenta recarga o descarga del flujo subterráneo, por este motivo su cuantificación es un aspecto incluido dentro de estudios referentes a los recursos de agua subterránea, al transporte de contaminantes, a la subsidencia o al diseño de campos de pozos (Isaar y Passchier, 1990).

#### **2.4.2.1 Recarga potencial en un acuífero**

Al ocurrir la precipitación, el agua que se infiltra llena los poros del suelo y al llegar a su capacidad máxima de acumulación de agua, el suelo está en capacidad de campo, cabe decir que se parte de que el suelo no está saturado. Al terminar la lluvia, comienza la evapotranspiración, que es cuando las raíces comienzan a tomar el agua que se encuentran en los poros del suelo. Si la precipitación es suficiente como para llevar al suelo a capacidad de campo y llenar la necesidad de evapotranspiración, el sobrante de agua que infiltra, percola para recargar potencialmente el acuífero, dicha recarga se conoce como recarga potencial del acuífero.

### **2.4.2.2 Importancia del conocimiento de la recarga en un acuífero**

La teoría de la sostenibilidad del manejo de un acuífero indica, que no se debe extraer más agua subterránea que la que se recupera a través de la recarga acuífera en un año.

Con la información de la recarga acuífera se puede determinar: Áreas de protección del acuífero, apoyar al ordenamiento territorial, etc. (Hernández, 2007).

### **2.4.2.3 Tipos de recarga en un acuífero**

La recarga a un acuífero puede darse naturalmente debido a la precipitación, a las aguas superficiales, es decir, a través de ríos y lagos, o por medio de transferencias desde otras unidades hidrogeológicas o acuíferos; pero también puede darse de manera artificial producto de actividades como la irrigación, fugas de redes de abastecimiento o por infiltraciones de embalses y depósitos (Balek, 1988; Custodio, 1997; Simmers, 1990; Lerner, 1990; Samper, 1997).

### **2.4.3 Método para la estimación de recarga acuífera**

La recarga puede determinarse por varios métodos, y se clasifican en:

- **Medidas directas.** La recarga se mide directamente mediante la construcción de lisímetros. Un lisímetro es un dispositivo que permite medir el flujo que drena hasta el acuífero.

- **Balance Hídrico de Suelos.** Se determinan los flujos de entrada y de salida de un sistema, y la recarga al acuífero constituye el residuo de la ecuación de balance.
- **Técnicas de Darcy.** Se encuentran valores de pendientes hidráulicas a partir de las ecuaciones de flujo de Richards y Boussinesq y luego se determina la velocidad de filtración. Si se asumen condiciones estables la recarga se determina directamente de la ecuación de Darcy.
- **Técnicas de Trazadores.** Su principal uso es determinar fuentes de recarga y zonas de descarga, aunque se utilizan para cuantificar la recarga a través de un balance de masa del trazador.
- **Métodos Empíricos.** Consiste en el desarrollo de ecuaciones empíricas que relacionan la recarga con alguna variable como la precipitación.

Para la realización de esta tesis se adoptará la metodología de balance hídrico de suelos, específicamente el método de Gunther Schosinsky, el cuál será descrito a continuación.

#### **2.4.3.1 Método Gunther Schosinsky para el cálculo de la recarga potencial hídrica del acuífero**

El método Schosinsky y Losilla (Schosinsky y Losilla ,2000) para el cálculo de la recarga potencial hídrica del acuífero; fue desarrollado para el cálculo de la infiltración a partir de las condiciones fisiográficas de los suelos y condiciones meteorológicas del lugar a estudiar, en otras palabras, el método se basa en el coeficiente de infiltración de los

suelos y la distribución de precipitación; donde la infiltración (I) están en función de la pendiente del terreno ( $K_p$ ), usos de suelos ( $K_v$ ) y textura de los suelos asociada a su procedencia geológica ( $K_{fc}$ ).

#### **2.4.3.1.1 Definición del método**

El método Gunther Schosinsky consiste en determinar la recarga potencial de un acuífero mediante un balance hídrico de suelos, determinando primero la lluvia que es interceptada por el follaje, en segundo lugar, la infiltración del lugar en estudio y posteriormente se calcula el balance hídrico de suelos.

Para determinar la infiltración de una determinada zona es necesario conocer los siguientes parámetros:

- La precipitación mensual de la zona.
- La Infiltración en los suelos de la zona.
- La cobertura vegetal y la pendiente de la zona.

Al determinar estos parámetros se procede a calcular la infiltración con la ecuación propuesta por Gunther Schosinsky y Losilla.

Calculada la infiltración, se calcula el balance hídrico de suelos para determinar la recarga potencial en el acuífero.

El concepto de balance hídrico se deriva del concepto de balance de materia, es decir, que es el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado.

Las entradas corresponden a la precipitación y a la infiltración del agua desde la superficie del suelo y las salidas corresponden a la evapotranspiración y escorrentía superficial. A continuación, se muestra un esquema de balance hídrico de suelos para el municipio de San Sebastián Salitrillo, Santa Ana (Figura 2.15).



*Figura 2.15 Esquema del modelo de balance hídrico para el municipio de San Sebastián Salitrillo*

*Fuente "Elaboración propia"*

Para poder realizar el balance de suelos por el método de Schosinsky es necesario determinar los siguientes parámetros:

- La infiltración de lluvia que penetra al suelo.
- La cobertura vegetal del suelo.

- La profundidad de las raíces extractoras del agua.
- La capacidad de campo, el punto de marchitez del suelo.
- La humedad del suelo al inicio del análisis.
- La lluvia interceptada por el follaje.
- La evapotranspiración potencial.

A continuación, se definen y se muestran los cálculos necesarios para determinar los diferentes componentes de la metodología antes mencionada.

#### **2.4.3.1.2 Precipitación**

Según Villón (Villón, 2002), la precipitación, es toda forma de humedad que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie del suelo: de acuerdo a esta definición la precipitación puede ser en forma de:

- Lluvia.
- Granizadas.
- Nevadas.

Desde el punto de vista de la ingeniería hidrológica, la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones y análisis, forman el punto de partida de los estudios concernientes al uso y control del agua.



#### **2.4.3.1.2.1 Medición de la precipitación**

Según Villón (Villón, 2002), la precipitación se mide en términos de la altura de lámina de agua en un metro cuadrado, y se expresa comúnmente en milímetros. Esta altura de lámina de agua, indica la altura del agua que se acumularía en una superficie horizontal, si la precipitación permaneciera donde cayó.

Los aparatos de medición, se basan en la exposición a la intemperie de un recipiente cilíndrico abierto en su parte superior, en el cual se recoge el agua producto de la lluvia u otro tipo de precipitación, registrando su altura. Los aparatos de medición, se clasifican de acuerdo con el registro de las precipitaciones, en pluviómetros y pluviógrafos.

#### **2.4.3.1.2.2 Determinación de la precipitación**

Para determinar la precipitación mensual se utilizarán los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio (Figura 2.16).



*Figura 2.16 Mapa de registro de lluvia diaria*

*Fuente: <http://www.snet.gob.sv/meteorologia/registro.php>*

### **2.4.3.1.3 Lluvia interceptada por el follaje**

Para determinar la lluvia interceptada por el follaje se deben tomar en cuenta las siguientes condiciones:

Según Schosinsky y Losilla (Schosinsky y Losilla, 2000), lluvias menores de 5 mm mensuales, no van a generar infiltración ya que consideran que, en un mes con lluvia, al menos 5 mm son retenidos por el follaje sin llegar al suelo.

Según Butler (Butler, 1957), considera que la retención de la lluvia en follajes, es del 12 % de la precipitación mensual.

Sin embargo, Linsley (Linsley et al., 1958), en bosques muy densos, la retención de la lluvia se considera en un 20 %.

A partir de las condiciones antes mencionadas se obtiene la ecuación para calcular la lluvia interceptada por el follaje:

$$\text{Si } P \leq 5 \frac{\text{mm}}{\text{mes}}, \text{Ret} = P \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

$$\text{Si el producto } P * C_{fo} \geq 5 \frac{\text{mm}}{\text{mes}}, \text{Ret} = P * C_{fo} \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

$$\text{Si } P > 5 \frac{\text{mm}}{\text{mes}} \text{ y el producto } P * C_{fo} < 5 \frac{\text{mm}}{\text{mes}}, \text{Ret} = 5 \quad \text{Ecuación (2.4)}$$

Donde:

P: Precipitación mensual del mes en mm/mes.

Ret: Retención de lluvia en el follaje en mm/mes.

C<sub>fo</sub>: Coeficiente de retención del follaje, para bosques muy densos 0.20, otros 0.12, adimensional.

#### **2.4.3.1.4 Infiltración**

Según Moran (Moran, 1989), La infiltración es el paso del agua a través de la superficie del suelo hacia el interior de la tierra.

##### **2.4.3.1.4.1 Coeficiente de infiltración**

El "Manual de Instrucciones de Estudios Hidrológicos" realizado por las Naciones Unidas, con colaboración de los gobiernos de El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Panamá y Costa Rica proponen la siguiente ecuación para el análisis del

coeficiente de infiltración aparente, que corresponde a la fracción de lluvia que aparentemente se infiltra:

$$C_i = (K_p + K_v + K_{fc}) \quad \text{Ecuación (2.5)}$$

$$\text{Si } K_p + K_v + K_{fc} > 1, C = 1. \quad \text{Ecuación (2.6)}$$

$$\text{Si } K_p + K_v + K_{fc} \leq 1, \text{ entonces, } C = K_p + K_v + K_{fc}. \quad \text{Ecuación (2.7)}$$

Donde:

$C_i$ : Coeficiente de infiltración, adimensional.

$K_p$ : Fracción que infiltra por efecto de pendiente, adimensional.

$K_v$ : Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal, adimensional.

$K_{fc}$ : Fracción que infiltra por la textura del suelo, adimensional.

#### **2.4.3.1.4.2 Coeficiente de infiltración (Fracción que infiltra por textura del suelo $K_{fc}$ )**

Según Schosinsky y Losilla (Schosinsky y Losilla, 2000), uno de los factores que más influyen en la infiltración de la lluvia en el suelo, es el coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo ( $K_{fc}$ ), que está dado tentativamente por la siguiente ecuación.

$$K_{fc} = 0.267 \ln(fc) - 0.000154 fc - 0.723 \quad \text{Ecuación (2.8)}$$

Para aplicar esta ecuación  $fc$  debe estar en el rango de 16 a 1568 mm/día.

Para valores de  $fc$  menores de 16 mm/día.

$$K_{fc} = 0.0148 \frac{fc}{16} \quad \text{Ecuación (2.9)}$$

Para valores de  $fc$  mayores a 1568 mm/día.

$$K_{fc} = 1 \quad \text{Ecuación (2.10)}$$

Donde:

$K_{fc}$ : Fracción que infiltra por textura del suelo, adimensional.

$f_c$ : Infiltración básica del suelo en mm/día.

El valor de  $f_c$  corresponde a la permeabilidad saturada del suelo, el cual se obtiene en campo, a través de los siguientes métodos:

- Prueba de anillos aplicada en la superficie del terreno.
- Permeámetro Guelph.
- Prueba de Porchet.

Para la realización de esta tesis, se utilizará la prueba de Porchet ya que no se cuenta con el equipo para realizar cualquiera de las otras pruebas mencionadas, y este método no requiere de equipo especial, consiste en hacer un orificio de diámetro de 7 cm y profundidad de 30 cm en el terreno y llenarlo de agua, para después medir el nivel a cada cierto intervalo de tiempo, por último realizar los cálculos necesarios para determinar la infiltración.

#### **2.4.3.1.4.3 Coeficiente de infiltración (Fracciones que infiltran por pendiente y cobertura vegetal $K_p$ , $K_v$ )**

Según Schosinsky y Losilla (Schosinsky y Losilla, 2000), los valores sugeridos en el manual de estudios hidrológicos (ONU, 1974), de los componentes del coeficiente de infiltración son los que se muestran en la tabla (2.6).

*Tabla 2.6 Componentes del coeficiente de infiltración (ONU, 1974)*

<b>Por pendiente</b>		<b>Kp</b>
Plana	0.02% - 0.06%	0.3
Moderada	0.3% - 0.4%	0.2
Colinas	3% - 4%	0.1
<b>Por cobertura vegetal</b>		<b>Kv</b>
Terrenos cultivados		0.1
Bosques		0.2

A partir de un análisis de los índices de escorrentía propuestos por Ven Te Chow (1994) y los coeficientes dados por la ONU mostrados en la tabla (2.5) proponen los siguientes valores de los componentes del coeficiente de infiltración para el respectivo cálculo de esta tabla (2.7).

*Tabla 2.7 Coeficientes de infiltración propuestos*

<b>Por pendiente</b>		<b>Kp</b>
Muy plana	0.02% - 0.06%	0.30
Plana	0.3% - 0.4%	0.20
Algo plana	1% - 2%	0.15
Promedio	2% - 7%	0.10
Fuerte	mayor de 7%	0.06
<b>Por cobertura vegetal</b>		<b>Kv</b>
Cobertura con zacate menos de 50%		0.09
Terrenos cultivados		0.10
Cobertura con pastizal		0.18
Bosques		0.20
Cobertura con zacate más de 75%		0.21

#### **2.4.3.1.4.4 Cálculo de infiltración pluvial mensual**

Al haber determinado el coeficiente de infiltración, este se multiplica por la precipitación mensual y con esto obtenemos la fracción de agua que infiltra mensualmente en el suelo.

$$P_i = C_i * (P - Ret) \quad \text{Ecuación (2.11)}$$

Donde:

P<sub>i</sub>: Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en mm/mes.

C<sub>i</sub>: Coeficiente de infiltración, adimensional.

P: Precipitación mensual en mm/mes, dato meteorológico.

Ret: Retención de lluvia mensual por follaje en mm/mes.

En ningún caso el coeficiente de infiltración (C<sub>i</sub>) ha de ser mayor de 1, si así fuese, se le asigna a C<sub>i</sub> el valor de 1.

#### **2.4.3.1.5 Escorrentía superficial**

Según Villón (Villón, 2002), es aquella que proviene de la precipitación no infiltrada y que escurre sobre la superficie del suelo. El efecto sobre el escurrimiento total es inmediato, y existirá durante la tormenta e inmediatamente después que termine.

La parte de la precipitación total que da lugar a esta escorrentía, se denomina precipitación en exceso.

Según Villón (Villón, 2002), el escurrimiento superficial, depende fundamentalmente de dos tipos de factores:

- **Meteorológicos.** Se pueden considerar la forma, el tipo, la duración y la intensidad de la precipitación, la dirección y la velocidad de la tormenta, y la distribución de la lluvia en la cuenca.
- **Fisiográficos.** Se pueden considerar las características físicas de la cuenca (Superficie, forma, elevación, pendiente), tipo y uso del suelo, humedad antecedente del mismo.

#### **2.4.3.1.5.1 Cálculo de la escorrentía superficial**

Según Schosinsky (Schosinsky, 2000), La escorrentía superficial generada por la lluvia mensual, corresponde a la precipitación mensual, menos la retención de lluvia en el follaje, menos la infiltración. La escorrentía mensual se calcula con la siguiente ecuación:

$$ESC = P - Ret - Pi \quad \text{Ecuación (2.12)}$$

Donde:

ESC: Escorrentía superficial.

P: Precipitación en mm/mes, dato meteorológico.

Ret: Retención de lluvia mensual por follaje en mm/mes.

Pi: Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en mm/mes.

#### **2.4.3.1.6 Cálculo del balance hídrico de suelos**

Como se muestra en la definición del método para calcular el balance hídrico de suelos es necesario conocer la infiltración mensual debida a la precipitación, que se calcula



como se muestra en el apartado de infiltración. Además, se necesita conocer la capacidad de campo y punto de marchitez, estos valores se obtienen por medio de laboratorio de suelos o por medio de tabla, en nuestro trabajo utilizaremos la tabla (2.9). También se necesita conocer la profundidad de raíces que extraen agua del suelo, estos valores se tomaran de la tabla (2.10), y también se necesita conocer la evapotranspiración potencial y evapotranspiración real.

#### **2.4.3.1.7 Evapotranspiración potencial**

Se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación.

Según (Miliarium.com, 2016) existen varios métodos para el cálculo de la evapotranspiración, los cuales son:

**Métodos directos:** proporcionan valores muy apegados a la realidad. Sirven para ajustar los parámetros de los métodos empíricos.

- Evapotranspirómetros.
- Lisímetros.
- Parcelas y cuencas experimentales.
- Método gravimétrico.

**Métodos indirectos:** estiman la evapotranspiración en cortos intervalos de tiempo (Inferiores a 30 minutos), por lo que permiten determinar este parámetro en tiempo real.

- Balance de energía.
- Fórmulas semiempíricas: fórmula de Penman.
- etc.

**Métodos climatológicos:** estiman la evapotranspiración en periodos mínimos de una semana a partir de fórmulas empíricas.

- Correlación entre medidas de evaporación en estanques.
- Fórmula de Thornthwaite.
- Fórmula de Blaney-Criddle.
- Fórmula de Makkink.
- Fórmula de Turc.
- Fórmula de Coutagne.
- Método de Penman.
- Método de Penman-Monteith.
- Curva de Hansen.
- Método de Jensen-Haise.
- Fórmulas de Stephens.
- Fórmula de Doorenbos-Pruitt.
- etc.

Para la elaboración de esta tesis se utilizará la fórmula de Hargreaves para el cálculo de la evapotranspiración potencial, estos datos se solicitaran, al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), para el cálculo de evapotranspiración.

#### **2.4.3.1.7.1 Fórmula de Hargreaves**

La fórmula creada por el Dr. George Hargreaves (Hargreaves, 1975) sugiere el cálculo de la evapotranspiración potencial a partir de datos medidos de temperaturas, y de datos de radiación solar.

$$ETP = 0.0135 (t_{med} + 17.78) * R_S \quad \text{Ecuación (2.13)}$$

Donde:

ETP: Evapotranspiración potencial diaria en mm/día.

$t_{med}$ : Temperatura media en °C.

$R_S$ : Radiación Solar incidente, convertida en mm/día.

#### **Cálculo de la radiación solar incidente ( $R_S$ )**

La radiación solar incidente,  $R_S$ , se evalúa a partir de la radiación solar extraterrestre (La que llega a la parte exterior de la atmósfera, que sería la que llegaría al suelo si no existiera atmósfera); ésta última aparece según los autores como  $R_0$  ó  $R_a$ , y la leemos en tablas en función de la latitud del lugar y del mes.

Samani (Samani, 2000) propone la siguiente fórmula:

$$R_S = R_0 * KT * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad \text{Ecuación (2.14)}$$

Donde:

$R_s$ : Radiación solar incidente.

$R_o$ : Radiación solar extraterrestre, valor que se obtiene de tabla (2.8).

$K_T$ : Coeficiente.

$t_{max}$ : Temperatura máxima diaria.

$t_{min}$ : Temperatura mínima diaria.

El coeficiente  $K_T$  es un coeficiente empírico que se puede calcular a partir de datos de presión atmosférica, pero Hargreaves recomienda  $K_T = 0,162$  para regiones del interior y  $K_T = 0,19$  para regiones costeras.

### **Fórmula simplificada**

Sustituyendo  $R_s$  en la ecuación (2.13) y tomando un valor medio de  $K_T = 0.17$ , se obtiene la expresión simplificada, ecuación (2.15).

$$ETP = 0.0023 (t_{med} + 17.78)R_o * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad \text{Ecuación (2.15)}$$

Donde:

ETP: Evapotranspiración potencial diaria en mm/día.

$t_{med}$ : Temperatura media en °C.

$R_o$ : Radiación solar extraterrestre, valor que se obtiene de tabla (2.8).

$t_{max}$ : Temperatura máxima diaria en °C.

$t_{min}$ : Temperatura mínima diaria en °C.

#### 2.4.3.1.7.2 Evapotranspiración potencial real

Esta metodología asume que la evapotranspiración potencial real será proporcional a la humedad del suelo, comparada con la diferencia de humedad entre la capacidad de campo y el punto de marchitez, de esta asunción resulta la siguiente ecuación:

$$ETPR = \left( \frac{HS-PM}{CC-PM} \right) (ET) \quad \text{Ecuación (2.16)}$$

Donde:

ETPR: Evapotranspiración potencial real en mm/día.

HS: Humedad del suelo en %.

ET: Evapotranspiración de la planta a capacidad de campo en mm/día.

CC: Capacidad de campo en %.

PM: Punto de marchitez permanente en %.

Según Heras (Heras, 1972), cada planta tiene una evapotranspiración diferente y va a depender de la temperatura de ambiente, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento y grado de desarrollo de la planta.

Determinar la evapotranspiración de la vegetación en una zona es casi imposible debido a la gran variedad de vegetación y grado de desarrollo de la misma, por esto es conveniente asumir una evapotranspiración promedio de la zona, la cual sería igual a la evapotranspiración potencial, que se describe en el apartado anterior.

Tabla 2.8 Radiación solar extraterrestre en mm/día (Allen et al., 1998)

HEMISFERIO NORTE												
Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	0.0	1.1	4.2	9.4	14.4	17.3	16.1	11.4	6.1	2.0	0.0	0.0
68	0.0	1.5	4.8	9.8	14.4	17.1	15.9	11.7	6.6	2.4	0.3	0.0
66	0.2	2.0	5.3	10.1	14.5	16.9	15.8	12.0	7.1	2.9	0.6	0.0
64	0.6	2.4	5.8	10.5	14.7	16.8	15.8	12.2	7.5	3.5	1.0	0.2
62	0.9	2.9	6.3	10.9	14.8	16.8	15.9	12.5	8.0	4.0	1.4	0.5
60	1.3	3.4	6.8	11.2	14.9	16.8	16.0	12.8	8.4	4.4	1.8	0.9
58	1.8	3.9	7.2	11.6	15.1	16.9	16.1	13.1	8.9	4.9	2.2	1.3
56	2.2	4.4	7.7	11.9	15.3	16.9	16.2	13.3	9.3	5.4	2.7	1.7
54	2.7	4.9	8.2	12.2	15.4	16.9	16.2	13.6	9.7	5.9	3.2	2.1
52	3.1	5.4	8.6	12.6	15.6	17.0	16.4	13.8	10.1	6.4	3.7	2.6
50	3.6	5.9	9.1	12.9	15.7	17.0	16.4	14.0	10.5	6.9	4.2	3.1
48	4.1	6.4	9.5	13.1	13.8	17.1	16.5	14.2	10.9	7.4	4.7	3.6
46	46.1	6.9	9.9	13.4	16.0	17.1	16.6	14.4	11.2	7.8	5.1	4.0
44	5.1	7.3	10.3	13.7	16.0	17.1	16.6	14.7	11.6	8.3	5.7	4.5
42	5.6	7.8	10.7	13.9	16.1	17.1	16.7	14.8	11.9	8.7	6.2	5.1
40	6.1	8.3	11.1	14.2	16.2	17.1	16.7	15.0	12.2	9.2	6.7	5.6
38	6.6	8.8	11.5	14.4	16.3	17.1	16.7	15.1	12.5	9.6	7.1	6.0
36	7.1	9.2	11.8	14.6	16.3	17.0	16.7	15.3	12.9	10.0	7.6	6.6
34	7.6	9.7	12.2	14.7	16.3	17.0	16.7	15.3	13.1	10.4	8.1	7.1
32	8.1	10.1	12.5	14.5	16.3	16.9	16.6	15.5	13.4	10.9	8.6	7.6
30	8.6	10.5	12.8	15.0	16.3	16.8	16.6	15.5	13.6	11.3	9.1	8.1
28	9.1	10.9	13.1	15.1	16.3	16.7	16.5	15.6	13.8	11.6	9.5	8.6
26	9.6	11.3	13.4	15.3	16.3	16.6	16.4	15.6	14.1	12.0	10.0	9.1
24	10.0	11.8	13.7	15.3	16.2	16.4	16.3	15.6	14.2	12.3	10.4	9.5
22	10.5	12.1	13.9	15.4	16.1	16.3	16.2	15.7	14.1	12.7	10.9	10.0
20	10.9	12.5	14.2	15.5	16.0	16.1	16.0	15.6	14.6	13.0	11.3	10.4
18	11.4	12.9	14.4	15.5	15.9	16.0	15.9	15.6	14.7	13.3	11.7	10.9
16	11.8	13.2	14.6	15.6	15.8	15.8	15.7	15.6	14.9	13.6	12.1	11.4
14	12.2	13.5	14.7	15.6	15.7	15.6	15.6	15.5	15.0	13.8	12.5	11.8
12	12.6	13.8	14.9	15.5	15.5	15.3	15.3	15.4	15.1	14.1	12.9	12.2
10	13.0	14.1	15.1	15.5	15.3	15.1	15.1	15.3	15.1	14.3	13.2	12.7
8	13.4	14.4	15.2	15.4	15.1	14.8	14.9	15.2	15.2	14.5	13.6	13.1
6	13.8	14.6	15.3	15.3	14.9	14.6	14.7	15.1	15.2	14.7	13.9	13.4
4	14.1	14.9	15.3	15.3	14.7	14.3	14.4	14.9	15.2	14.9	14.2	13.8
2	14.4	15.1	15.4	15.1	14.4	14.0	14.1	14.7	15.2	15.1	14.5	14.2
0	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	14.2	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5

#### 2.4.3.1.8 Capacidad de campo y punto de marchitez

Según Israelson y West (Israelson y West, 1922), la Capacidad de Campo (CC) es el contenido de agua o humedad que es capaz de retener el suelo luego de saturación o de haber sido mojado abundantemente y después dejado drenar libremente, evitando pérdida por evapotranspiración hasta que el potencial hídrico del suelo se estabilice (Alrededor de 24 a 48 horas después de la lluvia o riego).

El punto de marchitez (PMP) es la tensión máxima que puede realizar un cultivo para extraer el agua del suelo. A partir de allí, esa planta en esas condiciones de humedad no tendrá posibilidades de abastecerse de agua, los valores se estiman de la tabla (2.9).

*Tabla 2.9 Valores para punto de marchitez y capacidad de campo*

*Fuente (Israelsen y Hasen, 1979)*

<b>% de peso de suelo seco</b>	<b>PMP</b>	<b>CC</b>	<b>Densidad</b>
<b>TEXTURA DEL SUELO</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>Aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Arenoso	2-6	6-12	1.55-1.80
Franco-arenoso	4-8	10-18	1.40-1.60
Franco	8-12	18-26	1.35-1.50
Franco- arcilloso	11-15	23-31	1.30-1.40
Arcillo-arenoso	13-17	27-31	1.25-1.35
Arcilloso	15-19	31-39	1.20-1.30

#### 2.4.3.1.9 Profundidad de raíces

La forma natural de extracción de agua del suelo es mediante la transpiración de las plantas. Dicha extracción se realiza mediante las raíces; por lo tanto, la extracción de agua se realizará en una franja de suelo que tiene una profundidad igual a la mostrada en la tabla (2.10).

Tabla 2.10 Profundidad de raíces  
(Grassi, 1976)

PROFUNDIDAD DE RAÍCES	m
Alfalfa (pastos)	1.00 - 2.00
Algodón	1.00 - 1.70
Banano	0.50 - 0.80
Caña de Azúcar	1.20 - 2.00
Frijol	0.50 - 0.70
Cebolla	0.30 - 0.50
Cítricos	1.20 - 2.00
Bosques	2.00 - 3.00

#### 2.4.3.1.10 Conversión de parámetros a unidades consistentes de mm

La metodología Schosinsky dice que para poder trabajar en unidades consistentes todos los parámetros necesarios para el cálculo, se deben pasar las unidades en milímetros. Entonces la humedad del suelo, capacidad de campo y punto de marchitez, se convertirán a milímetros, pasándolos de porcentaje por peso de suelo seco a porcentaje por volumen, por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ por volumen} = \% \text{ por peso de suelo seco} * \text{densidad aparente} \quad \text{Ecuación (2.18)}$$

Luego este porcentaje por volumen se multiplica por la profundidad de raíces, debido a que las plantas toman la humedad del suelo en una franja igual a la profundidad de su raíz, resultando al final la siguiente expresión para convertir a unidades de milímetros los parámetros de capacidad de campo y punto de marchitez.

$$\frac{\text{Parametro} * DS * PR}{100} \quad \text{Ecuación (2.19)}$$



Donde:

Parámetro: capacidad DE CAMPO (CC), punto de marchitez (PM), en porcentaje por peso de suelo seco.

DS: densidad aparente en  $\text{g/cm}^3$ .

PR: profundidad de raíces en mm.

#### **2.4.3.1.11 Coeficiente de humedad**

$$Ch = \frac{\text{humedad del suelo-punto de marchitez}}{\text{capacidad de campo-punto de marchitez}} \quad \text{Ecuación (2.20)}$$

Cuando inicia un mes cualquiera, el suelo cuenta con una humedad inicial (HSi). Si no hubiera evapotranspiración, la precipitación (Pi) vendría a aumentar la humedad del suelo, permitiendo una mayor evapotranspiración. Si la evapotranspiración no se considera el coeficiente de humedad al final del mes sería (C1).

$$C1 = \frac{HSi-PM+Pi}{CC-PM} \quad \text{Ecuación (2.21)}$$

Donde:

C1: Coeficiente de humedad al final del mes antes que ocurra la evapotranspiración.

HSi: Humedad al inicio del mes, humedad del suelo inicial en mm.

PM: Punto de marchitez en mm.

Pi: Precipitación que infiltra en mm/mes.

CC: Capacidad de campo en mm.

Si se considera que ocurre la evapotranspiración, una vez ocurrida la infiltración, el coeficiente de humedad al final del mes sería:

$$C2 = \frac{HSi-PM+Pi-ETR1}{CC-PM} \quad \text{Ecuación (2.22)}$$

$$ETR1 = C1 * ETP \quad \text{Ecuación (2.23)}$$

Donde:

C2: Coeficiente de humedad al final del mes, después de ocurrida la evapotranspiración.

ETR1: Evapotranspiración potencial real en mm/mes, considerando la humedad correspondiente a C1.

ETP: Evapotranspiración potencial en mm/mes.

El valor de C1 corresponde al coeficiente de humedad máximo, ya que considera la humedad del suelo al inicio del mes, más la infiltración de la lluvia, sin ocurrir la evapotranspiración. El valor de C2 corresponde al coeficiente de humedad mínimo, ya que se calcula considerando la humedad anterior, restándole la evapotranspiración mensual, estimada con el coeficiente de humedad máxima C1. Por tanto, el coeficiente C2 se aproxima al coeficiente de humedad al final del mes.

Como la infiltración y la evapotranspiración ocurren durante el mes, se estima que el coeficiente de humedad mensual corresponde al promedio de C1 y C2:

$$\frac{C1+C2}{2} \quad \text{Ecuación (2.24)}$$

Esto quiere decir que la evapotranspiración potencial real ocurrida en un mes es:

$$ETPR = \left( \frac{C1+C2}{2} \right) * ETP \quad \text{Ecuación (2.25)}$$

Donde:

ETPR: Evapotranspiración real tentativa promedio, en una zona, ocurrida durante el mes en mm/ mes.

C1: Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración.

C2: Coeficiente de humedad mínimo, considerando evapotranspiración.

ETP: Evapotranspiración potencial en mm/mes.

Ningún coeficiente de humedad, C1 y C2 pueden ser mayores a 1 ni menor a 0. En el caso que C1 o C2, sea mayor que 1 se tomara igual a 1. Si C1 o C2 son negativos se tomarán con valor de 0.

#### **2.4.3.1.12 Humedad disponible (HD)**

El método Schosinsky y Losilla (Schosinsky y Losilla, 2000) define la humedad disponible como aquella humedad que pueden tomar las raíces de las plantas, para poder evapotranspirar, y se calcula de con la siguiente ecuación:

$$HD = HSi + Pi - PM \quad \text{Ecuación (2.26)}$$

Donde:

HD: Humedad disponible en mm/mes.

HSi: Humedad del suelo inicial en mm.

Pi: Precipitación que infiltra en mm/mes.

PM: Punto de marchitez en mm.

Si la humedad disponible es menor que ETPR de la ecuación (2.25), la planta no podrá evapotranspirar dicha cantidad, sino que evapotranspirará la humedad disponible, debido a que no hay suficiente humedad para evapotranspirar la cantidad de agua indicada en la ecuación (2.25). Sin embargo, si la humedad disponible (HD) es mayor que la cantidad de agua indicada en la ecuación (2.25), la planta evapotranspirará la cantidad expresada en dicha ecuación. Por lo tanto, la evapotranspiración real será:

$$\text{si } \left( \frac{C1+C2}{2} \right) * ETP \text{ es } \leq HD, \text{ entonces } ETPR = \left( \frac{C1+C2}{2} \right) * ETP \quad \text{Ecuación (2.27)}$$

$$\text{si } \left( \frac{C1+C2}{2} \right) * ETP \text{ es } > HD, \text{ entonces } ETPR = HD \quad \text{Ecuación (2.28)}$$

Donde:

ETPR: Evapotranspiración real tentativa promedio, en una zona, ocurrida durante el mes en mm/ mes.

C1: Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración.

C2: Coeficiente de humedad mínimo, considerando evapotranspiración.

ETP: Evapotranspiración potencial en mm/mes.

HD: Humedad disponible en mm/mes.

### 2.4.3.1.13 Humedad del suelo al final del mes (Hsf)

Para poder realizar el cálculo de la recarga del acuífero es necesario conocer también la humedad del suelo al final del mes, humedad del suelo al final del mes (Hsf)<sup>7</sup>, la cual no puede ser mayor que la capacidad de campo y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{si } (HD + PM - ETR) \text{ es } < CC, \text{ entonces } Hsf = HD + PM - ETR \text{ Ecuación (2.29)}$$

$$\text{si } (HD + PM - ETR) \text{ es } \geq CC, \text{ entonces } Hsf = CC \text{ Ecuación (2.30)}$$

Donde:

HSf: Humedad del suelo al final de mes en mm.

HD: Humedad disponible en mm/mes.

PM: Punto de marchitez en mm.

ETR: Evapotranspiración real en mm/mes.

CC: Capacidad de campo en mm.

También, así como es necesaria la humedad del suelo al final de mes, es necesaria la humedad del suelo al inicio del mes (Hsi) y es la siguiente:

$$Hsi = \text{Es igual a la humedad del suelo final (Hsf) del mes anterior} \text{ Ecuación (2.31)}$$

Donde:

Hsi: Humedad de suelo inicial, inicio de mes en mm.

Hsf: Humedad de suelo final, fin de mes en mm.

---

<sup>7</sup> La humedad del suelo al final del mes (Hsf) en ningún momento puede ser mayor a la capacidad de campo (CC).

#### **2.4.3.1.14 Cálculo de la recarga potencial al acuífero**

Como se mencionó anteriormente la recarga del acuífero se debe al agua que infiltra después de que se haya satisfecho en el suelo la evapotranspiración y llegue a capacidad de campo, el agua restante es la que recarga el acuífero, y se calcula de la siguiente forma:

$$Rp = Pi + Hsi - Hsf - ETR \quad \text{Ecuación (2.32)}$$

Donde:

Rp: Recarga potencial mensual en mm/mes.

Pi: Precipitación que infiltra en mm/mes.

Hsf: Humedad del suelo al final del mes en mm.

ETR: Evapotranspiración real en mm/mes.

Hsi: Humedad de suelo inicial, inicio de mes en mm.

#### **2.4.3.1.15 Recarga potencial anual**

El método Schosinsky y Losilla (Schosinsky y Losilla 2000), dice que, para determinar la recarga potencial anual de los acuíferos, es necesario conocer la humedad inicial del suelo en un mes determinado.

##### **2.4.3.1.15.1 Estimación de la humedad en un mes determinado**

El método Schosinsky y Losilla (Schosinsky y Losilla 2000), nos dice que las humedades conocidas en un suelo son la capacidad de campo y el punto de marchitez, en nuestro país el suelo se encuentra a capacidad de campo después de los meses de mayor

precipitación, un criterio para poder elegir el mes en el que vamos a considerar que el suelo se encuentra a capacidad de campo es elegir el mes siguiente después de los meses consecutivos en los que la infiltración supera a la evapotranspiración potencial mensual.

Conocida la humedad inicial de un mes, se puede calcular la humedad final del mes, que sería la inicial del siguiente así sucesivamente, al terminar el ciclo tienen que resultar que la humedad final del último mes tiene que ser igual a la inicial del mes de partida.

#### **2.4.3.1.15.2 Cálculo anual de la recarga potencial**

El cálculo se realizará mediante información en una hoja de Excel proporcionada por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

## **2.5 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) COMO HERRAMIENTA PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DIGITALES**

Según Olmos (Olmos, 2010), un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés) es una integración organizada de hardware, software, datos geográficos y usuarios, diseñada para capturar, almacenar, manejar, analizar, modelar y representar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. También puede definirse como un modelo de una parte de la realidad referido a un sistema de

coordenadas terrestre y construido para satisfacer necesidades concretas de información. El SIG funciona como una base de datos con información geográfica (Datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

La razón fundamental para utilizar un SIG es la gestión de información espacial. El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no podríamos obtener de otra forma. Lo que más distingue un SIG de otros sistemas para dibujo, tratamiento de imágenes, diseño cartográfico, atlas digitales, etc., son las operaciones de análisis de datos.

### **2.5.1 Hardware**

Las computadoras que se ofrecen hoy en cualquier tienda de informática cumplen los requerimientos para la creación y operación de un SIG. Los dispositivos y periféricos opcionales tienen su utilidad principalmente en la entrada y salida de los datos (Módem, escáner, GPS, impresora en color) (Olmos, 2010).



## **2.5.2 Software**

Cada programa de SIG es un conjunto de algoritmos para acceder, analizar y sintetizar datos espaciales y sus atributos asociados. Unas funciones son clásicas y las encontramos en prácticamente todos los paquetes de SIG y otras funciones son más particulares. Existen programas que se enfocan más en el manejo de la cartografía vectorial y otros para la cartografía ráster. Casi todos utilizan ya ambos formatos, aunque con predominio de uno de ellos. La elección del programa SIG depende de las aplicaciones y análisis que se quiere hacer. No hay ningún líder entre los programas, algunos tienen muy buenas herramientas para el tratamiento de imágenes de satélite y otros incluyen un amplio rango de módulos para el modelado y evaluaciones estadísticas. Los usuarios experimentados utilizan normalmente varios programas distintos, según características de los datos y aplicaciones. El costo va desde cero dólares (Software libre) hasta varios miles de dólares (Olmos, 2010).

## **2.5.3 Datos**

La mayoría de la cartografía digital actual proviene de cartografía tradicional que se ha digitalizado o escaneado y después vectorizado. Una fuente importante de información son las coordenadas tomadas por un GPS y otra fuente importante muy distinta en su estructura a la anterior son las fotos aéreas e imágenes de satélite. Lo que realmente hace un SIG interesante es la posibilidad de generar nueva cartografía a partir de los mapas iniciales: Un mapa de distancia a la carretera más próxima a partir de un mapa

de la red de carreteras, un mapa del índice de erosión a partir de información sobre de tipo de suelo y cubierta vegetal en combinación con precipitaciones y pendiente del terreno, un mapa de recarga acuífera, etc. (Olmos, 2010).

### **2.5.4 Usuarios**

El usuario enlaza con todos estos componentes y pone el SIG en funcionamiento.

El éxito de la implementación y del diseño del SIG depende en gran medida de sus conocimientos (Tanto del SIG como del tema a analizar), del conjunto de métodos, ideas y modelos que aplica en el proyecto, su capacidad de reconocer y resolver problemas que pueden surgir durante el proceso y de su capacidad de adquirir o convertir información al formato digital para integrarla en el SIG (Olmos, 2010).

### **2.5.5 Información con que trabaja un SIG**

De todos los subsistemas de SIG, el correspondiente a los datos es el pilar fundamental que pone en marcha los restantes. Los datos son el combustible que alimenta a los restantes subsistemas, y sin los cuales un SIG carece por completo de sentido y utilidad.

El subsistema de datos es, a su vez, el más interrelacionado, y está conectado de forma inseparable a todos los restantes. Mientras que, por ejemplo, la visualización no es por completo imprescindible para el desarrollo de procesos de análisis, no hay elemento del sistema SIG que pueda vivir si no es alimentado por datos. Los datos son necesarios para la visualización, para el análisis y para dar sentido a la tecnología y, en lo referente al factor organizativo y a las personas, el rol de estas en el sistema SIG es en gran

medida gestionar esos datos y tratar de sacar de ellos el mayor provecho posible, buscando y extrayendo el valor que estos puedan tener en un determinado contexto de trabajo. Por tanto, los datos son fundamentales en un SIG, y todo esfuerzo dedicado a su estudio y a su mejor manejo será siempre positivo dentro de cualquier trabajo con SIG. La forma en que los datos se gestionan en un SIG es un elemento vital para definir la propia naturaleza de este, así como sus prestaciones, limitaciones y características generales (Olaya, 2011).

### **2.5.5.1 Diferencia entre Datos e información**

Existe una importante diferencia entre los conceptos de datos e información. Ambos términos aparecen con frecuencia y pueden confundirse, pese a que representan cosas bien diferentes. Aun así, son conceptos muy unidos, y resultan clave para entender los fundamentos de un SIG. Un SIG es un Sistema de Información Geográfica, pero maneja datos geográficos, existiendo diferencias entre estos conceptos (Olaya, 2011).

Entendemos como dato al simple conjunto de valores o elementos que utilizamos para representar algo. Por ejemplo, el código 502132N es un dato. Este código por sí mismo no tiene un significado, y es necesario interpretarlo para que surja ese significado.

Al realizar esa interpretación, el dato nos informa del significado que tiene, y es en ese momento cuando podemos emplearlo para algún fin y llevar a cabo operaciones sobre el que tengan sentido y resulten coherentes con el significado propio que contiene (Olaya, 2011).

El dato anterior podemos interpretarlo como si fuera una referencia geográfica, y cuyo significado sería entonces una latitud, en particular 50° 21' 32" Norte. Si lo interpretamos como un código que hace referencia a un documento de identificación de una persona, la información que nos aporta es en ese caso completamente distinta. El dato sería el mismo, formado por seis dígitos y una letra, pero la información que da es diferente, ya que lo entendemos e interpretamos de manera distinta (Olaya, 2011).

La información es, por tanto, el resultado de un dato y una interpretación, y el trabajo con datos es en muchos casos un proceso enfocado a obtener de estos toda la información posible. Un dato puede esconder más información que la que a primera vista puede apreciarse, y es a través de la interpretación de los datos como se obtiene esta (Olaya, 2011).

### **2.5.5.2 Componentes de la información geográfica**

Comprender la información geográfica es vital para poder capturar dicha información e incorporarla a un SIG. En líneas generales, podemos dividir está en dos componentes principales, cada una de las cuales tiene su implicación particular en los procesos posteriores (Olaya, 2011).

- Componente espacial
- Componente temática

La componente espacial hace referencia a la posición dentro de un sistema de referencia establecido. Esta componente es la que hace que la información pueda

calificarse como geográfica, ya que sin ella no se tiene una localización, y por tanto el marco geográfico no existe. La componente espacial responde a la pregunta ¿dónde? Por su parte, la componente temática responde a la pregunta ¿qué? y va invariablemente unida a la anterior. En la localización establecida por la componente espacial, tiene lugar algún proceso o aparece algún fenómeno dado. La naturaleza de dicho fenómeno y sus características particulares, quedan establecidas por la componente temática (Olaya, 2011).

Puede entenderse lo anterior como una variable fundamental (La componente temática), que se sirve, sin embargo, de un variable soporte (La componente espacial) para completar su significado (Olaya, 2011).

### **2.5.6 Fuentes principales de datos espaciales**

El origen de los datos con los que se trabaja en un SIG puede ser sumamente variado y presentarse asimismo en formas diversas. No hace tanto tiempo, toda la información que se manejaba dentro de un SIG tenía su origen en un mapa en papel, el cual debía prepararse para adaptarse a la naturaleza propia del SIG. El desarrollo de los SIG ya había comenzado a dar sus frutos y se obtenían los primeros programas, pero eran necesarios datos para utilizarlos. Sin embargo, los datos geográficos de los que se disponía no se encontraban en formato digital, por lo que no eran adecuados para su uso dentro de un SIG. Una tarea básica en esos tiempos era la digitalización de cartografía, es decir, convertir los datos geográficos en formato impreso en datos en

formato digital que un SIG pudiera manejar. La disponibilidad de datos digitales era baja, pero, como resulta lógico pensar, sí que existía una gran cantidad de datos geográficos en otros formatos tales como mapas, cartas de navegación, fotografías aéreas, etc. La tecnología ha ido avanzando y ya se producen datos directamente en formato digital, considerando específicamente la existencia de los SIG como herramientas básicas de manejo de datos geográficos. No obstante, los datos en formato impreso, así como las técnicas que se emplearon en su creación, siguen siendo válidas, y sirven igualmente para crear datos geográficos que podemos emplear en un SIG. Hoy en día, la situación es bien distinta a la de aquellos primeros tiempos, y puede afirmarse que los orígenes a partir de los cuales se generan los datos geográficos son muy diversos (Olaya, 2011).

### **2.5.6.1 Datos digitales y datos análogos**

La principal diferencia que se presenta desde la aparición de los SIG es la necesidad de utilizar datos digitales. Un SIG implica una aplicación informática, y esta se alimenta en última instancia exclusivamente de datos digitales. Esta es la razón por la que debemos alimentar nuestro SIG con una serie de valores numéricos, y llegar a ellos a partir de la realidad que se pretende modelizar implica toda una serie de etapas. Otros datos a pesar de producirse hoy en día, no son digitales directamente. Y junto a estos tenemos, como ya sabemos, todos los datos (Que no son pocos) generados con anterioridad y

que se presentan en diversas formas. Pero si deseamos trabajar con ellos en un SIG, de un modo u otro todos habrán de acabar siendo digitales (Olaya, 2011).

Los datos geográficos digitales tienen una serie de ventajas frente a los analógicos (Además del mero hecho de que podemos incorporarlos a un SIG), y suponen, como sucede en muchos otros campos, un salto cualitativo importante. Entender las ventajas frente a los datos analógicos ayuda a comprender un poco más la importancia de los SIG y la relevancia que cobran en el manejo de los datos geográficos. Estas ventajas pueden resumirse en las siguientes (Olaya, 2011):

- Sencillez de actualización. La cartografía digital es editable, y esto simplifica enormemente la introducción de cambios. Si en una capa con información catastral cambia la frontera de una parcela, basta modificar esta frontera. En un mapa analógico habría que rehacer todo el mapa y volver a imprimirse. Además, y gracias a la división en capas, pueden actualizarse a distintos ritmos las distintas variables, pues son independientes y pueden modificarse por separado.
- Facilidad de distribución. Resulta más sencillo y menos costoso distribuir cartografía digital que analógica, ya que esto se puede hacer rápidamente por Internet.
- Espacio de almacenamiento. Se generan actualmente grandes volúmenes de datos que, además, y gracias a que son más fáciles de actualizar, se producen con una frecuencia mucho mayor. No obstante, un soporte digital puede

almacenar una enorme cantidad de estos ocupando una fracción del espacio físico.

- Facilidad y precisión de análisis. Podemos hacer con los datos geográficos digitales cosas que no eran posibles con los analógicos y, mejor aún, podemos automatizar estos análisis. Asimismo, la precisión es mayor, ya que depende únicamente de los datos y la precisión intrínseca de estos, pero no de la operación de análisis.
- Facilidad de mantenimiento. Aunque no se introduzcan modificaciones y no se actualicen los datos, el formato digital hace más fácil su conservación.

La degradación del soporte no degrada directamente el dato en sí, haciéndole perder calidad. La degradación del soporte analógico (El papel), sí lo hace. Además, los datos digitales pueden replicarse con suma facilidad, por lo que su persistencia está garantizada en mayor medida y a un menor coste que la de los datos analógicos.

### **2.5.6.2 Fuentes primarias y secundarias**

Como hemos visto, algunos datos que utilizamos en un SIG son de tipo analógico, mientras que otros son de tipo digital. En algunos casos (Generalmente en los analógicos), estos datos no han sido tomados pensando en su utilización en un SIG, y nos van a servir de base para obtener otros que sí pueden emplearse directamente dentro de un SIG. Por el contrario, existen otros datos que ya han sido recogidos



considerando su utilización dentro de un Sistema de Información Geográfica, y la forma en la que se presentan ya es adecuada para incorporarlos en este y trabajar con ellos.

En base a lo anterior, se define una forma distinta de clasificar los datos espaciales con los que trabajamos en un SIG: datos primarios (O procedentes de una fuente primaria) y datos secundarios (O procedentes de una fuente secundaria).

Los datos primarios son aquellos que podemos emplear en un SIG y que, en su forma original, ya son susceptibles de ser sometidos a las operaciones de manejo y análisis que incorporan los SIG. En este grupo encontramos las imágenes digitales o los datos obtenidos con GPS, todos ellos recogidos ya en origen de forma adecuada para su empleo directo en un SIG.

Por su parte, los datos secundarios derivan de algún otro tipo de dato previo, el cual no es adecuado para su empleo en un SIG. Entre estos incluimos las versiones digitales de los mapas clásicos, así como los datos procedentes de un muestreo o levantamiento tradicional. Otros provenientes de cartografía impresa, tales como capas de elevaciones, también se incluyen en este grupo (Olaya, 2011).

## **2.5.7 Bases de datos**

Las bases de datos son un elemento fundamental en el entorno informático hoy en día y tienen aplicación en la práctica totalidad de campos. Concebidas con un propósito general, son de utilidad para toda disciplina o área de aplicación en la que exista una necesidad de gestionar datos, tanto más cuanto más voluminosos sean estos. En

nuestro ámbito particular de los SIG, los datos son cada día más voluminosos, debido no solo a una mayor cantidad de información, sino también a una mayor precisión en esta, la cual implica un mayor volumen de datos. Además, presentan otra serie de características (Uso múltiple, necesidad de acceso eficiente para análisis, necesidad de indexación, etc.), haciendo todas ellas que sea recomendable el uso de bases de datos y tecnologías específicas para su manejo (Olaya, 2011).

### **2.5.7.1 Qué es una base de datos**

Entendemos como Base de Datos un conjunto de datos estructurado y almacenado de forma sistemática con objeto de facilitar su posterior utilización. Una base de datos puede, por tanto, constituirse con cualquier tipo de datos, incluyendo los de tipo puramente espacial (Geometrías, etc.) tales como los que se utilizan en un SIG, así como, por supuesto, datos numéricos y alfanuméricos como los que constituyen la componente temática de la información geoespacial. Los elementos clave de la base de datos son esa estructuración y sistematicidad, pues ambas son las responsables de las características que hacen de la base de datos un enfoque superior a la hora de gestionar datos (Olaya, 2011).

### **2.5.7.2 Uso de bases de datos**

Las ventajas de utilizar un almacenamiento estructurado se aprecian en diversos puntos, ya que afectan no solo a los datos sino también al propio uso que se hace de

estos. Algunas ventajas que afectan directamente a los datos son las siguientes: (Olaya, 2011)

- Mayor independencia. Los datos son independientes de las aplicaciones que los usan, así como de los usuarios.
- Mayor disponibilidad. Se facilita el acceso a los datos desde contextos, aplicaciones y medios distintos, haciéndolos útiles para un mayor número de usuarios.
- Mayor seguridad (Protección de los datos). Por ejemplo, resulta más fácil replicar una base de datos para mantener una copia de seguridad que hacerlo con un conjunto de ficheros almacenados de forma no estructurada. Además, al estar centralizado el acceso a los datos, existe una verdadera sincronización de todo el trabajo que se haya podido hacer sobre estos (Modificaciones), con lo que esa copia de seguridad servirá a todos los usuarios.
- Menor redundancia. Un mismo dato no se encuentra almacenado en múltiples ficheros o con múltiples esquemas distintos, sino en una única instancia en la base de datos. Esto redundaría en menor volumen de datos y mayor rapidez de acceso.
- Mayor eficiencia en la captura, codificación y entrada de datos. Esto tiene una consecuencia directa sobre los resultados que se obtienen de la utilización de la base de datos, presentándose al respecto ventajas como, por ejemplo:

- Mayor coherencia. La mayor calidad de los datos que se deriva de su mejor gestión deriva en mayor calidad de los resultados.
- Mayor eficiencia. Facilitando el acceso a los datos y haciendo más sencilla su utilización, la obtención de resultados es más eficiente.
- Mayor valor informativo. Resulta más sencillo extraer la información que los datos contienen, ya que uno de los cometidos de la base de datos es aumentar el valor de estos como fuente de información.

Los usuarios de la base de datos también obtienen ventajas al trabajar con estas, entre los que cabe citar:

- Mayor facilidad y sencillez de acceso. El usuario de la base de datos se debe preocupar únicamente de usar los datos, disponiendo para ello de las herramientas adecuadas y de una estructura sólida sobre la que apoyarse.
- Facilidad para reutilización de datos (Facilidad para compartir).

## **2.5.8 Cartografía y Formatos digitales (Vectorial y ráster)**

A continuación, se describe en que consiste el formato vectorial y ráster que se utiliza en un SIG.

### **2.5.8.1 Información geográfica y cartográfica digital**

Se denomina información geográfica a aquellos datos espaciales georreferenciados requeridos como parte de las operaciones científicas, administrativas o legales. Dichos datos espaciales suelen llevar una información alfanumérica asociada.

La georreferenciación es el posicionamiento en el que se define la localización de un objeto espacial en un sistema de coordenadas y datum<sup>8</sup> determinado.

Este proceso es utilizado frecuentemente en los Sistemas de Información Geográfica.

En la cartografía tradicional estamos acostumbrados a ver mapas compuestos por varios temas a la vez. Un mapa que muestra el uso del suelo lleva por lo general además las carreteras principales, las poblaciones y sus etiquetas que les identifiquen.

En la cartografía digital se mantiene la información temática (Capas o coberturas) por separado, para combinarla en el momento adecuado con fines de análisis o con fines de presentación. Pero, lo más importante es que los elementos del mapa son referenciados sobre la tierra. Cualquier movimiento del ratón revela su posición actual con sus coordenadas geográficas (En grados y minutos) o en coordenadas geodésicas, en metros sobre el eje X y el eje Y. La escala del mapa digital no es fija, el mapa puede ser ampliado para ver más detalle o reducido, se puede incluso combinar mapas de distintas escalas, lo que no sería posible con cartografía tradicional (Olmos, 2010).

#### **2.5.8.1.1 Formatos ráster y vectorial**

Los datos espaciales en un SIG pueden ser representados a través de dos formatos o sistemas espaciales: vectorial y ráster (Figura 2.17).

---

<sup>8</sup>Se aplica en varias áreas de estudio y trabajo específicamente cuando se hace una relación hacia alguna geometría de referencia importante, sea esta una línea, un plano o una superficie (Plana o curva).

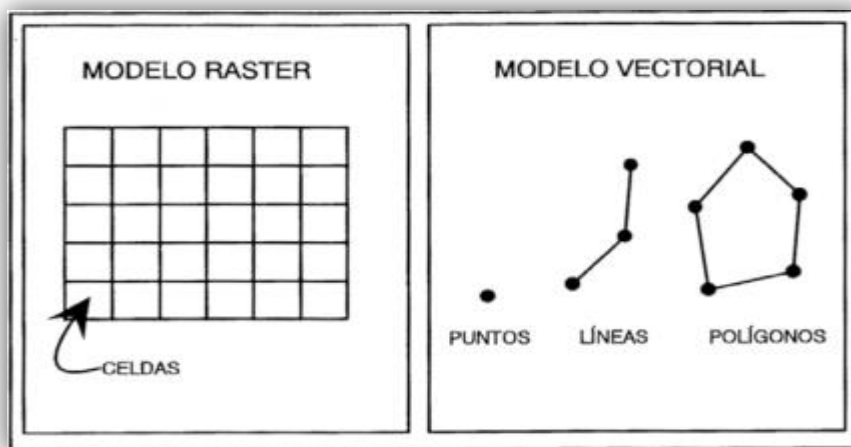


Figura 2.17 Formas de representar datos espaciales

*Fuente: Sistemas de información geográfica (SIG), Olmos (2010)*

Son dos formatos muy diferentes, que se distinguen por su manera de almacenar los objetos geográficos (La base de datos geográfica), su manera de almacenar los atributos de estos objetos (La información temática) y en segundo lugar por su apariencia. En el formato vectorial, la información del mundo real es representada por los puntos y líneas que definen sus límites o fronteras, estableciendo un sistema de coordenadas para localizar cada objeto. Un punto es representado por un par de coordenadas (X, Y); una línea es un conjunto de coordenadas que corresponden a sus vértices ( $X_1Y_1$ ;  $X_2Y_2$ ;  $X_3Y_3...$ ) y un área, o sea un polígono es una línea cerrada, y rellena. En el formato ráster, el espacio está representado por un conjunto de celdas adyacentes llamadas píxel, que representan las unidades de información espacial. Estas establecen su localización por un sistema de referencia en filas y columnas, acompañado por la extensión del mapa y el tamaño de la celda. Los píxeles en realidad

no mantienen una relación mutua entre sí. En la cobertura de tipo ráster, cada celda tiene un valor o código asignado, correspondiente al tipo de información temática que representa la celda (Figura 2.18) (Olmos, 2010).



*Figura 2.18 Almacenamiento del atributo en el formato ráster*

*Fuente: Sistemas de información geográfica (SIG), Olmos (2010)*

Esto es diferente en el formato vectorial, en el que cada objeto representa una unidad homogénea de información, con una topología que define sus relaciones con los demás objetos de la cobertura temática (En el caso de superficies compuestas por polígonos adyacentes o de líneas que forman una red). La asignación de atributos en el formato vectorial se realiza a través de una tabla de atributos asociada a la cobertura vectorial, en la cual un identificador conecta el objeto con su registro en dicha tabla (Figura 2.19) (Olmos, 2010).

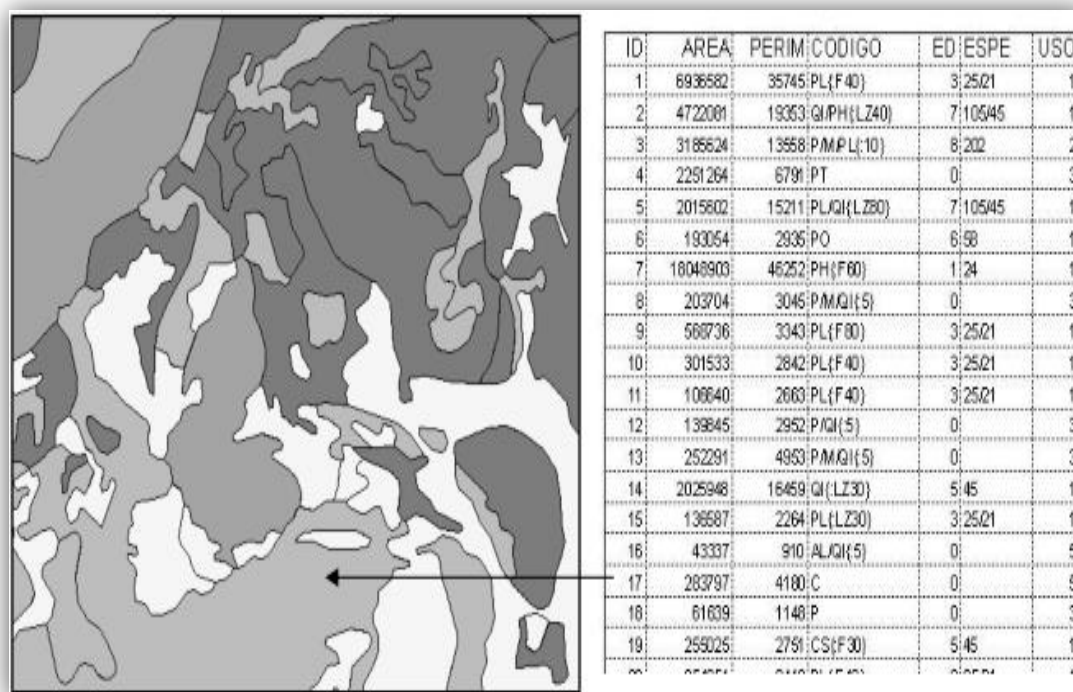


Figura 2.19 Almacenamiento de atributos del sistema vectorial

Fuente: Sistemas de información geográfica (SIG), Olmos Pablo (2010)

### 2.5.8.1.2 Topología

La topología es el campo de las matemáticas, la que estudia las relaciones de los elementos en el espacio. “La topología de un mapa es el conjunto de relaciones que describen la posición relativa de sus componentes” (Cebrián, 1994).

La concepción de estas relaciones varía entre los sistemas ráster y vectoriales. En los sistemas ráster (Matriciales) las relaciones se producen entre celdas como análisis, generalmente, de vecindad, conformándose las entidades espaciales a partir de la proximidad física y de atributos entre los píxeles. Los sistemas vectoriales se suelen



basar en una topología arco-nodo que viene definida por la direccionalidad, la conectividad y la proximidad entre vectores; de forma tal que a partir de éstos y otros valores se definen las diferentes entidades espaciales. La topología tiene una gran importancia en el desarrollo y evolución de los SIG. Es determinante en sus capacidades de análisis y define en gran manera el desarrollo de los formatos de la información geográfica (Olmos, 2010). En las figuras (Figura 2.20) y (Figura 2.21) se muestra la representación de los dos tipos de formatos.

#### **2.5.8.1.3 Ventajas y desventajas de los formatos ráster y vectorial**

El modelo de SIG ráster se centra en las propiedades del espacio más que en la precisión de la localización. Divide el espacio en celdas regulares donde cada una de ellas representa un único valor. Cuanto mayor sean las dimensiones de las celdas menor es la precisión o detalle en la representación del espacio geográfico (Resolución). En el caso del modelo de SIG vectorial, el interés de las representaciones se centra en la precisión de localización de los elementos sobre el espacio y donde los fenómenos a representar son discretos, es decir, de límites definidos.

El método de almacenamiento de datos vectoriales permite que se almacenen los datos en un espacio mínimo. Mucho menos memoria es necesaria para almacenar solo unas coordenadas y la información sobre su “Relleno” en comparación con una cobertura compuesta por píxeles, que repite el código en cada celda. Además, si la unidad geográfica (La forma de los objetos) es idéntica en mapas de distintos temas, se

almacena toda la información temática en una misma tabla. Naturalmente se puede visualizar solo un tema a la vez.

Por ejemplo: Los datos espaciales son polígonos que representan parcelas (Unidad geográfica) de bosque. La tabla contiene información temática, por campos: especie dominante, su edad, último año de planteamiento, tipo de tratamiento fitosanitario, etc. En el formato ráster, aunque las parcelas tienen la misma extensión, esta misma información (3 temas) requiere 3 coberturas cada píxel puede almacenar un solo código, que representa o el año, o el código de la especie, etc.

Así es el formato vectorial el más adecuado a la hora de almacenar y tratar grandes bases de datos relacionadas con las mismas unidades espaciales (Municipios, parcelas). Otro lado fuerte del formato vectorial es que las estructuras lineales realmente son continuas, lo que permite hacer análisis de redes. Además, el formato vectorial se asemeja más a lo que conocemos de la cartografía tradicional. El mapa de salida es más nítido, se puede poner a los polígonos un borde negro para resaltar los colores del relleno, es más fácil colocar etiquetas con los nombres de los objetos, etc.

El formato ráster está limitado en la presentación de puntos y líneas, que por definición no tienen extensión (Punto) o anchura (Línea). En el formato ráster obtienen automáticamente una extensión la que corresponde al tamaño del píxel. Sin embargo, muchos temas que son importantes en ecología varían de forma continua: Por ejemplo, la altitud, la temperatura, la precipitación, la densidad de la vegetación, el riesgo de incendio forestal o la probabilidad de encontrar la especie X en un sitio dado. Estos

temas encuentran una representación más operativa en el formato ráster. Además, esta estructura ráster matricial es muy similar a la arquitectura digital del ordenador y por tanto más rápida en cálculos matemáticos combinando mapas de distintos temas. Por lo tanto, el formato ráster tiene mucho más potencial analítico en ecología que el formato vectorial. Además, es el mismo formato de las imágenes de satélite y fotos aéreas (Digitales), con lo cual pueden ser incorporadas y tratadas en un SIG fácilmente. En resumen, el sistema vectorial predomina donde el objetivo es analizar movimientos a través de una red, operar con una extensa base de datos o plotear mapas en alta calidad. En cambio, el sistema ráster se orienta más a operaciones analíticas en SIG y al tratamiento de imágenes de satélite. Cada sistema tiene sus ventajas e inconvenientes, de hecho, se trabaja con ambos formatos aprovechando las ventajas de los dos (Olmos, 2010).

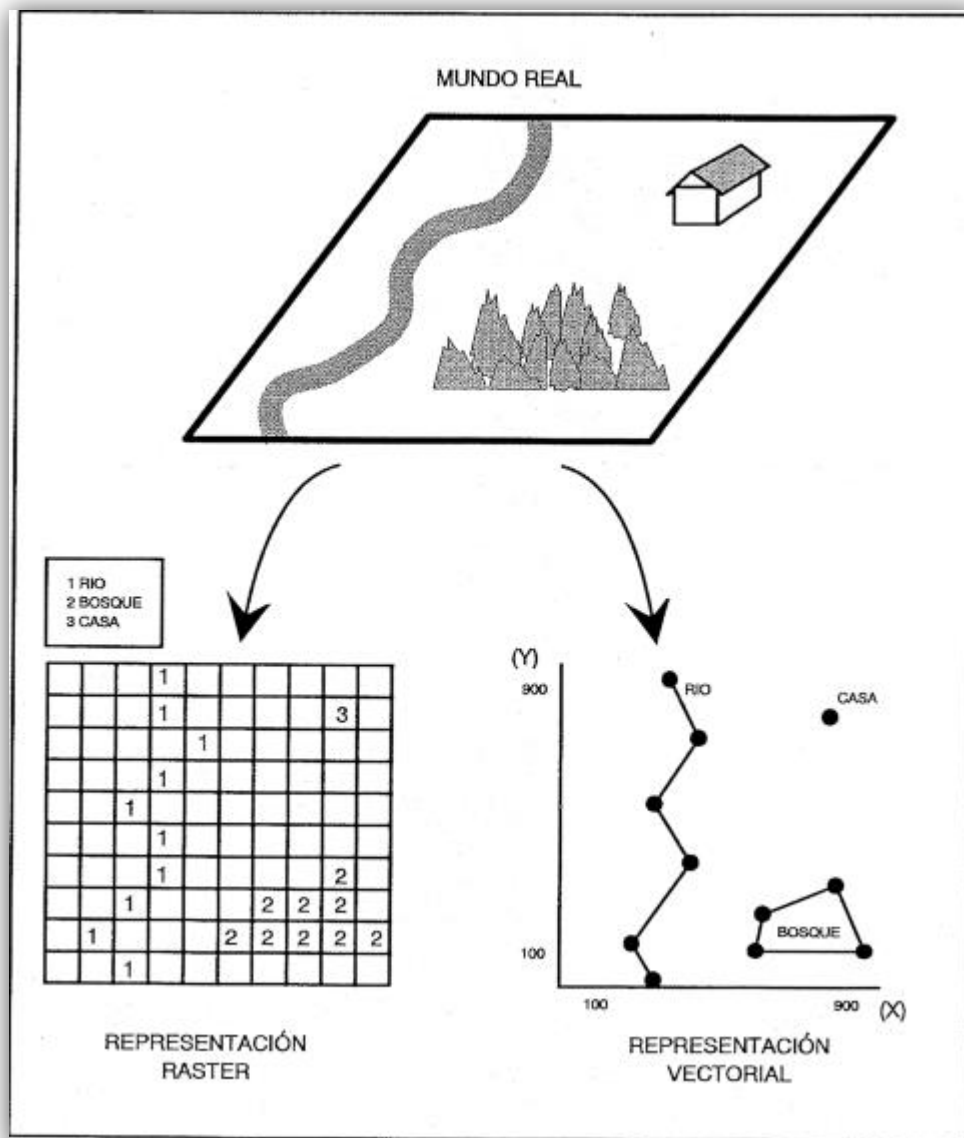
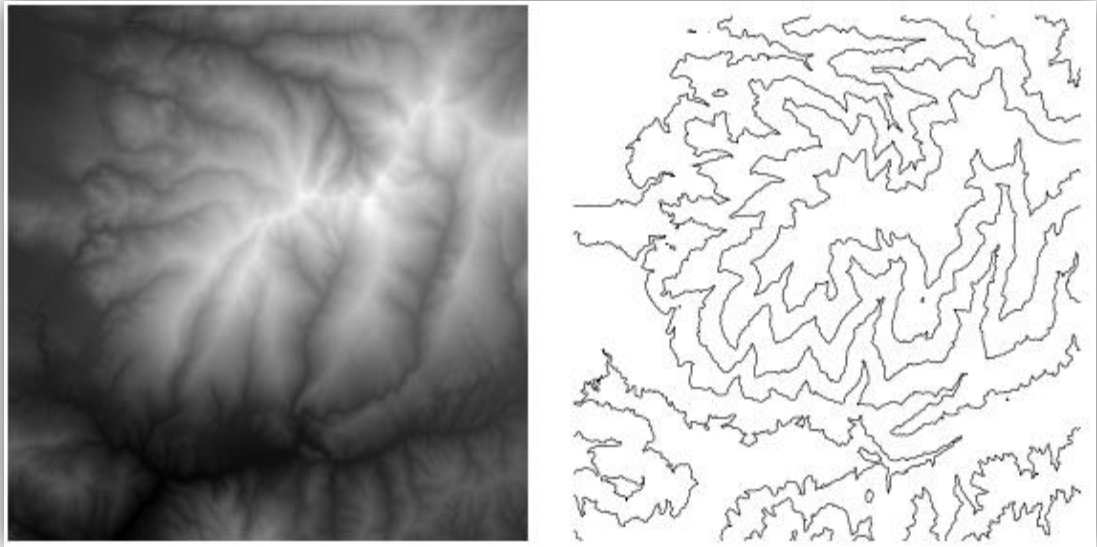


Figura 2.20 Representación de datos ráster y vectorial

Fuente: Sistemas de información geográfica (SIG), Olmos (2010)



*Figura 2.21 Ráster (Modelo digital del terreno) y vectorial (Curvas de nivel)*

*Fuente: Sistemas de información geográfica (SIG), Olmos (2010)*

## **2.5.9 Álgebra de mapas**

La información contenida en las capas es susceptible de ser analizada para la obtención de otras capas referentes al mismo espacio geográfico, pero que contengan distinta información derivada de aquella. El álgebra de mapas es el conjunto de procedimientos y métodos que permiten llevar a cabo dicho análisis y extraer nuevos valores a partir de los contenidos en una o varias capas (Olaya, 2011).

Se entiende por álgebra de mapas el conjunto de técnicas y procedimientos que, operando sobre una o varias capas en formato ráster, nos permite obtener información derivada, generalmente en forma de nuevas capas de datos. Aunque nada impide que este proceso se lleve a cabo sobre capas vectoriales, se entiende que el álgebra de

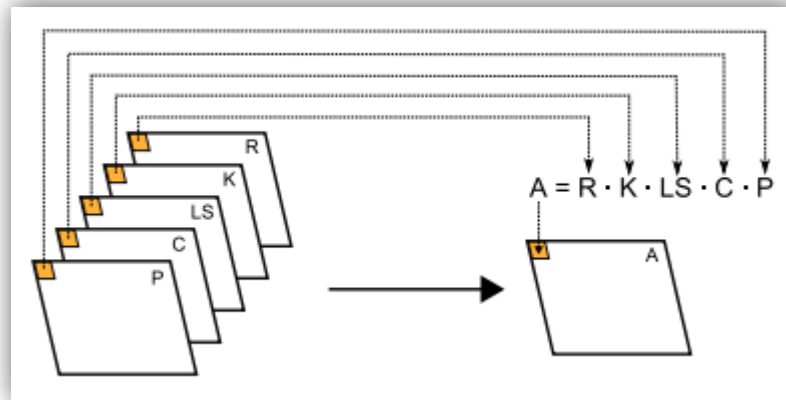
mapas hace referencia al análisis desarrollado sobre capas ráster, pues estas, por su estructura regular y sus características inherentes, son mucho más adecuadas para plantear los algoritmos y formulaciones correspondientes (Olaya, 2011).

Como tal, el álgebra de mapas lo forman un conjunto de variables (Los mapas), expresiones y funciones, los cuales, a través de una sintaxis adecuada, permiten la obtención de nuevos resultados geográficos. El concepto de álgebra de mapas, constituye sin embargo no una herramienta puntual, sino un completo marco de trabajo para el manejo de capas ráster y, muy especialmente, su análisis encaminado a la obtención de nuevos resultados (Olaya, 2011).

Si analizamos las prácticas geográficas hasta nuestros días, vemos que el álgebra de mapas como proceso de análisis no es algo nuevo. La idea de utilizar mapas existentes para generar otros nuevos o simplemente extraer de ellos resultados cuantitativos es una práctica común desde el mismo momento en que aparece la cartografía moderna. Sin embargo, es con la aparición de los Sistemas de Información Geográfica y la posibilidad de procesar los datos geográficos en un entorno informatizado cuando se dota de formalismo a estos planteamientos y se define con rigor el conjunto de herramientas de análisis (Olaya, 2011).

Un caso práctico de álgebra de mapas se muestra a continuación, donde se utiliza la ecuación universal de pérdidas de suelo (USLE),  $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$ , donde A representa las pérdidas totales en toneladas por hectárea y año, y los factores R, K, LS, C y P, representan la influencia de los diversos factores (Agresividad del clima, tipo de suelo,

topografía, uso de suelo, y prácticas de conservación) sobre dichas pérdidas. La USLE representa, por tanto, un modelo sencillo que combina cinco variables, todas ellas susceptibles de ser recogidas en las correspondientes capas ráster. Si extendemos el cálculo puntual de la variable A, a todos los puntos de la zona estudiada, obtendremos una nueva capa de dicha variable, evaluando la anterior expresión para cada una de las celdas de esas capas ráster (Figura 2.22) (Olaya, 2011).



*Figura 2.22 Caso práctico de álgebra de mapas*

*Fuente: Sistemas de información geográfica, Olaya (2011)*

### **2.5.10 Tipos de funciones en el álgebra de mapas**

Las funciones son el elemento principal del álgebra de mapas. Cuatro son los tipos principales de funciones que podemos definir, agrupadas según la forma en que toman la información necesaria para su cálculo de entre la contenida en todas las celdas de las capas de origen (Olaya, 2011).

- Local. El valor en cada celda de la capa resultante es función únicamente de los valores en esa misma celda en las capas de partida.
- Focal. El valor en cada celda de la capa resultante es función del valor en dicha celda y en las situadas en un entorno definido alrededor de la misma.
- Zonal o regional. El valor en cada celda de la capa resultante es función del valor de todas las celdas conectadas a esta que presentan un mismo valor para una de las capas de entrada (Pertenece a la misma clase que esta).
- Global. El valor resultante de la función es obtenido a partir de todas las celdas de la capa.

La combinación de distintas funciones y de enfoques variados da lugar a un enorme conjunto de operaciones de análisis basados en el álgebra de mapas así definido. Este conjunto es el que dota de toda su potencia a los SIG como herramientas de análisis del medio, y permite extraer de los datos geográficos en formato ráster toda la información que realmente contienen (Olaya, 2011).

### **2.5.10.1 Funciones locales**

Las funciones locales asignan valores a una celda en base a los valores que esa misma celda presenta para cada una de las capas de entrada, operando con estos de una forma u otra. Es decir, el valor resultante para una localización dada es función exclusivamente de lo que se encuentra en dicha localización, no dependiendo en modo alguno de otras localizaciones es decir de otras celdas (Figura 2.23) (Olaya, 2011).



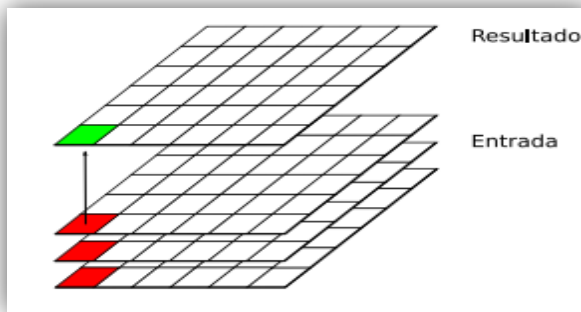


Figura 2.23 Función locales

Fuente: *Sistemas de información geográfica, Olaya (2011)*

### 2.5.10.2 Funciones focales

Las funciones de análisis focal operan sobre una sola capa de datos, asignando a cada celda un valor que deriva de su valor en la capa de partida, así como de los valores de las situadas en un entorno inmediato de esta (Figura 2.24). La función focal queda así definida por las dimensiones y forma del entorno a considerar, así como por la función a aplicar sobre los valores recogidos en este (Olaya, 2011).

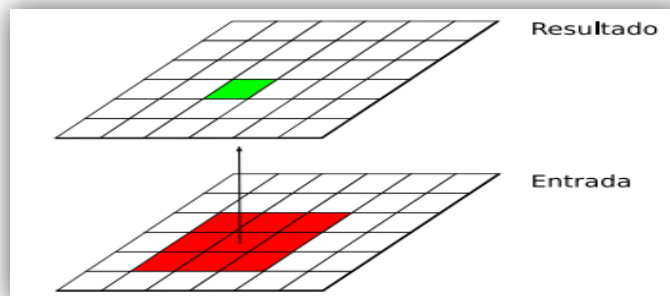
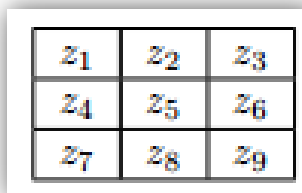


Figura 2.24 Función focal

Fuente: *Sistemas de información geográfica, Olaya (2011)*

A diferencia de las funciones locales, las focales no se aplican sobre varias capas, ya que la información necesaria se extrae de la vecindad de cada celda, dentro de la propia capa de partida.

Las funciones focales más habituales emplean un entorno cuadrado  $3 \times 3$  centrado en la celda, que se va desplazando por la capa de tal modo que todas las celdas van siendo designadas como celdas centrales, y un nuevo valor es calculado para ellas. Este entorno de celdas a considerar se denomina frecuentemente ventana de análisis. Para definir las operaciones sobre esta ventana, es frecuente introducir una notación como la siguiente con el fin de simplificar las expresiones (Figura 2.25). Siendo  $Z_5$  la celda central, la cual recibirá el valor resultante de la operación efectuada (Olaya, 2011).



$z_1$	$z_2$	$z_3$
$z_4$	$z_5$	$z_6$
$z_7$	$z_8$	$z_9$

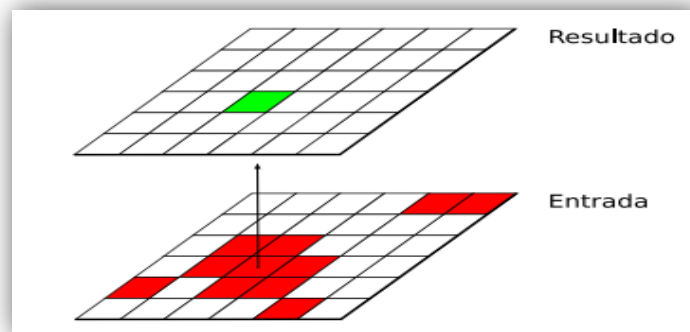
*Figura 2.25 Ventana de análisis*

*Fuente: Sistemas de información geográfica, Olaya (2011)*

### 2.5.10.3 Funciones regionales

Las funciones de análisis zonal asocian a cada celda valores relativos no a dicha celda ni a un entorno fijo de esta, sino a la clase, a la que dicha celda pertenece (Figura 2.26). Se necesita, por tanto, una capa de apoyo que contenga la pertenencia de cada celda a una u otra clase, ya que la utilización de una celda en el análisis no se establece por posición, como en los casos anteriores, sino por valor. Esta capa es de tipo discreto y representa una teselación<sup>9</sup> del territorio en un número definido de clases.

Lo habitual es emplear esta capa de clases en conjunción con otra, ya sea de valores continuos o discretos, y extraer de esta segunda los valores a utilizar para definir el valor representativo de cada clase (Olaya, 2011).



*Figura 2.26 Función regional*

*Fuente: Sistemas de información geográfica, Olaya (2011)*

---

<sup>9</sup>hacen referencia a una regularidad o patrón de figuras que recubren o pavimentan completamente una superficie plana.

### 2.5.10.4 Funciones globales

Las funciones globales son aquellas que utilizan la totalidad de valores de la capa para la obtención del resultado. Por su forma de operar, no generan exclusivamente nuevas capas como las anteriores funciones, sino tanto valores concretos como objetos geográficos de diversa índole (Figura 2.27) (Olaya, 2011).

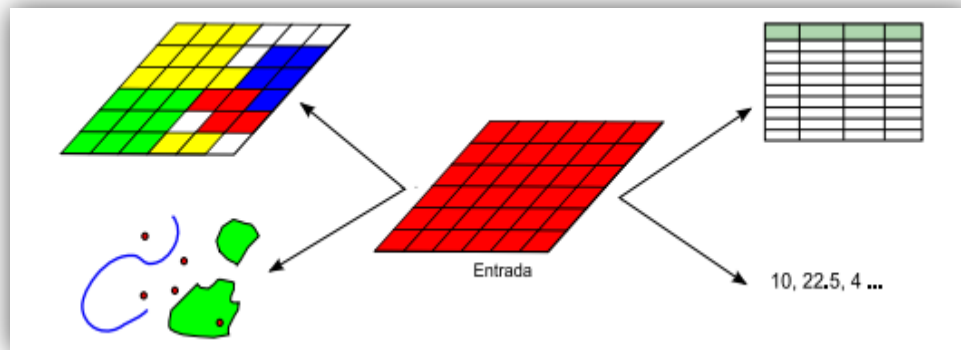


Figura 2.27 Función global

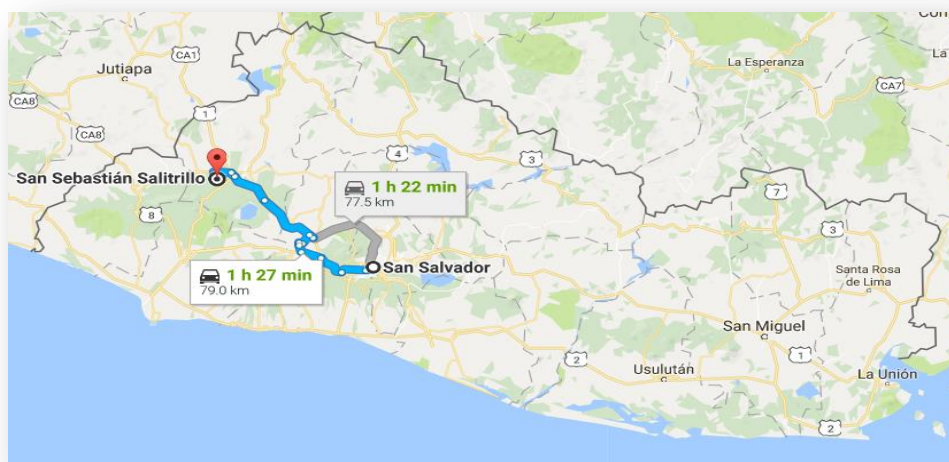
Fuente: *Sistemas de información geográfica*, Olaya (2011)

## CAPITULO III

### GENERALIDADES

#### 3.1 UBICACIÓN DEL MUNICIPIO DE SAN SEBASTIÁN SALITRILLO

El municipio de San Sebastián Salitrillo, se ubica en el departamento de Santa Ana, a 79 Km de San Salvador como se muestra en la (Figura 3.1), tiene una extensión territorial de 42.23 km<sup>2</sup> lo que representa un 2.1 % del área total de Santa Ana. Y una elevación promedio de 775 MSNM. (PFGL, 2015)



*Figura 3.1 Distancia entre San Salvador y el Municipio en estudio.*

Fuente: Google Maps

La población con la que cuenta el municipio de San Sebastián salitrillo es de 24,556 habitantes, su distribución política - administrativa consiste en una cabecera municipal

y los cantones: Los Amates, San Luis, Santa Rosa y Santa Bárbara como se muestra en la (Figura 3.2). (PFGL, 2015)



*Figura 3.2 División administrativa de San Sebastián Salitrillo.*

Fuente: (PFGL, 2015)

Para tener una mejor idea de la ubicación del Municipio de San Sebastián Salitrillo mencionaremos sus colindantes, al norte colinda con el municipio de El Porvenir, al sur con Santa Ana y Chalchuapa, al oriente con Santa Ana y al poniente con Chalchuapa, sus coordenadas geográficas centrales son  $13^{\circ} 58' 0''$  N,  $89^{\circ} 38' 0''$  O, cuenta con algunas quebradas ya que por su orografía es un valle. (PFGL, 2015)

## **3.2 DELIMITACIÓN Y VEGETACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

### **3.2.1 Delimitación de la microcuenca de estudio**

Para delimitar y trazar la zona de estudio se hizo un análisis de la microcuenca de drenaje natural en la que se encuentra el municipio, cabe señalar que dentro de esta zona de estudio se incluye parte del municipio de Chalchuapa al Sur-Oeste, también se tomó en cuenta el cauce del río Chalchuapa al Norte, así como también el parte aguas de la subcuenca Pampe al Sur (Figura 3.3).

Como resultado final tenemos que la zona de estudio comprende San Sebastián Salitrillo completamente, parte de El Porvenir al Norte, Santa Ana al Este y Chalchuapa al Sur Oeste, con un área de 66.23 Km<sup>2</sup>.

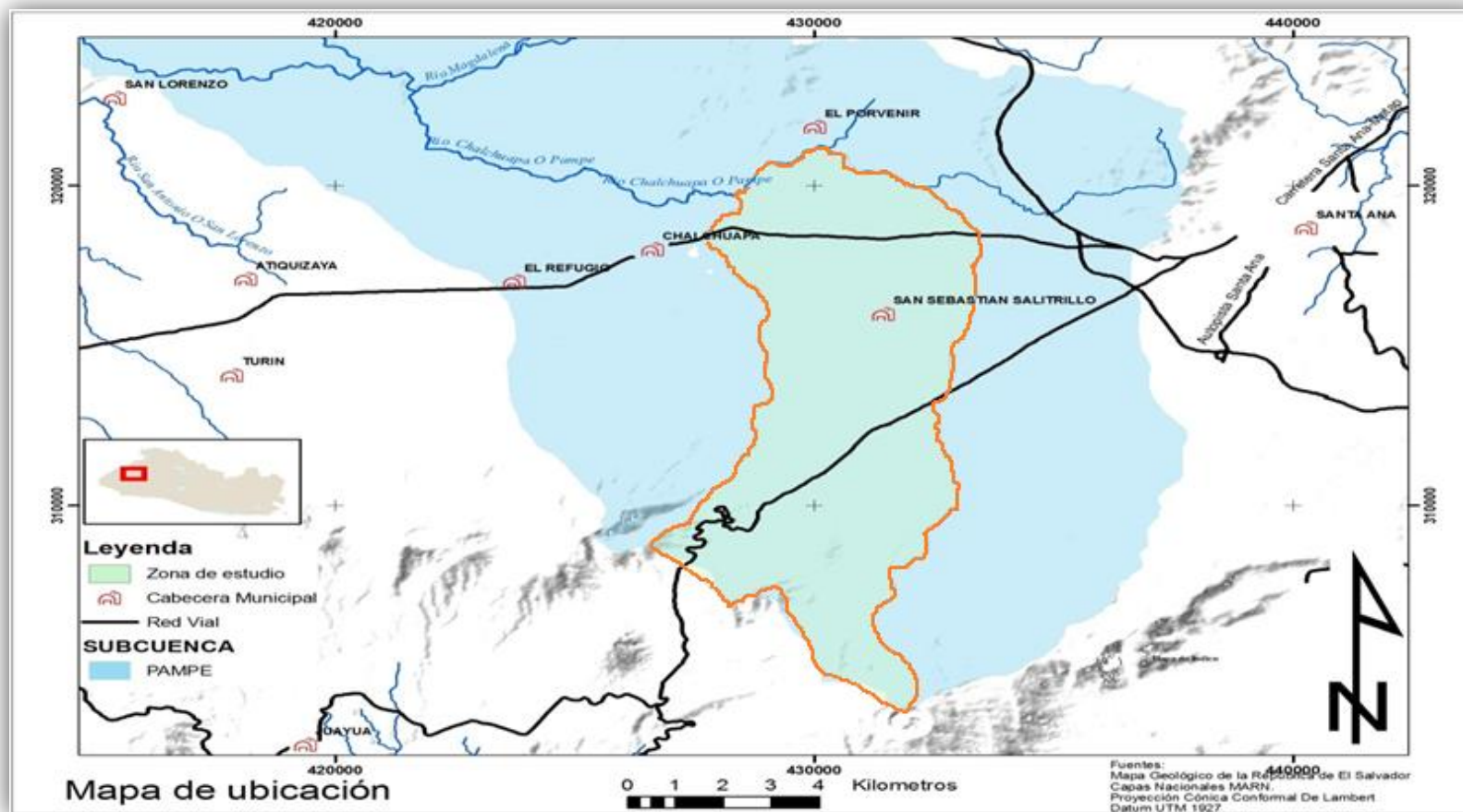


Figura 3.3 Delimitación de la zona de estudio

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)



### **3.2.2 Vegetación de San Sebastián Salitrillo**

El municipio cuenta con una vegetación que está constituida, por pequeños bosques húmedos subtropicales frescos. Entre las especies arbóreas más conocidas están: Cedro, Pino, Roble, Laurel, Manzano-rosa, Pepeto, Chichipato, Carao, Guachipilín, Cuje, Amate, Ceiba. (PFGL, 2015)

### **3.3 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA**

Geológicamente hablando El Salvador es un país extremadamente joven. Una cuarta parte del territorio nacional es de edad pleistocénica y tres cuartas partes están cubiertas por rocas de edad terciaria, predominando la época pliocénica, las cuales se originaron por fenómenos volcánicos que dieron origen a dislocamientos en los materiales producidos por fallamientos<sup>10</sup> normales e inversos. Estos fallamientos, tienen orientaciones de acuerdo a los rumbos ONO y NNE, según el mapa geológico de El Salvador, siendo el rumbo ONO el más importante, su rumbo aproximado es N 70° O. Las fallas de este sistema definen los límites norte y sur del Graben Central, donde se ha desarrollado el frente volcánico activo y donde han ocurrido los terremotos más destructivos. (<http://www.snet.gob.sv>)

---

<sup>10</sup> Es uno de los procesos geológicos importantes durante la formación de montañas

### 3.3.1 Geología de la zona de estudio

De acuerdo a la imagen (Figura 3.4) que muestra, la geología predominante en la zona de estudio se puede distinguir una sola formación geológica, la cual es la Formación San Salvador, perteneciente a la era Cenozoica.

#### 3.3.2.1 Formación Geológica San Salvador

La Formación San Salvador, se describe como piroclastitas ácidas y efusivas ácidas-básicas intercaladas, (Wiesemann, et al 1978); ubicada en una franja de rumbo ONO-ESE aproximadamente, limitando al norte con las unidades del Mesozoico-Terciario inferior, y al sur con las Formación Bálsamo. Entre los miembros geológicos pertenecientes a la Formación San Salvador y que se han ubicado en el área de análisis, se tienen:

- **s2:** Wiesemann (Wiesemann ,1978), lo describe por una secuencia de rocas volcánicas básicas-intermedias, piroclastitas subordinadas; contemporáneas con los miembros s3'a, s3'b, s4, que afloran en la parte central a lo largo del país.
- **s3'a:** Wiesemann (Wiesemann et al ,1978), describe esta formación como una secuencia de piroclásticas ácidas y epiclastitas volcánicas (Tobas color café), en parte contemporáneas con los miembros s2 y s3'b.
- **s5'a:** Wiesemann (Wiesemann et al ,1978), describe esta formación como una secuencia de efusivas básicas-intermedias, contemporáneas con los miembros s5'b, s5'c, s4, s3'b.

- **s5'b:** Wieseemann (Wieseemann et al ,1978), describe esta formación como una acumulación de escorias, tobas de lapilli y cinder. Es en parte, tiempo equivalente a los miembros s5'a y s5'c.
- **s5'c:** Wieseemann (Wieseemann et al ,1978), definido esta formación como una secuencia volcánica constituida principalmente por cenizas y tobas de lapilli, en parte contemporánea con los miembros s3'b, s5'a, s4, s5'b.
- **Q'f:** son depósitos sedimentarios del cuaternario constituidos principalmente por secciones con intercalaciones de rocas piroclásticas, depósitos coluviales, conos de deyección. Están ubicados a lo largo de la bahía de Jiquilisco, el Golfo de Fonseca y a lo largo del Rio Iempa. (Wieseemann, 1975)

A través del uso del programa ArcGIS (ArcMap), se muestra el resultado de digitalizar la zona de estudio y además de dividirla en las diferentes zonas geológicas contenidas en ella formadas por los distintos miembros geológicos de la formación San Salvador, para ello se utilizó el mapa geológico del país (Figura 3.5), en la tabla de atributos se detallan las características geológicas de cada zona como son la formación, edad, miembro geológico y el área correspondiente (Figura 3.4).

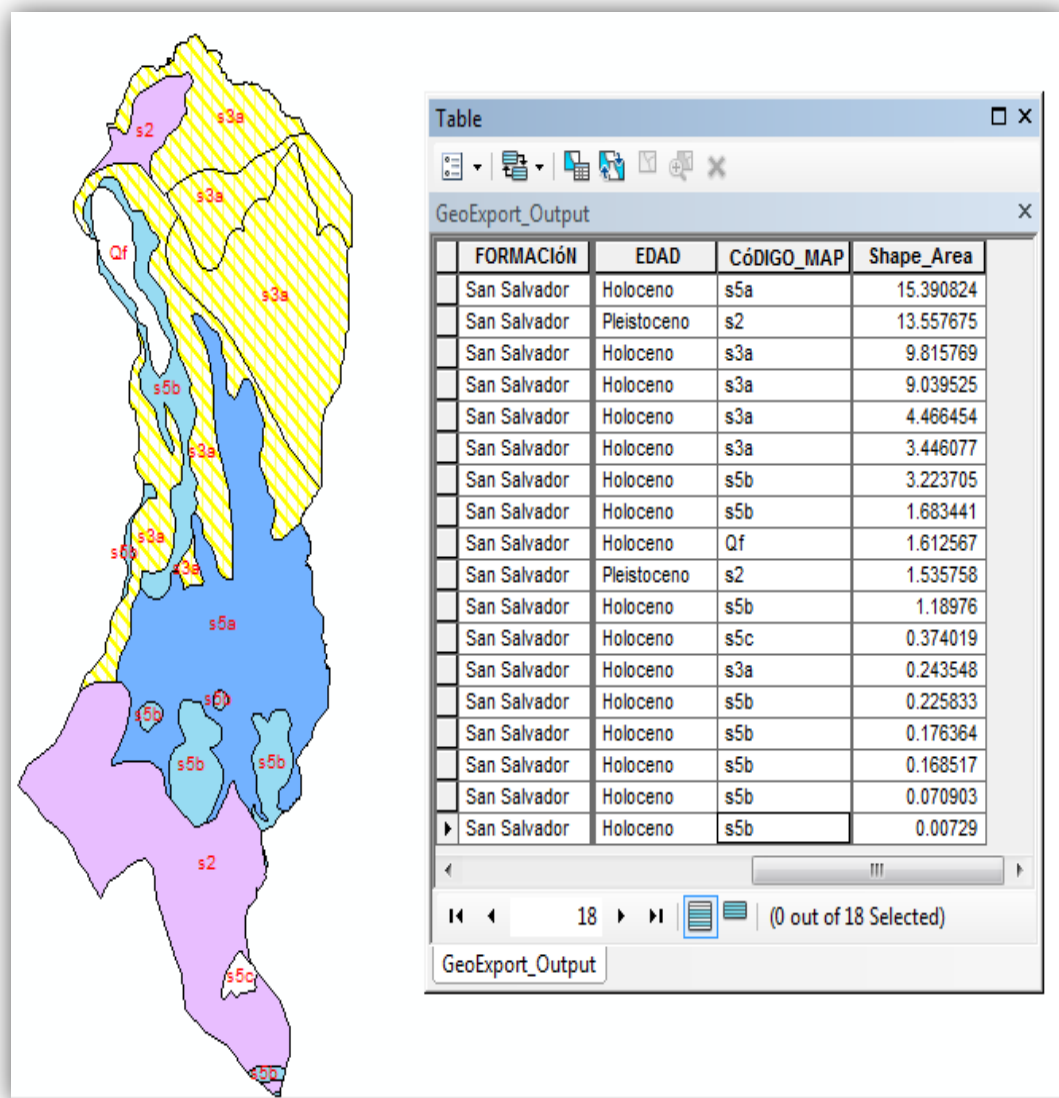


Figura 3.4 Características geológicas de la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia basado en el Mapa geológico elaborado por la Misión

Geológica Alemana

A continuación, se muestra en la tabla (3.1) el área correspondiente a cada miembro geológico presente en la zona de estudio.

*Tabla 3.1 Área de los diferentes miembros de Formación San Salvador*

*Fuente: Elaboración propia*

Miembro Geológico	Área (km <sup>2</sup> )
s2	15.09
s3'a	27.02
S5'a	15.39
S5'b	6.75
S5'c	0.37
Q'f	1.61
Total	66.23

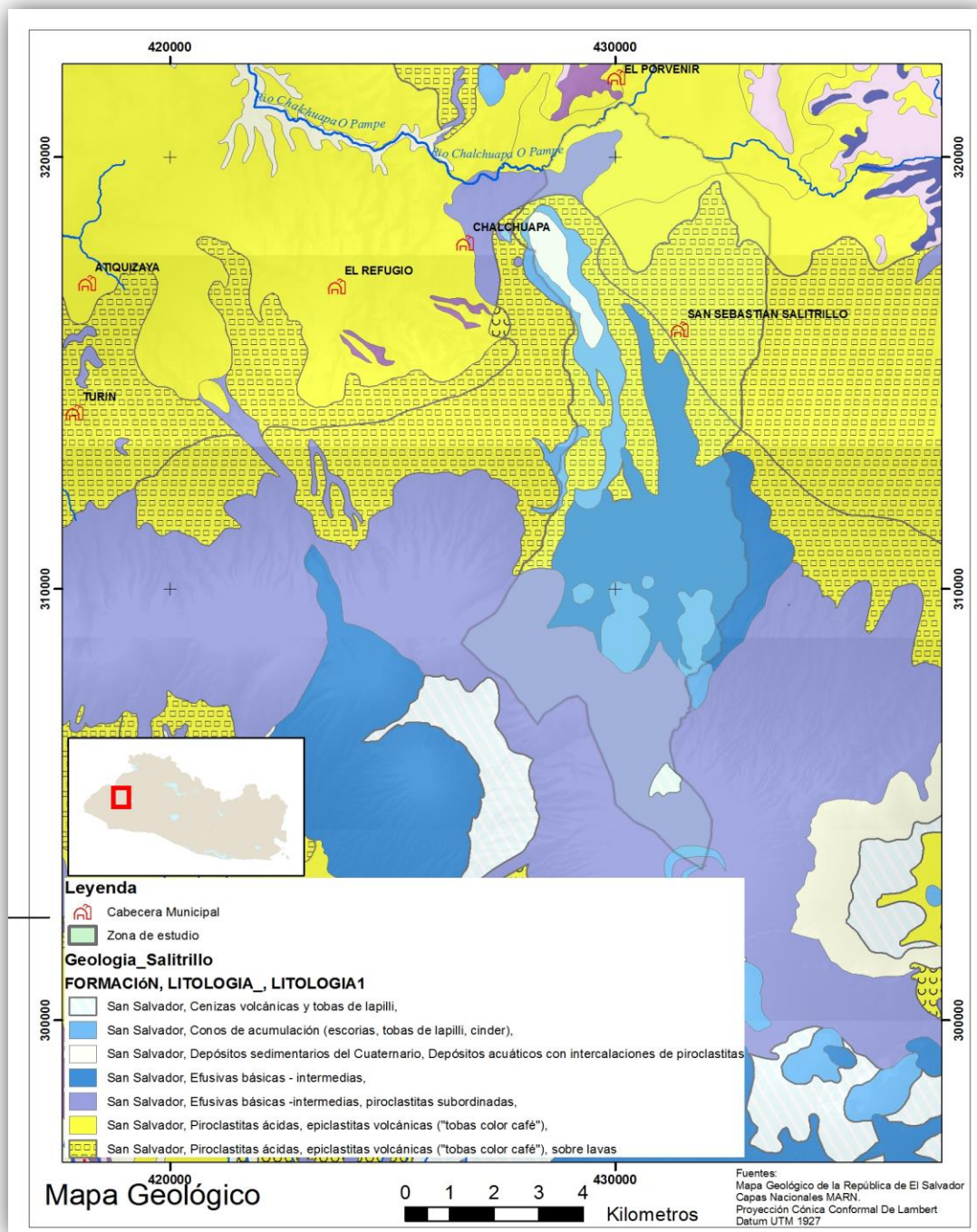


Figura 3.5 Mapa geológico de la zona en estudio

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)

### **3.4 CLIMA DE LA ZONA DE ESTUDIO**

El Salvador está situado en la parte Norte del cinturón tropical de la Tierra, de tal modo que en Noviembre y Octubre se ve influenciado principalmente por vientos del Noreste y ocasionalmente, por nortes rafagosos que nos traen aire fresco originado en regiones polares de Norteamérica, pero calentado en gran medida al atravesar el Golfo de México en su camino a Centroamérica. (SNET, 2017)

En el municipio de San Sebastián Salitrillo el clima es cálido, pertenece al tipo de tierra cálida y templada. El monto pluvial anual oscila entre los 1,700 y 1,900 mm. Se dan dos estaciones climáticas, una lluviosa que va del mes de Mayo al mes de Octubre y una estación seca que comprende los meses de Noviembre al mes de Abril. (PFGL, 2015)

### **3.5 CARACTERIZACIÓN HIDROGRÁFICA DE LA ZONA**

Por su topografía el municipio únicamente cuenta con un río, el río que riega al municipio es el Amulunga. Hidrográficamente el territorio de San Sebastián Salitrillo tiene sus drenajes orientados hacia la subcuenca del río Paz.

Entre a las cuencas y subcuencas que se encuentran colindantes a la cuenca del río Pampe tenemos: Lempa (Guajoyo y Suquiapa), Coatepeque, Banderas, Paz (Agua Caliente). En la imagen (Figura 3.6) se muestra la red de drenaje la cual está conformada por quebradas y ríos que drenan toda aquella precipitación que no pudo infiltrarse y la llevan al río Pampe, el cual va a desembocar al río Paz.

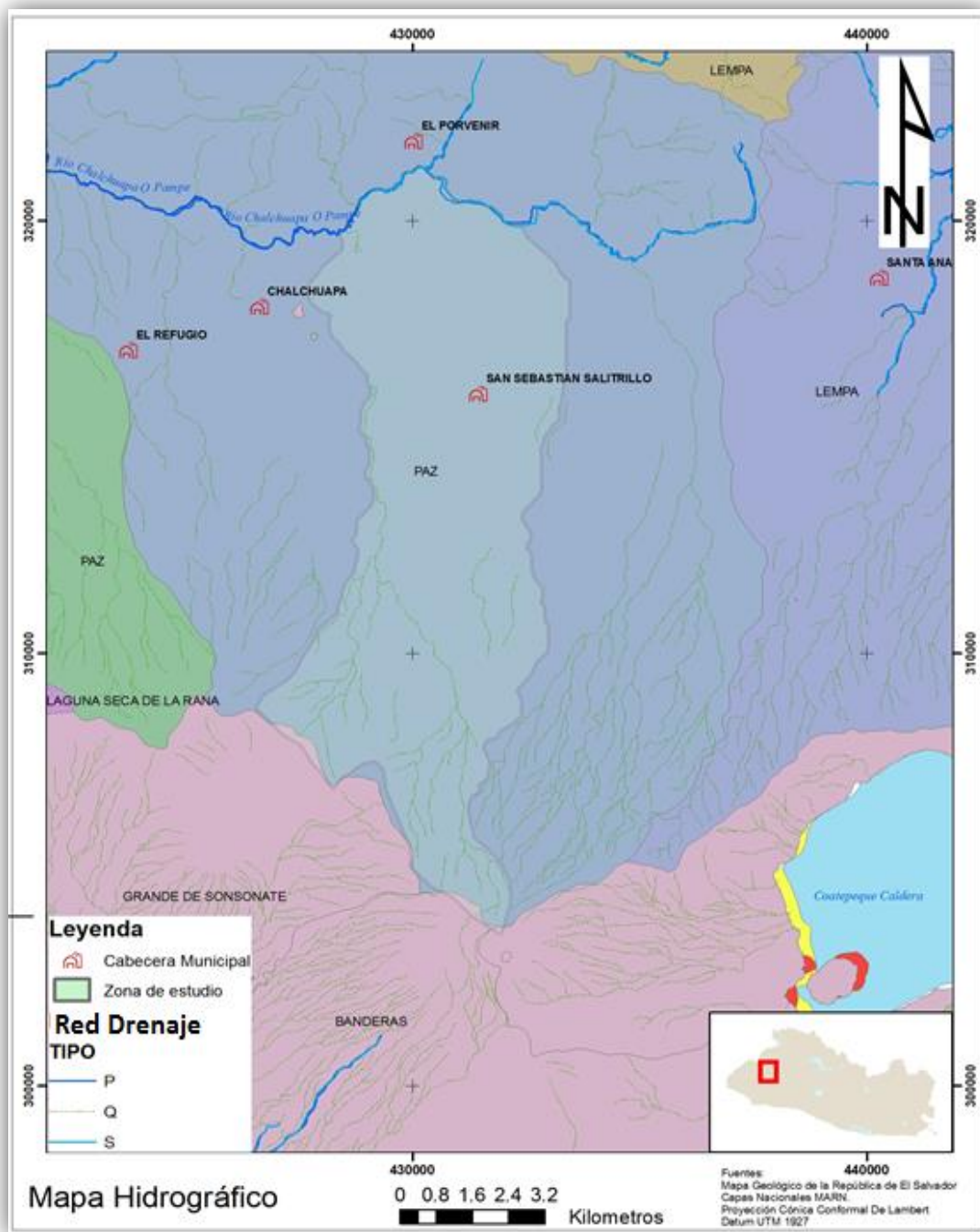


Figura 3.6 Mapa hidrográfico de la zona en estudio

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)



## **3.6 CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DE LA MICROCUENCA EN ESTUDIO**

De acuerdo al Mapa Hidrogeológico del país, siendo este el primer mapa nacional a una escala más detallada (1: 100,000), el cual fue creado por la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA) (Figura 3.7), en el cual se identifican las diferentes unidades hidrogeológicas (Acuíferos).

En dicha figura se pueden observar cuatro unidades hidrogeológicas presentes en la zona de estudio las cuales mencionaremos y describiremos a continuación:

### **3.6.1 Acuífero volcánico fisurado de gran extensión y alta producción**

Esta unidad está constituida básicamente por rocas volcánicas de carácter andesítico y basáltico con ciertas intercalaciones de materiales piroclásticos. Entre las rocas se pueden distinguir flujos y coladas de lavas que provienen de los centros de erupción volcánica. Los materiales antes mencionados pueden presentar la característica física que es la conductividad hidráulica que oscila en los rangos de mediana a alta, como consecuencia de su porosidad secundaria o fallamiento existente. (ANDA, 2008)

### **3.6.2 Acuífero poroso de gran extensión y productividad media**

Los materiales de esta unidad consisten principalmente en materiales piroclásticos aglomerados (Pómez, lapilli, tobas), teniendo una distribución granulométrica que varía

de fina a gruesa. Las conductividades hidráulicas pueden variar de medianas a bajas, como consecuencia al grado de cementación o compactación que pueden tener los granos de los materiales que la constituye.

### **3.6.3 Acuíferos locales de extensión limitada y de productividad mediana a baja**

Esta unidad está constituida, básicamente, por sedimentos aluviales (Arenas, gravas, etc.) que han sido transportados por los ríos, desde la parte alta de los cerros hasta la planicie. Los materiales de esta unidad presentan una conductividad hidráulica de media a baja, la que depende de la granulometría, del grado de limpieza (Contenido de limo y arcilla) y del grado de compactación que presentan los materiales. En las partes bajas el espesor de estos materiales puede superar los 15 m conformados por los miembros geológicos de Q'f, s4, s3'a, todos pertenecientes a la Formación san salvador. (ANDA, 2008)

### **3.6.4 Rocas no acuíferas**

Esta unidad hidrogeológica es representada por rocas no acuíferas las cuales presentan limitaciones en cuanto al almacenamiento y flujo de agua subterránea ya que está formado por tobas aglomeradas y brechosas, Lahares<sup>11</sup> cementados y flujos macizos de lavas con conductividades hidráulicas muy bajas o casi nulas, debido a su baja porosidad o a su alto grado de compactación y cimentación.

---

<sup>11</sup> Lahares: Son flujos que generalmente acompañan a una erupción volcánica; contienen fragmentos de roca volcánica, producto de la erosión en las pendientes de un volcán.

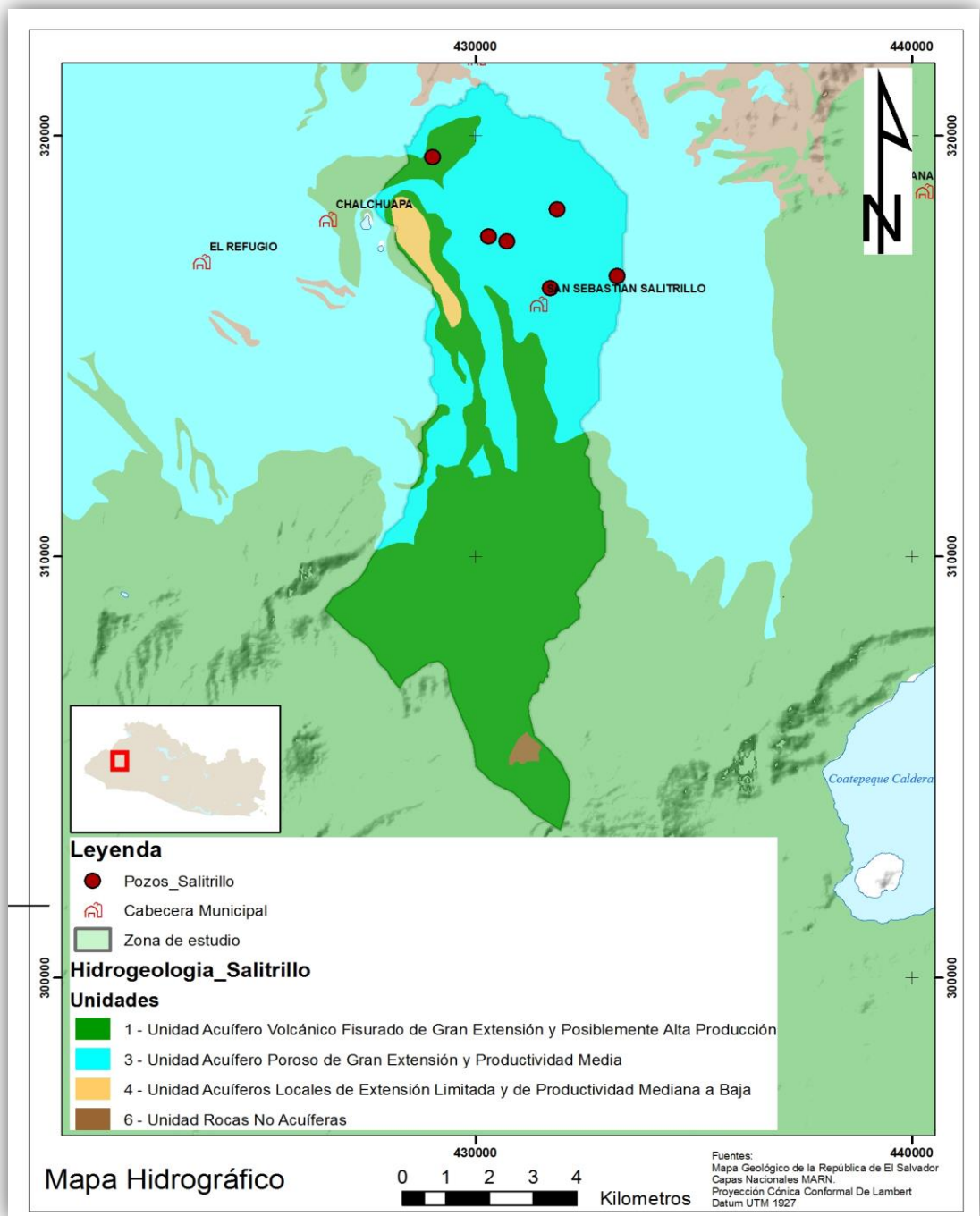


Figura 3.7 Mapa hidrogeológico de la zona en estudio

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)

## **CAPITULO IV**

# **RECOLECCIÓN DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Para determinar la caracterización hidrogeológica del acuífero se deberán cumplir los objetivos planteados en el capítulo uno de este trabajo de investigación, por lo que se hará un análisis químico del agua, un mapa de vulnerabilidad, el mapa de recarga potencial y por último un modelo conceptual.

En cuanto al análisis químico del agua, fue necesario extraer muestras de agua de los pozos en estudio tanto en época seca como lluviosa, para la recarga potencial se realizaron pruebas de infiltración y además se solicitaron al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), datos de precipitaciones y temperaturas, estas últimas para calcular la evapotranspiración potencial, para la vulnerabilidad se tomaron los niveles del agua de los pozos en estudio para poder aplicar el método GOD. Por lo que a continuación se presenta la información recolectada tanto en campo como por medio de instituciones gubernamentales relacionadas con los recursos hídricos de nuestro país como lo es el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

Este capítulo se dividirá en tres partes las cuales son: recolección de datos, procesamiento y análisis de los resultados, para que se pueda tener una mejor

apreciación del proceso que se realizó para poder obtener los resultados requeridos y cumplir con los objetivos propuestos.

## **4.1 RECOLECCIÓN DE DATOS**

En este apartado se presenta toda la información recolectada necesaria para poder realizar la investigación medular de este trabajo de investigación que es obtener la caracterización hidrogeológica del acuífero de San Sebastián Salitrillo en el departamento de Santa Ana.

### **4.1.1 Recolección de datos para Mapa de Vulnerabilidad**

Para poder determinar la vulnerabilidad del acuífero a través del método GOD es necesario conocer los niveles de los pozos de la red de monitoreo, ya que este es un parámetro que se necesita para poder obtener dicha vulnerabilidad, por lo que a continuación se presenta tanto la red de pozos que se utilizará para este trabajo de investigación, así como el método que se utilizó para poder obtener los niveles del agua subterránea en los pozos.

#### **4.1.1.1 Red de pozos de monitoreo**

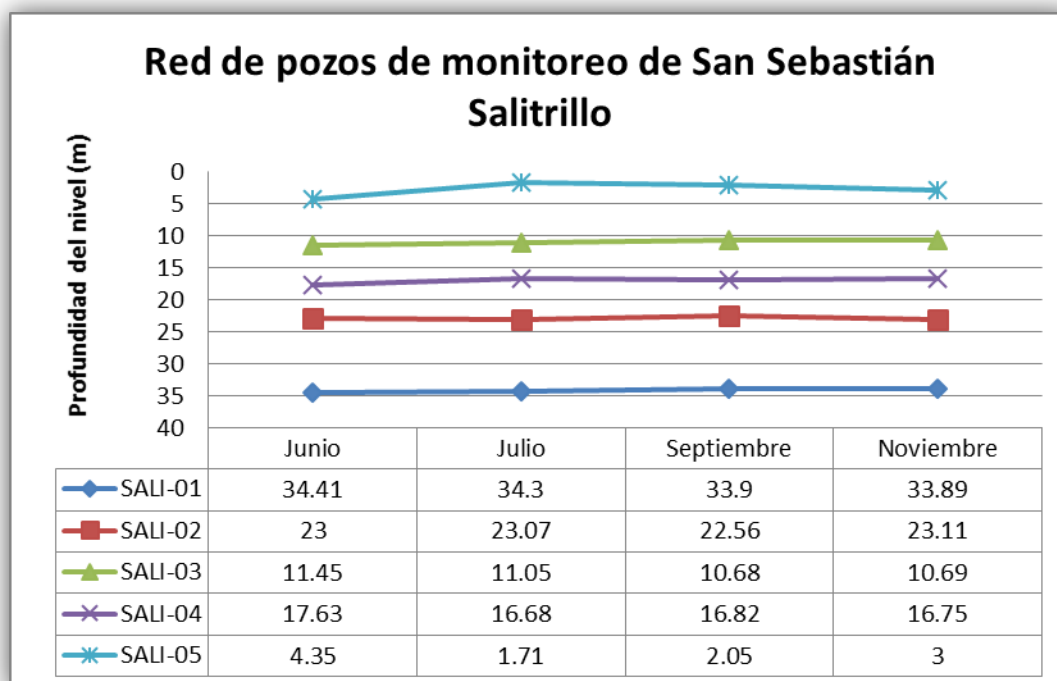
Los pozos monitoreados en la zona de estudio fueron un total de 5 y un manantial, cabe señalar que aunque la cantidad de pozos en la zona es mayor, solo se nos fue posible el monitoreo de estos, que a continuación presentamos en la tabla (4.1) en la cual está la información recolectada en las visitas de campo que se hicieron al lugar.

*Tabla 4.1 Profundidades de pozos medidas en campo*

*Fuente: Elaboración propia*

Pozos de monitoreo de San Sebastián Salitrillo										
Cod. Pozo	Elevación	Nombre	Longitud	Latitud	Prof. (m)					
					Abril	Mayo	Junio	Julio	Sep.	Nov.
SALI-01	721.55	Las Marías	89° 38.704'O	13° 58.768'N	33.95	34.27	34.41	34.3	33.9	33.89
SALI-02	714.75	San Juan	89° 37.834'O	13° 59.118'N	23.05	25.84	23	23.07	22.56	23.11
SALI-03	699.86	Galicia	89° 38.802'O	13° 59.560'N	11.22	11.37	11.45	11.05	10.68	10.69
SALI-06	688	Amulunga	89° 39.425'O	13° 59.788'N	No aplica					
SALI-04	705.89	San José	89° 38.705'O	13° 59.287'N		17.5	17.63	16.68	16.82	16.75
SALI-05	691.64	El Rosario	89° 38.758'O	14° 0.148'N	4.24	4.43	4.35	1.71	2.05	3

En base a la información de la tabla (4.1) se presenta el comportamiento de los niveles de los pozos monitoreados y de cómo estos han variado su nivel de profundidad para los diferentes meses, dicha información se puede observar en la (Figura 4.1).



*Figura 4.1 Red de pozos de monitoreo*

*Fuente: Elaboración propia*

#### **4.1.1.2 Medición de niveles en la red de pozos de monitoreo**

Existen muchas técnicas y herramientas utilizadas para la recolección de datos necesarios para la creación de mapas de vulnerabilidad, para nuestro caso realizamos una medición de niveles en los pozos que forman parte de nuestro estudio por medio de una sonda eléctrica, que funciona emitiendo un sonido cuando esta entra en contacto con el agua, entonces se lee en la cinta métrica la profundidad a la que se encuentra el agua (Figura 4.2).



*Figura 4.2 Medición de niveles de pozos*

*Fuente: Elaboración propia*

### **4.1.1.3 Gradiente Hidráulico para la red de Pozos**

El gradiente hidráulico ( $i$ ) se define como la pérdida de energía experimentada por unidad de longitud recorrida por el agua; es decir, representa la pérdida o cambio de potencial hidráulico por unidad de longitud, medida en el sentido del flujo de agua.

Se define mediante la siguiente expresión:

$$i = \frac{\Delta h}{l} \quad \text{Ecuación (4.1)}$$

Donde:

$i$ : Gradiente hidráulico (Adimensional).

$\Delta h$ : Diferencia de potencial entre dos puntos del acuífero ( $h_1-h_2$ ).

$l$ : Distancia en la dirección del flujo entre estos dos puntos.



### Cálculo de Gradiente hidráulico

$i = (\text{Diferencia de potencial entre dos puntos del acuífero}) / (\text{Distancia en la dirección del flujo entre estos dos puntos})$

La siguiente imagen (Figura 4.3) es la representación en planta de la distribución de pozos monitoreados, en la cual se pretende encontrar el gradiente hidráulico, para ello se consideran en el análisis aquellos pozos que estén lo más alineados posibles en dirección de Sur a Norte (Las Marías - San José, dirección S-N y San José - El Rosario, dirección N-O), así como la longitud que existen entre los pozos involucrados en nuestro análisis.

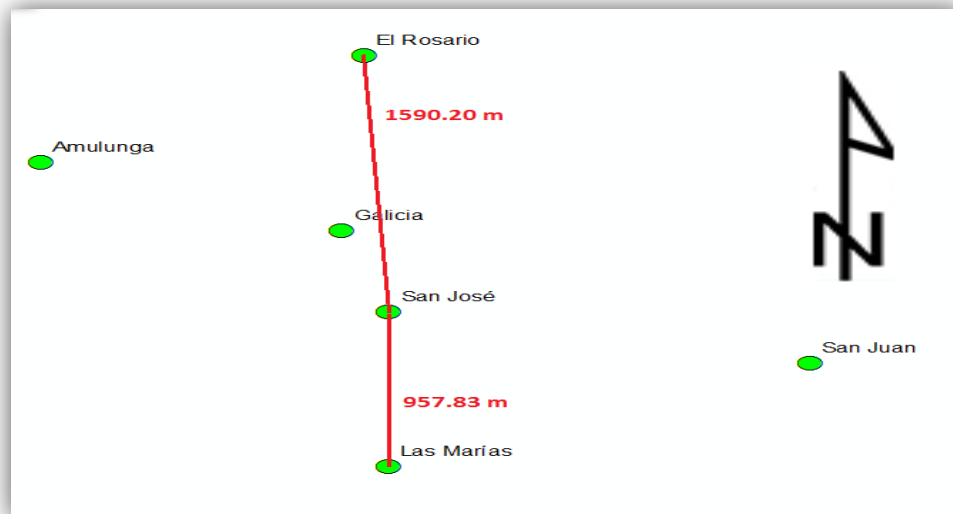


Figura 4.3 Distancia en metros entre los pozos El Rosario-San José y San José-Las Marías

Fuente: Elaboración propia en software Arcgis

A continuación, se presenta el cálculo del gradiente hidráulico para los pozos, Las Marías, San José y El Rosario, mediante la Ecuación (4.1) y la información extraída de la

tabla (4.3) (Profundidades de Pozos medidas en campos) datos que servirán como diferenciales de altura. Cabe recalcar que el análisis se hará para los meses de Mayo y Septiembre que son en los cuales se dan los niveles de profundidad del agua subterránea más bajos y más altos respetivamente.

#### Septiembre

$$i_{\text{SAN JOSÉ - EL ROSARIO}} = 16.82 - 2.05 / 1590.20 = 0.0093$$

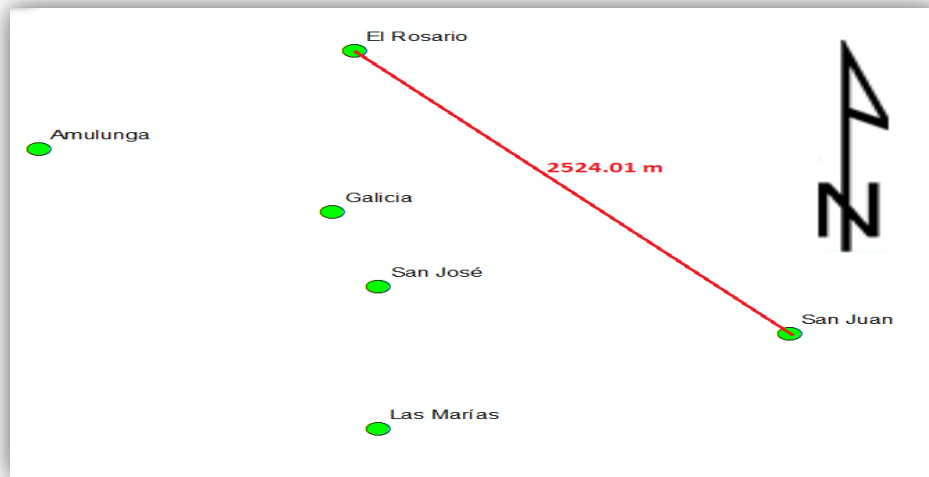
$$i_{\text{LAS MARIAS - SAN JOSÉ}} = 33.9 - 16.82 / 957.83 = 0.018$$

#### Mayo

$$i_{\text{SAN JOSÉ - EL ROSARIO}} = 17.5 - 4.43 / 1590.21 = 0.0082$$

$$i_{\text{LAS MARIAS - SAN JOSÉ}} = 34.27 - 17.5 / 957.83 = 0.018$$

Para el siguiente análisis de la (Figura 4.4) se busca verificar que tan similares resultan los gradientes hidráulicos de los pozos San Juan - El Rosario (Dirección N-O) en comparación al análisis anterior.



*Figura 4.4 Distancia en metros entre los pozos El Rosario-San Juan*

*Fuente: Elaboración propia en software Arcgis*

Al igual que el cálculo anterior y para los meses ya antes mencionados se tienen los resultados de los gradientes hidráulicos.

Septiembre

$$i_{\text{SAN JUAN} - \text{EL ROSARIO}} = \frac{22.56 - 2.05}{2524.01} = 0.0081$$

Mayo

$$i_{\text{SAN JUAN} - \text{EL ROSARIO}} = \frac{25.84 - 4.43}{2524.01} = 0.0084$$

#### **4.1.1.4 Perfiles de Niveles Piezométricos de la Red de Pozos**

Los perfiles de los niveles piezométricos para los pozos monitoreados en la zona de estudio serán de mucha importancia para definir la dirección del flujo del acuífero, para ello la piezometría realizada en campo nos será de mucha ayuda para definir el nivel del agua subterránea en unidades de (msnm), en la tabla (4.2) se encuentra toda la

información necesaria para los meses de Mayo y Septiembre, que son en los cuales tenemos registro de los niveles de profundidad del agua en los pozos, más bajos y más altos respectivamente, de ahí que nuestro estudio se enfoca principalmente en estos meses.

*Tabla 4.2 Información para el cálculo de Nivel del Agua subterránea*

*Fuente: elaboración propia*

Cod. Pozo	Elevación (msnm)	Nombre	Tipo	Brocal (m)	Mayo Prof. (m)	Septiembre Prof. (m)
SALI-01	721.55	Las Marías	Excavado	0.67	34.27	33.9
SALI-02	714.75	San Juan	Perforado	0.11	25.84	22.56
SALI-03	699.86	Galicia	Excavado	0.33	11.37	10.68
SALI-06	688	Amulunga	Manantial	No aplica	No aplica	No aplica
SALI-04	705.89	San José	Excavado	0.48	17.5	16.82
SALI-05	691.64	El Rosario	Excavado	0.15	4.43	2.05

De la siguiente imagen (Figura 4.5) de perfil, en la cual se puede observar la medición a través de una Sonda Eléctrica para obtener el nivel de profundidad del agua en un pozo y además muestra en de talle, que mediante un nivel de referencia podemos determinar el Nivel del Agua Subterránea en (msnm), dato que nos servirá para elaborar los perfiles del flujo del agua subterránea y nivel de terreno. Para ello nos auxiliaremos de la siguiente fórmula:

$$Nivel\ del\ Agua\ Subterránea_{msnm} = Elevación + H. Brocal - Profundida \quad \text{Ecuación (4.2)}$$

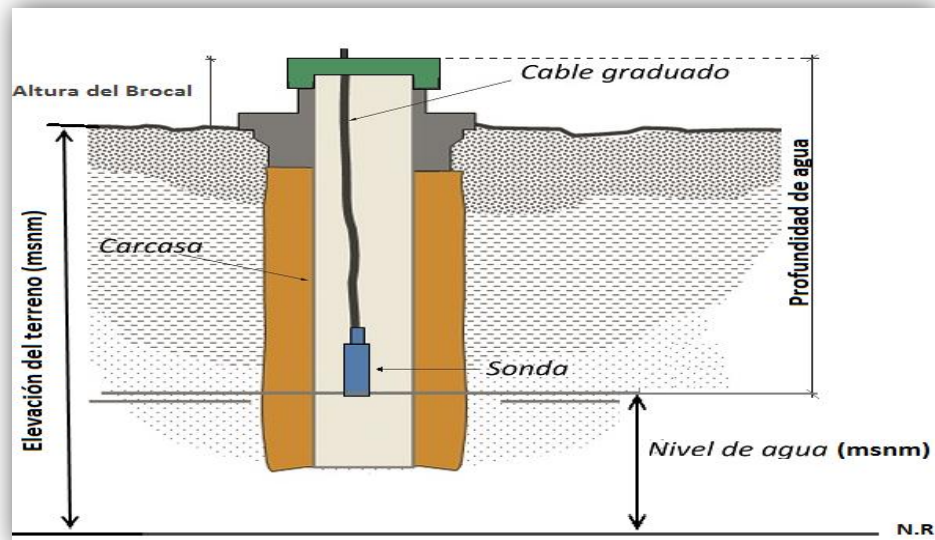


Figura 4.5 Medición de Profundidad mediante una Sonda Eléctrica

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.3 Niveles de agua Subterránea en msnm

Fuente: Elaboración Propia

Cod. Pozo	Nombre	Mayo N.A. msnm	Septiembre N.A. msnm
SALI-01	Las Marías	687.95	689.51
SALI-02	San Juan	689.02	692.30
SALI-03	Galicia	688.82	689.51
SALI-06	Amulunga	No aplica	No aplica
SALI-04	San José	688.87	689.55
SALI-05	El Rosario	687.36	689.74

De toda la información anterior y teniendo los niveles de terreno en msnm al igual que la profundidad del agua subterránea procederemos a generar los gráficos los cuales

mostrarán los perfiles de las diferentes combinaciones de pozos para verificar la dirección del flujo del agua subterránea teniendo presente que el análisis solo se hará para los meses de Mayo y Septiembre por ser los meses en los que los niveles de profundidad del agua subterránea son menores y mayores respectivamente.

#### PERFILES PARA EL MES DE MAYO

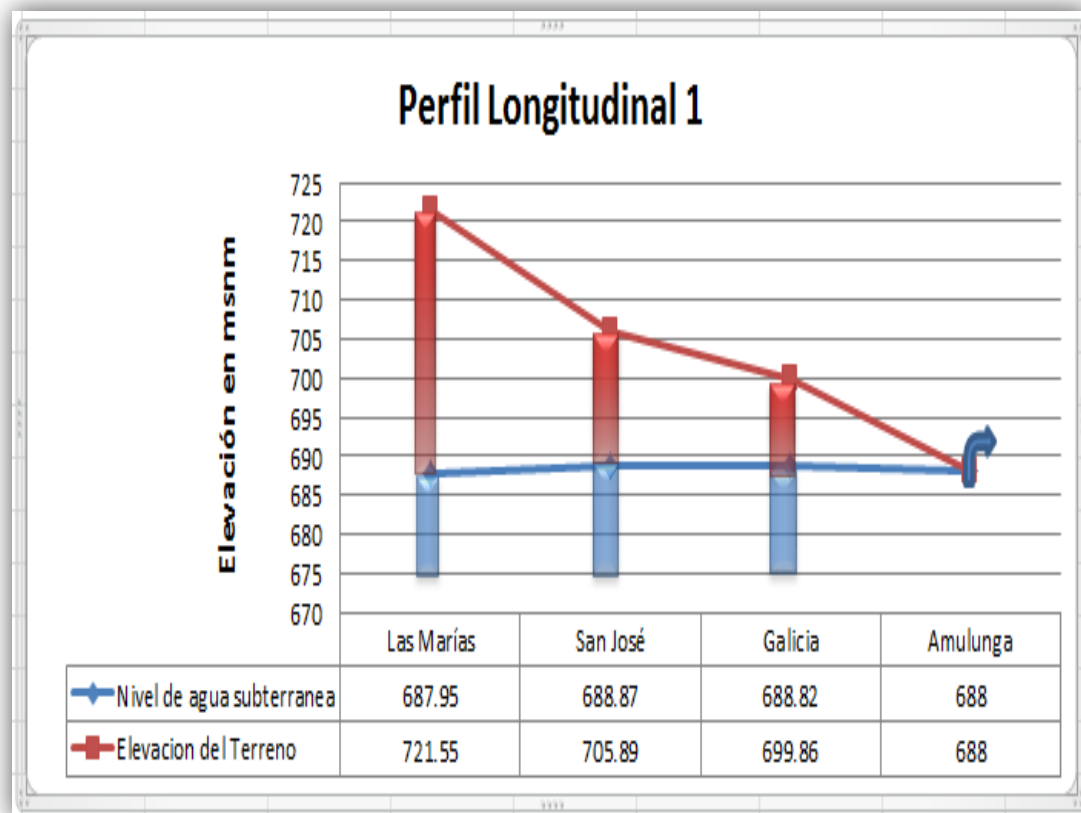


Figura 4.6 Perfil de nivel piezométrico Longitudinal 1

Fuente: Elaboración propia

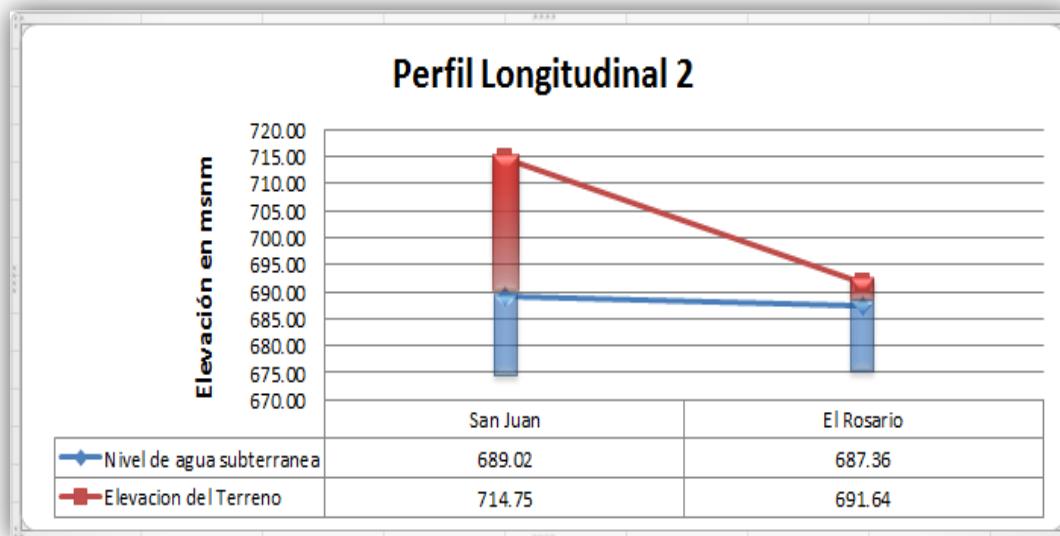


Figura 4.7 Perfil de nivel piezométrico Longitudinal 2

Fuente: Elaboración propia

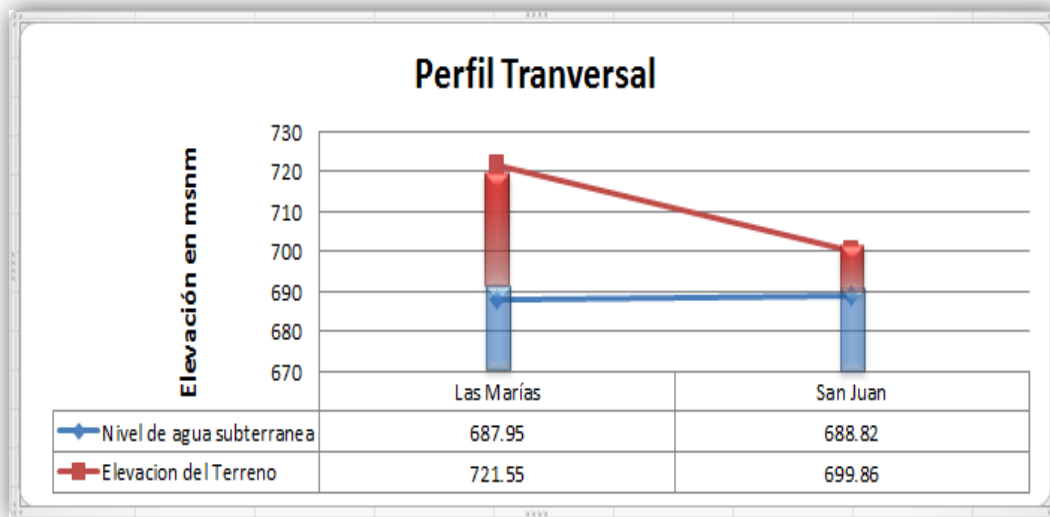
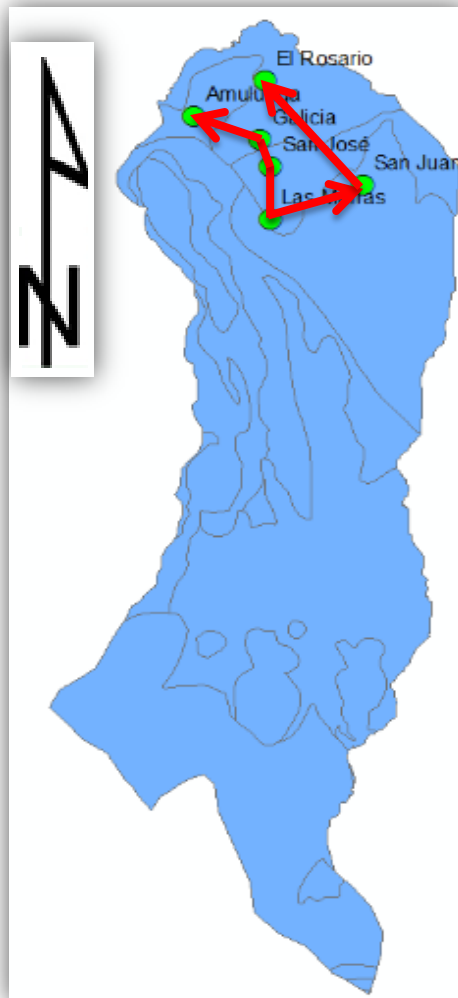


Figura 4.8 Perfil de nivel piezométrico Transversal

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente imagen (Figura 4.9) se muestra la dirección de los diferentes perfiles que se realizaron para el análisis del flujo del agua subterránea.



*Figura 4.9 Dirección de perfiles*

*Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana*



PERFILES PARA EL MES DE SEPTIEMBRE

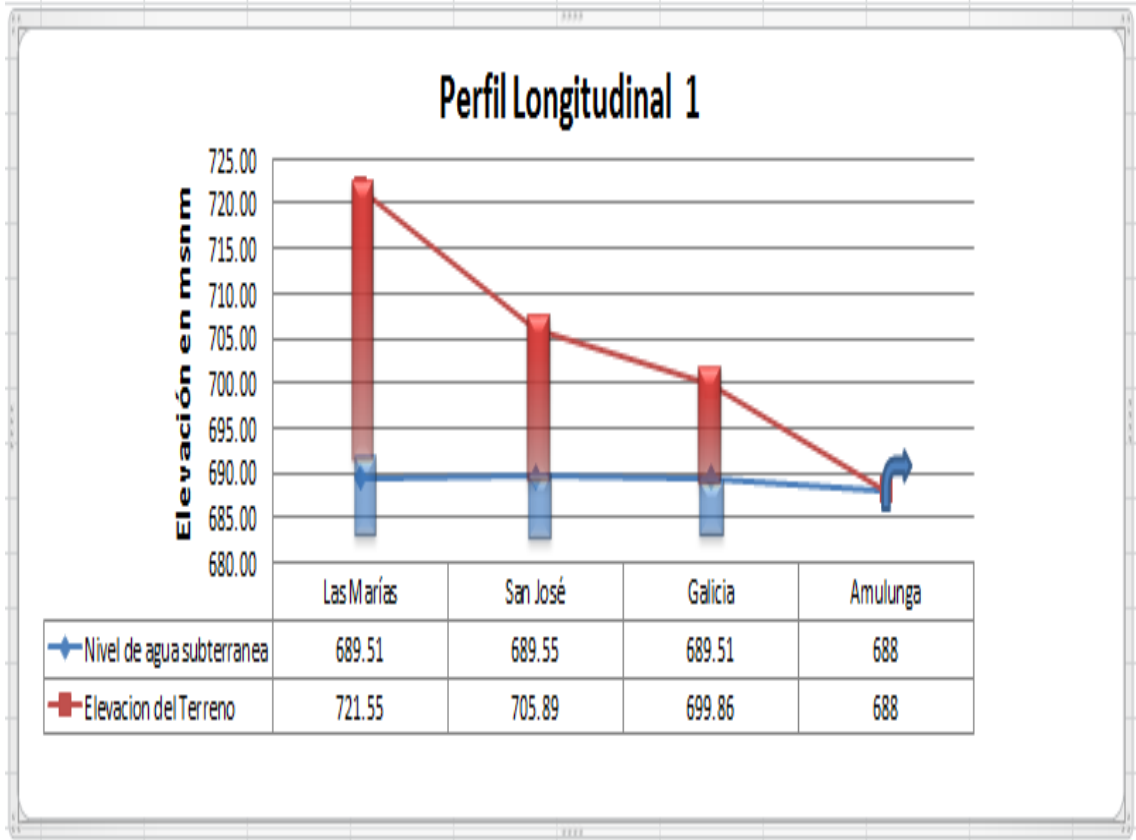


Figura 4.10 Perfil de nivel piezométrico Longitudinal 1

Fuente: Elaboración propia

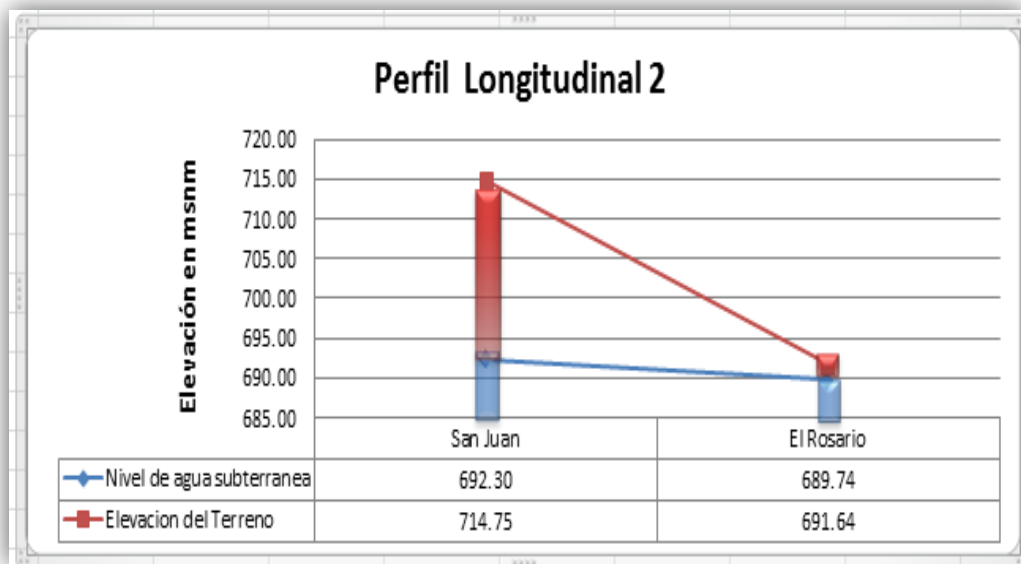


Figura 4.11 Perfil de nivel piezométrico Longitudinal 2

Fuente: Elaboración propia

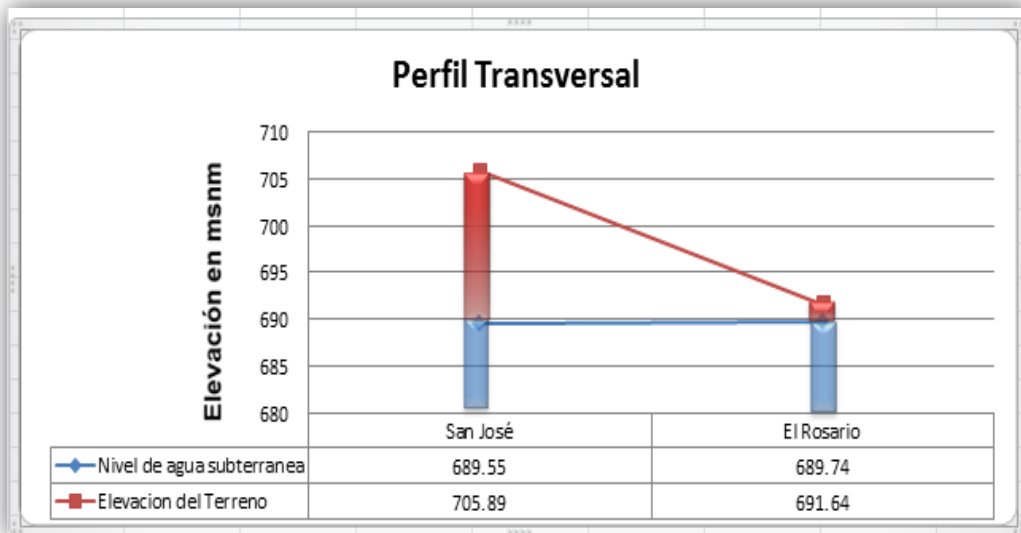


Figura 4.12 Perfil de nivel piezométrico Transversal

Fuente: Elaboración propia

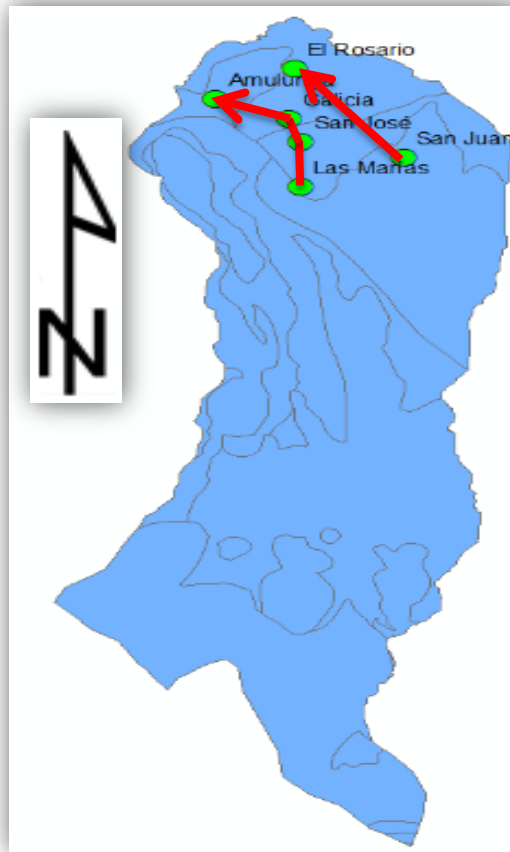


Figura 4.13 Ubicación de perfiles en la zona de estudio

Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana

#### 4.1.2 Recolección de datos para la Recarga Potencial del Acuífero

Para realizar la recarga potencial del acuífero se realizaron pruebas de infiltración en la zona de estudio, esto para obtener la permeabilidad del suelo que se utilizara para calcular el coeficiente que infiltra por textura del suelo ( $K_{fc}$ ), además se recolectaron datos en el MARN, los cuales se detallan a continuación.

### 4.1.2.1 Datos de Infiltración en campo

Para la determinación del valor de  $f_c$ , el cual corresponde a la permeabilidad saturada del suelo, valor que se obtiene en campo; se utilizó el método prueba de Porchet, ya que no se cuenta con el equipo especializado para realizar otro tipo de prueba y este método no requiere de equipo especial para la determinación de la infiltración básica del suelo. A continuación, se describe el procedimiento para la realización de la prueba Porchet:

1. Como primer paso se debe buscar una zona en la cual las características del suelo no hayan sido alteradas, seguidamente si fuese necesario se debe limpiar la zona si presenta vegetación, y a continuación se realiza la excavación de un hueco, con un diámetro de 7 cm y profundidad de 30 cm, desde la superficie del suelo. (Figura 4.14).



*Figura 4.14 Excavación en zona de estudio para prueba de infiltración*

*Fuente: Elaboración propia*

2. Cuando se tiene el agujero excavado, se debe colocar una regla o una cinta métrica que nos permita medir la variación de nivel que presentará el agua en el agujero debido a la infiltración que se dará en el terreno. Luego se procede a llenar con agua el agujero hasta alcanzar una altura de 30 cm (La cual puede descender rápida o lentamente, dependiendo de las características del suelo).  
  
Se debe tener el cuidado de contar con suficiente agua para la prueba debido a que se deben realizar lecturas en intervalos de tiempo de 2 minutos para los primeros 10 minutos de iniciada la prueba, luego se realizan lecturas en intervalos de 5 min hasta que los niveles de descenso para tres intervalos consecutivos de tiempo, sean los mismos o aproximadamente iguales.
  
3. Como tercer paso se debe llevar un registro de las lecturas, de los descensos de nivel que se va presentando según transcurra el tiempo. Es importante mencionar que se debe contar por lo menos con dos personas para realizar esta prueba, las personas que efectúen este ensayo deben estar distribuidas de tal forma que una de ellas haga lecturas de nivel y apuntes, mientras que la otra lleve cronometrado el tiempo transcurrido para cada intervalo.

#### 4.1.2.2 Datos de Precipitación

El cálculo de la precipitación se hará en base a un periodo de estudio de 7 años (2010 -2016), de las estaciones meteorológicas: Santa Ana UNICAES, Los Andes y Los Naranjos, los datos son precipitaciones mensuales proporcionados por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

A continuación, se muestra una comparación entre las tres estaciones para cada año de estudio (Figura 4.15 hasta la Figura 4.21).

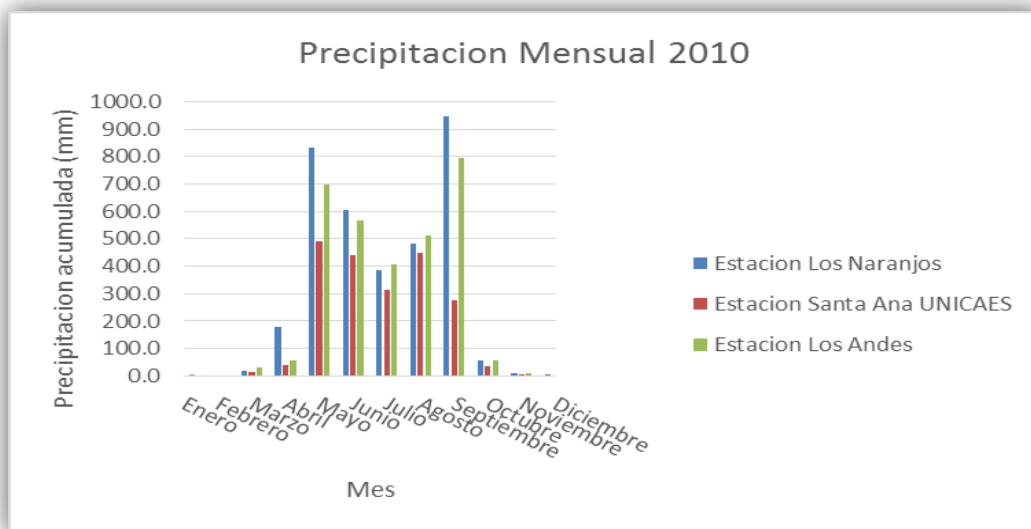


Figura 4.15 Precipitación mensual por cada estación meteorológica para el año 2010

Fuente: Elaboración propia

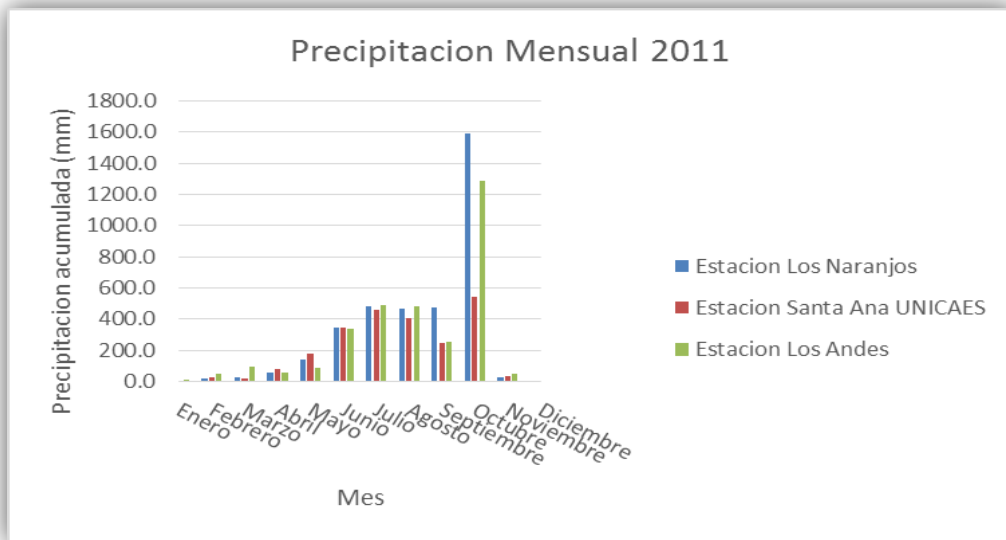


Figura 4.16 Precipitación mensual por cada estación meteorológica para el año 2011

Fuente: Elaboración propia

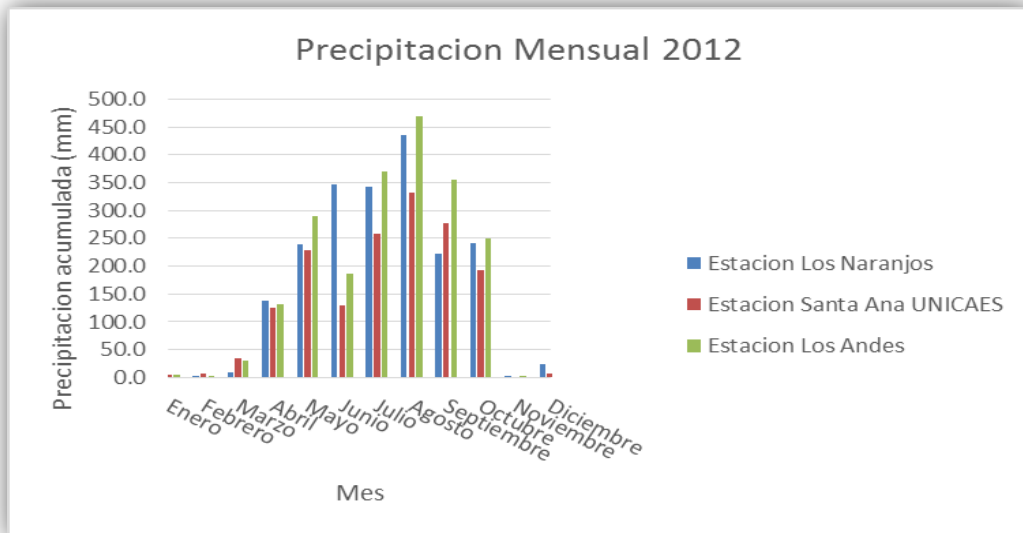


Figura 4.17 Precipitación mensual por cada estación meteorológica para el año 2012

Fuente: Elaboración propia

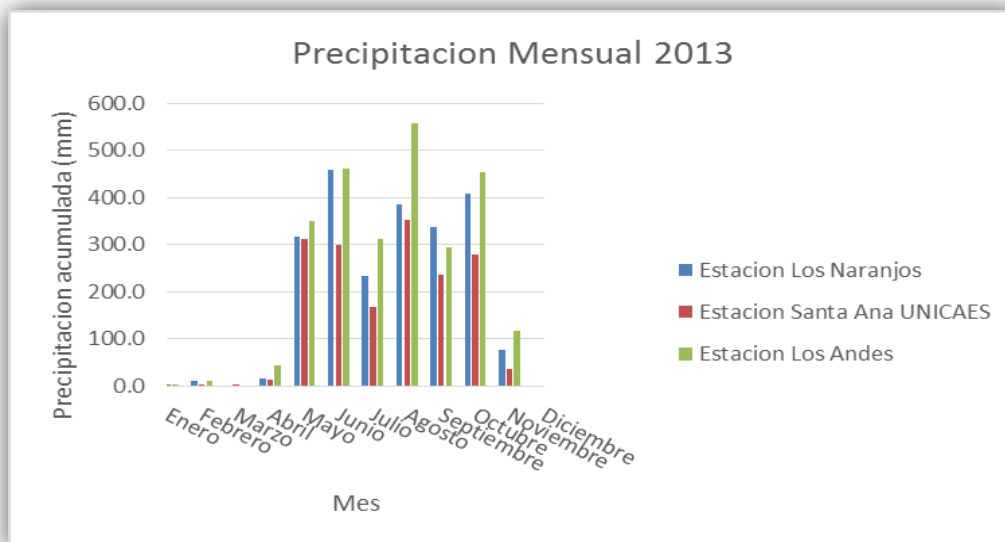


Figura 4.18 Precipitación mensual por cada estación meteorológica para el año 2013

Fuente: Elaboración propia

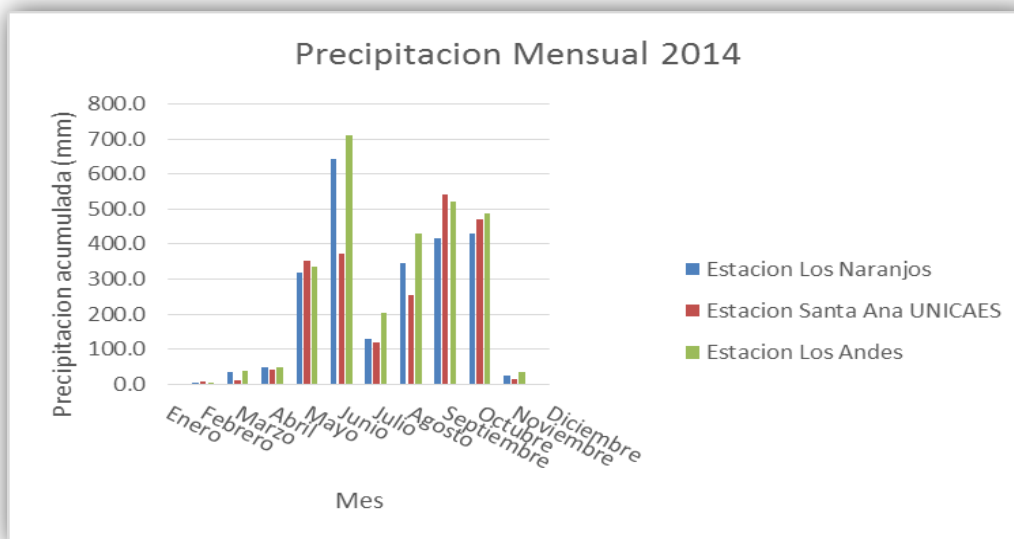


Figura 4.19 Precipitación mensual por cada estación meteorológica para el año 2014

Fuente: Elaboración propia



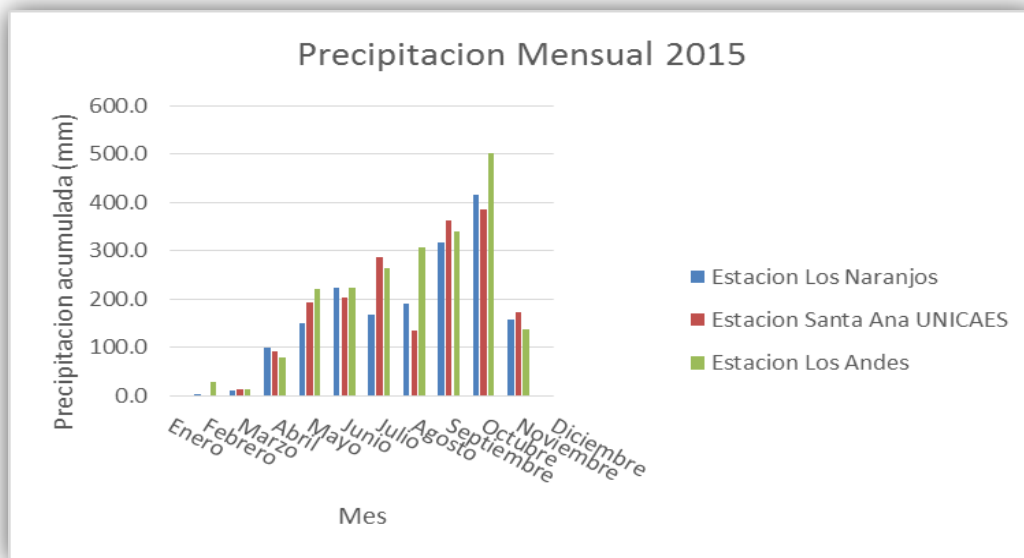


Figura 4.20 Precipitación mensual por cada estación meteorológica para el año 2015

Fuente: Elaboración propia

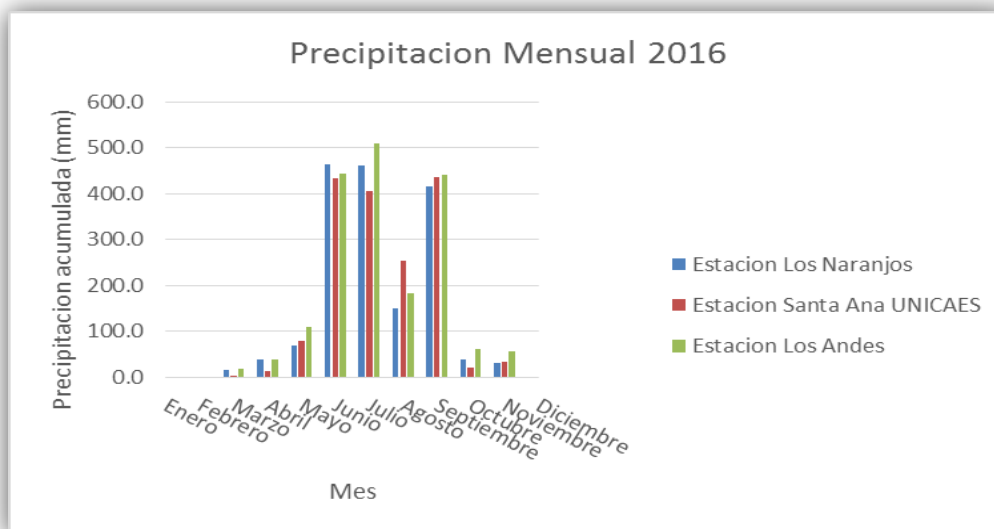


Figura 4.21 Precipitación mensual por cada estación meteorológica para el año 2016

Fuente: Elaboración propia

En la tabla (4.4) se muestran los datos de precipitaciones mensuales para cada de año de estudio los cuales promediaremos para sacar un promedio multianual.

*Tabla 4.4 Precipitaciones mensuales por cada estación meteorológica (2010 – 2016)*

*Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales*

Indice	Estación	Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
A-18	Finca Los Andes	2010	0.1	0.0	32.7	56.7	699.5	567.7	406.8	512.3	795.1	56.7	8.0	0.0
A-37	Santa Ana - UNICAES	2010	0.0	0.0	16.1	38.4	489.2	440.0	315.2	449.1	276.9	35.1	4.5	0.0
T-24	Los Naranjos	2010	0.0	0.0	19.2	177.2	833.1	604.1	387.6	482.2	947.0	55.3	10.0	0.1
A-18	Finca Los Andes	2011	0.8	47.0	95.5	54.3	86.8	333.9	486.2	479.4	256.4	1284.9	50.8	0.3
A-37	Santa Ana - UNICAES	2011	0.0	23.5	15.4	82.3	174.6	344.5	456.0	406.0	247.9	538.6	35.4	0.0
T-24	Los Naranjos	2011	0.6	21.6	23.5	56.5	136.4	343.4	481.0	469.7	472.5	1588.9	26.5	0.0
A-18	Finca Los Andes	2012	4.7	0.2	30.2	132.2	289.8	186.8	370.9	468.8	355.3	250.4	1.2	25.1
A-37	Santa Ana - UNICAES	2012	5.6	6.9	35.0	125.3	227.9	128.5	258.0	332.8	277.9	193.0	0.0	6.1
T-24	Los Naranjos	2012	3.8	0.6	8.4	137.4	239.1	347.8	343.2	435.8	221.9	242.2	0.3	24.8
A-18	Finca Los Andes	2013	0.4	11.0	0.0	45.0	350.4	461.1	313.5	557.6	295.0	453.0	117.0	1.0
A-37	Santa Ana - UNICAES	2013	1.0	0.5	0.1	13.4	312.6	299.4	168.3	353.5	236.0	279.0	37.0	0.0
T-24	Los Naranjos	2013	1.0	11.9	0.0	16.5	316.9	458.3	235.0	385.7	339.0	408.0	76.0	0.0
A-18	Finca Los Andes	2014	0.0	5.9	39.5	50.1	336.7	709.5	203.0	428.6	522.4	488.5	35.2	0.0
A-37	Santa Ana - UNICAES	2014	0.0	8.2	12.7	41.8	354.0	374.1	119.1	254.1	542.6	470.5	15.2	0.0
T-24	Los Naranjos	2014	0.0	5.2	34.9	49.8	319.4	643.6	130.6	347.3	415.8	428.8	24.7	0.0
A-18	Finca Los Andes	2015	0.0	28.0	13.8	80.1	221.8	224.1	264.1	307.5	340.1	501.6	138.7	1.4
A-37	Santa Ana - UNICAES	2015	0.0	0.0	13.2	92.5	194.4	204.8	286.9	136.3	362.3	384.8	173.8	0.0
T-24	Los Naranjos	2015	0.0	0.1	10.4	99.2	150.0	224.5	169.2	191.4	318.6	416.4	158.6	0.0
A-18	Finca Los Andes	2016	0.0	0.0	18.7	37.9	108.7	445.1	508.7	182.1	442.1	62.8	56.8	ND
A-37	Santa Ana - UNICAES	2016	0.0	0.0	4.7	14.4	79.3	434.9	406.3	254.1	436.8	20.7	34.5	ND
T-24	Los Naranjos	2016	0.3	0.0	16.5	37.9	69.6	463.6	461.4	150.7	415.8	39.0	32.4	ND

Como se puede observar tanto en la tabla (4.4) como en las figuras (Figuras 4.15 hasta 4.21) los meses de menor lluvia van de Noviembre a Marzo, porque es donde las precipitaciones llegan a tener valores de cero, esto da un indicio que en esos meses no se recarga el acuífero, si no en los meses restantes.

En la tabla (4.5) se muestra el promedio de las precipitaciones para los 7 años de estudio de cada una de las estaciones, que serán los valores a ingresar para el cálculo de la recarga.

*Tabla 4.5 Promedio de precipitaciones mensuales para un periodo de siete años*

*Fuente: elaboración propia*

Índice	Estación	Periodo	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
A-18	Finca Los Andes	2010-2016	0.86	13.16	32.91	65.19	299.10	418.31	364.74	419.47	429.49	442.56	58.24	3.97
A-37	Santa Ana-UNICAES	2010-2016	0.9	5.6	13.9	58.3	261.7	318.0	287.1	312.3	340.1	274.5	42.9	1.0
T-24	Los Naranjos	2010-2016	0.8	5.6	16.1	82.1	294.9	440.8	315.4	351.8	447.2	454.1	46.9	4.2

### 4.1.2.3 Datos de Temperatura

Se solicitaron datos de temperatura mensual máxima, mínima y promedio, al Ministerio De Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) para un período de estudio de siete años (2010 – 2016), los cuales se muestran en las tablas (4.6, 4.7 y 4.8).

Tabla 4.6 Datos de temperaturas máximas mensuales para cada estación meteorológica en estudio (2010-2016)

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Índice	Estación	Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
A-18	Finca Los Andes	2010	18.9	21.8	23.9	24.1	22.9	22.2	22.2	21.9	20.8	19.4	19.2	17.6
A-18	Finca Los Andes	2011	19.6	21.2	21.7	23.3	23.5	22.4	22.1	22.0	21.1	19.0	19.1	18.4
A-18	Finca Los Andes	2012	19.1	21.1	22.8	23.2	22.4	22.3	23.0	22.6	22.1	20.2	18.8	19.5
A-18	Finca Los Andes	2013	20.1	22.0	22.8	24.7	23.3	22.6	22.6	22.2	21.2	21.9	20.1	19.2
A-18	Finca Los Andes	2014	19.5	22.1	23.8	24.4	22.4	22.6	23.6	22.9	21.9	21.1	18.5	17.6
A-18	Finca Los Andes	2015	17.8	19.9	21.8	24.2	24.1	22.6	23.3	24.2	22.6	21.2	20.4	20.7
A-18	Finca Los Andes	2016	19.6	19.9	23.9	24.7	24.7	22.7	23.3	22.6	22.2	21.0	19.5	ND
A-37	Santa Ana – UNICAES	2010	30.5	33.3	34.9	34.6	32.3	31.0	30.8	30.3	29.6	30.4	30.3	28.8
A-37	Santa Ana – UNICAES	2011	31.5	32.7	32.7	33.6	32.9	31.4	31.1	31.3	31.0	28.6	30.4	30.4
A-37	Santa Ana – UNICAES	2012	31.4	33.0	34.3	33.3	32.2	31.1	32.3	31.7	32.0	30.9	29.9	31.4
A-37	Santa Ana – UNICAES	2013	32.0	33.6	33.2	35.1	32.8	31.8	31.8	31.5	30.2	31.5	30.6	31.1
A-37	Santa Ana – UNICAES	2014	31.3	33.8	34.8	34.7	31.9	31.2	33.0	32.3	30.5	30.2	29.4	29.8
A-37	Santa Ana – UNICAES	2015	30.4	32.2	34.2	34.6	34.3	32.5	32.5	33.4	31.4	30.5	30.9	30.9
A-37	Santa Ana – UNICAES	2016	31.0	31.0	34.6	35.7	34.9	31.8	32.4	32.0	31.1	31.5	30.5	ND
T-24	Los Naranjos	2010	21.8	24.0	25.4	24.7	24.2	23.3	23.4	23.3	22.2	22.8	22.2	21.0
T-24	Los Naranjos	2011	23.0	23.9	23.9	24.1	24.4	23.7	23.5	24.1	23.4	21.2	22.4	21.8
T-24	Los Naranjos	2012	22.3	23.3	24.6	24.6	24.1	23.5	24.1	24.0	24.2	22.8	21.3	22.5
T-24	Los Naranjos	2013	22.4	23.9	23.9	25.0	23.7	23.9	24.0	23.8	22.7	24.0	22.4	22.5
T-24	Los Naranjos	2014	22.0	24.1	25.0	24.9	23.8	24.1	24.7	24.6	23.5	23.0	21.7	21.8
T-24	Los Naranjos	2015	21.9	22.9	24.2	25.2	25.2	24.0	24.2	25.3	24.0	23.4	22.7	23.5
T-24	Los Naranjos	2016	23.2	22.5	24.7	25.6	25.2	23.4	24.3	24.0	22.9	23.4	22.5	ND

Tabla 4.7 Datos de temperaturas mínimas mensuales para cada estación meteorológica en estudio (2010-2016)

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Índice	Estación	Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
A-18	Finca Los Andes	2010	10.9	12.5	12.8	14.6	15.0	14.6	14.2	14.4	14.5	12.6	11.4	9.3
A-18	Finca Los Andes	2011	11.5	11.8	11.6	13.7	14.5	14.4	13.9	13.7	13.9	12.8	11.4	11.0
A-18	Finca Los Andes	2012	11.2	12.2	12.0	13.3	14.5	14.3	13.8	13.8	13.4	13.2	11.1	11.5
A-18	Finca Los Andes	2013	11.4	12.1	11.5	14.2	13.9	14.0	13.9	13.5	13.8	13.8	12.8	12.0
A-18	Finca Los Andes	2014	10.7	12.2	13.3	13.6	14.0	14.5	14.0	14.0	13.8	13.5	12.1	11.0
A-18	Finca Los Andes	2015	10.6	10.8	12.2	14.3	14.0	14.3	14.0	14.3	14.3	14.4	13.5	13.3
A-18	Finca Los Andes	2016	11.4	10.0	14.5	14.8	15.3	13.9	14.0	14.2	13.6	13.3	12.2	ND
A-37	Santa Ana - UNICAES	2010	16.6	18.0	18.5	20.5	21.0	20.7	20.2	20.3	20.4	19.1	17.9	15.8
A-37	Santa Ana - UNICAES	2011	17.2	17.9	17.5	19.2	20.5	19.9	19.9	19.9	20.0	19.2	17.8	17.6
A-37	Santa Ana - UNICAES	2012	17.8	18.5	18.3	18.6	20.4	19.9	19.7	19.7	19.5	19.4	18.2	17.5
A-37	Santa Ana - UNICAES	2013	18.1	18.0	18.5	20.1	20.2	20.0	19.7	19.5	20.0	19.9	19.2	18.0
A-37	Santa Ana - UNICAES	2014	17.0	18.2	19.3	20.3	20.5	19.8	20.4	19.7	19.6	19.4	18.4	17.5
A-37	Santa Ana - UNICAES	2015	17.4	17.3	19.6	20.7	20.5	21.0	20.3	20.5	20.1	20.7	20.0	19.4
A-37	Santa Ana - UNICAES	2016	17.4	17.1	20.1	21.1	21.9	20.2	20.0	20.6	19.9	20.1	19.6	ND
T-24	Los Naranjos	2010	10.3	11.0	12.1	13.1	15.6	15.4	14.9	14.6	14.9	13.9	12.2	9.9
T-24	Los Naranjos	2011	10.7	11.9	10.4	12.1	14.3	15.6	15.4	15.2	14.6	14.8	13.3	13.1
T-24	Los Naranjos	2012	11.9	12.6	12.0	12.6	14.8	14.2	15.9	15.0	15.0	14.8	13.7	10.9
T-24	Los Naranjos	2013	13.1	10.9	11.3	12.5	14.7	15.3	15.5	15.1	14.0	15.3	14.6	12.9
T-24	Los Naranjos	2014	11.4	11.4	12.6	13.1	15.2	15.5	16.2	15.3	14.5	14.4	13.1	12.4
T-24	Los Naranjos	2015	12.2	10.5	13.2	13.8	15.0	15.8	15.7	15.7	15.1	15.3	15.2	13.4
T-24	Los Naranjos	2016	10.3	10.9	11.9	13.9	15.5	14.7	15.3	15.2	14.2	14.6	13.6	ND

*Tabla 4.8 Datos de temperaturas promedio mensuales para cada estación meteorológica en estudio (2010-2016)*

*Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales*

Índice	Estación	Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
A-18	Finca Los Andes	2010	14.4	16.9	17.9	18.5	18.5	17.9	17.5	17.3	17.1	15.5	14.8	15.1
A-18	Finca Los Andes	2011	15.3	15.7	15.8	17.9	18.2	17.7	17.5	17.4	17.2	15.9	15.2	14.5
A-18	Finca Los Andes	2012	14.9	16.3	16.5	17.7	17.9	17.5	17.7	17.5	17.4	16.2	14.6	15.2
A-18	Finca Los Andes	2013	15.2	16.7	16.4	18.4	17.8	17.5	17.9	17.5	17.2	17.6	16.4	15.6
A-18	Finca Los Andes	2014	14.7	16.9	18.0	18.3	18.3	18.1	18.0	17.7	17.3	16.7	14.9	13.9
A-18	Finca Los Andes	2015	13.5	14.4	16.3	18.2	18.1	17.8	18.2	19.1	18.3	18.0	17.5	16.8
A-18	Finca Los Andes	2016	15.2	14.5	18.4	19.1	19.8	18.1	18.1	18.3	17.5	17.0	15.6	ND
A-37	Santa Ana - UNICAES	2010	21.8	23.7	24.9	25.9	25.1	24.3	23.7	23.3	23.1	23.0	22.8	22.7
A-37	Santa Ana - UNICAES	2011	22.7	23.3	23.3	24.4	25.1	23.9	23.7	23.6	23.4	22.7	22.4	22.0
A-37	Santa Ana - UNICAES	2012	22.5	23.7	24.2	24.1	24.4	23.7	24.0	23.6	23.3	23.3	22.0	22.0
A-37	Santa Ana - UNICAES	2013	23.1	24.3	24.3	25.9	24.6	23.9	24.0	23.6	22.9	23.9	23.6	23.3
A-37	Santa Ana - UNICAES	2014	22.8	24.2	25.3	25.8	24.8	24.2	25.5	24.3	23.5	23.2	22.7	22.0
A-37	Santa Ana - UNICAES	2015	22.0	23.1	25.1	25.6	25.7	25.0	23.7	24.9	23.9	23.8	23.3	23.8
A-37	Santa Ana - UNICAES	2016	22.3	22.7	25.5	26.4	26.5	23.9	24.3	24.5	23.4	24.0	23.6	ND
T-24	Los Naranjos	2010	15.4	17.1	17.8	18.9	19.6	19.1	18.8	18.8	18.3	18.1	17.0	16.2
T-24	Los Naranjos	2011	16.4	17.1	17.2	18.4	19.3	19.4	19.1	19.0	18.5	17.5	17.4	16.9
T-24	Los Naranjos	2012	16.6	17.6	18.1	18.5	19.0	18.6	19.7	18.9	19.0	18.2	16.9	16.2
T-24	Los Naranjos	2013	17.3	17.2	17.3	18.9	19.0	19.1	19.1	18.9	18.1	18.8	17.8	17.0
T-24	Los Naranjos	2014	16.4	17.3	18.7	18.8	19.2	19.5	20.4	19.5	18.5	18.2	16.8	16.9
T-24	Los Naranjos	2015	16.6	16.7	18.5	19.5	20.0	19.9	20.1	20.5	19.3	19.0	18.7	18.3
T-24	Los Naranjos	2016	16.7	16.5	18.9	19.9	20.4	19.4	20.0	19.7	18.9	19.1	18.1	ND

### 4.1.3 Recolección de datos para Caracterización Hidrogeoquímica del Agua Subterránea

Para la determinación de pH, la conductividad eléctrica, la alcalinidad y los iones mayoritarios se han analizado muestras de agua de los 5 pozos en estudio, para ello se tomaron tres muestras de cada uno de los 5 pozos en recipientes cerrados; de estos tres recipientes, dos son de capacidad de almacenamiento 1000 ml y uno de 500 ml, del cual a este último se le agregaron 2 ml de ácido clorhídrico, el cual sirve como un preservante.

Los tres especímenes de cada pozo son colocados dentro de una hielera (Figura 4.22) con el objetivo de preservar la muestra y conservar sus características. Posteriormente son llevados al laboratorio para su respectivo análisis.



*Figura 4.22 Preservación de especímenes para ensayo*

*Fuente: Elaboración propia*

Los resultados obtenidos del laboratorio del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) para los 5 pozos analizados en el municipio de San Sebastián Salitrillo se muestran de la tabla (4.9), correspondientes a los análisis fisicoquímicos realizados a las muestras de agua obtenida de las visitas de campo, cabe señalar que estos datos son únicamente para la época seca. Ya que para la época lluviosa los datos proporcionados por el laboratorio del (MARN) se encuentran en la tabla (4.10); en ambas tablas se han identificados los 5 pozos monitoreados abreviándolos como:

- SALI-1 (Pozo Las Marías)
- SALI-2 (Pozo San Juan)
- SALI-3 (Pozo Galicia)
- SALI-4 (Pozo San José)
- SALI-5 (Pozo El Rosario)



*Tabla 4.9 Resultados fisicoquímicos del agua para la época seca.*

*Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales*

Parámetro	Unidad	NSO 13.07.01.08	SALI-01	SALI-02	SALI-03	SALI-04	SALI-05
Potencial de Hidrógeno (pH)	-	6 – 8.5	7.15	7.21	7.29	7.33	6.97
Conductividad eléctrica (CE)	µsiemens/cm	-	436.5	358.5	431	374	510.5
Salinidad	Ppt	-	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Alcalinidad	mg/l CaCO <sub>3</sub>	-	137.07	150.13	143.6	132.72	187.11
Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> )	mg/l CaCO <sub>3</sub>	-	137.07	150.13	143.6	132.72	187.11
Boro	mg/l B	0.30	0.19	0.17	0.21	0.16	0.16
Calcio (Ca)	mg/l Ca	-	49.68	34.35	51.44	38.6	59.25
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	mg/l Cl <sup>-</sup>	-	11.14	6.19	12.13	8.17	11.63
Dureza total	mg/l CaCO <sub>3</sub>	500	174.31	154.77	196.14	178.22	245.12
Flúor (F)	mg/l F	-	0.19	0.19	0.23	0.28	0.14
Fosfato (PO <sub>4</sub> )	mg/l PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	-	0.12	0.21	0.13	0.51	0.22
Hierro (Fe)	mg/l Fe	0.30	0.145	0.135	0.137	0.155	0.142
Magnesio (Mg)	mg/l Mg	-	12.21	16.76	16.44	19.88	23.6
Manganeso	mg/l Mn	0.10	<0.024	<0.024	<0.024	<0.024	<0.024
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	mg/l NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	45.00	39.82	17.07	38.67	27.18	34.78
Potasio (K)	mg/l K	-	4.65	5.2	5.33	4.63	6.08
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	mg/l SiO <sub>2</sub>	-	78.1	82.06	83.52	63.6	81.03
Sólidos totales disueltos (STD)	mg/l	1000	203	165.5	200.5	177.5	239
Sodio (Na)	mg/l Na	200.00	17.5	17.5	17.5	17.5	18.5
Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	mg/l SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	400.00	37	10	26	31	28
Arsénico (As)	mg/l As	0.01	0.00088	0.00143	0.001	0.00145	0.00096

*Tabla 4.10 Resultados fisicoquímicos agua para la época lluviosa.*

*Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)*

Parámetro	Unidad	NSO 13.07.01.08	SALI-01	SALI-02	SALI-03	SALI-04	SALI-05
Potencial de Hidrógeno (pH)	-	6 – 8.5	7.24	7.10	7.62	7.23	6.88
Conductividad eléctrica (CE)	µsiemens/cm	-	433.5	365	423.5	386	517
Salinidad	Ppt	-	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Alcalinidad	mg/l CaCO <sub>3</sub>	-	124.95	154.24	87.86	130.81	191.33
Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> )	mg/l CaCO <sub>3</sub>	-	124.95	154.24	87.86	130.81	191.33
Boro	mg/l B	0.30	<0.02	<0.02	0.42	0.32	0.91
Calcio (Ca)	mg/l Ca	-	46.59	37.18	38.53	39.41	57.92
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	mg/l Cl <sup>-</sup>	-	9.38	4.94	34.08	7.41	11.36
Dureza total	mg/l CaCO <sub>3</sub>	500	190.04	154.58	154.86	162.67	224.7
Flúor (F)	mg/l F	-	0.55	0.09	0.09	<0.02	0.09
Fosfato (PO <sub>4</sub> )	mg/l PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	-	7.39	7.59	2.55	2.75	2.11
Hierro (Fe)	mg/l Fe	0.30	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009
Magnesio (Mg)	mg/l Mg	-	17.9	15	14.24	15.61	19.45
Manganeso	mg/l Mn	0.10	<0.024	<0.024	<0.024	<0.024	<0.024
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	mg/l NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	45.00	35.784	12.255	25.735	22.304	36.275
Potasio (K)	mg/l K	-	4.33	4.8	3	4.6	5.78
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	mg/l SiO <sub>2</sub>	-	70.62	81.19	58.54	55.22	88.14
Sólidos totales disueltos (STD)	mg/l	1000	212.5	179	207.5	189	253
Sodio (Na)	mg/l Na	200.00	18.55	19.5	28.35	19.75	20.2
Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	mg/l SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	400.00	68	7	13	10	10
Arsénico (As)	mg/l As	0.01	NR	NR	NR	NR	NR

## **4.2 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN RECOLECTADA**

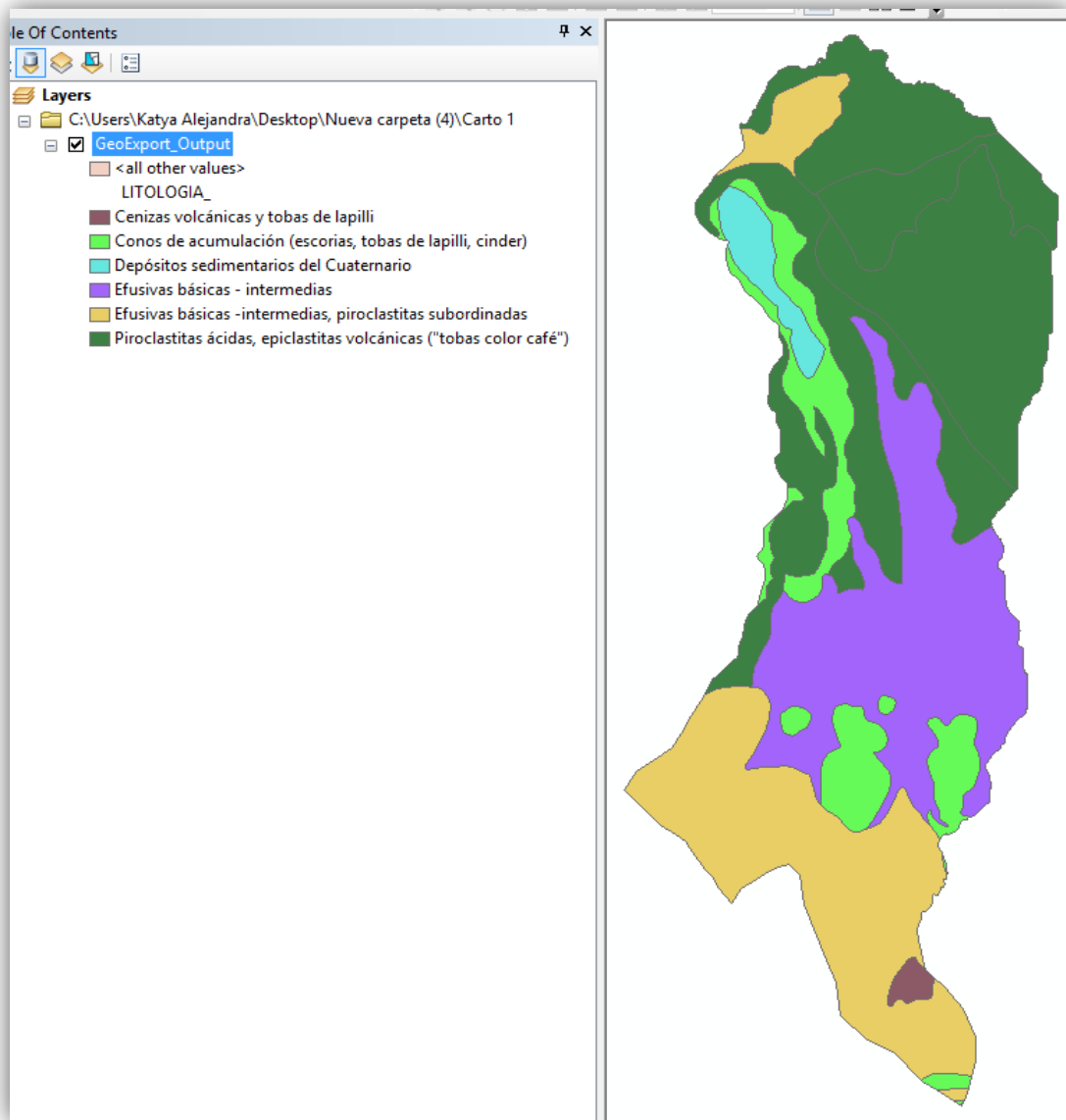
En este apartado se realizarán los procesos de cálculo de los datos obtenidos anteriormente necesarios para poder obtener los resultados tanto de la recarga potencial, vulnerabilidad del acuífero y las características hidroquímica del mismo.

Para ello se utilizarán tanto cálculos matemáticos a través de ecuaciones desarrolladas en capítulos anteriores, así como programas de computadoras especiales para este tipo de análisis.

### **4.2.1 Procesamiento de datos para la elaboración de mapa de Vulnerabilidad**

Para obtener el mapa de vulnerabilidad del acuífero nos auxiliaremos del programa ArcGIS. Para ello necesitamos primero obtener el mapa geológico de la zona de estudio (Figura 4.23), una vez lo tenemos hay que asignarle los valores de Grado de confinamiento (G) (Figura 4.24), para la asignación de los valores de (G) se realiza basándonos en el diagrama de evaluación de método GOD (Figura 2.13), variando estos valores para el acuífero dentro del rango de los no confinados (Libre) ; para la asignación de los valores de (O) observamos la geología de la zona y podemos ver que hay suelos dentro de la cuenca de estudio que están más consolidados, como lo es para el caso de las tobas por esa razón debemos de referirnos a la metodología GOD porque esta hace

tres grandes grupos dentro de los que están, los sedimentos, las rocas porosas y rocas compactas.



*Figura 4.23 Mapa geológico de la zona de estudio*

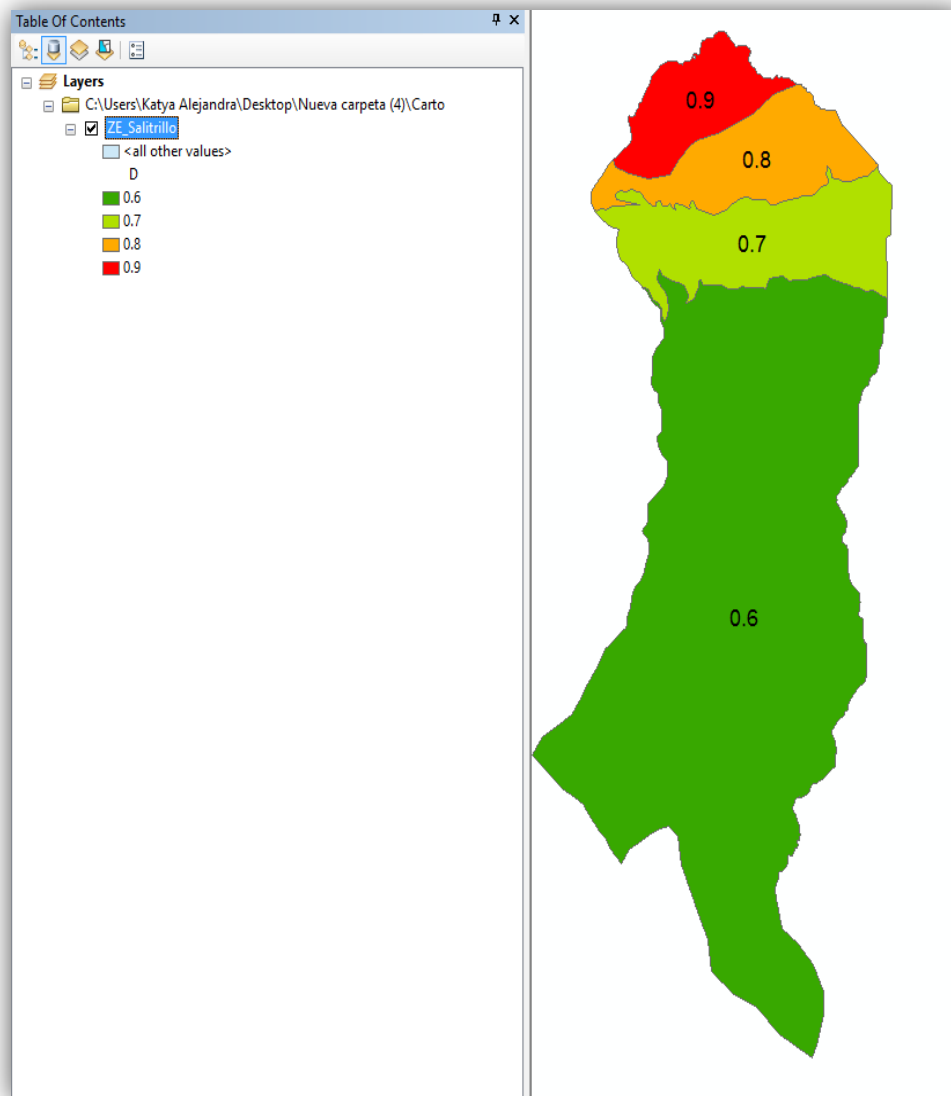
*Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana*

LITOLOGIA_	G	O
Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas ("tobas color café")	0.9	0.7
Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas ("tobas color café")	0.9	0.7
Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas ("tobas color café")	0.9	0.7
Efusivas básicas -intermedias, piroclastitas subordinadas	1	0.7
Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas ("tobas color café")	0.9	0.7
Conos de acumulación (escorias, tobas de lapilli, cinder)	0.6	0.9
Depósitos sedimentarios del Cuaternario	0.5	0.9
Efusivas básicas - intermedias	0.8	0.7
Conos de acumulación (escorias, tobas de lapilli, cinder)	0.6	0.9
Piroclastitas ácidas, epiclastitas volcánicas ("tobas color café")	0.9	0.7
Conos de acumulación (escorias, tobas de lapilli, cinder)	0.6	0.9
Conos de acumulación (escorias, tobas de lapilli, cinder)	0.6	0.9
Conos de acumulación (escorias, tobas de lapilli, cinder)	0.6	0.9
Conos de acumulación (escorias, tobas de lapilli, cinder)	0.9	0.9
Cenizas volcánicas y tobas de lapilli	0.7	0.8
Conos de acumulación (escorias, tobas de lapilli, cinder)	0.6	0.9
Conos de acumulación (escorias, tobas de lapilli, cinder)	0.6	0.9
Efusivas básicas -intermedias, piroclastitas subordinadas	1	0.7

Figura 4.24 Asignación de valores G y O conforme a la geología

Fuente: Elaboración propia

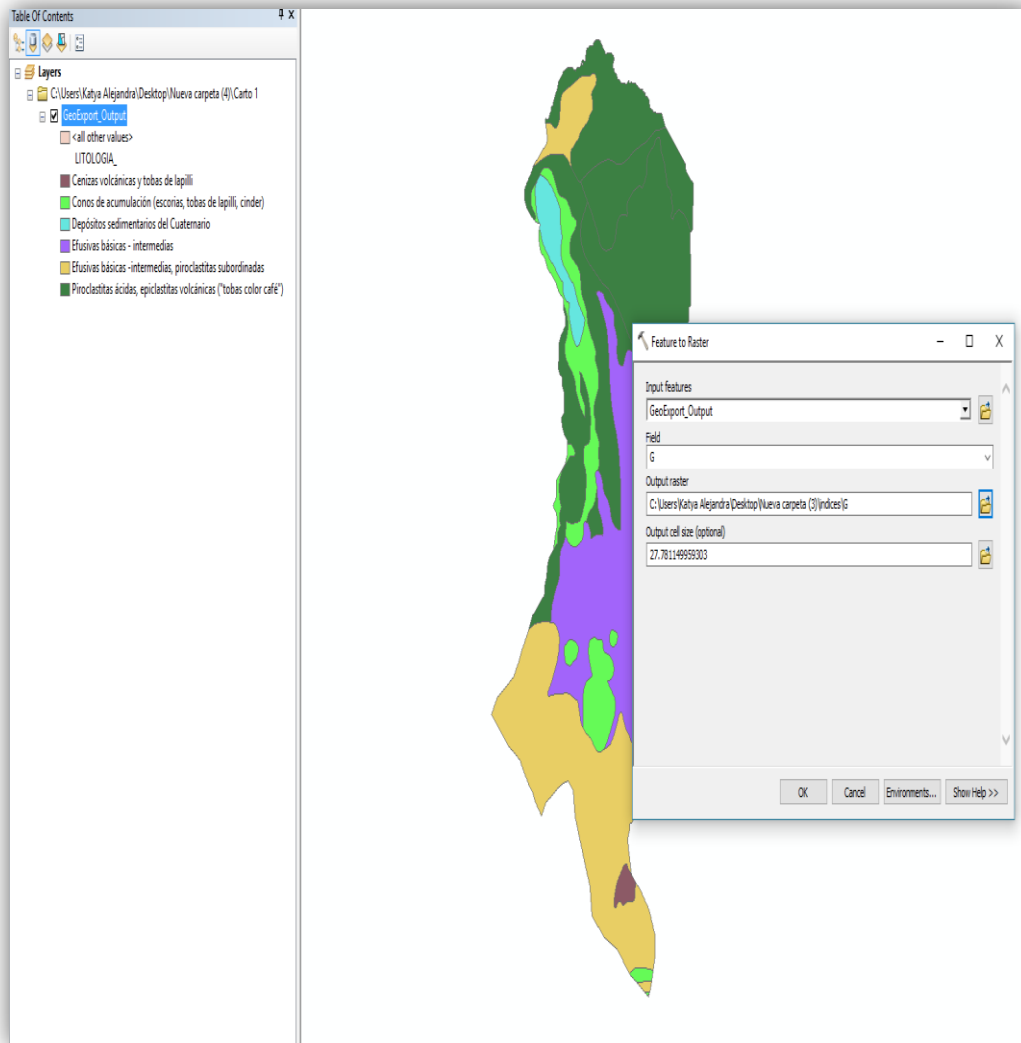
Una vez se han asignado estos valores, debemos obtener el índice (D), en este caso utilizaremos las curvas de nivel y nos basaremos en los niveles de los pozos tabla (4.1) estudiados, así como en su ubicación para tratar de zonificar los valores y así obtener zonas con diferentes valores de (D), a continuación, se muestra la zonificación realizada (Figura 4.25).



*Figura 4.25 Distribución de áreas conforme a índice D*

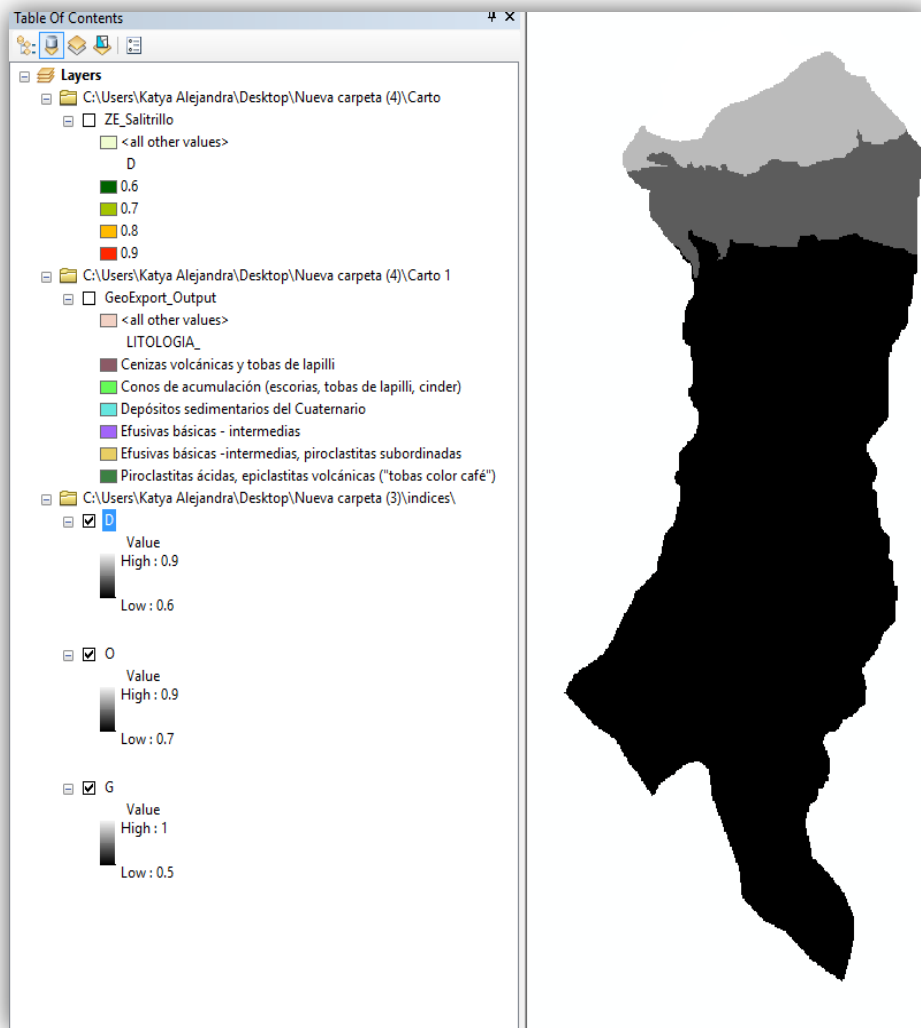
*Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana*

Ahora se deben de realizar los ráster de cada uno de los parámetros G, O, D esto se debe a que se utilizarán más adelante para poder realizar el álgebra de mapas (Figura 4.26).



*Figura 4.26 Elaboración de cada índice a ráster*

*Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana*



*Figura 4.27 Resultado de la elaboración de los ráster*

*Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana*



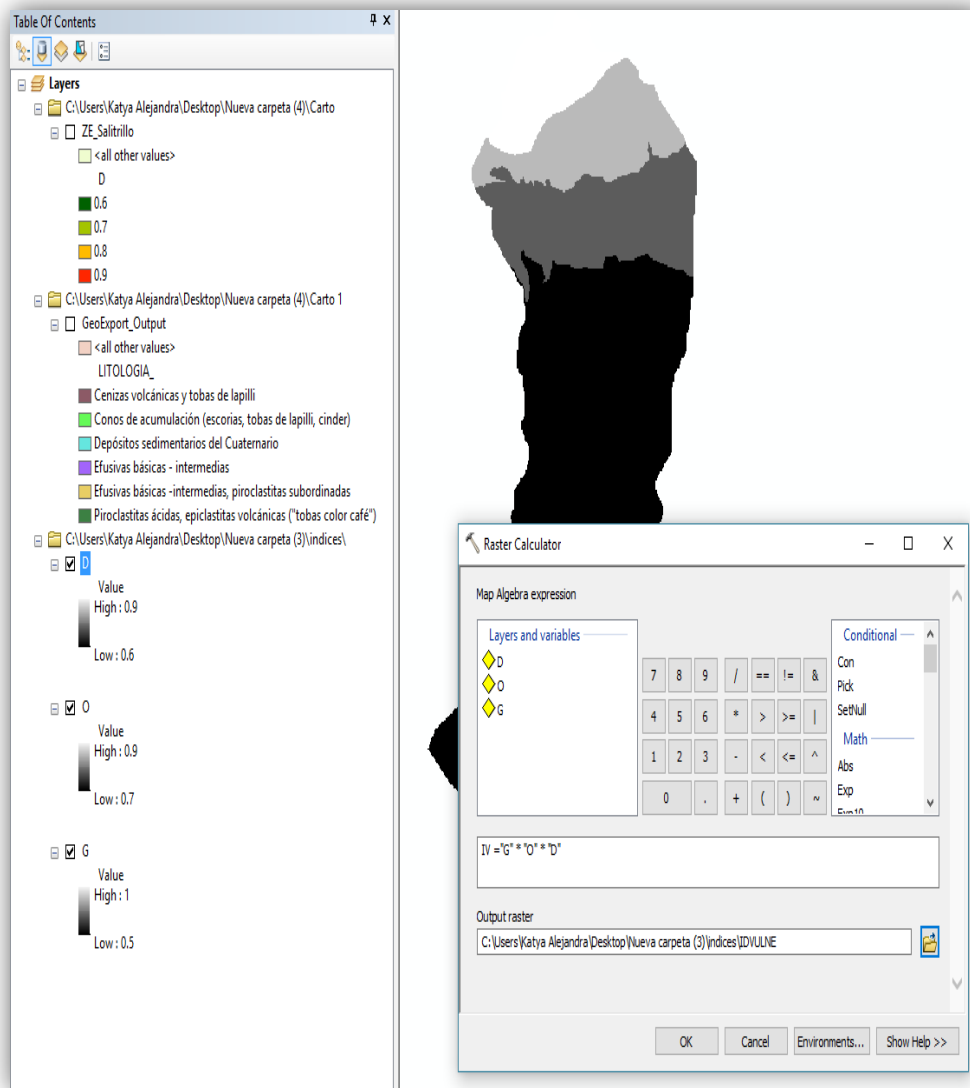


Figura 4.28 Algebra de mapas

Fuente: Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana

Una vez se ha realizado el álgebra de mapas de debe hacer una reclasificación de los valores (Figura 4.29) con el objetivo que los valores que se nos presente el mapa sean los mismo propuestos por el autor para la clasificación de la vulnerabilidad.

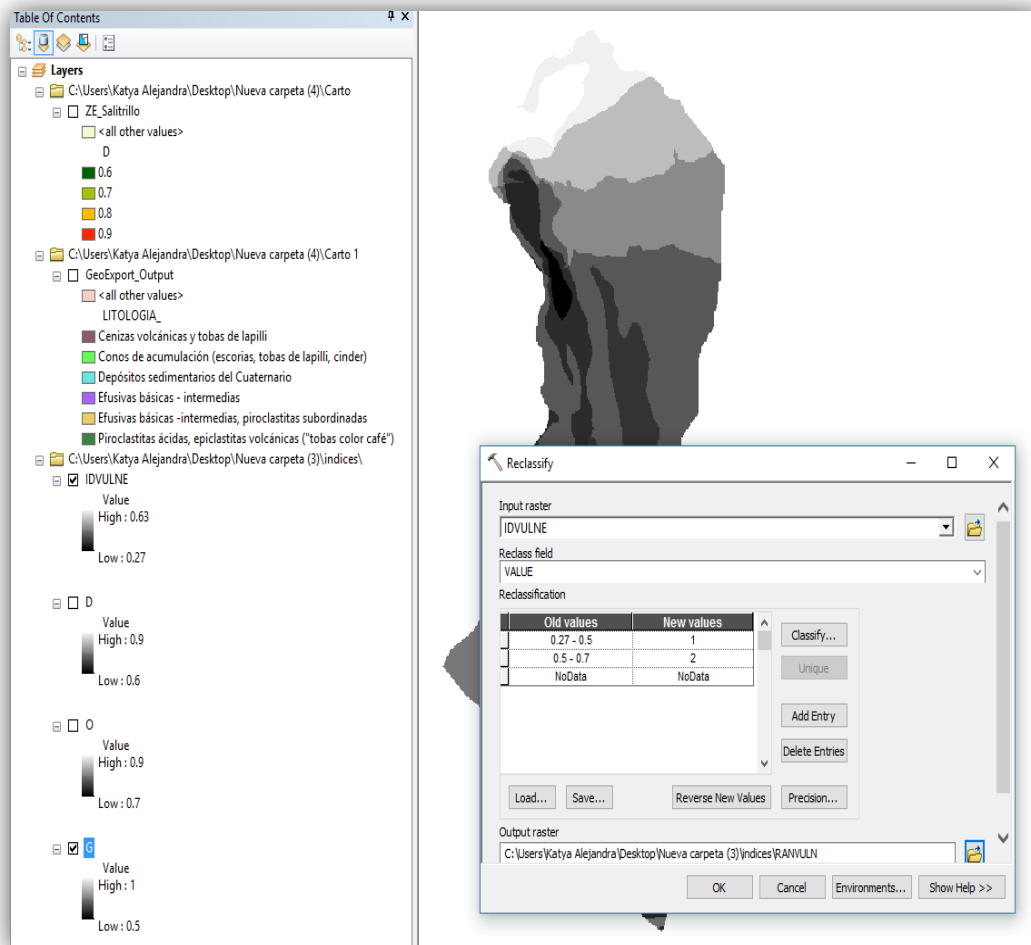


Figura 4.29 Reclasificación de valores

Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana

Y es así como luego de este procedimiento podemos obtener el mapa de vulnerabilidad para la zona de estudio.

## **4.2.2 Procesamiento de datos para elaboración de mapa de Recarga Potencial**

En este apartado se presentará el procesamiento de los datos obtenidos para el cálculo de la recarga potencial del acuífero, cabe señalar que se utilizará una hoja de Excel de la autoría del profesor Gunther Schosinsky Nevermann, ingeniero especialista en hidrogeología de la Escuela Centroamericana de Geología de la UCR, construida especialmente para el método, posteriormente estos resultados se utilizarán para construir el mapa de recarga ya que conjuntamente se trabajó con el programa ArcGis.

Para iniciar, el área de estudio se dividió mediante polígonos de Thiessen, esto para poder visualizar las zonas de influencia de cada estación sobre esta, y así poder asignarles los valores de precipitación los cuales se encuentran en la tabla (4.4) correspondiente a cada zona, a la hora de ingresar los datos en la hoja de Excel.

Seguidamente lo que se hizo es crear un archivo de tipo vectorial (Shapefile) en el programa ArcGis, donde se ingresaron las coordenadas de los puntos, los cuales ubican las estaciones meteorológicas a utilizar (Figura 4.30).



*Figura 4.30 Ubicación de Estaciones meteorológicas para el análisis*

*Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana*

Luego de esto se utilizó la herramienta de crear polígonos de Thiessen en el programa ArcGis, para que de esta manera se puedan ver las divisiones de las zonas de cada estación meteorológica (Figura 4.31).



*Figura 4.31 Polígonos de Thiessen para el análisis de recarga*

*Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana*

Y con esto ya se tiene el área de estudio dividida por los polígonos de Thiessen de cada estación, en la (Figura 4.32) se muestran las zonas de estudio más detalladas.



*Figura 4.32 Áreas definidas por Polígonos de Thiessen para el análisis de recarga*

*Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana*

#### **4.2.2.1 Cálculo de la Evapotranspiración Potencial**

De los datos recolectados de temperaturas tablas (4.5, 4.6 y 4.7), se utilizarán para el cálculo de la evapotranspiración por medio de la Ecuación (2.15), además haremos uso de la tabla (2.8) para determinar la radiación solar extraterrestre.

El resultado de la Ecuación (2.15) es un valor diario, por lo que se multiplico por el número de días de cada mes para poder obtener la evapotranspiración mensual que serán los datos a ingresar para el cálculo de la recarga potencial, también de la

Tabla (2.8) se interpola para poder obtener el valor de  $R_o$  (Radiación Solar), ya que las estaciones meteorológicas se encuentran en latitud 13 grados Norte.

En las tablas (4.11, 4.12 y 4.13), se muestran los resultados de evapotranspiración para cada estación meteorológica de nuestro estudio.

*Tabla 4.11 Evapotranspiración, Estación Finca Los Andes, periodo (2010-2016)*

*Fuente: Elaboración propia*

<b>Factores</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
$t_{max}(^{\circ}C)$	19.2	21.1	23	24.1	23.3	22.5	22.9	22.6	21.7	20.5	19.4	16.1
$t_{min}(^{\circ}C)$	11.1	11.7	12.6	14.1	14.5	14.3	14	14	13.9	13.4	12.1	9.7
$t_{med}(^{\circ}C)$	14.7	15.9	17	18.3	18.4	17.8	17.8	17.8	17.4	16.7	15.6	13
$R_o(mm/ día)$	12.4	13.65	14.8	15.55	15.6	15.45	15.45	15.45	15.05	13.95	12.7	12
ETP( Día )	2.64	3.24	3.82	4.08	3.85	3.62	3.77	3.71	3.40	2.95	2.63	2.15
ETP ( Mes )	81.84	90.72	118.42	122.4	119.35	108.6	116.87	115.01	102	91.45	78.9	66.65

*Tabla 4.12 Evapotranspiración, Estación Santa Ana UNICAES, periodo (2010-2016)*

*Fuente: Elaboración propia*

<b>Factores</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
$t_{\max}$ (°C)	31.2	32.8	34.1	34.5	33.0	31.5	32.0	31.8	30.8	30.5	30.3	30.4
$t_{\min}$ (°C)	17.4	17.9	18.8	20.1	20.7	20.2	20.0	20.0	19.9	19.7	18.7	17.6
$t_{\text{med}}$ (°C)	22.5	23.6	24.7	25.4	25.2	24.1	24.1	24.0	23.4	23.4	22.9	22.6
$R_o$ (mm/ día )	12.4	13.65	14.8	15.55	15.6	15.45	15.45	15.45	15.05	13.95	12.7	12
ETP( Día )	4.26	5.02	5.65	5.87	5.41	5.00	5.15	5.09	4.70	4.35	4.04	3.98
ETP (Mes )	132.1	140.6	175.2	176.1	167.7	150.0	159.7	157.8	141.0	134.9	121.2	123.4

*Tabla 4.13 Evapotranspiración, Estación Los Naranjos, periodo (2010-2016)*

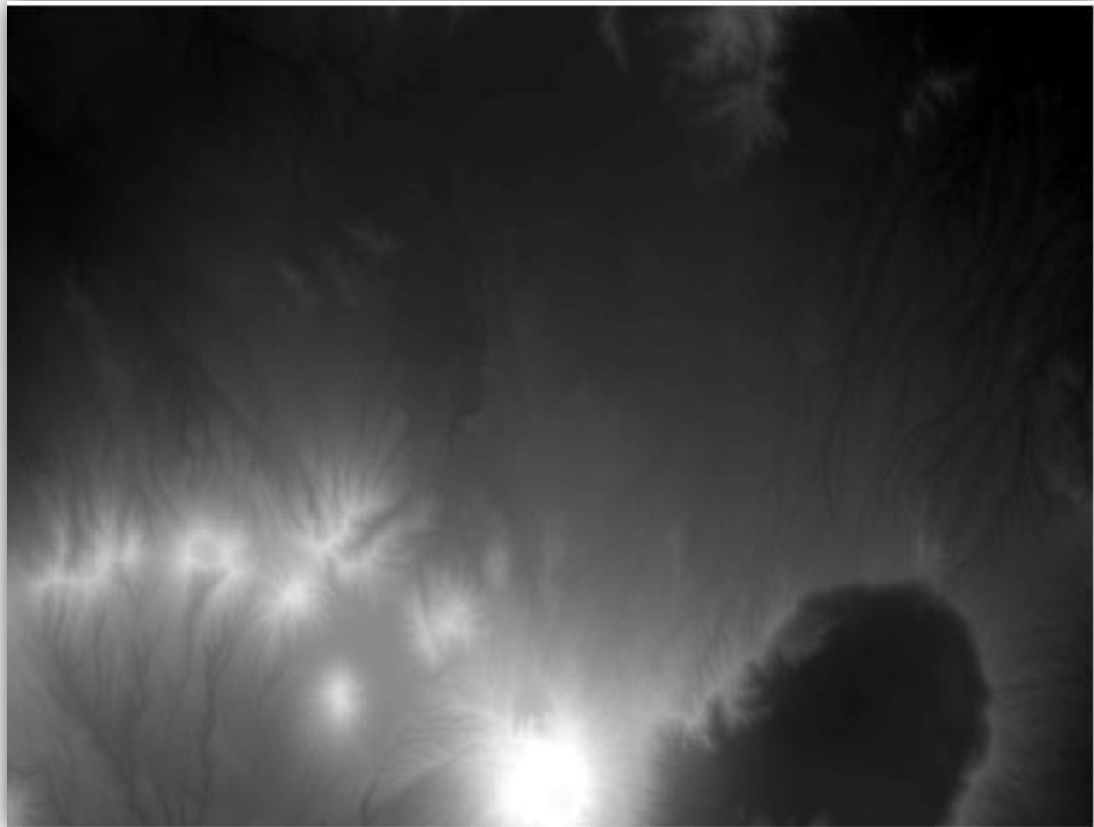
*Fuente: Elaboración propia*

<b>Factores</b>	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
$t_{\max}$ (°C)	22.4	23.5	24.5	24.9	24.4	23.7	24.0	24.2	23.3	22.9	22.2	22.2
$t_{\min}$ (°C)	11.4	11.3	11.9	13.0	15.0	15.2	15.6	15.2	14.6	14.7	13.7	12.1
$t_{\text{med}}$ (°C)	16.5	17.1	18.1	19.0	19.5	19.3	19.6	19.3	18.7	18.4	17.5	16.9
$R_o$ (mm/ día )	12.4	13.65	14.8	15.55	15.6	15.45	15.45	15.45	15.05	13.95	12.7	12
ETP( Día )	3.23	3.82	4.33	4.53	4.09	3.84	3.87	3.96	3.71	3.33	3.01	3.04
ETP ( Mes )	100.1	107.0	134.2	135.9	126.8	115.2	120.0	122.8	111.3	103.2	90.3	94.2



#### 4.2.2.2 Cálculo de Fracción que Infiltra por Pendiente $K_p$

Para calcular este parámetro se generaron las pendientes a partir de la imagen satelital (Ráster) de la zona, que se obtuvo por medio de la página de internet ([www.lancover.org](http://www.lancover.org)) en la cual se descargó la imagen que se necesitaba de la zona de estudio (Figura 4.33) y luego se utilizó el programa ArcGis para generar las pendientes de la imagen.



*Figura 4.33 Ráster zona de Santa Ana, donde se ubica el área de estudio*

*Fuente: <https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>*

En el resultado de generar las pendientes (Figura 4.34) sobre la imagen satelital se observa que los rangos de pendientes son los que el programa creo por el mismo, valores que no nos sirven porque utilizaremos los rangos de pendientes de la tabla (2.6) y además se considerará tomar valores intermedios de estos rangos resultando una nueva tabla de rangos tabla (4.14), entonces lo que se hizo para obtener los rangos que se necesitan es utilizar la herramienta de reclasificar, contenida en el programa y agregar los rangos de pendientes que necesitamos (Figura 4.35).

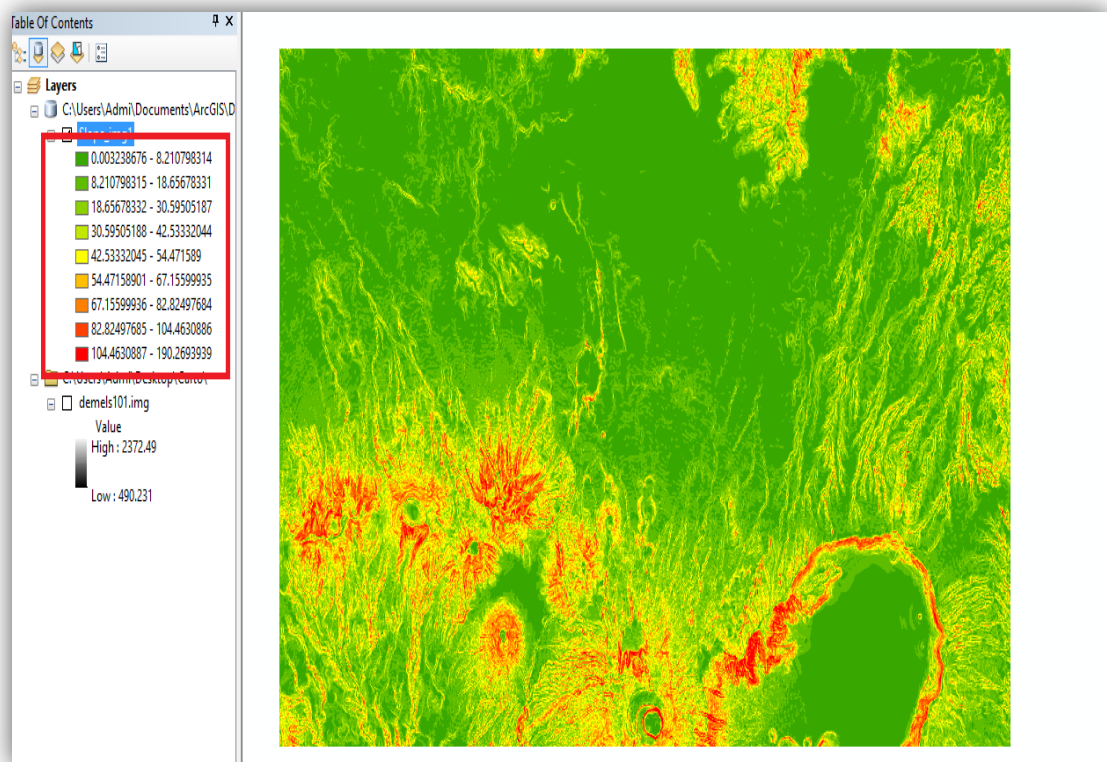


Figura 4.34 Rangos de pendientes sin reclasificar

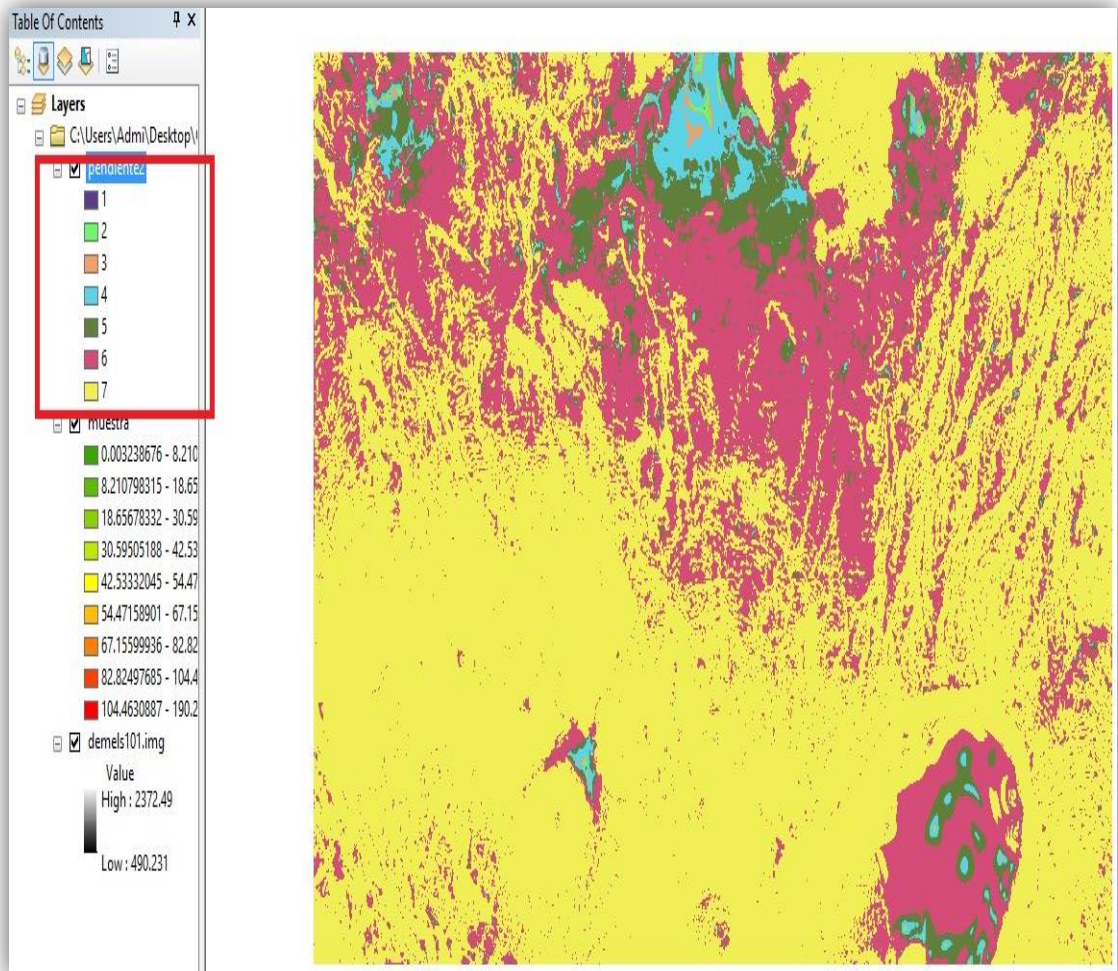
Fuente: Elaboración propia basada en la imagen satelital descargada de

<https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>

*Tabla 4.14 Rangos de pendientes modificados*

*Fuente: Elaboración propia*

<b>Pendiente (%)</b>	<b>K<sub>p</sub></b>
0.02 - 0.06	0.30
0.06 - 0.3	0.25
0.3 - 0.4	0.20
0.4 - 1	0.18
1 - 2	0.15
2 - 7	0.10
Mayor a 7	0.06



*Figura 4.35 Rangos de pendientes reclasificados*

*Fuente: Elaboración propia basada en la imagen satelital descargada de*

*<https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>*

Para asignarle los valores de  $K_p$  según el rango de pendientes de la tabla (4.14), se debe transformar el ráster a vectorial (Figura 4.36), para poder editar la tabla de atributos y agregar una nueva columna con los rangos de pendientes y otra con el valor de  $K_p$ .

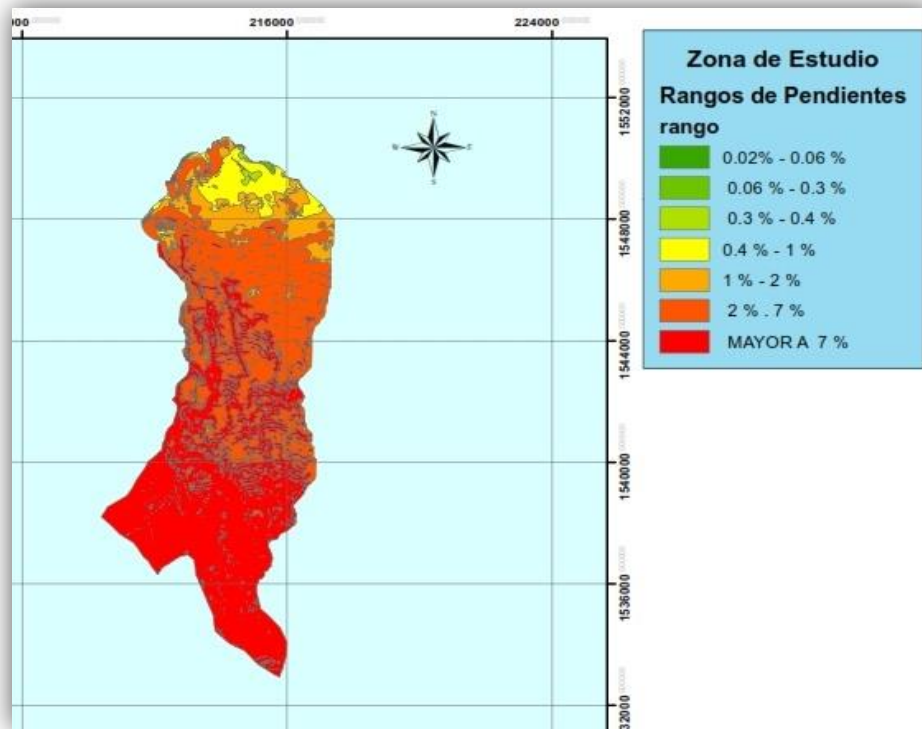


*Figura 4.36 Archivo ráster transformado a vectorial*

*Fuente: Elaboración propia basada en la imagen satelital descargada de*

*<https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>*

Como resultado final (Figura 4.37) se debe unir el área de estudio con el resultado del proceso de determinar los rangos de pendientes y transformar a formato ráster para poder realizar el álgebra de mapas.



*Figura 4.37 Unión de zona de estudio con el resultado de pendientes*

*Fuente: Elaboración propia basada en la imagen satelital descargada de*

*<https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>*

#### **4.2.2.3 Cálculo de Fracción que Infiltra por Cobertura del Suelo $K_v$**

Para determinar este valor se utilizó el mapa de Visualizador de Información Geográfica de Evaluación Ambiental (VIGEA) (Figura 4.38) para ver la vegetación de la zona y luego se digitalizo en ArcGIS (Figura 4.40) para poder ver la vegetación existente en la zona de estudio.

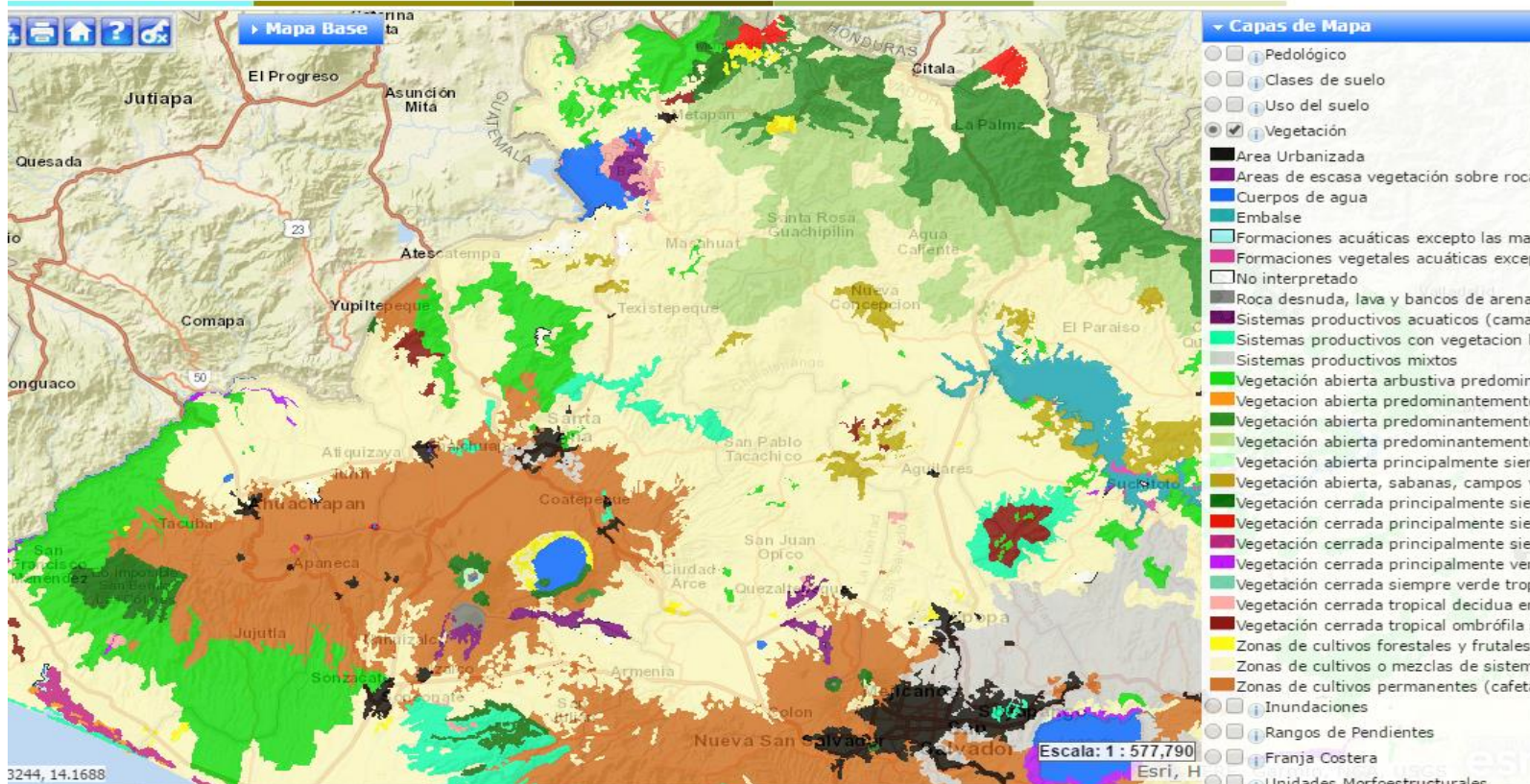
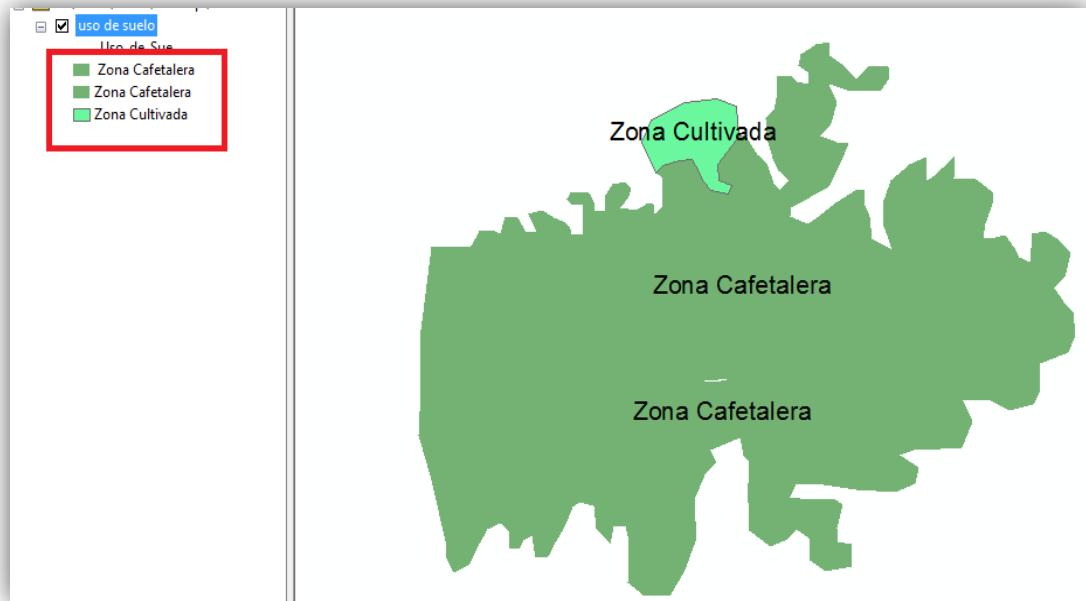


Figura 4.38 Mapa de vegetación del Depto. De Santa Ana

Fuente: Visualizador de Información Geográfica de Evaluación Ambiental (VIGEA)



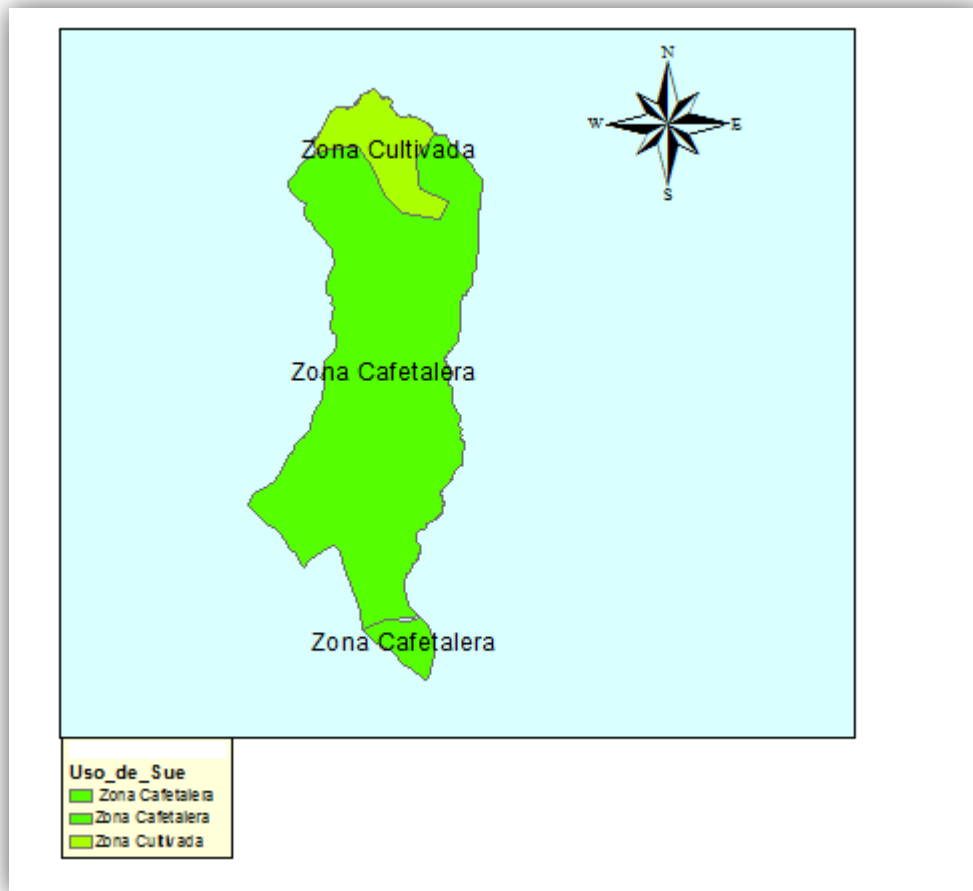
*Figura 4.39 Digitalización de parte del mapa de vegetación en el programa ArcGis*

*Fuente: Elaboración propia basada en la imagen del Visualizador de Información*

*Geográfico de Evaluación Ambiental (VIGEA)*

Luego de a ver digitalizado parte del mapa de vegetación se georreferencio y se sobrepuso la zona de estudio, posteriormente se unieron estos dos archivos dando como resultado (Figura 4.40).



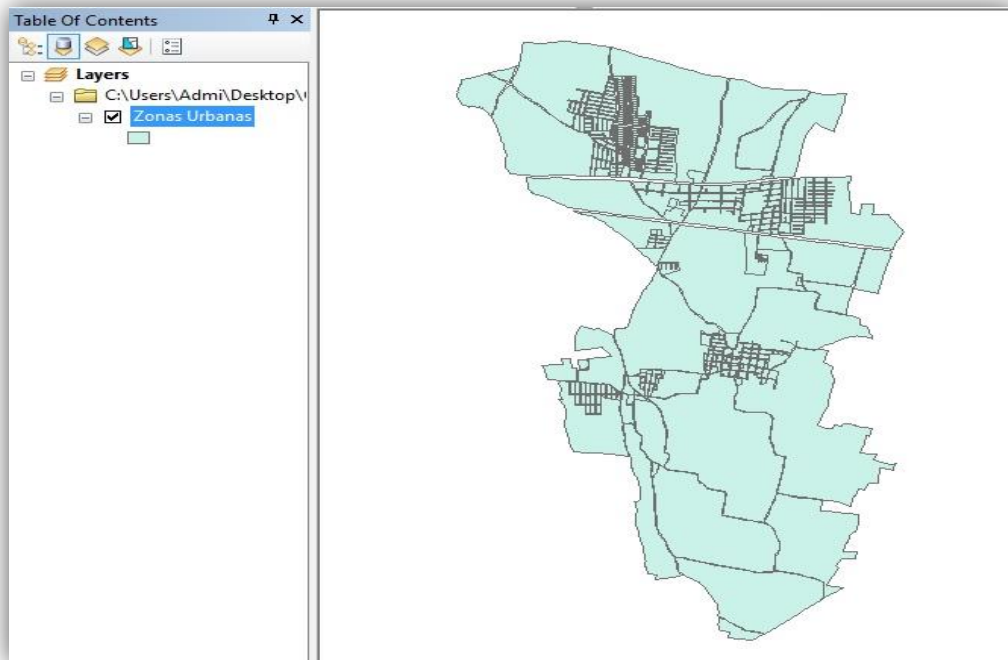


*Figura 4.40 División del área de estudio por vegetación*

*Fuente: Mapa base de la imagen del Visualizador de Información Geográfica de Evaluación Ambiental (VIGEA)*

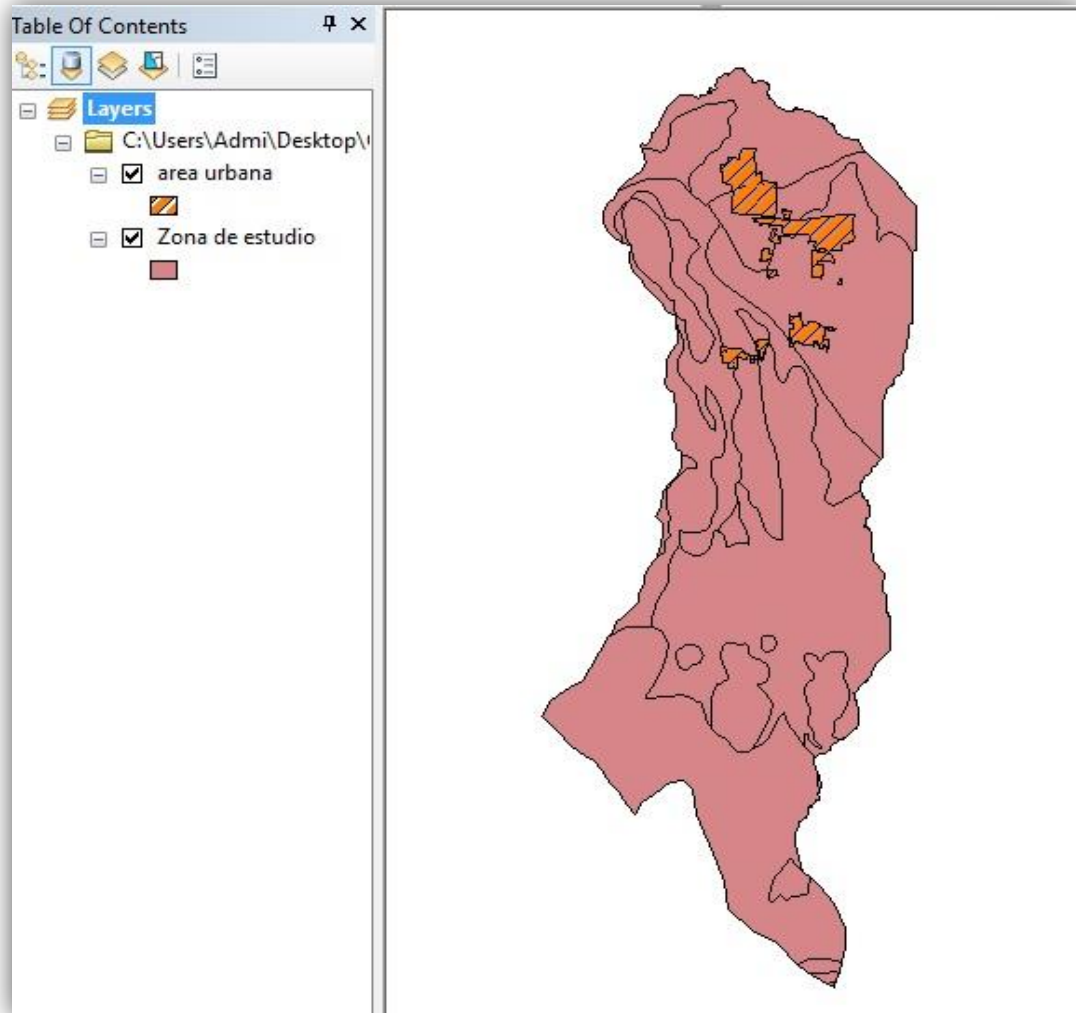
De la unión de estos dos archivos se puede observar que en el área de estudio quedaron dos tipos de vegetación o dos zonas, una cafetalera y la otra de varios cultivos, entonces con esta información podemos asignar valores de  $K_v$  a estas zonas de la tabla (2.7), tomaremos como bosques la zona cafetalera y la otra zona como terrenos cultivados.

En cuanto al área urbana (Figura 4.41) del municipio también se consideró colocar un valor de  $K_v$  debido a que el suelo en esas zonas está impermeabilizado lo que hace que la infiltración sea mucho menor en esas zonas, por lo que tomando en cuenta la tabla (2.7) se estimará un rango de 0 – 0.09, ya que como se mencionó la infiltración es mucho menor a la del suelo natural. De estas zonas urbanas también se tomó en cuenta la densidad de uso residencial, debido a que existen colonias donde la impermeabilización del suelo es mayor como en el caso de la residencial Ciudad Real, entonces para las zonas residenciales se utilizó un valor de 0.04, para las zonas cultivadas de 0.1 y para las zonas con cafetales se asignó un valor de 0.2.



*Figura 4.41 Área urbana del municipio San Sebastián Salitrillo*

*Fuente: Elaboración propia*



*Figura 4.42 Unión del área urbana con el área de estudio*

*Fuente: Mapa base de la imagen del Visualizador de Información Geográfica de Evaluación Ambiental (VIGEA)*

Por último, se unieron estos dos archivos (Figura 4.42) y se transformó a formato ráster para después poder realizar el álgebra de mapas.

#### 4.2.2.4 Cálculo de Fracción que Infiltra por Textura del Suelo $K_{fc}$

Los datos recolectados de las pruebas (Porchet) de infiltración se exponen a continuación tablas (4.15, 4.16, 4.17 y 4.18), así como la velocidad de infiltración en mm/ h y mm/min determinada para cada prueba.

*Tabla 4.15 Pruebas de infiltración en Centro escolar Cantón San Luis*

*Fuente: Elaboración propia*

Lugar: Centro Escolar Cantón San Luis							
Tiempo (min)	Descenso acumulado (cm)	Altura (cm)	Altura, caso de rellenar (cm)	Diferencial de altura(cm)	Diferencial de tiempo(min)	Infiltración (mm/h)	Infiltración (cm/min)
0	0.000	28.000		0.000	0.000		
2	2.000	26.000		2.000	2.000	600.000	1.000
4	4.000	24.000		2.000	2.000	600.000	1.000
6	6.000	22.000		2.000	2.000	600.000	1.000
8	8.000	20.000		2.000	2.000	600.000	1.000
10	9.000	19.000		1.000	2.000	300.000	0.500
15	10.000	18.000		1.000	5.000	120.000	0.200
20	11.500	16.500		1.500	5.000	180.000	0.300
25	13.000	15.000		1.500	5.000	180.000	0.300
30	14.800	13.200		1.000	5.000	120.000	0.200
35	15.600	12.400		1.040	5.000	124.800	0.208
40	17.400	10.600		1.040	5.000	124.800	0.208

**Tabla 4.16 Pruebas de infiltración en Planta de bombeo Municipal colonia San Juan**

*Fuente: Elaboración propia*

Lugar: Planta de Bombeo Municipal Colonia San Juan							
Tiempo (min)	Descenso acumulado (cm)	Altura (cm)	Altura, caso de rellenar (cm)	Diferencial de altura(cm)	Diferencial de tiempo(min)	Infiltración (mm/h)	Infiltración (cm/min)
0	0.000	24.000		0.000	0.000		
2	2.500	21.500		2.500	2.000	750.000	1.250
4	3.800	20.200		1.300	2.000	390.000	0.650
6	4.400	19.600		0.600	2.000	180.000	0.300
8	5.600	18.400		1.200	2.000	360.000	0.600
10	6.500	17.500		0.900	2.000	270.000	0.450
15	8.400	15.600		1.900	5.000	228.000	0.380
20	10.000	14.000		1.600	5.000	192.000	0.320
25	11.200	12.800		1.200	5.000	144.000	0.240
30	12.200	11.800		0.090	5.000	10.800	0.018
35	13.100	10.900		0.090	5.000	10.800	0.018
40	14.100	9.900		0.084	5.000	10.080	0.017

**Tabla 4.17 Pruebas de infiltración en Finca San Luis La Loma**

*Fuente: Elaboración propia*

Lugar: Finca San Luis (Los Castro)							
Tiempo (min)	Descenso acumulado (cm)	Altura (cm)	Altura, caso de rellenar (cm)	Diferencial de altura(cm)	Diferencial de tiempo(min)	Infiltración (mm/h)	Infiltración (cm/min)
0	0.000	30.000		0.000	0.000		
2	10.000	20.000		10.000	2.000	3000.000	5.000
4	15.000	15.000		5.000	2.000	1500.000	2.500
6	19.000	11.000		4.000	2.000	1200.000	2.000
8	22.000	8.000		3.000	2.000	900.000	1.500
10	24.500	5.500		2.500	2.000	750.000	1.250
13.18		0.000	25.000	5.500	3.180	1037.736	1.730
15	8.000	22.000		3.000	5.000	360.000	0.600
20	16.000	14.000		8.000	5.000	960.000	1.600
25	22.000	8.000		6.000	5.000	720.000	1.200
30	26.000	4.000		4.000	5.000	480.000	0.800
34	30.000	0.000	15.000	4.000	4.000	600.000	1.000
35	15.100	14.900		0.100	1.000	60.000	0.100
40		9.000		0.080	5.000	9.600	0.016
45		5.900		0.090	5.000	10.800	0.018
50		2.900		0.080	5.000	9.600	0.016

Tabla 4.18 Pruebas de infiltración en Finca Gabiota

Fuente: Elaboración propia

Lugar: Finca Gabiota							
Tiempo (min)	Descenso acumulado (cm)	Altura (cm)	Altura, caso de rellenar (cm)	Diferencial de altura(cm)	Diferencial de tiempo(min)	Infiltración (mm/h)	Infiltración (cm/min)
0	0.000	27.000		0.000	0.000		
2	6.500	20.500		6.500	2.000	1950.000	3.250
4	10.900	16.100		4.400	2.000	1320.000	2.200
6	13.900	13.100		3.000	2.000	900.000	1.500
8	16.500	10.500		2.600	2.000	780.000	1.300
10	18.400	8.600		1.900	2.000	570.000	0.950
15	22.000	5.000		3.600	5.000	432.000	0.720
19.37		0.000	25.000	5.000	9.370	320.171	0.534
20	2.000	25.000		0.000	10.000	0.000	0.000
25	8.100	18.900		6.100	5.000	732.000	1.220
30	8.130	18.870		0.030	5.000	3.600	0.006
35	8.160	18.840		0.040	5.000	4.800	0.008
40	8.200	18.800		0.040	5.000	4.800	0.008
45	8.240	18.760		0.030	5.000	3.600	0.006

De los resultados obtenidos anteriormente, en la tabla (4.19) se presentan los valores de velocidad de infiltración en mm/día obtenida, sacando un promedio de los dos valores menores de infiltración de cada prueba, además de su respectivo valor de  $K_{fc}$ . Se observa que el valor correspondiente a la prueba realizada en el centro escolar cantón San Luis tiene un valor de velocidad de infiltración mayor a 1568 mm/día, y de acuerdo al método de Schosinsky se debe asignar un valor de  $K_{fc}$  igual a uno, mientras que para los otros sitios donde se realizaron las otras pruebas de infiltración los valores de velocidad de infiltración son menores a 1568 mm/día, por lo que se utilizó la ecuación (2.8) para el cálculo de  $K_{fc}$ .

*Tabla 4.19 Velocidades de infiltración en mm/día de las pruebas de infiltración y valores de  $K_{fc}$*

*Fuente: Elaboración propia*

<b>Lugar de prueba de infiltración</b>	<b>Velocidad de infiltración (mm/día)</b>	<b><math>K_{fc}</math></b>
Centro Escolar Cantón San Luis	3000	1.00
Planta de Bombeo Municipal Col San Juan	250	0.70
Finca San Luis la Loma	240	0.70
Finca Gaviota	100	0.50

Se siguió con asignar un valor de  $K_{fc}$  para la zona urbana porque a pesar que no se tiene una gran cantidad de infiltración debido a la impermeabilización del suelo, no se puede despreciar, ya que existe una infiltración mínima debido que en los terrenos residenciales existen partes donde se conserva el suelo natural, por lo que se asignó un valor de 0.2 para esta zona, en base a estos resultados se asignaron los valores de  $K_{fc}$  en el mapa mediante ArcGis, según las características del suelo en toda la zona de estudio (Figura 4.44).

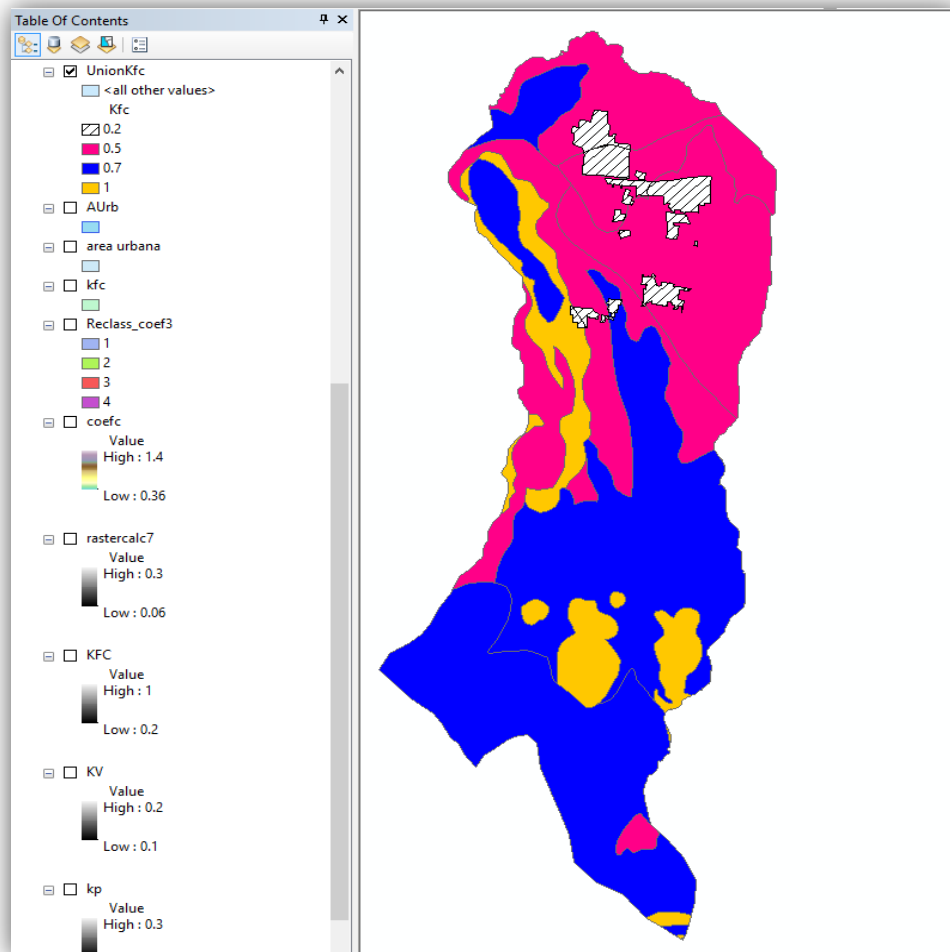


Figura 4.43 Representación en la zona de estudio de los diferentes valores de  $K_{fc}$

Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana

#### 4.2.2.5 Cálculo de Coeficiente de Infiltración $C_i$

Según la teoría del capítulo II el coeficiente de infiltración ( $C_i$ ) es la sumatoria  $K_p$ ,  $K_v$  y  $K_{fc}$ , ecuación (2.5), es por esta razón que hemos obtenido estos tres ráster correspondientes a las fracciones que infiltran por textura, pendiente y por cobertura vegetal, para que por medio de la suma de estos tres factores y auxiliando de la



herramienta del álgebra de mapas del programa ArcGis se obtuvo un ráster que nos refleja los valores del coeficiente de infiltración (Figura 4.44).

Una vez obtenido el ráster de coeficiente de infiltración ( $C_i$ ), este se unió con los polígonos de Thiessen para dividir la zona y asignar los valores correspondientes de precipitaciones a la hora de introducir los datos en la hoja de Excel y además se reclasifico para obtener valores cuyo máximo sea 1 (Figura 4.45), sobre estas zonas divididas por los polígonos de Thiessen se sobrepuso el mapa geológico, para subdividir las zonas según las características del suelo (Figura 4.46), esto con el fin de poder tener zonas con diferentes características y poder asignar a cada zona su respectivo valor de  $K_p$ ,  $K_v$  y  $K_{fc}$ , así como los demás parámetros necesarios para el cálculo de la recarga potencial ; obteniéndose estos valores se puede utilizar la hoja Excel creada por Schosinsky la cual nos da el resultado de la recarga potencial para cada una de las zonas obtenidas. En las tablas (4.20, 4.21 y 4.22) se muestran las zonas que se utilizaran para realizar el cálculo de la recarga mediante la hoja de Excel así como sus respectivos parámetros.

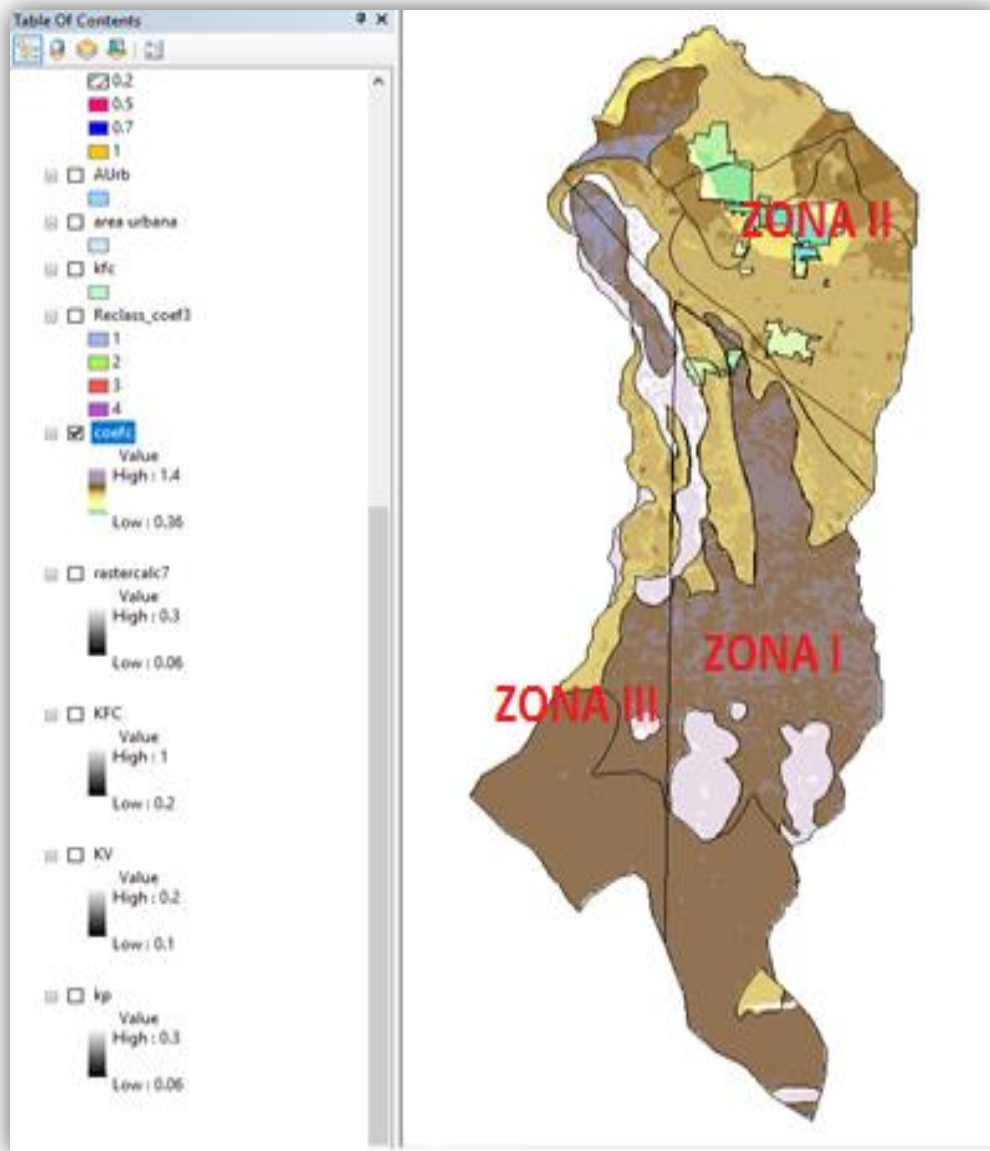


Figura 4.44 Representación de los valores de coeficiente de infiltración en la zona de estudio

Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana

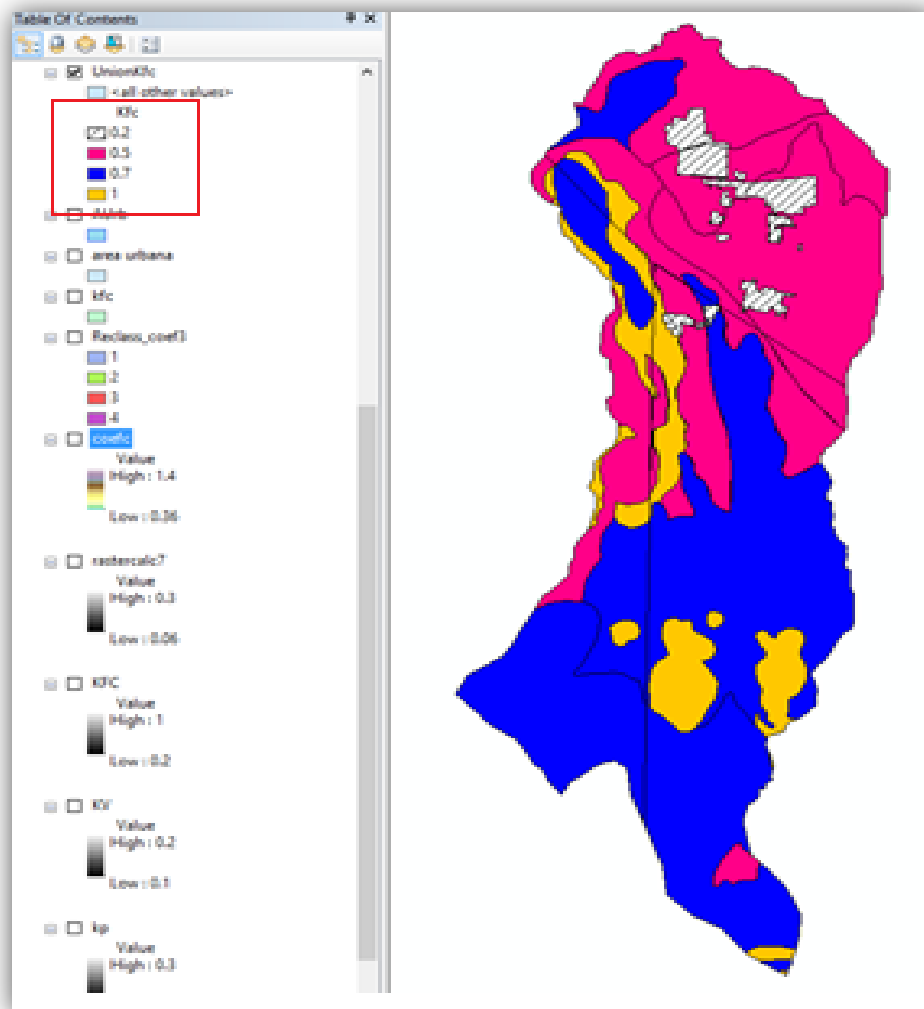


Figura 4.45 Representación de los valores de coeficiente de infiltración ya reclasificados

Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana

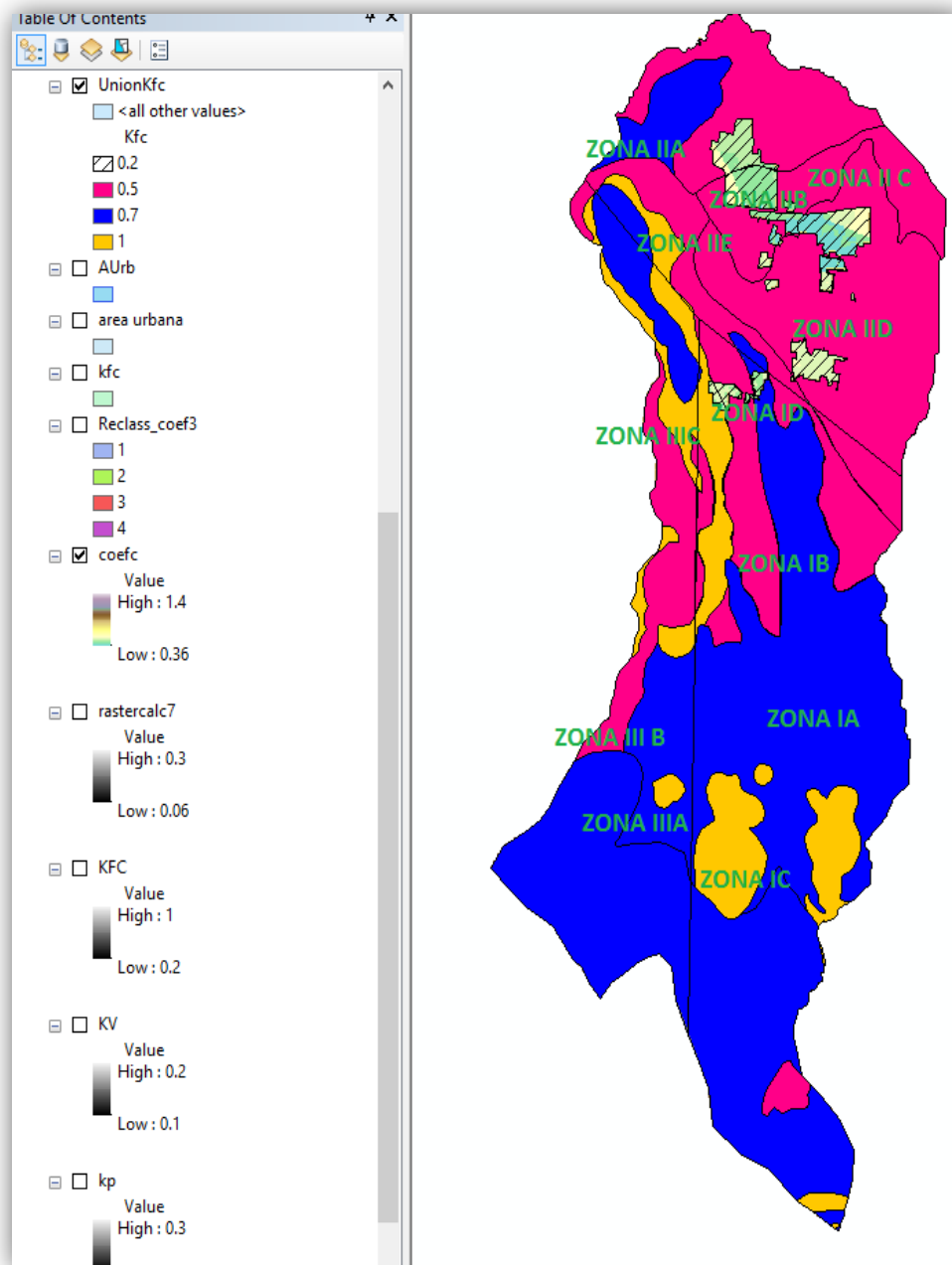


Figura 4.46 Zonificación debido a características geológicas y coeficiente de infiltración

Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana

Tabla 4.20 Parámetros de cada una de las sub zonas de Zona I

Fuente: Elaboración propia

PARÁMETRO	ZONA I (Los Andes)			
	ZONA IA	ZONA IB	ZONA IC	ZONA ID
fc (mm/día)	250	100	3000	35
Kfc	0.70	0.49	1.00	0.22
Kp	0.10	0.20	0.25	0.09
Kv	0.20	0.20	0.20	0.04
Ci	1.00	0.89	1.00	0.35
Ds (g/cm <sup>3</sup> )	1.5	1.30	1.80	1.80
PR (mm)	2500	2500	2500	2500
Hsi (mm)	450	942.50	540	180
CC (%)	12	29	12	4
PM (%)	5	15	6	1
P (mm)	Tabla (4.7)			
ETP ( mm)	Tabla(4.14)			
Lluvia retenida	0.12	0.12	0.12	0.12
Mes de inicio	10	10	10	10

Tabla 4.21 Parámetros de cada una de las Sub zonas de Zona II

Fuente: Elaboración propia

	<b>ZONA II (Santa Ana - UNICAES)</b>				
<b>PARÁMETRO</b>	<b>ZONA IIA</b>	<b>ZONA IIB</b>	<b>ZONA IIC</b>	<b>ZONA IID</b>	<b>ZONA IIE</b>
<b>fc (mm/día)</b>	240	35	100	100	3000
<b>Kfc</b>	0.70	0.22	0.49	0.49	1.00
<b>Kp</b>	0.10	0.07	0.10	0.20	0.1
<b>Kv</b>	0.20	0.04	0.10	0.10	0.2
<b>Ci</b>	1.00	0.33	0.69	0.79	1.00
<b>Ds (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1.50	1.00	1.30	1.30	1.50
<b>PR (mm)</b>	750	10	1500	2000	2500
<b>Hsi (mm)</b>	135	0.40	565.5	754	450
<b>CC (%)</b>	12	4	29	29	12
<b>PM (%)</b>	5	1	15	15	6
<b>P (mm)</b>	Tabla (4.7)				
<b>ETP ( mm)</b>	Tabla (4.15)				
<b>Lluvia retenida</b>	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
<b>Mes de inicio</b>	10	10	10	10	10

Tabla 4.22 Parámetros de cada una de las Sub zonas de Zona III

Fuente: Elaboración propia

Parámetro	ZONA III (Los Naranjos)		
	ZONA IIIA	ZONA IIIB	ZONA IIIC
fc (mm/día)	250	100	3000
Kfc	0.70	0.49	1.00
Kp	0.10	0.20	0.20
Kv	0.20	0.20	0.20
Ci	1.00	0.89	1.00
Ds (g/cm <sup>3</sup> )	1.50	1.30	1.80
PR (mm)	2500	2500	2500
Hsi (mm)	450	942.5	540
CC (%)	12	29	12
PM (%)	5	15	6
P (mm)	Tabla (4.7)		
ETP ( mm)	Tabla (4.16)		
Lluvia retenida	0.12	0.12	0.12
Mes de inicio	10	10	10

#### 4.2.2.6 Cálculo de hoja de Excel creada por Schosinsky para el cálculo de Recarga Potencial

A partir de las zonas determinadas en las tablas (4.20, 4.22 y 4.21), se asignaron todos los parámetros necesarios para el cálculo de la recarga según los mapas y su respectiva zona (Figuras 4.47 hasta 4.58).

BALANCE HIDRICO DE SUELOS													
Gunther Schosinsky													
<b>Zona de Estudio:</b>		ZONA IA											
<b>Fecha:</b>													
<b>Textura de Suelo:</b>													
<b>Simbología</b>													
fc: Capacidad de Infiltración.						P: Precipitación Media Mensual.							
I: Infiltración.						Pi: Precipitación que infiltra.							
CC: Capacidad de Campo.						ESC: Escorrentía Superficial							
PM: Punto de Marchitez.						ETP: Evapotranspiración Potencial.							
PR: Profundidad de Raíces.						ETR: Evapotranspiración Real.							
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.						HSi: Humedad de Suelo Inicial.							
DS: Densidad de Suelo.						HD: Humedad Disponible							
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR						HSf: Humedad de Suelo Final.							
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR						DCC: Déficit de Capacidad de Campo.							
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)						Rp: Recarga Potencial							
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)						NR: Necesidad de Riego.							
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración						Ret: Retención de lluvia							
fc [mm/d]						250.00							
Kp [0.01%]						0.10							
Kv [0.01%]						0.20							
Kfc [0.01%]						0.71273							
I [0.01%]						1		por peso (%)					
DS (g/cm³):						1.50		CC		12.00		450.00	
PR (mm)						2500.00		PM		5.00		187.50	
HSi (mm)						450.00		(CC-PM)		7.00		262.50	
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?						10							
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1						0.12							
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	0.86	13.16	32.91	65.19	299.10	418.31	364.74	419.47	429.49	442.56	58.24	3.97	2548.00
Ret [mm]	0.86	5.00	5.00	7.82	35.89	50.20	43.77	50.34	51.54	53.11	6.99	3.97	314.48
Pi (mm)	0.00	8.16	27.91	57.36	263.21	368.12	320.97	369.13	377.95	389.45	51.25	0.00	2233.52
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	81.84	90.72	118.42	122.40	119.35	108.60	116.87	115.01	102.00	91.45	78.90	66.65	1212.21
HSi (mm)	373.53	324.57	291.21	273.14	279.37	429.31	450.00	450.00	450.00	450.00	450.00	426.51	
C1	0.71	0.55	0.50	0.54	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.91	
C2	0.49	0.36	0.28	0.29	0.90	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.89	0.68	
HD (mm)	186.03	145.23	131.62	143.00	355.08	609.93	583.47	631.63	640.45	651.95	313.75	239.01	
ETR (mm)	48.96	41.52	45.99	51.13	113.26	108.60	116.87	115.01	102.00	91.45	74.75	52.98	962.51
HSf (mm)	324.57	291.21	273.14	279.37	429.31	450.00	450.00	450.00	450.00	450.00	426.51	373.53	
DCC (mm)	125.43	158.79	176.86	170.63	20.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.49	76.47	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	238.83	204.10	254.12	275.95	298.00	0.00	0.00	1271.01
NR (mm)	158.31	207.99	249.30	241.90	26.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27.65	90.14	1002.06

Figura 4.47 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IA

Fuente: Elaboración propia basada en la hoja de Excel propuesta por Gunther

Schosinsky



BALANCE HIDRICO DE SUELOS													
Gunther Schosinsky													
Zona de Estudio:		ZONA IB											
Fecha:													
Textura de Suelo:													
Simbología													
fc: Capacidad de Infiltración.						P: Precipitación Media Mensual.							
I: Infiltración.						Pi: Precipitación que infiltra.							
CC: Capacidad de Campo.						ESC: Escorrentía Superficial							
PM: Punto de Marchitez.						ETP: Evapotranspiración Potencial.							
PR: Profundidad de Raíces.						ETR: Evapotranspiración Real.							
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.						HSi: Humedad de Suelo Inicial.							
DS: Densidad de Suelo.						HD: Humedad Disponible							
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR						HSf: Humedad de Suelo Final.							
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR						DCC: Déficit de Capacidad de Campo.							
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)						Rp: Recarga Potencial							
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)						NR: Necesidad de Riego.							
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración						Ret: Retención de lluvia							
fc [mm/d]		100.00											
Kp [0.01%]		0.20											
Kv [0.01%]		0.20											
Kfc [0.01%]		0.49118						por peso (%)					
I [0.01%]		0.89118						(mm)					
DS (g/cm <sup>3</sup> ):		1.30				CC		29.00		942.50			
PR (mm)		2500.00				PM		15.00		487.50			
HSi (mm)		942.50				(CC-PM)		14.00		455.00			
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?		10											
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1		0.12											
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	0.86	13.16	32.91	65.19	299.10	418.31	364.74	419.47	429.49	442.56	58.24	3.97	2548.00
Ret [mm]	0.86	5.00	5.00	7.82	35.89	50.20	43.77	50.34	51.54	53.11	6.99	3.97	314.48
Pi (mm)	0.00	7.27	24.87	51.12	234.57	328.05	286.04	328.96	336.82	347.07	45.67	0.00	1990.47
ESC (mm)	0.00	0.89	3.04	6.24	28.64	40.06	34.93	40.17	41.13	42.38	5.58	0.00	243.05
ETP (mm)	81.84	90.72	118.42	122.40	119.35	108.60	116.87	115.01	102.00	91.45	78.90	66.65	1212.21
HSi (mm)	854.51	794.43	745.30	706.18	694.48	828.42	942.50	942.50	942.50	942.50	942.50	912.15	
C1	0.81	0.69	0.62	0.59	0.97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.93	
C2	0.66	0.55	0.46	0.43	0.72	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.93	0.80	
HD (mm)	367.01	314.20	282.67	269.80	441.55	668.97	741.04	783.96	791.82	802.07	500.67	424.65	
ETR (mm)	60.08	56.40	64.00	62.82	100.63	108.60	116.87	115.01	102.00	91.45	76.02	57.65	1011.52
HSf (mm)	794.43	745.30	706.18	694.48	828.42	942.50	942.50	942.50	942.50	942.50	912.15	854.51	
DCC (mm)	148.07	197.20	236.32	248.02	114.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	30.35	87.99	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	105.37	169.17	213.95	234.82	255.62	0.00	0.00	978.95
NR (mm)	169.83	231.52	290.75	307.60	132.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	33.23	97.00	1262.72

Figura 4.48 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IB

Fuente: Elaboración propia basada en la hoja de Excel propuesta por Gunther

Schosinsky

BALANCE HIDRICO DE SUELOS													
Gunther Schosinsky													
Zona de Estudio:		ZONA IC											
Fecha:													
Textura de Suelo:													
Simbología													
fc: Capacidad de Infiltración.						P: Precipitación Media Mensual.							
I: Infiltración.						Pi: Precipitación que infiltra.							
CC: Capacidad de Campo.						ESC: Escorrentía Superficial							
PM: Punto de Marchitez.						ETP: Evapotranspiración Potencial.							
PR: Profundidad de Raíces.						ETR: Evapotranspiración Real.							
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.						HSi: Humedad de Suelo Inicial.							
DS: Densidad de Suelo.						HD: Humedad Disponible							
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR						HSf: Humedad de Suelo Final.							
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR						DCC: Déficit de Capacidad de Campo.							
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)						Rp: Recarga Potencial							
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)						NR: Necesidad de Riego.							
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración						Ret: Retención de lluvia							
fc [mm/d]		3000.00											
Kp [0.01%]		0.25											
Kv [0.01%]		0.20											
Kfc [0.01%]		1						por peso (%)		(mm)			
I [0.01%]		1				CC		12.00		540.00			
DS (g/cm <sup>3</sup> ):		1.80				PM		6.00		270.00			
PR (mm)		2500.00				(CC-PM)		6.00		270.00			
HSi (mm)		540.00											
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?		10											
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1		0.12											
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	0.86	13.16	32.91	65.19	299.10	418.31	364.74	419.47	429.49	442.56	58.24	3.97	2548.00
Ret [mm]	0.86	5.00	5.00	7.82	35.89	50.20	43.77	50.34	51.54	53.11	6.99	3.97	314.48
Pi (mm)	0.00	8.16	27.91	57.37	263.21	368.11	320.97	369.13	377.95	389.45	51.25	0.00	2233.52
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	81.84	90.72	118.42	122.40	119.35	108.60	116.87	115.01	102.00	91.45	78.90	66.65	1212.21
HSi (mm)	463.08	413.42	379.21	360.17	365.81	516.37	540.00	540.00	540.00	540.00	540.00	516.39	
C1	0.72	0.56	0.51	0.55	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.91	
C2	0.50	0.37	0.29	0.30	0.89	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.90	0.69	
HD (mm)	193.08	151.58	137.12	147.53	359.02	614.49	590.97	639.13	647.95	659.45	321.25	246.39	
ETR (mm)	49.65	42.38	46.95	51.72	112.65	108.60	116.87	115.01	102.00	91.45	74.86	53.32	965.45
HSf (mm)	413.42	379.21	360.17	365.81	516.37	540.00	540.00	540.00	540.00	540.00	516.39	463.08	
DCC (mm)	126.58	160.79	179.83	174.19	23.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.61	76.92	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	235.89	204.10	254.12	275.95	298.00	0.00	0.00	1268.06
NR (mm)	158.76	209.14	251.30	244.87	30.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27.65	90.26	1012.31

Figura 4.49 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IC

Fuente: Elaboración propia basada en la hoja de Excel propuesta por Gunther

Schosinsky

BALANCE HIDRICO DE SUELOS													
Gunther Schosinsky													
Zona de Estudio:		ZONA ID											
Fecha:													
Textura de Suelo:													
Simbología													
fc: Capacidad de Infiltración.		P: Precipitación Media Mensual.											
I: Infiltración.		Pi: Precipitación que infiltra.											
CC: Capacidad de Campo.		ESC: Escorrentía Superficial											
PM: Punto de Marchitez.		ETP: Evapotranspiración Potencial.											
PR: Profundidad de Raíces.		ETR: Evapotranspiración Real.											
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.		HSi: Humedad de Suelo Inicial.											
DS: Densidad de Suelo.		HD: Humedad Disponible											
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR		HSf: Humedad de Suelo Final.											
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR		DCC: Déficit de Capacidad de Campo.											
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)		Rp: Recarga Potencial											
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)		NR: Necesidad de Riego.											
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración		Ret: Retención de Lluvia											
fc [mm/d]		35.00											
Kp [0.01%]		0.09											
Kv [0.01%]		0.04											
Kfc [0.01%]		0.22089		por peso									
I [0.01%]		0.35089		(%)									
DS (g/cm <sup>3</sup> ):		1.80		(mm)									
PR (mm)		2500.00		CC		4.00		180.00					
HSi (mm)		180.00		PM		1.00		45.00					
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?		10		(CC-PM)		3.00		135.00					
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1		0.12											
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	0.86	13.16	32.91	65.19	299.10	418.31	364.74	419.47	429.49	442.56	58.24	3.97	2548.00
Ret [mm]	0.86	5.00	5.00	7.82	35.89	50.20	43.77	50.34	51.54	53.11	6.99	3.97	314.48
Pi (mm)	0.00	2.86	9.79	20.13	92.36	129.17	112.62	129.52	132.62	136.65	17.98	0.00	783.71
ESC (mm)	0.00	5.30	18.12	37.24	170.85	238.95	208.35	239.61	245.33	252.80	33.27	0.00	1449.80
ETP (mm)	81.84	90.72	118.42	122.40	119.35	108.60	116.87	115.01	102.00	91.45	78.90	66.65	1212.21
HSi (mm)	102.72	78.33	65.05	60.14	62.79	100.81	144.96	157.72	175.54	180.00	180.00	136.88	
C1	0.43	0.27	0.22	0.26	0.82	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.68	
C2	0.17	0.09	0.03	0.02	0.09	0.57	0.71	0.94	1.00	1.00	1.00	0.55	0.34
HD (mm)	57.72	36.20	29.84	35.27	110.15	184.98	212.58	242.24	263.16	271.65	152.98	91.88	
ETR (mm)	24.38	16.15	14.69	17.48	54.33	85.02	99.86	111.70	102.00	91.45	61.10	34.17	712.35
HSf (mm)	78.33	65.05	60.14	62.79	100.81	144.96	157.72	175.54	180.00	180.00	136.88	102.72	
DCC (mm)	101.67	114.95	119.86	117.21	79.19	35.04	22.28	4.46	0.00	0.00	43.12	77.28	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	26.16	45.20	0.00	0.00	71.36
NR (mm)	159.12	189.52	223.58	222.13	144.20	58.62	39.29	7.77	0.00	0.00	60.92	109.77	1214.91

Figura 4.50 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona ID

Fuente: Elaboración propia basada en la hoja de Excel propuesta por Gunther

Schosinsky

**BALANCE HIDRICO DE SUELOS**  
**Gunther Schosinsky**

**Zona de Estudio:** ZONA IIA  
**Fecha:**

**Textura de Suelo:**

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.	P: Precipitación Media Mensual.
I: Infiltración.	Pi: Precipitación que infiltra.
CC: Capacidad de Campo.	ESC: Escorrentía Superficial
PM: Punto de Marchitez.	ETP: Evapotranspiración Potencial.
PR: Profundidad de Raíces.	ETR: Evapotranspiración Real.
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.	HSi: Humedad de Suelo Inicial.
DS: Densidad de Suelo.	HD: Humedad Disponible
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR	HSf: Humedad de Suelo Final.
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR	DCC: Déficit de Capacidad de Campo.
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)	Rp: Recarga Potencial
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)	NR: Necesidad de Riego.
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración	Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	240.00			
Kp [0.01%]	0.10			
Kv [0.01%]	0.20			
Kfc [0.01%]	0.70337			
I [0.01%]	1			
DS (g/cm <sup>3</sup> ):	1.50	CC	12.00	135.00
PR (mm)	750.00	PM	5.00	56.25
HSi (mm)	135.00	(CC-PM)	7.00	78.75
Nº de mes con que inicia HSi:1,2,3...12?	10			
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12			

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	0.90	5.60	13.90	58.30	261.70	318.00	287.10	312.30	340.10	274.50	42.90	1.00	1916.30
Ret [mm]	0.90	5.00	5.00	7.00	31.40	38.16	34.45	37.48	40.81	32.94	5.15	1.00	239.29
Pi (mm)	0.00	0.60	8.90	51.30	230.30	279.84	252.65	274.82	299.29	241.56	37.75	0.00	1677.01
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	132.10	140.60	150.00	176.10	167.70	150.00	159.70	157.80	141.00	134.90	121.20	123.40	1754.50
HSi (mm)	68.35	58.20	56.52	56.69	56.25	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	112.15	
C1	0.15	0.03	0.12	0.66	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.71	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.79	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	
HD (mm)	12.10	2.55	9.17	51.74	230.30	358.59	331.40	353.57	378.04	320.31	116.50	55.90	
ETR (mm)	10.15	2.28	8.74	51.74	150.50	150.00	159.70	157.80	141.00	134.90	60.60	43.80	1071.21
HSf (mm)	58.20	56.52	56.69	56.25	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	135.00	112.15	68.35	
DCC (mm)	76.80	78.48	78.31	78.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.85	66.65	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	1.05	129.84	92.95	117.02	158.29	106.66	0.00	0.00	605.81
NR (mm)	198.75	216.80	219.58	203.11	17.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	83.45	146.25	1085.13

Figura 4.51 Cálculo de recarga potencial mediante hoja de Excel para la zona IIA

Fuente: Elaboración propia basada en la hoja de Excel propuesta por Gunther

Schosinsky

BALANCE HIDRICO DE SUELOS													
Gunther Schosinsky													
Zona de Estudio:	ZONA IIB												
Fecha:													
Textura de Suelo:													
Simbología													
fc: Capacidad de Infiltración.							P: Precipitación Media Mensual.						
I: Infiltración.							Pi: Precipitación que infiltra.						
CC: Capacidad de Campo.							ESC: Escorrentía Superficial						
PM: Punto de Marchitez.							ETP: Evapotranspiración Potencial.						
PR: Profundidad de Raíces.							ETR: Evapotranspiración Real.						
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.							HSi: Humedad de Suelo Inicial.						
DS: Densidad de Suelo.							HD: Humedad Disponible						
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR							HSf: Humedad de Suelo Final.						
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR							DCC: Déficit de Capacidad de Campo.						
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)							Rp: Recarga Potencial						
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)							NR: Necesidad de Riego.						
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración							Ret: Retención de lluvia						
fc [mm/d]	35.00												
Kp [0.01%]	0.07												
Kv [0.01%]	0.04												
Kfc [0.01%]	0.22089						por peso						
I [0.01%]	0.33089						(%)						
DS (g/cm <sup>3</sup> ):	1.00						(mm)						
PR (mm)	10.00						CC 4.00 0.40						
HSi (mm)	0.40						PM 1.00 0.10						
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	10						(CC-PM) 3.00 0.30						
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12												
<b>Concepto</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Total</b>
P (mm)	0.90	5.60	13.90	58.30	261.70	318.00	287.10	312.30	340.10	274.50	42.90	1.00	1916.30
Ret [mm]	0.90	5.00	5.00	7.00	31.40	38.16	34.45	37.48	40.81	32.94	5.15	1.00	239.29
Pi (mm)	0.00	0.20	2.94	16.98	76.20	92.60	83.60	90.94	99.03	79.93	12.49	0.00	554.90
ESC (mm)	0.00	0.40	5.96	34.33	154.09	187.24	169.05	183.89	200.26	161.63	25.26	0.00	1122.11
ETP (mm)	132.10	140.60	175.20	176.10	167.70	150.00	159.70	157.80	141.00	134.90	121.20	123.40	1779.70
HSi (mm)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.10	
C1	0.00	0.66	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	
C2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
HD (mm)	0.00	0.20	2.94	16.98	76.20	92.60	83.90	91.24	99.33	80.23	12.79	0.00	
ETR (mm)	0.00	0.20	2.94	16.98	76.20	75.00	79.85	78.90	70.50	67.45	12.79	0.00	480.81
HSf (mm)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.10	0.10	
DCC (mm)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.30	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.30	3.75	12.04	28.53	12.48	0.00	0.00	74.09
NR (mm)	132.40	140.70	172.56	159.42	91.80	75.00	79.85	78.90	70.50	67.45	108.71	123.70	1300.99

Figura 4.52 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IIB

Fuente: Elaboración propia basada en la hoja de Excel propuesta por Gunther

Schosinsky

BALANCE HIDRICO DE SUELOS														
Gunther Schosinsky														
Zona de Estudio:	ZONA IIC													
Fecha:														
Textura de Suelo:														
Simbología														
fc: Capacidad de Infiltración.							P: Precipitación Media Mensual.							
I: Infiltración.							Pi: Precipitación que infiltra.							
CC: Capacidad de Campo.							ESC: Escorrentía Superficial							
PM: Punto de Marchitez.							ETP: Evapotranspiración Potencial.							
PR: Profundidad de Raíces.							ETR: Evapotranspiración Real.							
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.							HSi: Humedad de Suelo Inicial.							
DS: Densidad de Suelo.							HD: Humedad Disponible							
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR							HSf: Humedad de Suelo Final.							
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR							DCC: Déficit de Capacidad de Campo.							
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)							Rp: Recarga Potencial							
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)							NR: Necesidad de Riego.							
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración							Ret: Retención de lluvia							
fc [mm/d]	100.00													
Kp [0.01%]	0.10													
Kv [0.01%]	0.10													
Kfc [0.01%]	0.49118													
I [0.01%]	0.69118													
DS (g/cm <sup>3</sup> ):	1.30						CC		29.00		565.50			
PR (mm)	1500.00						PM		15.00		292.50			
HSi (mm)	565.50						(CC-PM)		14.00		273.00			
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	10													
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12													
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	
P (mm)	0.90	5.60	13.90	58.30	261.70	318.00	287.10	312.30	340.10	274.50	42.90	1.00	1916.30	
Ret [mm]	0.90	5.00	5.00	7.00	31.40	38.16	34.45	37.48	40.81	32.94	5.15	1.00	239.29	
Pi (mm)	0.00	0.41	6.15	35.46	159.18	193.42	174.63	189.95	206.86	166.96	26.09	0.00	1159.12	
ESC (mm)	0.00	0.19	2.75	15.84	71.12	86.42	78.02	84.87	92.43	74.60	11.66	0.00	517.89	
ETP (mm)	132.10	140.60	175.20	176.10	167.70	150.00	159.70	157.80	141.00	134.90	121.20	123.40	1779.70	
HSi (mm)	421.88	374.42	343.35	324.66	330.57	405.80	481.16	516.39	553.44	565.50	565.50	491.51		
C1	0.47	0.30	0.21	0.25	0.72	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.73		
C2	0.24	0.15	0.07	0.09	0.28	0.57	0.75	0.94	1.00	1.00	0.65	0.40		
HD (mm)	129.38	82.34	57.00	67.62	197.25	306.72	363.29	413.84	467.81	439.96	299.09	199.01		
ETR (mm)	47.46	31.49	24.84	29.55	83.95	118.05	139.40	152.90	141.00	134.90	100.09	69.62	1073.25	
HSf (mm)	374.42	343.35	324.66	330.57	405.80	481.16	516.39	553.44	565.50	565.50	491.51	421.88		
DCC (mm)	191.08	222.15	240.84	234.93	159.70	84.34	49.11	12.06	0.00	0.00	73.99	143.62		
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	53.81	32.06	0.00	0.00	85.87	
NR (mm)	275.72	331.26	391.20	381.48	243.45	116.28	69.41	16.96	0.00	0.00	95.11	197.39	2118.27	

Figura 4.53 Cálculo de recarga potencial mediante hoja de Excel para la zona IIC

Fuente: Elaboración propia basada en la hoja de Excel propuesta por Gunther

Schosinsky

**BALANCE HIDRICO DE SUELOS**  
**Gunther Schosinsky**

**Zona de Estudio:** ZONA 2 D UNICAES

**Fecha:**

**Textura de Suelo:**

Simbología

fc: Capacidad de Infiltración.

I: Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

(CC-PM): Rango de Agua Disponible.

DS: Densidad de Suelo.

C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR

C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR

Kp: Factor por pendiente ( ver léame)

Kv: Factor por vegetación ( ver léame)

Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración

P: Precipitación Media Mensual.

Pi: Precipitación que infiltra.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSi: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSf: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

Ret: Retención de lluvia

fc [mm/d]	100.00
Kp [0.01%]	0.20
Kv [0.01%]	0.10
Kfc [0.01%]	0.49118
I [0.01%]	0.79118
DS (g/cm <sup>3</sup> ):	1.30
PR (mm)	2000.00
HSi (mm)	754.00
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	10
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12

	por peso	(%)	(mm)
CC	29.00		754.00
PM	15.00		390.00
(CC-PM)	14.00		364.00

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	0.90	5.60	13.90	58.30	261.70	318.00	287.10	312.30	340.10	274.50	42.90	1.00	1916.30
Ret [mm]	0.90	5.00	5.00	7.00	31.40	38.16	34.45	37.48	40.81	32.94	5.15	1.00	239.29
Pi (mm)	0.00	0.47	7.04	40.59	182.21	221.40	199.89	217.44	236.79	191.12	29.87	0.00	1326.82
ESC (mm)	0.00	0.13	1.86	10.71	48.09	58.44	52.76	57.39	62.50	50.44	7.88	0.00	350.19
ETP (mm)	132.10	140.60	175.20	176.10	167.70	150.00	159.70	157.80	141.00	134.90	121.20	123.40	1779.70
HSi (mm)	596.82	535.38	490.40	458.17	458.87	552.05	650.35	704.46	754.00	754.00	754.00	677.87	
C1	0.57	0.40	0.30	0.30	0.69	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.79	
C2	0.36	0.25	0.15	0.15	0.37	0.64	0.83	1.00	1.00	1.00	0.75	0.52	
HD (mm)	206.82	145.86	107.44	108.76	251.08	383.45	460.24	531.90	600.79	555.12	393.87	287.87	
ETR (mm)	61.44	45.46	39.27	39.89	89.03	123.10	145.78	157.80	141.00	134.90	105.99	81.05	1164.71
HSf (mm)	535.38	490.40	458.17	458.87	552.05	650.35	704.46	754.00	754.00	754.00	677.87	596.82	
DCC (mm)	218.62	263.60	295.83	295.13	201.95	103.65	49.54	0.00	0.00	0.00	76.13	157.18	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.10	95.79	56.22	0.00	0.00	162.11
NR (mm)	289.28	358.74	431.76	431.34	280.62	130.55	63.46	0.00	0.00	0.00	91.33	199.53	2276.59

Figura 4.54 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IID

Fuente: Elaboración propia basada en la hoja de Excel propuesta por Gunther

Schosinsky

BALANCE HIDRICO DE SUELOS													
Gunther Schosinsky													
Zona de Estudio:	ZONA IIE												
Fecha:													
Textura de Suelo:													
Simbología													
fc: Capacidad de Infiltración.							P: Precipitación Media Mensual.						
I: Infiltración.							Pi: Precipitación que infiltra.						
CC: Capacidad de Campo.							ESC: Escorrentía Superficial						
PM: Punto de Marchitez.							ETP: Evapotranspiración Potencial.						
PR: Profundidad de Raíces.							ETR: Evapotranspiración Real.						
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.							HSi: Humedad de Suelo Inicial.						
DS: Densidad de Suelo.							HD: Humedad Disponible						
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR							HSf: Humedad de Suelo Final.						
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR							DCC: Déficit de Capacidad de Campo.						
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)							Rp: Recarga Potencial						
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)							NR: Necesidad de Riego.						
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración							Ret: Retención de lluvia						
fc [mm/d]	3000.00												
Kp [0.01%]	0.10												
Kv [0.01%]	0.20												
Kfc [0.01%]	1						por peso						
I [0.01%]	1						(%)						
DS (g/cm <sup>3</sup> ):	1.50						(mm)						
PR (mm)	2500.00						CC 12.00 450.00						
HSi (mm)	450.00						PM 6.00 225.00						
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	10						(CC-PM) 6.00 225.00						
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12												
<b>Concepto</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Total</b>
P (mm)	0.90	5.60	13.90	58.30	261.70	318.00	287.10	312.30	340.10	274.50	42.90	1.00	1916.30
Ret [mm]	0.90	5.00	5.00	7.00	31.40	38.16	34.45	37.48	40.81	32.94	5.15	1.00	239.29
Pi (mm)	0.00	0.60	8.90	51.30	230.30	279.84	252.65	274.82	299.29	241.56	37.75	0.00	1677.01
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	132.10	140.60	150.00	176.10	167.70	150.00	159.70	157.80	141.00	134.90	121.20	123.40	1754.50
HSi (mm)	323.74	282.78	258.30	248.44	264.14	372.67	450.00	450.00	450.00	450.00	450.00	450.00	389.03
C1	0.44	0.26	0.19	0.33	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.73
C2	0.18	0.10	0.06	0.07	0.45	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.63	0.33	
HD (mm)	98.74	58.38	42.20	74.75	269.44	427.51	477.65	499.82	524.29	466.56	262.75	164.03	
ETR (mm)	40.95	25.08	18.76	35.61	121.76	150.00	159.70	157.80	141.00	134.90	98.72	65.29	1149.58
HSf (mm)	282.78	258.30	248.44	264.14	372.67	450.00	450.00	450.00	450.00	450.00	389.03	323.74	
DCC (mm)	167.22	191.70	201.56	185.86	77.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	60.97	126.26	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	52.51	92.95	117.02	158.29	106.66	0.00	0.00	527.43
NR (mm)	258.36	307.22	332.80	326.35	123.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	83.45	184.37	1615.82

Figura 4.55 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IIE

Fuente: Elaboración propia basada en la hoja de Excel propuesta por Gunther

Schosinsky



BALANCE HIDRICO DE SUELOS													
Gunther Schosinsky													
Zona de Estudio:	ZONA IIIA												
Fecha:													
Textura de Suelo:													
Simbología													
fc: Capacidad de Infiltración.							P: Precipitación Media Mensual.						
I: Infiltración.							Pi: Precipitación que infiltra.						
CC: Capacidad de Campo.							ESC: Escorrentía Superficial						
PM: Punto de Marchitez.							ETP: Evapotranspiración Potencial.						
PR: Profundidad de Raíces.							ETR: Evapotranspiración Real.						
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.							HSi: Humedad de Suelo Inicial.						
DS: Densidad de Suelo.							HD: Humedad Disponible						
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR							HSf: Humedad de Suelo Final.						
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR							DCC: Déficit de Capacidad de Campo.						
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)							Rp: Recarga Potencial						
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)							NR: Necesidad de Riego.						
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración							Ret: Retención de lluvia						
fc [mm/d]	250.00												
Kp [0.01%]	0.10												
Kv [0.01%]	0.20												
Kfc [0.01%]	0.71273						por peso						
I [0.01%]	1						(%)						
DS (g/cm <sup>3</sup> ):	1.50						(mm)						
PR (mm)	2500.00						CC 12.00 450.00						
HSi (mm)	450.00						PM 5.00 187.50						
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	10						(CC-PM) 7.00 262.50						
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12												
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	0.80	5.60	16.10	82.10	294.90	440.80	315.40	351.80	447.20	454.10	46.90	4.20	2459.90
Ret [mm]	0.80	5.00	5.00	9.85	35.39	52.90	37.85	42.22	53.66	54.49	5.63	4.20	306.98
Pi (mm)	0.00	0.60	11.10	72.25	259.51	387.90	277.55	309.58	393.54	399.61	41.27	0.00	2152.92
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	100.10	107.00	134.20	135.90	126.80	115.20	120.00	122.80	111.30	103.20	90.30	94.20	1361.00
HSi (mm)	344.06	295.74	261.02	239.92	264.33	409.83	450.00	450.00	450.00	450.00	450.00	409.40	
C1	0.60	0.41	0.32	0.47	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.85	
C2	0.37	0.25	0.16	0.23	0.80	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.81	0.54	
HD (mm)	156.56	108.84	84.62	124.66	336.34	610.24	540.05	572.08	656.04	662.11	303.77	221.90	
ETR (mm)	48.32	35.32	32.20	47.83	114.01	115.20	120.00	122.80	111.30	103.20	81.87	65.34	997.40
HSf (mm)	295.74	261.02	239.92	264.33	409.83	450.00	450.00	450.00	450.00	450.00	409.40	344.06	
DCC (mm)	154.26	188.98	210.08	185.67	40.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	40.60	105.94	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	232.54	157.55	186.78	282.24	296.41	0.00	0.00	1155.52
NR (mm)	206.04	260.66	312.08	273.74	52.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	49.03	134.80	1289.29

Figura 4.56 Cálculo de recarga potencial mediante hoja de Excel para la zona IIIA

Fuente: Elaboración propia basada en la hoja de Excel propuesta por Gunther

Schosinsky

BALANCE HIDRICO DE SUELOS														
Gunther Schosinsky														
Zona de Estudio:	ZONA IIIB													
Fecha:														
Textura de Suelo:														
Simbología														
fc: Capacidad de Infiltración.							P: Precipitación Media Mensual.							
I: Infiltración.							Pi: Precipitación que infiltra.							
CC: Capacidad de Campo.							ESC: Escorrentía Superficial							
PM: Punto de Marchitez.							ETP: Evapotranspiración Potencial.							
PR: Profundidad de Raíces.							ETR: Evapotranspiración Real.							
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.							HSi: Humedad de Suelo Inicial.							
DS: Densidad de Suelo.							HD: Humedad Disponible							
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR							HSf: Humedad de Suelo Final.							
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR							DCC: Déficit de Capacidad de Campo.							
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)							Rp: Recarga Potencial							
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)							NR: Necesidad de Riego.							
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración							Ret: Retención de lluvia							
fc [mm/d]	100.00													
Kp [0.01%]	0.20													
Kv [0.01%]	0.20													
Kfc [0.01%]	0.49118						por peso (%) (mm)							
I [0.01%]	0.89118						CC		29.00		942.50			
DS (g/cm³):	1.30						PM		15.00		487.50			
PR (mm)	2500.00						(CC-PM)		14.00		455.00			
HSi (mm)	942.50													
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	10													
Luvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12													
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	
P (mm)	0.80	5.60	16.10	82.10	294.90	440.80	315.40	351.80	447.20	454.10	46.90	4.20	2459.90	
Ret [mm]	0.80	5.00	5.00	9.85	35.39	52.90	37.85	42.22	53.66	54.49	5.63	4.20	306.98	
Pi (mm)	0.00	0.53	9.89	64.39	231.27	345.69	247.35	275.90	350.71	356.12	36.78	0.00	1918.64	
ESC (mm)	0.00	0.07	1.21	7.86	28.24	42.21	30.20	33.69	42.82	43.49	4.49	0.00	234.28	
ETP (mm)	100.10	107.00	134.20	135.90	126.80	115.20	120.00	122.80	111.30	103.20	90.30	94.20	1361.00	
HSi (mm)	818.79	753.92	699.06	653.27	659.18	793.80	942.50	942.50	942.50	942.50	942.50	894.29		
C1	0.73	0.59	0.49	0.51	0.89	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.89		
C2	0.57	0.45	0.34	0.35	0.64	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.88	0.71		
HD (mm)	331.29	266.96	221.45	230.15	402.95	652.00	702.35	730.90	805.71	811.12	491.78	406.79		
ETR (mm)	64.87	55.40	55.68	58.48	96.65	115.20	120.00	122.80	111.30	103.20	84.99	75.50	1064.06	
HSf (mm)	753.92	699.06	653.27	659.18	793.80	942.50	942.50	942.50	942.50	942.50	894.29	818.79		
DCC (mm)	188.58	243.44	289.23	283.32	148.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48.21	123.71		
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	81.80	127.35	153.10	239.41	252.92	0.00	0.00	854.57	
NR (mm)	223.81	295.04	367.75	360.75	178.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	53.52	142.41	1622.12	

Figura 4.57 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IIIB

Fuente: Elaboración propia basada en la hoja de Excel propuesta por Gunther

Schosinsky

BALANCE HIDRICO DE SUELOS													
Gunther Schosinsky													
Zona de Estudio:	ZONA IIIC												
Fecha:													
Textura de Suelo:													
Simbología													
fc: Capacidad de Infiltración.							P: Precipitación Media Mensual.						
I: Infiltración.							Pi: Precipitación que infiltra.						
CC: Capacidad de Campo.							ESC: Escorrentía Superficial						
PM: Punto de Marchitez.							ETP: Evapotranspiración Potencial.						
PR: Profundidad de Raíces.							ETR: Evapotranspiración Real.						
(CC-PM): Rango de Agua Disponible.							HSi: Humedad de Suelo Inicial.						
DS: Densidad de Suelo.							HD: Humedad Disponible						
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR							HSf: Humedad de Suelo Final.						
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR							DCC: Déficit de Capacidad de Campo.						
Kp: Factor por pendiente ( ver léame)							Rp: Recarga Potencial						
Kv: Factor por vegetación ( ver léame)							NR: Necesidad de Riego.						
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración							Ret: Retención de lluvia						
fc [mm/d]	3000.00												
Kp [0.01%]	0.20												
Kv [0.01%]	0.20												
Kfc [0.01%]	1						por peso						
I [0.01%]	1						(%)						
DS (g/cm <sup>3</sup> ):	1.80						(mm)						
PR (mm)	2500.00						CC 12.00 540.00						
HSi (mm)	540.00						PM 6.00 270.00						
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3...12?	10						(CC-PM) 6.00 270.00						
Lluvia retenida [0.01%] : Bosques=0.2, otros=0.1	0.12												
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	0.80	5.60	16.10	82.10	294.90	440.80	315.40	351.80	447.20	454.10	46.90	4.20	2459.90
Ret [mm]	0.80	5.00	5.00	9.85	35.39	52.90	37.85	42.22	53.66	54.49	5.63	4.20	306.98
Pi (mm)	0.00	0.60	11.10	72.25	259.51	387.90	277.55	309.58	393.54	399.61	41.27	0.00	2152.92
ESC (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ETP (mm)	100.10	107.00	134.20	135.90	126.80	115.20	120.00	122.80	111.30	103.20	90.30	94.20	1361.00
HSi (mm)	433.16	383.89	348.11	325.89	349.87	496.07	540.00	540.00	540.00	540.00	540.00	499.17	
C1	0.60	0.42	0.33	0.47	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.85	
C2	0.38	0.26	0.17	0.24	0.79	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.82	0.55	
HD (mm)	163.16	114.49	89.21	128.13	339.38	613.97	547.55	579.58	663.54	669.61	311.27	229.17	
ETR (mm)	49.28	36.38	33.32	48.26	113.32	115.20	120.00	122.80	111.30	103.20	82.10	66.01	1001.17
HSf (mm)	383.89	348.11	325.89	349.87	496.07	540.00	540.00	540.00	540.00	540.00	499.17	433.16	
DCC (mm)	156.11	191.89	214.11	190.13	43.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	40.83	106.84	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	228.77	157.55	186.78	282.24	296.41	0.00	0.00	1151.75
NR (mm)	206.94	262.51	314.99	277.77	57.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	49.03	135.03	1303.69

Figura 4.58 Cálculo de recargar potencial mediante hoja de Excel para la zona IIIC

Fuente: Elaboración propia basada en la hoja de Excel propuesta por Gunther

Schosinsky

*Tabla 4.23 Recarga por cada sub zona*

*Fuente: Elaboración propia*

<b>ZONA I</b>	<b>RECARGA (mm/año)</b>
IA	1271.01
IB	978.95
IC	1268.06
ID	71.36
<b>ZONA II</b>	
IIA	605.81
IIB	74.09
IIC	85.87
IID	162.11
IIE	527.43
<b>ZONA III</b>	
IIIA	1155.52
IIIB	854.57
IIIC	1151.75

El resultado del cálculo de la recarga por cada zona se muestra en la tabla (4.23), estos valores de recarga serán ingresados igualmente a cada zona delimitada en ArcGis para finalmente obtener el mapa de recarga de la zona de estudio.

### 4.2.3 Procesamiento de Información para Elaboración de la Caracterización Hidrogeoquímica

Con los datos mostrados en las tablas (4.9 y 4.10) tanto para la época seca y lluviosa respectivamente, se identificaron de estos datos los iones mayoritarios que están en unidades de mg/l y para poder tener un mismo sistema de unidades de iones mayoritarios, estos se convertirán en miliequivalentes dividiendo cada ion entre su respectivo peso equivalente, a continuación, se muestra la tabla (4.24) en la cual se encuentran estos pesos.

*Tabla 4.24 Peso de un miliequivalentes para Cationes y aniones*

*Fuente: www.aguaysig.com*

CATIONES		ANIONES	
PARÁMETRO	PESO DE UN MILIEQUIVALENTES	PARÁMETRO	PESO DE UN MILIEQUIVALENTES
Calcio (Ca)	20	Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> )	61
Magnesio (Mg)	12.15	Cloruro (Cl)	35.5
Sodio (Na)	23	(Sulfato SO <sub>4</sub> )	48
Potasio (K)	39		

En la tabla (4.25) se muestran los resultados de la conversión de Iones mayoritarios a unidades de miliequivalentes para la época seca.

*Tabla 4.25 Iones mayoritarios en miliequivalentes para la época seca*

*Fuente: Elaboración propia*

TABLA DE MILIEQUIVALENTES PARA LAS DIFERENTES MUESTRAS					
Parámetro	SALI-01	SALI-02	SALI-03	SALI-04	SALI-05
Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> )	2.25	2.46	2.35	2.18	3.07
Calcio (Ca)	2.48	1.72	2.57	1.93	2.96
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	0.31	0.17	0.34	0.23	0.33
Magnesio (Mg)	1.00	1.38	1.35	1.64	1.94
Potasio (K)	0.12	0.13	0.14	0.12	0.16
Sodio (Na)	0.76	0.76	0.76	0.76	0.80
Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	0.77	0.21	0.54	0.65	0.58

En la tabla (4.26) se muestran los resultados de la conversión de los Iones mayoritarios a unidades de miliequivalentes para la época lluviosa.

*Tabla 4.26 Iones mayoritarios en miliequivalentes para la época lluviosa.*

*Fuente: Elaboración propia*

TABLA DE MILIEQUIVALENTES PARA LAS DIFERENTES MUESTRAS					
Parámetro	SALI-01	SALI-02	SALI-03	SALI-04	SALI-05
Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> )	2.05	2.53	1.44	2.14	3.14
Calcio (Ca)	2.33	1.86	1.93	1.97	2.90
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	0.26	0.14	0.96	0.21	0.32
Magnesio (Mg)	1.47	1.23	1.17	1.28	1.60
Potasio (K)	0.11	0.12	0.08	0.12	0.15
Sodio (Na)	0.81	0.85	1.23	0.86	0.88
Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	1.42	0.15	0.27	0.21	0.21

#### **4.2.3.1 Procesamiento de datos Hidrogeoquímica mediante el Software Easy Quim para elaborar el diagrama de Piper de la época Seca y Lluviosa**

En este apartado se hace una breve descripción del software sobre los creadores y como funciona, para luego procesar los datos de nuestra investigación.

EasyQuim (EasyQuim, 2012) es un Software libre creado por el Grupo de Hidrología Subterránea (GHS), específicamente por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), este Software está diseñado para mejorar la clasificación, análisis, cálculos, visualizaciones e interpretaciones de datos hidroquímicos. Realiza algunos cálculos tales como conversión de unidad y relaciones iónicas. También traza Diagramas de Piper, Schöeller-Berkaloff, SAR (Salinidad) y Stiff.

El Software presenta una interfaz muy sencilla y fácil de usar en la cual hay que introducir los datos en las celdas substituyendo los valores existentes: nombre, coordenadas, parámetros físico-químicos e iones mayoritarios.

En las (Figuras 4.59, 4.60, 4.612 y 4.62), se presenta el procesamiento de los datos obtenidos de nuestra investigación.

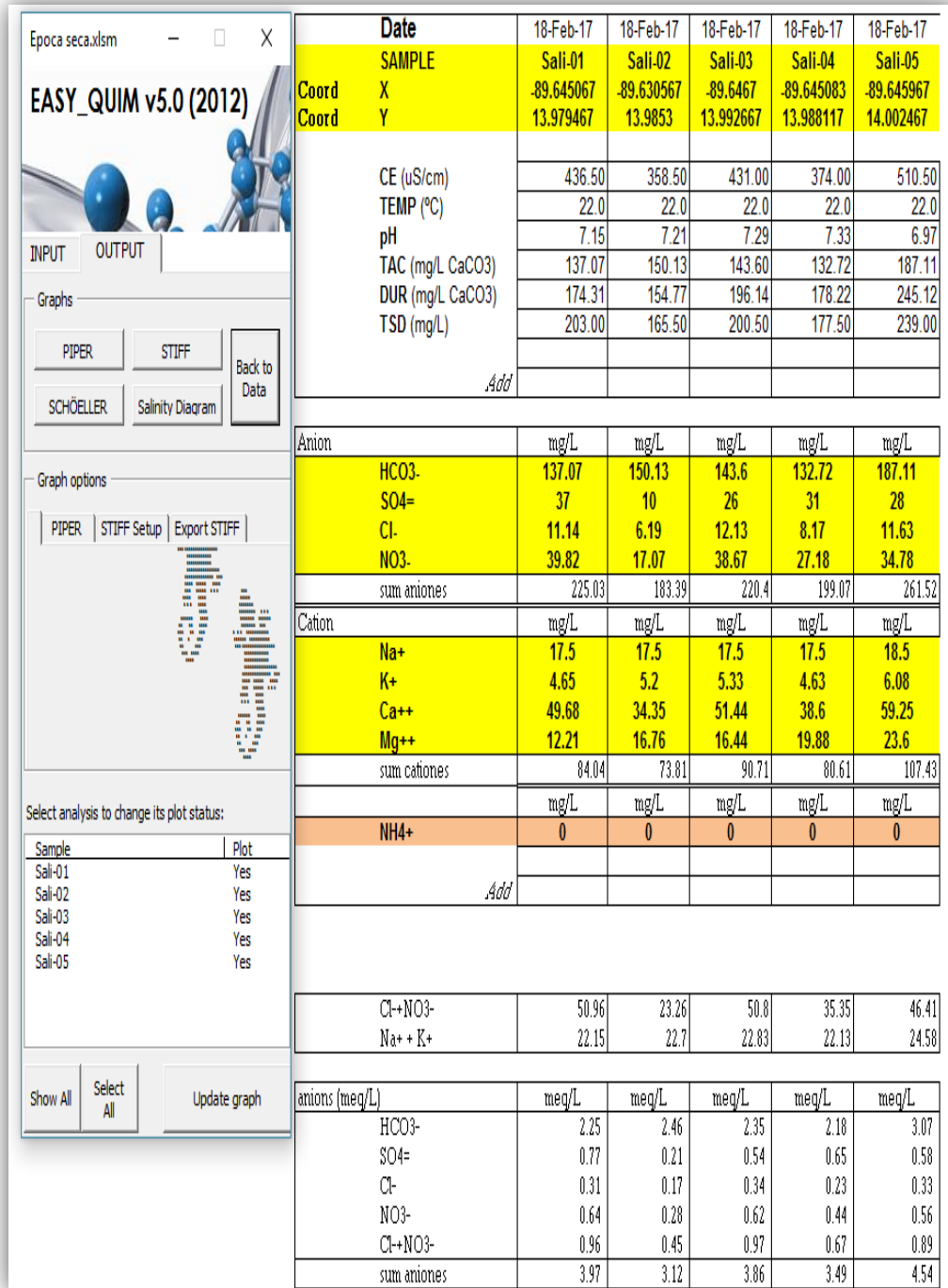


Figura 4.59 Modelación de resultados fisicoquímicos para el agua en época Seca

Fuente: EASY\_QUIM



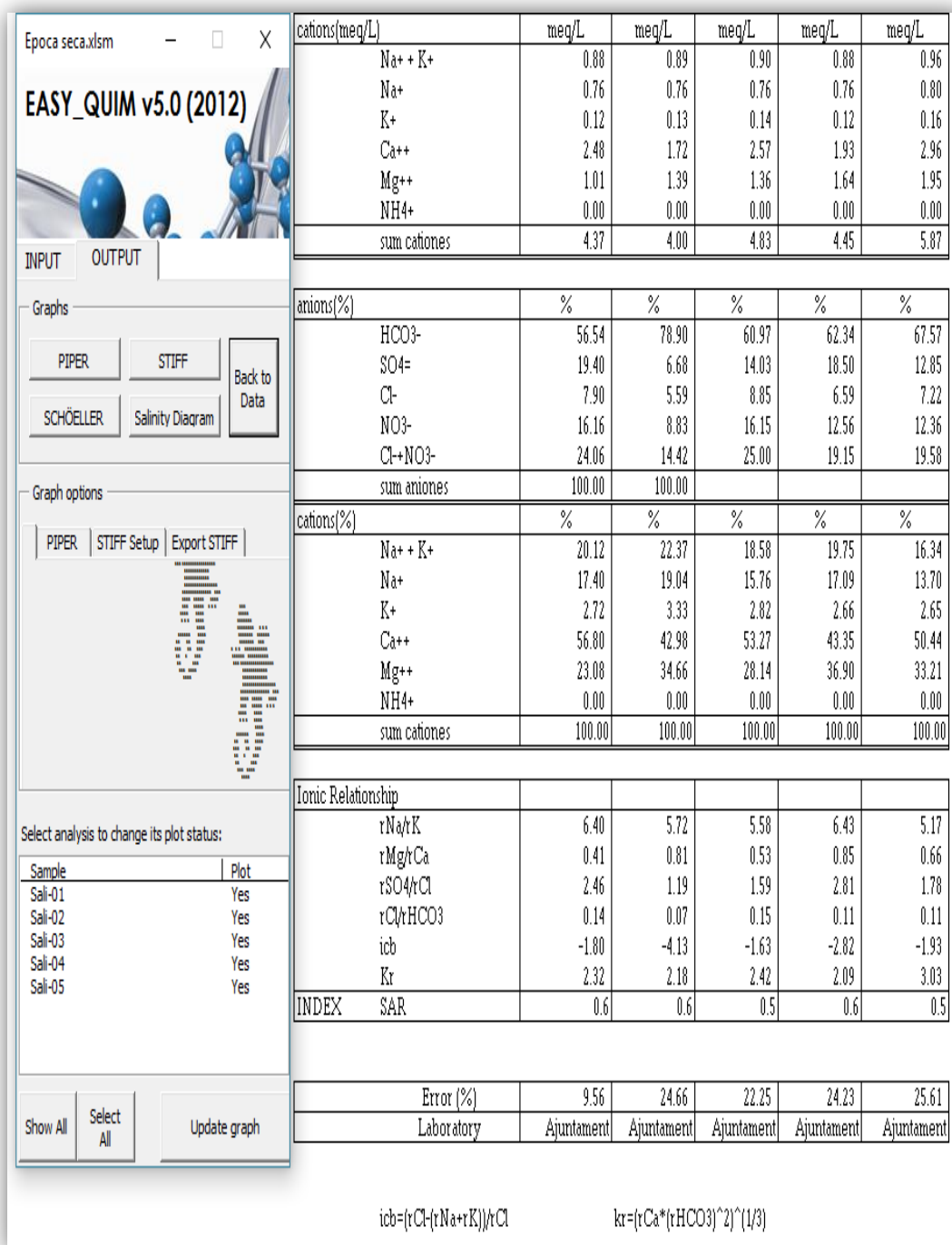


Figura 4.60 Modelación de resultados fisicoquímicos para el agua en época seca.

Fuente: EASY\_QUIM

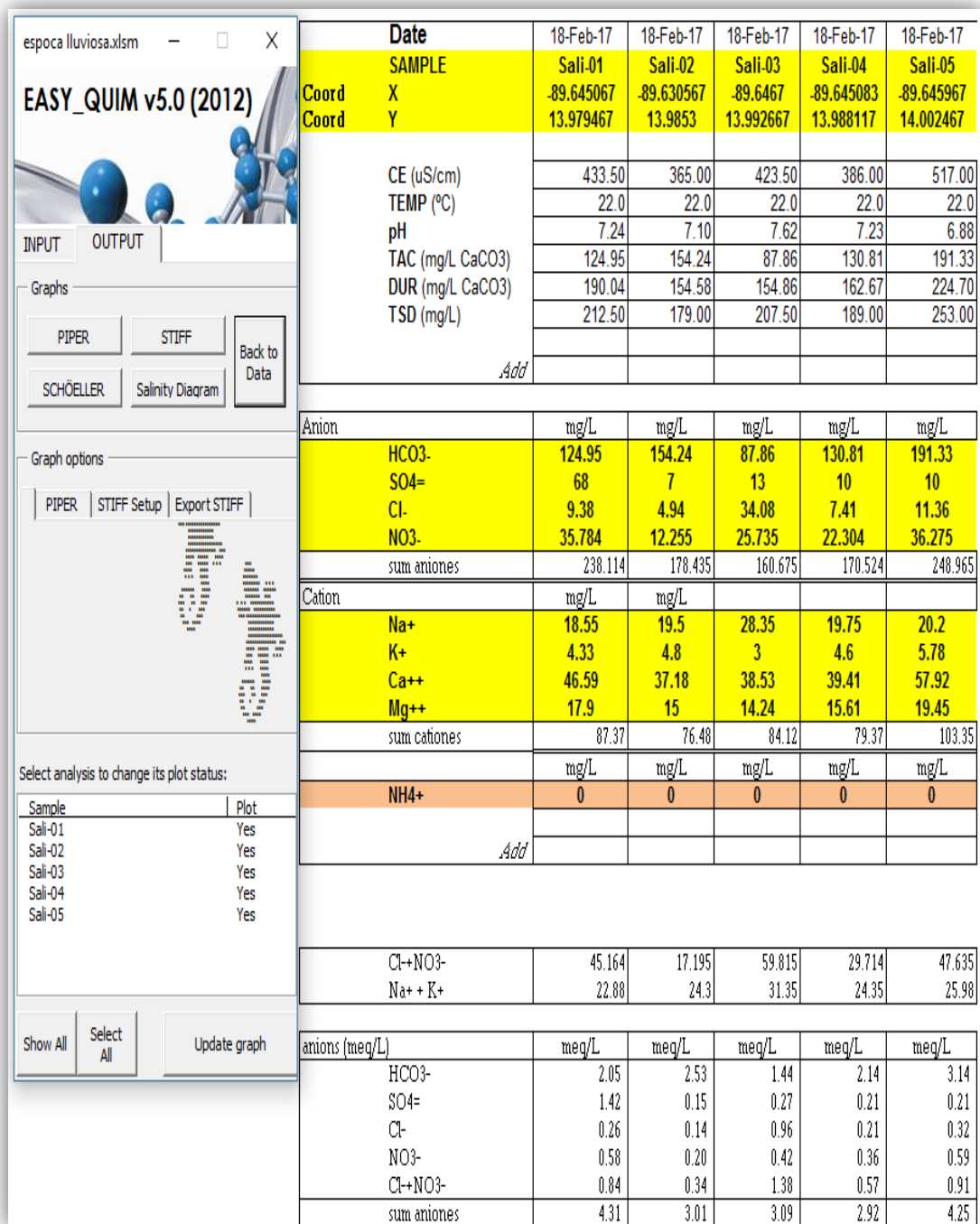


Figura 4.61 Modelación de resultados físico-químico para el agua en época lluviosa.

Fuente: EASY\_QUIM

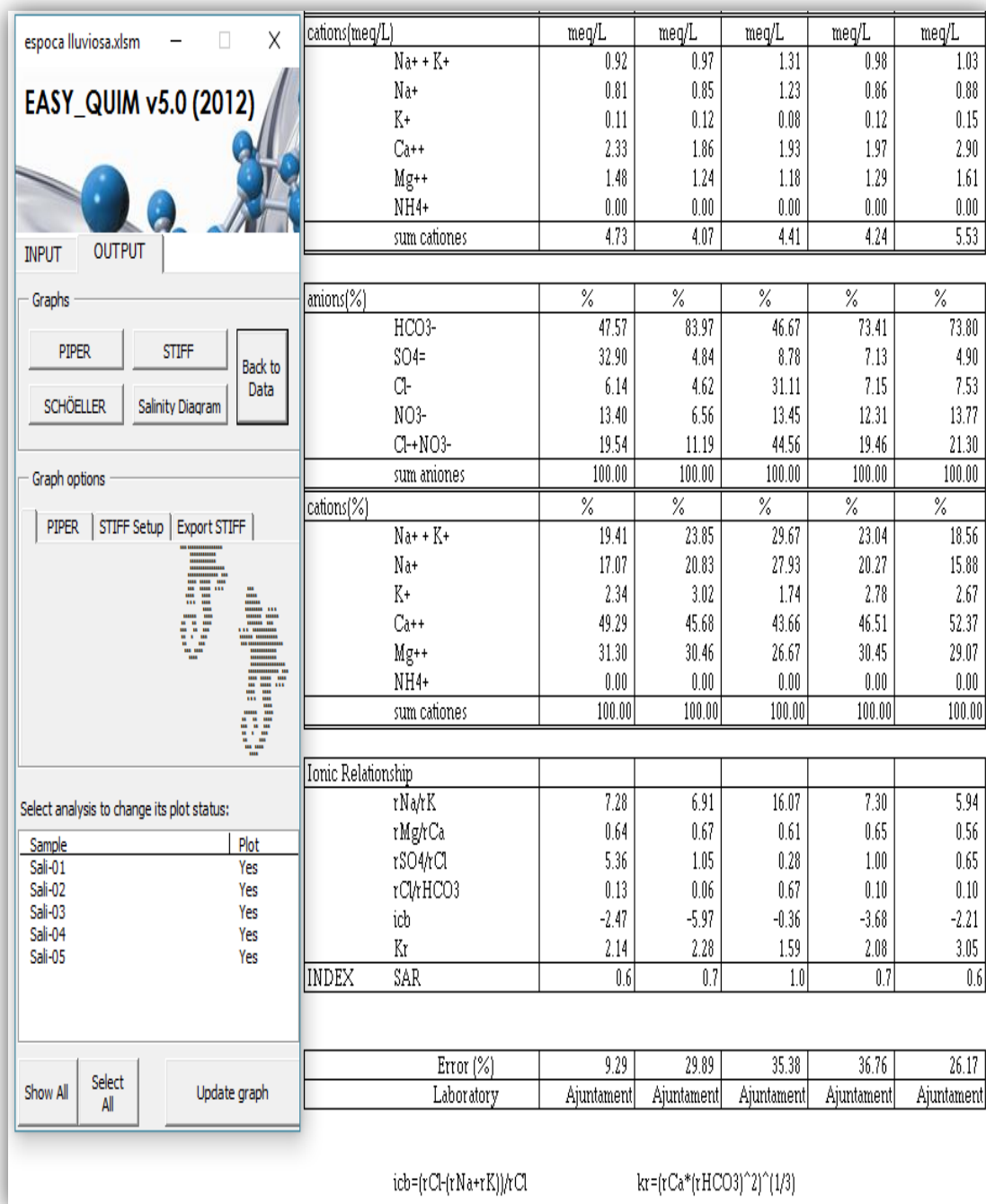
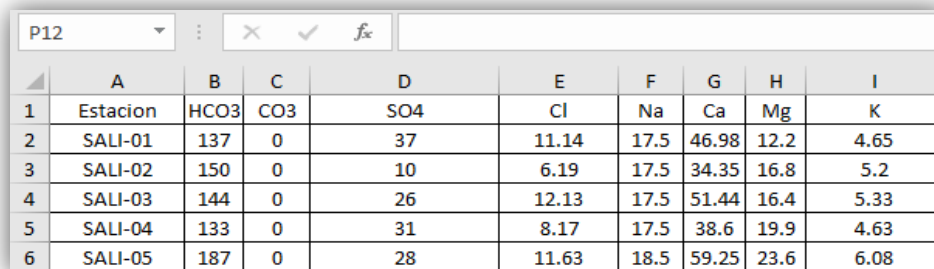


Figura 4.62 Modelación de resultados físico-químico para el agua en época lluviosa.

Fuente: EASY\_QUIM

### 4.2.3.2 Procesamiento de datos para Elaborar el Diagrama de Stiff de las épocas Seca y Lluviosa

Para la modelación de los diagramas de Stiff nos auxiliaremos de la página online (hatarichem.gidahatari.com) en la cual se ingresan los valores de los iones mayoritarios dentro de una hoja de Excel (Figura 4.63) los cuales tienen que estar en unidades de mg/l, luego de tener ingresada las concentraciones en la hoja Excel se guarda el archivo y se sube a la página web antes mencionada y esta nos proporciona los diagramas de Stiff que para los primeros 5 diagramas serán la modelación para las concentraciones pertenecientes a la época seca.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Estacion	HCO3	CO3	SO4	Cl	Na	Ca	Mg	K
2	SALI-01	137	0	37	11.14	17.5	46.98	12.2	4.65
3	SALI-02	150	0	10	6.19	17.5	34.35	16.8	5.2
4	SALI-03	144	0	26	12.13	17.5	51.44	16.4	5.33
5	SALI-04	133	0	31	8.17	17.5	38.6	19.9	4.63
6	SALI-05	187	0	28	11.63	18.5	59.25	23.6	6.08

Figura 4.63 Iones mayoritarios para el cálculo de diagramas de Stiff para época seca

Fuente: Elaboración propia

El mismo procedimiento que se siguió para la época seca, se hará para la época lluviosa en la (Figura 4.64) se muestran la Hoja Excel, la cual muestra los valores en unidades de mg/l para las concentraciones de los iones mayoritarios pertenecientes a la época Lluviosa.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Estacion	HCO3	CO3	SO4	Cl	Na	Ca	Mg	K
2	SALI-01	125	0	68	9.38	18.55	46.59	17.9	4.33
3	SALI-02	154	0	7	4.94	19.5	37.18	15	4.8
4	SALI-03	87.8	0	13	34.08	28.35	38.53	14.2	3
5	SALI-04	131	0	10	7.41	19.75	39.41	15.6	4.6
6	SALI-05	191	0	10	11.36	20.2	57.92	19.5	5.78

Figura 4.64 Iones mayoritarios para el cálculo de diagramas de Stiff para época lluviosa

Fuente: Elaboración propia

### 4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

Este apartado corresponde a la última parte de este capítulo, aquí es donde se muestran los resultados finales provenientes del procesamiento de los datos, es donde se cumplirán los objetivos planteados en este trabajo de graduación, ya que se presenta el mapa de vulnerabilidad, el mapa de recarga potencial, el análisis químico del agua, así como el modelo conceptual.

En los anexos IV-I y IV-II, se encuentra los mapas tanto de vulnerabilidad como de recarga potencial, donde se puede apreciar las zonas del municipio que pueden presentar diferentes tipos de vulnerabilidad y recarga potencial según los mapas definidos a continuación.

### 4.3.1 Análisis de resultados del mapa de Vulnerabilidad

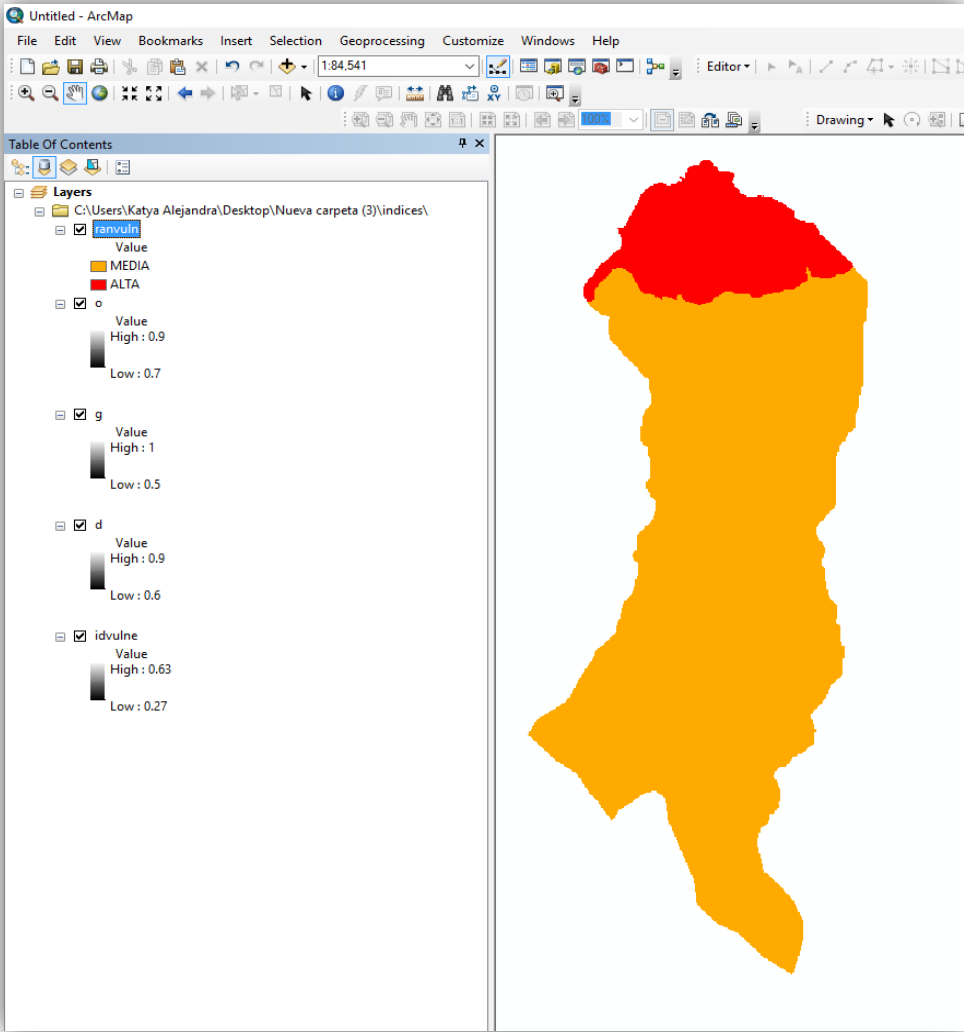


Figura 4.65 Mapa de vulnerabilidad de la zona de estudio

Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana

Como resultado del procesamiento de la información, podemos ver (Figura 4.65) que la zona de estudio quedo dividida en dos partes una representada por el color naranja que nos dice que es vulnerabilidad es media, mientras que la otra parte representada con el color rojo, nos dice que es vulnerabilidad alta, esta misma representación se realizó colocando el municipio de San Sebastián Salitrillo (Ver anexo IV-I), donde se muestran las zonas de vulnerabilidad del municipio según la clasificación antes mostrada para la zona en estudio.

### 4.3.2 Análisis de resultados de mapa de Recarga Potencial

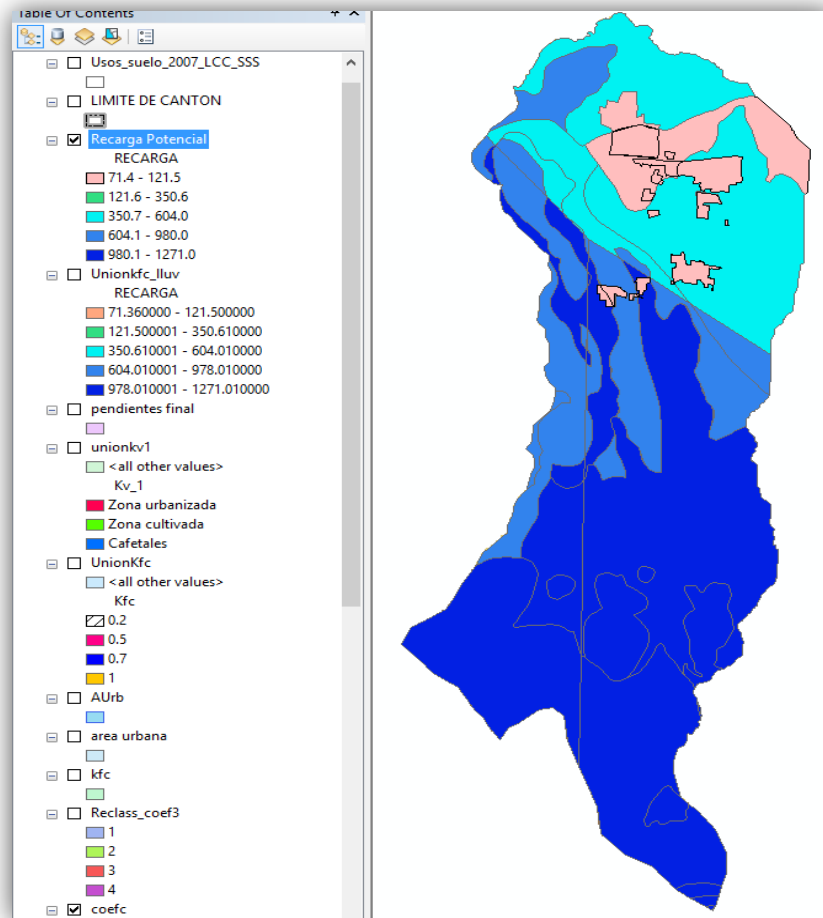


Figura 4.66 Mapa de recarga de la zona de estudio

Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana

El resultado final de la recargar potencial representado en el mapa de la zona de estudio (Figura 4.66), nos muestra las diferentes zonas de recarga que van desde la mayor recarga representada con el color azul hasta la que genera menos recarga representada con el color rosado; las zonas de menor recarga pertenecen a la parte



donde esta urbanizado ya que el suelo se encuentra impermeabilizado por las construcciones, el mapa de recarga potencial colocando el municipio (Ver anexo IV-II), nos muestra también las zonas de mayor y menor recarga que se dan solamente en municipio.

### **4.3.3 Análisis de resultados de Caracterización Hidrogeoquímica del Agua**

De los datos procesados tanto el software Easy Quim como en la página Hatarichem anteriormente procedemos a ver los resultados y hacer su respectivo análisis.

#### **4.3.3.1 Análisis de resultados del diagrama de Piper para época seca y lluviosa**

En la (Figura 4.67) se presentan el diagrama de Piper modelado por el Software Easy Quim para la época seca, según este diagrama podemos observar que para los cinco pozos analizados y apoyándonos en la (Figura 2.5) determinamos que todas las concentraciones analizadas caen en la zona II, la cual tiene por clasificación a las aguas Bicarbonatadas cálcicas.

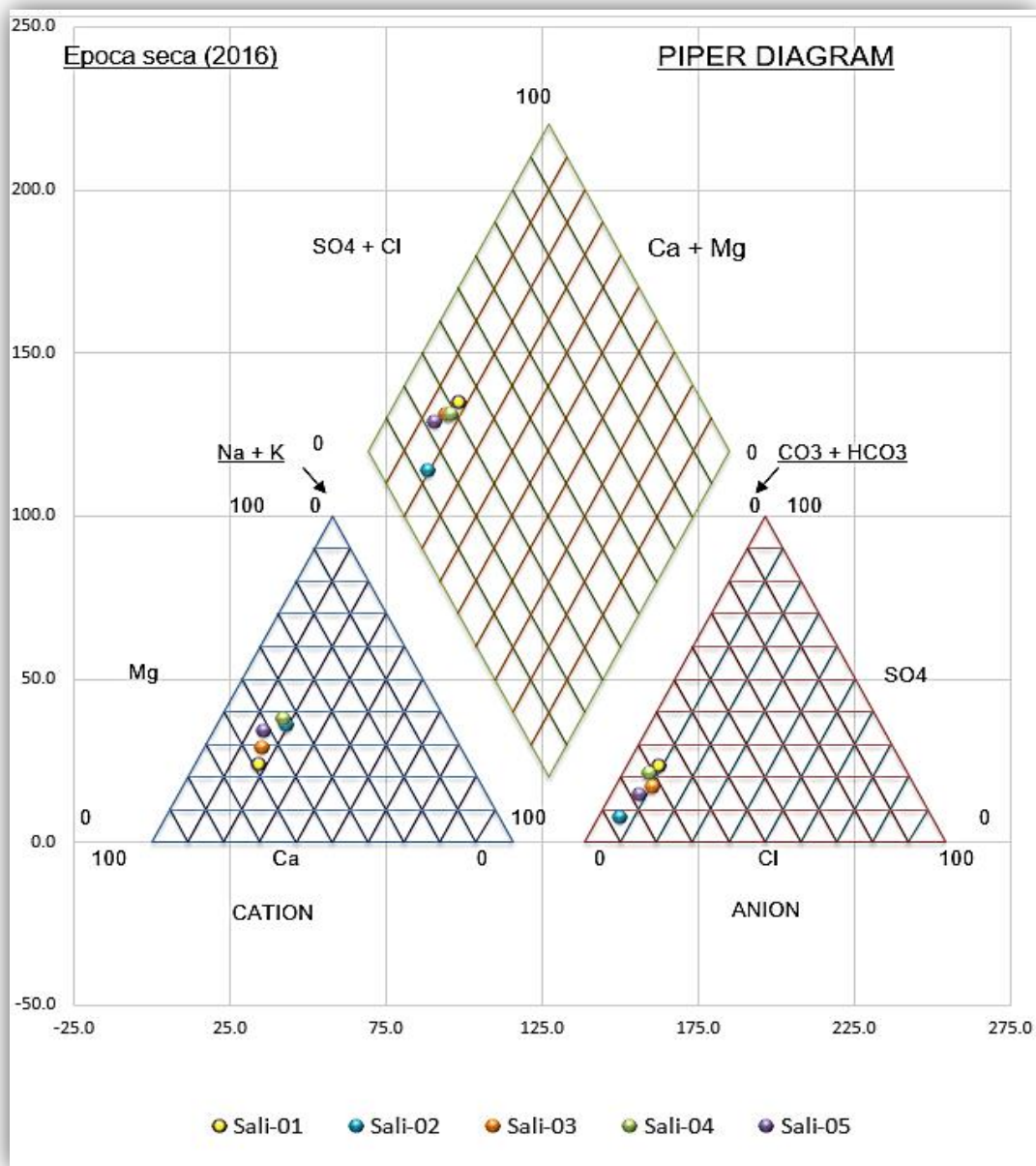


Figura 4.67 Diagrama de Piper para la época seca.

Fuente: EASY\_QUIM

Al igual que en la figura anterior las concentraciones para los diferentes pozos en época lluviosa (Figura 4.68) caen en la zona II, por lo tanto, se puede afirmar que para la

época en estudio también se está en presencia de una clasificación de aguas subterráneas Bicarbonatadas Cálcidas.

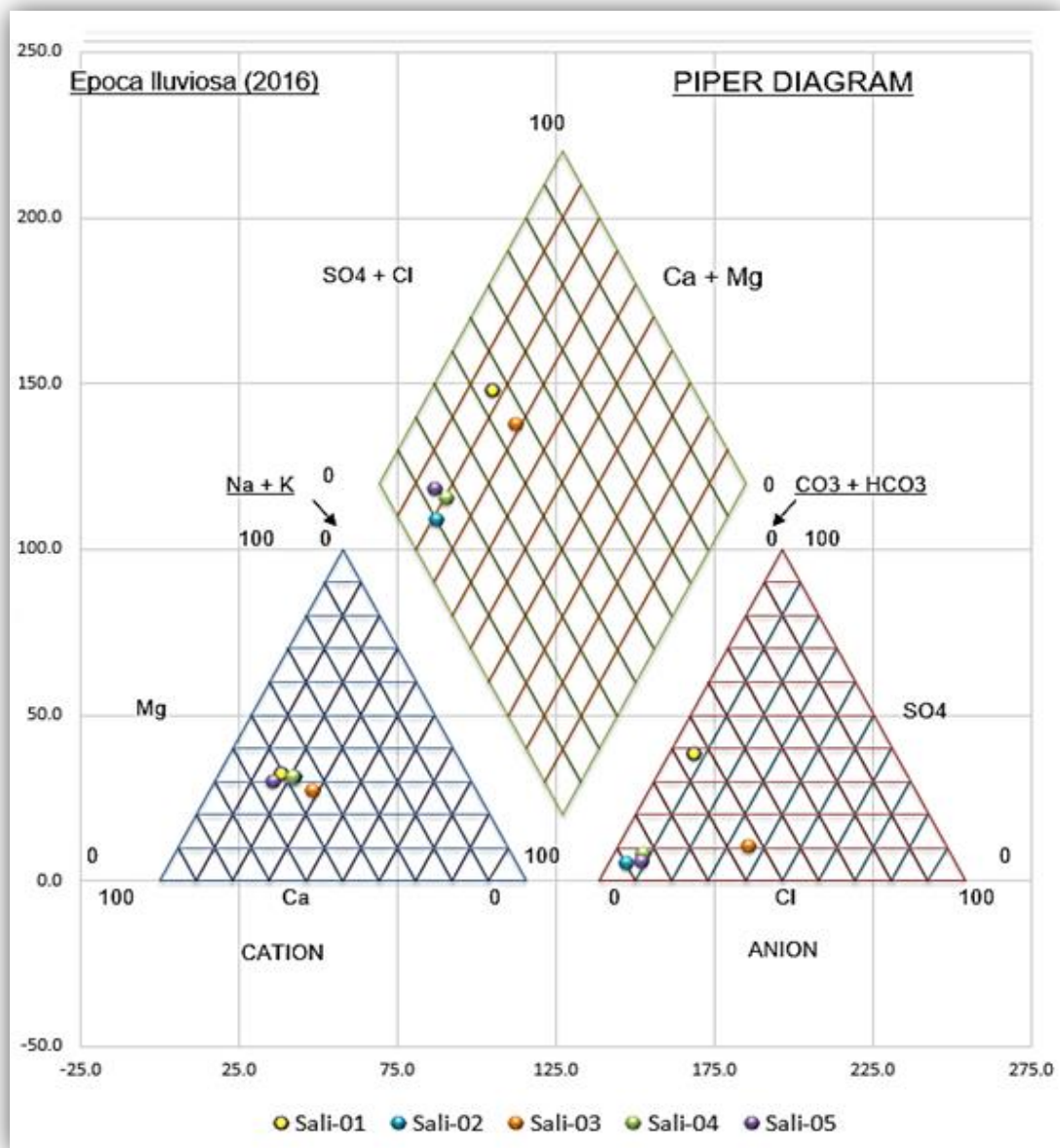


Figura 4.68 Diagrama de Piper para la época lluviosa.

Fuente: EASY\_QUIM

### 4.3.3.2 Análisis de resultados del diagrama de Stiff para época seca y lluviosa

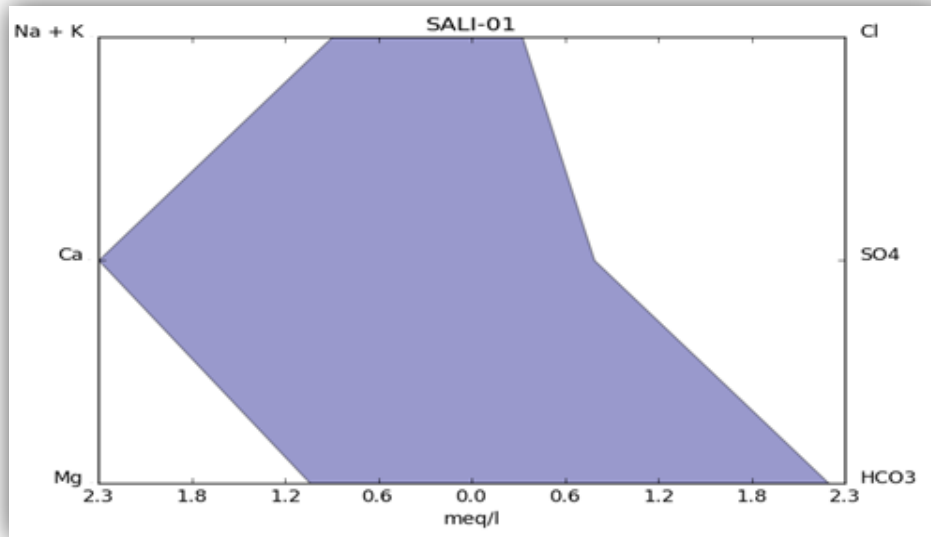


Figura 4.69 Diagrama de Stiff para pozo Las Marías (SALI-01) época seca

Fuente: Elaboración propia mediante la página Hatarichem

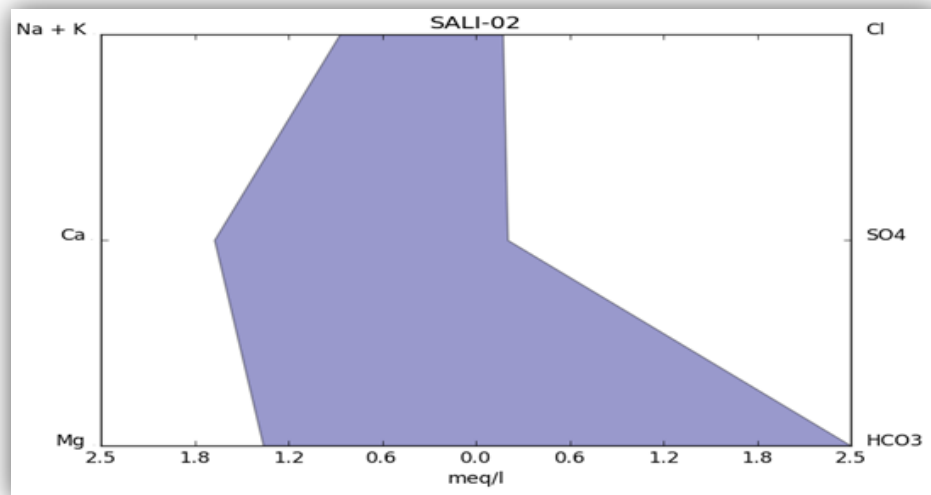


Figura 4.70 Diagrama de Stiff para pozo San Juan (SALI-02) época seca

Fuente: elaboración propia mediante la página Hatarichem

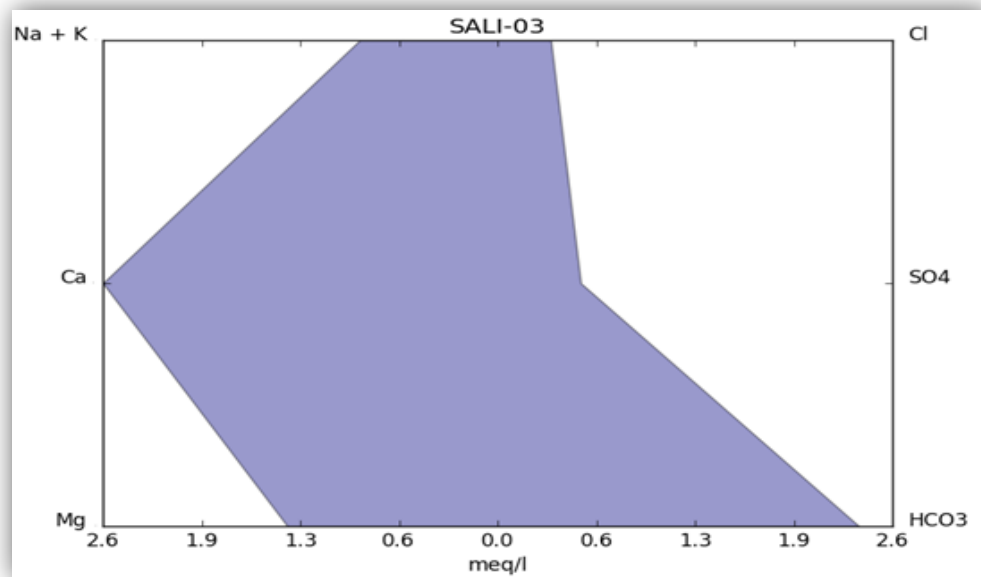


Figura 4.71 Diagrama de Stiff para pozo Galicia (SALI-03) época seca

Fuente: Elaboración propia mediante la página Hatarichem

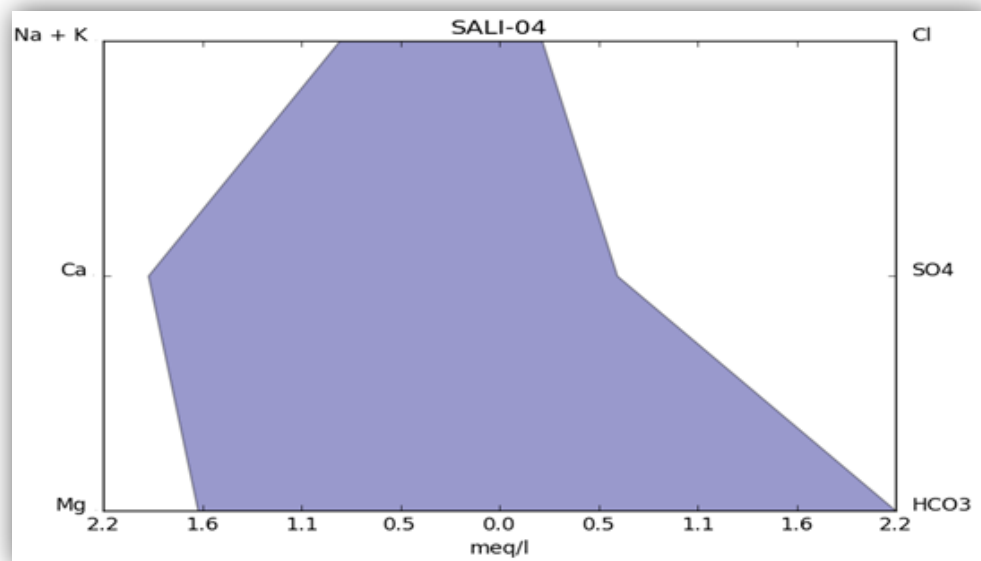


Figura 4.72 Diagrama de Stiff para pozo San José (SALI-04) época seca

Fuente: Elaboración propia mediante la página Hatarichem

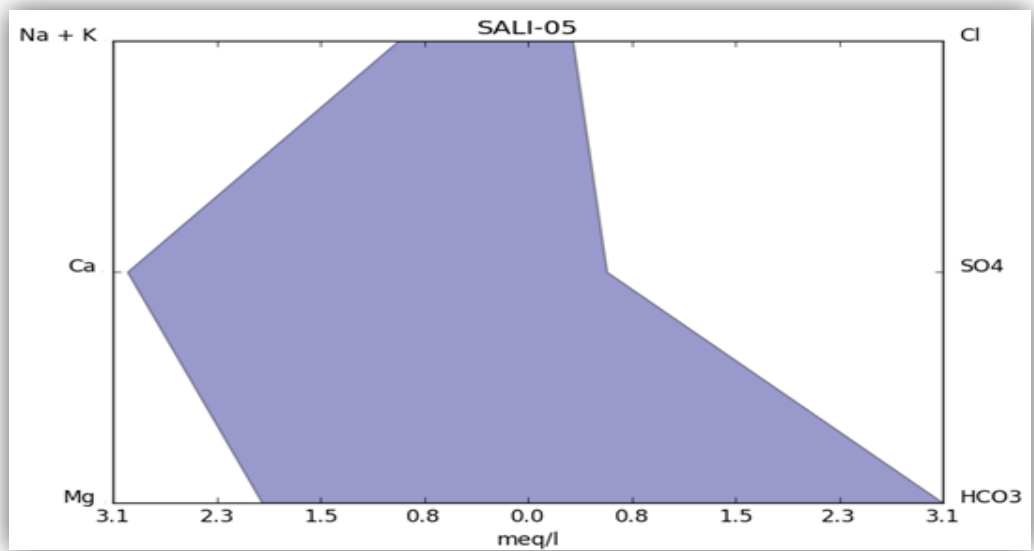


Figura 4.73 Diagrama de Stiff para pozo El Rosario (SALI-05) época seca

Fuente: elaboración propia

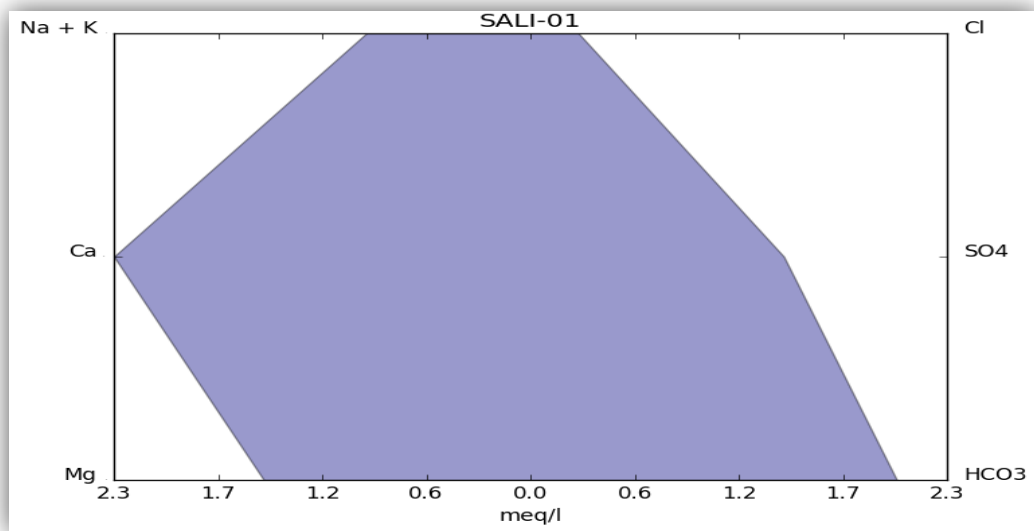


Figura 4.74 Diagrama de Stiff para pozo Las Marías (SALI-01) época lluviosa

Fuente: Elaboración propia mediante la página Hatarichem

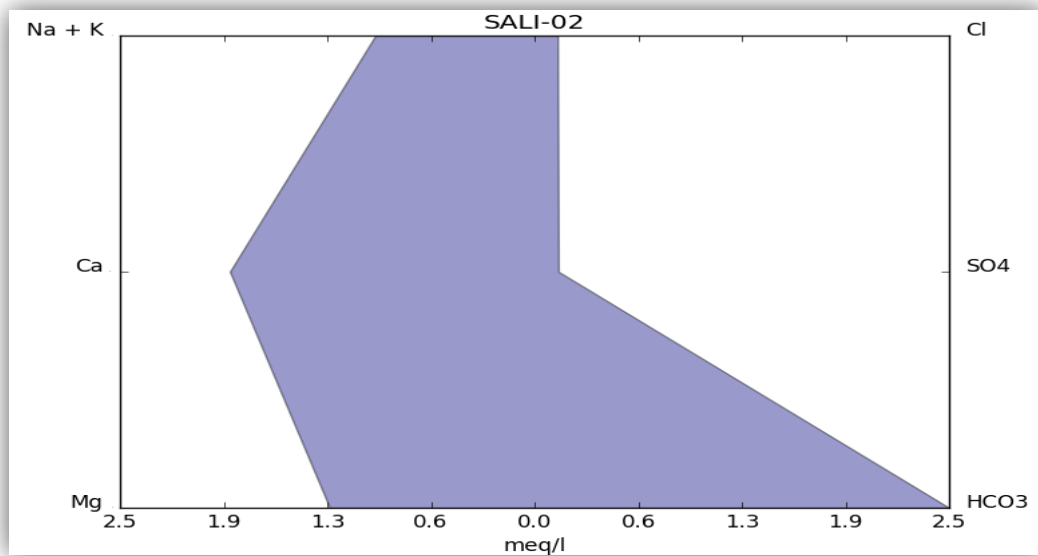


Figura 4.75 Diagrama de Stiff para pozo San Juan (SALI-02) época lluviosa

Fuente: Elaboración propia mediante la página Hatarichem

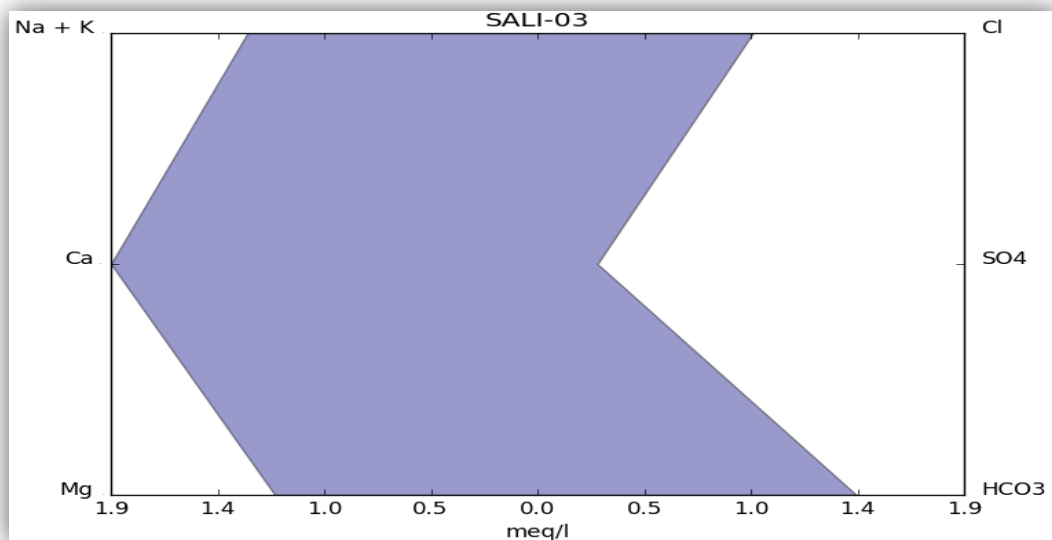


Figura 4.76 Diagrama de Stiff para pozo Galicia (SALI-03) época lluviosa

Fuente: Elaboración propia mediante la página Hatarichem

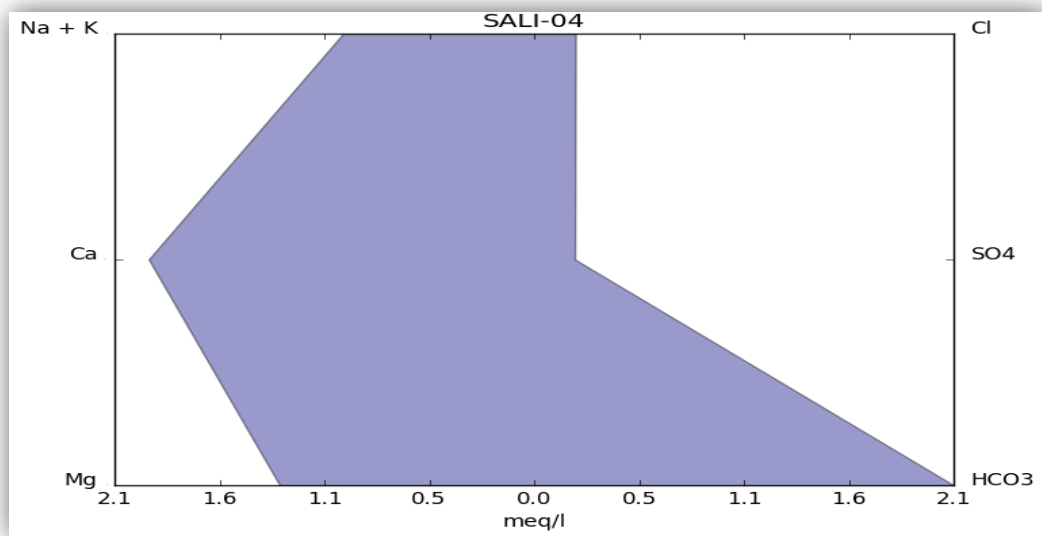


Figura 4.77 Diagrama de Stiff para pozo San José (SALI-04) época lluviosa

Fuente: Elaboración propia mediante la página Hatarichem

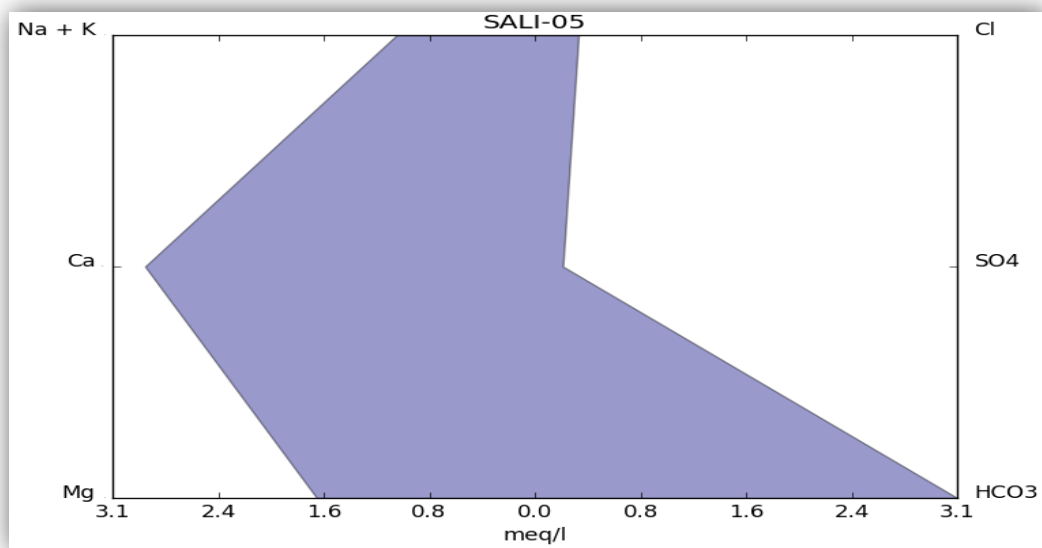


Figura 4.78 Diagrama de Stiff para pozo El Rosario (SALI-05) época lluviosa

Fuente: Elaboración propia mediante la página Hatarichem



Según los diagramas de Stiff para cada uno de los pozos expuestos anteriormente tanto para época seca como para la época lluviosa podemos observar que los cinco poseen una clasificación Bicarbonatada Cálcica.

#### 4.3.3.3 Análisis de resultados del pH del agua subterránea

En cuanto a el potencial de hidrogeno (pH), podemos observar que el resultado para época seca nos proporciona valores de que varían de 6.97 a 7.33 por ello según la clasificación mostrada en la escala de pH (Figura 2.1), para el valor de 7.15 (SALI-01), 7.21 (SALI-02), 7.29 (SALI-03), 7.33 (SALI-04), los podemos clasificar como un pH neutro, en cuanto al potencial de hidrogeno (pH), para época lluviosa nos proporciona valores de que varían de 6.88 a 7.62 por ello según la clasificación mostrada en la escala de pH (Figura 2.1) para el valor de 7.24 (SALI-01), 7.10 (SALI-02), 7.62(SALI-03), 7.23 (SALI-04), también los podemos clasificar como un pH neutro (Figura 4.79).



Figura 4.79 Escala de pH

Fuente: (<http://www.carbotecnia.info/encyclopedia/que-es-el-ph-del-agua/>)

## 4.4 MODELO CONCEPTUAL

El modelo conceptual del acuífero ha sido elaborado en base a la información geológica, hidrogeológica y las características fisicoquímicas recolectadas en campo, además el modelo buscará tener una idea precisa del comportamiento del flujo subterráneo y la vulnerabilidad del acuífero, información que será sustentada con el mapa de recarga y el mapa de vulnerabilidad acuífera, generados con la ayuda del Software ArcGIS. Todo lo antes expuesto estará contenido en la delimitación de la zona de estudio, que está dada por una microcuenca de área igual a 66.23 km<sup>2</sup>, en la cual el Municipio de San Sebastián Salitrillo es el principal punto de interés de nuestro estudio. A manera de profundizar en lo que es la creación de este modelo conceptual preliminar, primeramente se determina la geología del lugar, basándonos en el mapa Geológico de El Salvador para la zona de estudio (Figura 3.5), se puede afirmar que toda la zona pertenece a la Formación San Salvador, la cual se subdivide en distintos miembros geológicos que la conforman, pero el miembro geológico de mayor presencia es s3'a tabla (3.1), el cual según Wiesemann en el año 1978 lo describe como una secuencia de piroclastitas ácidas y epiclastitas volcánicas (Tobas color café), cabe mencionar que para la zona de estudio la conforman otras cinco miembros geológicos, por lo que se puede afirmar que los niveles de profundidad del acuífero varían según el área y la geológica presente. En cuanto a la hidrografía del lugar y por su topografía el municipio únicamente cuenta con un río conocido por el nombre de Amulunga, río que

está ubicado al Norte, a las afueras del municipio de San Sebastián Salitrillo, sirviendo como descarga de las aguas que se infiltran por el fenómeno natural de precipitación y es esta última la principal fuente de recarga en la zona de estudio debido a que no se tiene evidencia que la recarga ocurra por la presencia de algún río, en cuanto a registros de precipitación es lógico afirmar que se dan para la época lluviosa, específicamente entre los meses de Mayo a Octubre, aseveración que sustentamos debido a los registros presentados entre los años del 2010 al 2016 los cuales pueden encontrarse en la sección, 4.1.2.2 Datos de Precipitación. La importancia de establecer el flujo que sigue el acuífero en estudio, radica en conocer la zona de mayor recarga y aquellas más vulnerables, como ya antes se mencionó las aguas infiltradas van a descargar al río Amulunga y con perfiles elaborados por la información piezométrica obtenida del monitoreo de pozos presentados en la tabla (4.1) establecimos la dirección del flujo. A continuación, se muestra la ubicación de los pozos en la zona de estudio (Figura 4.9), así como el perfil de niveles de aguas subterráneas (Figura 4.7) y la elevación del terreno, para el mes de septiembre que es cuando más vulnerables es el acuífero por estar más somero en comparación a otros meses en los que los niveles del agua se ven reducidos, con esta información antes mencionada se puede afirmar que el flujo del agua en el acuífero está orientado de Este a Oeste según la interpretación de los pozos muestreados.

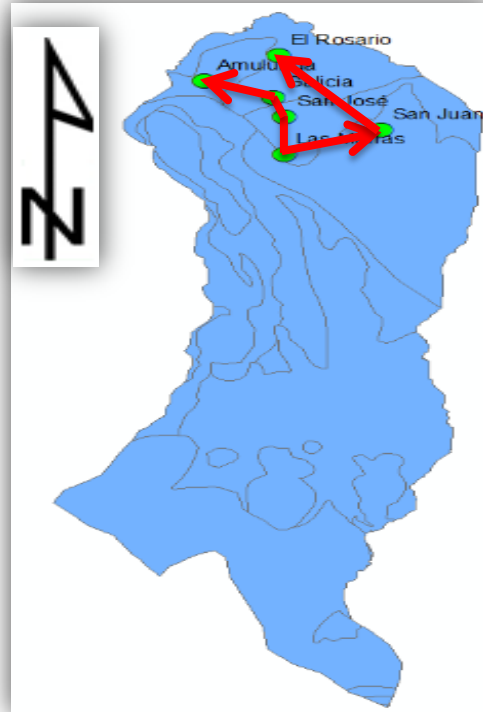


Figura 4.9 Dirección de perfiles

Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana

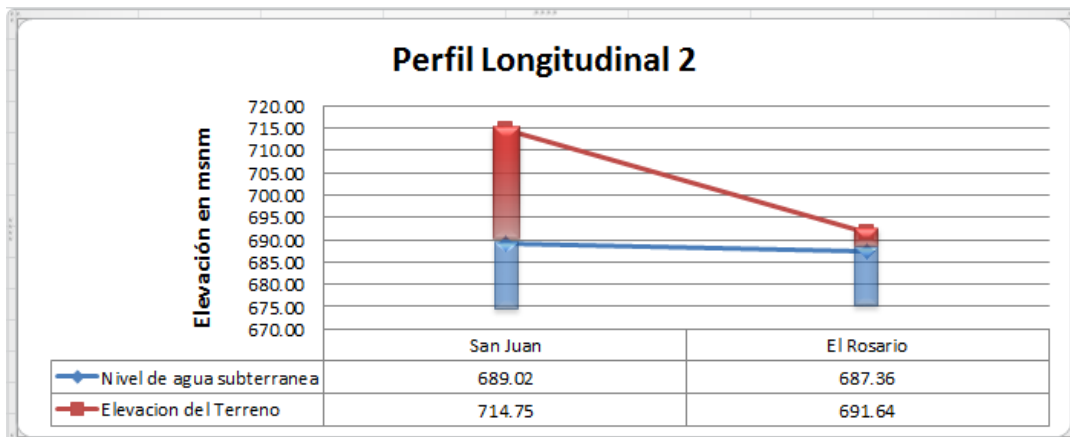


Figura 4.7 Perfil Hidrogeológico Longitudinal 2

Fuente: Elaboración propia

De la información Hidrogeológica de la zona, depende en gran medida el análisis anterior del movimiento del flujo de las aguas subterráneas ya que Según el mapa hidrogeológico (Figura 3.6), el acuífero al que pertenece el municipio de San Sebastián Salitrillo corresponde a la unidad hidrogeológica, Acuífero Poroso de Gran Extensión y Productividad Media, unidad que la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), define como sedimentos aluviales (Arenas, gravas, etc.) que han sido transportados por los ríos, desde la parte alta de los cerros hasta la planicie. Los materiales de esta unidad presentan una conductividad hidráulica de media a baja, la que depende de la granulometría, del grado de limpieza (Contenido de limo y arcilla) y del grado de compactación que presentan los materiales.

De acuerdo con el análisis Hidrogeoquímico mostrado en nuestro estudio y para los resultados obtenidos de estos, del diagrama de Piper se puede inferir que el agua que se muestreo en los pozos más al sur del municipio, es la misma agua que se encuentra en los pozos con ubicación más al norte de la zona de estudio dándonos una clasificación de agua Bicarbonatada cálcica para todo el acuífero. Así como también en lo que respecta a las variaciones de pH para las épocas seca (6.97 a 7.33) y lluviosa (6.88 a 7.62), para los pozos monitoreados se puede observar que son muy similares variando muy poco entre época seca y lluviosa, con los que podemos decir que la mayoría de los pozos presenta un pH neutro (Figura 4.80) lo que nos indica que el agua es adecuada para el consumo humano, aun aquellas que presentaron un nivel de pH ligeramente ácido están dentro de los límites de las aguas potables, además es

importante mencionar que la conductividad eléctrica (CE), la cual si bien es una característica física, caen el análisis de caracterización Hidrogeoquímica para los datos presentados en las tablas (4.9 y 4.10) podemos concluir que para todos los pozos monitoreados las aguas están dentro del límite de aguas dulces continentales que presentan el rango de Conductividad Eléctrica de 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 1,500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

En base a toda la información presentada anteriormente se muestra el mapa Hidrogeológico de la zona de estudio (Figura 4.80), en el cual se detalla las zonas de mayor recarga y descarga, de las aguas que infiltran hasta llegar al acuífero. Para poder determinar estas zonas fue necesario trabajar en software de sistemas de información geográfica y con los datos proporcionados por el MARN de las estaciones pluviométricas más cercanas a la zona de interés y mediante los coeficientes de infiltración encontrados se pudo identificar las zonas de mayor recarga y la zona de descarga, la cual se determinó mediante la información piezometría que se tenía para los diferentes pozos monitoreados.

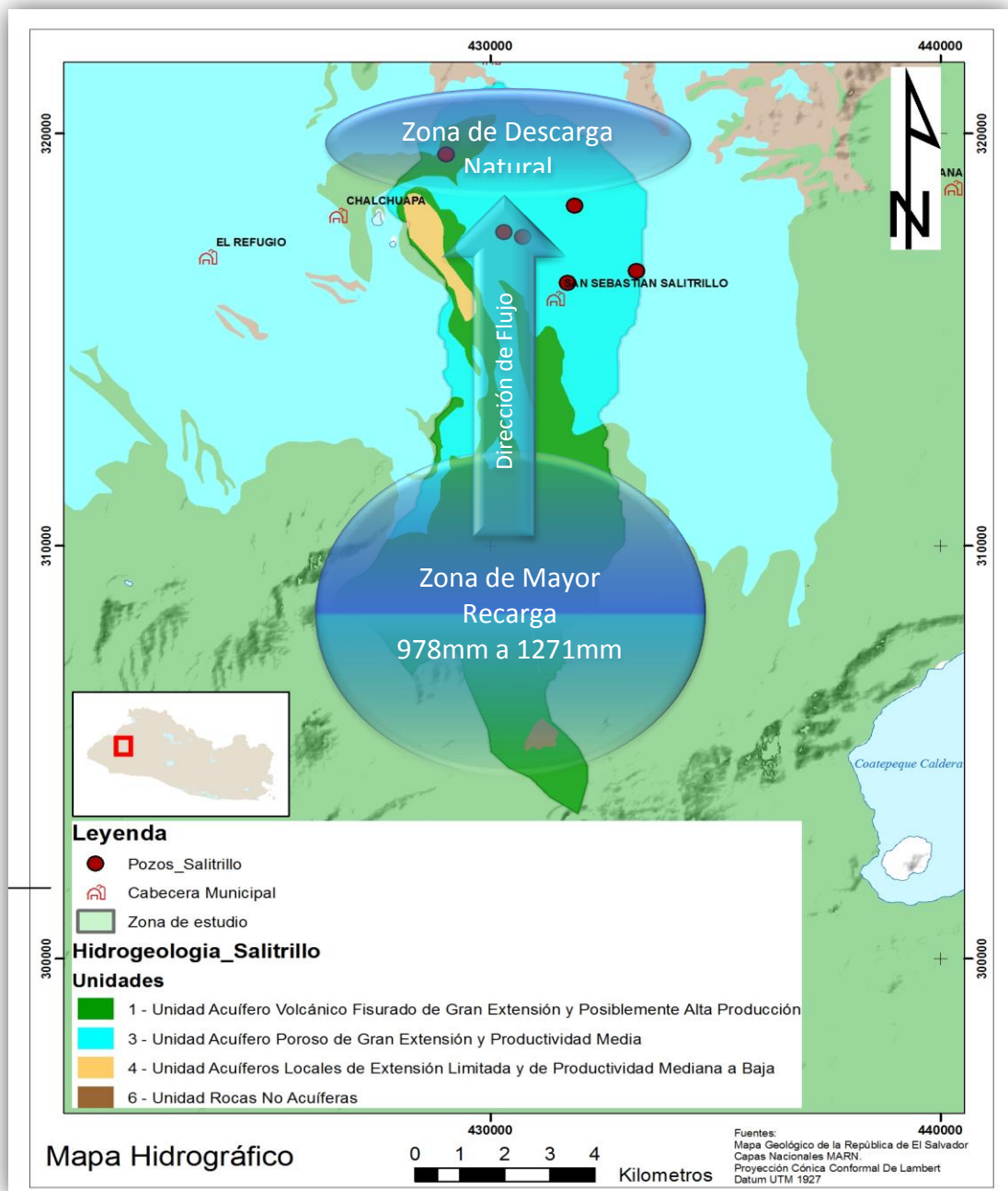


Figura 4.80 Identificación de Zona de Mayor Recarga y de Descarga.

Fuente: Mapa base geológico elaborado por la Misión Geológica Alemana

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 CONCLUSIONES**

##### **5.1.1 Conclusiones sobre el análisis químico del agua**

En el análisis hidrogeoquímica de la composición iónica del agua de la red de pozos se ha determinado que el agua está dentro de la clasificación bicarbonatada cálcica.

El pH del agua para época seca oscila entre un mínimo de 6.97 en el pozo SALI-05, ubicado en el sector de Los Amates, y un máximo de 7.33 en el pozo SALI-04, también ubicado en el sector de Los Amates.

El pH del agua para época lluviosa oscila entre un mínimo de 6.88 en el pozo SALI-05, ubicado en el sector de Los Amates, y un máximo de 7.62 en el pozo SALI-03, también ubicado en el sector de Los Amates.

La dureza para época seca varía entre 154.77 y 245.12 mg/l de CaCO<sub>3</sub> y para época lluviosa varia 154.58 y 224.7 mg/l de CaCO<sub>3</sub>. De acuerdo a la clasificación de Custodio y Llamas (1983) el agua es de los pozos se puede clasificar como "Moderadamente dura" a "Muy dura". En todos los casos la dureza se encuentra dentro del rango permitido por la Norma Oficial Salvadoreña (500 mg/L).

En cuanto a la conductividad para época seca el valor mínimo de es 358.5  $\mu$ siemens/cm y un máximo de 510.5  $\mu$ siemens/cm y para la época lluviosa tenemos el valor máximo de 517  $\mu$ siemens/cm y un valor mínimo de 365  $\mu$ siemens/cm. El Límite máximo



permitido de conductividad para agua potable según Norma Oficial Salvadoreña 1600  $\mu$ siemens/cm (NSO 13.07.01.99).

De los resultados de los parámetros analizados podemos decir que las características químicas indican que no hay cambios significativos de época seca a lluviosa, y además todos están dentro de los límites permitidos por la Norma Oficial Salvadoreña.

### **5.1.2 Conclusiones sobre la recarga potencial del acuífero**

El valor de recarga potencial anual obtenido a través de la aplicación de la metodología Schosinsky corresponde a 62, 348, 426 m<sup>3</sup>/año para la zona en estudio, cuyo procedimiento de cálculo se muestra en el anexo IV-IV.

En cuanto al municipio de San Sebastián Salitrillo, se observó del mapa de recarga que los cantones que presentan mayor recarga son: San Luis y Santa Bárbara ubicados al sur del municipio, ya que los rangos de recarga en los que se encuentran son 980.1 – 1271 y 604.1 – 980 mm/año, que representa la mayor recarga de la zona de estudio, cabe señalar que el municipio está muy poco poblado ya que es un municipio productor de café mayormente, entonces la mayor parte de este es vegetación, por lo que resulta que la recarga al acuífero es significativa en todo el municipio, pero en los últimos años debido al aumento de la población, en este municipio han comenzado a surgir proyectos de urbanización que impermeabilizan el suelo, reduciendo la capacidad de infiltración y en consecuencia la recarga.

### **5.1.3 Conclusiones sobre la vulnerabilidad del acuífero**

En el resultado del mapa de vulnerabilidad de la zona de estudio obtenido implementando el método GOD, se puede observar que se obtuvieron dos categorías media en la parte Sur y alta en la parte Norte, lo que nos indica que en la parte donde existe vulnerabilidad media el acuífero se podría contaminar por lixiviados o por descargas continuas de contaminantes, en cuanto a la parte de vulnerabilidad alta es lógico pensar que será más fácil de contaminar por lo tanto es conveniente tener en cuenta esto, para tomar decisiones que protejan el acuífero.

Ya analizando el municipio, del mapa de vulnerabilidad se observa que los cantones con vulnerabilidad media son: Santa Bárbara, San Luis, Santa Rosa y parte de Los Amates, mientras que la otra parte del cantón Los Amates se encuentra con vulnerabilidad alta.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Al concluir este trabajo de investigación y considerando todos los objetivos alcanzados de la misma, se pueden hacer diversas recomendaciones para efecto de un mayor aprovechamiento de este trabajo escrito.

- Para futuros estudios de análisis químicos que se le brinden a los pozos del municipio de San Sebastián Salitrillo, es conveniente contar con un mayor número de pozos para monitoreo y de esta manera tener un banco de información más representativo de la zona.

- Que esta investigación sea de ayuda para la protección del acuífero y para aquellas zonas en las que las aguas subterráneas sean más vulnerables a la contaminación intrínseca.
- Que por parte de las entidades correspondientes se continúe con el monitoreo de los niveles piezométricos para los diferentes pozos del municipio para tener un registro del comportamiento del acuífero en épocas secas como lluviosas, para hacer una gestión adecuada del recurso hídrico.
- Se recomienda impulsar medidas de protección al acuífero con el fin de mantener las características obtenidas del muestreo de la red de pozos en el municipio, ya que los datos arrojados para nuestro estudio resultaron satisfactorios, es decir el agua es apta para el consumo humano.
- Es importante recomendar a la municipalidad que la zona de descarga (Manantial Amulunga) de las aguas subterráneas, la cual está ubicada al Norte del municipio de San Sebastián Salitrillo, tengan mayor protección ya que los niveles piezométricos para esta zona muestran que las aguas se encuentran someras y corren mayor riesgo de contaminación, a la vez se restrinjan las actividades potencialmente contaminantes en la zona.
- Que los mapas de Recarga de acuífero y el mapa de la Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero sean tomados en cuenta por la municipalidad para el desarrollo territorial del municipio.

- Que estudios como este se lleven a cabo en todo el territorio de El Salvador para conocer la calidad y las zonas de recarga de las aguas subterráneas de nuestro país con el fin de proteger esta zonas.

# BIBLIOGRAFÍA

## TESIS

- José Isidro García, Noel Borromeo López, José Ernesto Muñoz (2011): Aplicación De La Prospección Geofísica Utilizando El Método Schlumberger Para La Exploración Del Agua Subterránea En Cantón Los Magueyes, Colonia Santa Lucia, Municipio De Ahuachapán.
- Judith Mireya Rivas, Amanda Mercedes Rivas (2009): “Identificación, Caracterización Y Lineamientos Para El Manejo De Zonas De Recarga Hídrica En El Municipio De Dulce Nombre De María, Chalatenango.”
- César Armando Alvarado (2007): “Modelo Conceptual Y Vulnerabilidad Intrínseca Del Acuífero Quezaltepeque-Nejapa”.
- Gonzalo De Jesús Mena, Juan Orlando Montes (2010): Evaluación De La Vulnerabilidad De Las Aguas Subterráneas Aplicada Al Antiguo Botadero De Desechos Sólidos De Mariona, Departamento De San Salvador.
- Cecilia Haydee Gallardo Carpio (2009): Determinación De La Calidad Del Agua Que Abastece A Cuatro Comunidades Del Cantón El Almendro Del Municipio De Jucuarán, Usulután.

## OTRAS FUENTES

- Gunther Schosinsky N. (2006): “Calculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos”, Revista Geológica de América Central.

- Villón Béjar, Máximo (2002): Hidrología, Ed. Villón, Lima - Perú.
- Chereque Morán, Wendor (1989): Hidrología para estudiantes de ingeniería civil, Perú.
- Bosque Sendra, J. (2000): Sistemas de Información Geográfica, Ed. Rialp, Madrid.
- Burrough, P.A. y McDonnell, R.A. (2000): “Principles of Geographical Information Systems Oxford University Press”, Oxford.
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W. (2001): “Geographic Information Systems and Science John Wiley & sons”, Chichester.
- Maguire, D.J.; Goodchild, M.F. and Rhind, D.W. (Eds.) (1991): “Geographical Information Systems: Principles and Applications, John Wiley & sons”, Chichester ([www.wiley.co.uk/wileychi/gis/resources.html](http://www.wiley.co.uk/wileychi/gis/resources.html)).
- Taboada González, J.A. y Cotos Yáñez, J.M. (2005): Sistemas de información medioambiental, Ed. Netbiblo.
- Worboys, M.F. & Duckham, M. (2004): GIS: A Computing Perspective, CRC Press.
- Carlos Alberto Sereviche Sierra, et al (2013): Manual de Métodos analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos básicos en aguas
- ANDA. (2008a). Mapa Hidrogeológico de la República de El Salvador.
- APHA-AWWA-WEF (2005) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21th Edition. New York, 2-27 a 2-29, método 2320.

- EPA (2007) Part III, 40 CFR, Part 122, 136 et al. Guidelines Establishing Test Procedures for the Analysis of Pollutants Under the Clean Water Act.
- CUSTODIO, Emilio. Hidroquímica. En: CUSTODIO, Emilio y LLAMAS, Manuel. Hidrología subterránea, segunda edición. Barcelona: Ediciones Omega, 2001. p 1007 – 11095.
- DE FREITA, Francisco. Cronel Armando. Caracterización Hidrogeoquímica De Las Aguas Subterráneas Del Acuífero Mesa – Las Piedras. Congreso latinoamericano de Hidrogeología, Venezuela 2010.
- Comisión Docente Curso Internacional de Hidrología Subterránea Roser Escuder, Josep Fraile, Salvador Jordana, Fidel Ribera, Xavier Sánchez-Villa, Eric Vásquez -Suñé (2009): Conceptos básicos de hidrología subterránea.

#### PUBLICACIONES DE INTERNET

- <http://www.carbotecnia.info/encyclopedia/que-es-el-ph-del-agua/>
- <http://www.uprm.edu/biology>
- <http://www.fundacionbotin.org>
- <http://www.aguaysig.com>
- <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx>
- <https://pendientedemigracion.ucm.es/info>
- <http://ri.ues.edu.sv/458/1/10136842.pdf>

- <http://gea.ciens.ucv.ve/geoquimi/hidro/wpcontent/uploads/2011/07/fundamentales>
- <http://gea.ciens.ucv.ve/geoquimi/hidro/wpcontent/uploads/2011/07/.pdf>
- <http://revistas.ufpr.br/hidrogeologia/article/download/2652/2193>
- <http://www.jmarcano.com/nociones/ciclo1.html>
- <http://www.snet.gob.sv/meteorologia/registro.php>
- <http://Miliarium.com>
- <https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>
- <http://hatarichem.gidahatari.com>



## **ANEXOS**

ANEXO IV-III  
SALI-01



SALI-02



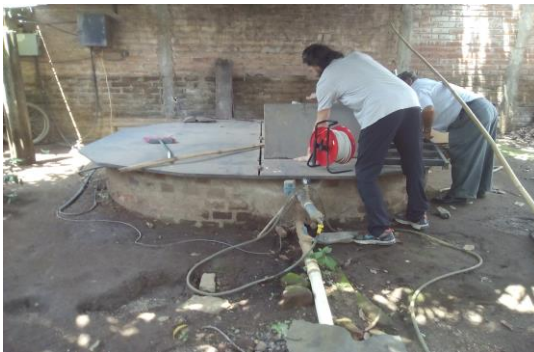
SALI-03



SALI-04



SALI-05



SALI-06



ANEXO IV-IV

El cálculo de la recarga potencial anual se realizó de la siguiente manera, se determinaron todas las áreas a través del programa ArcGis, de cada una de las zonas que contengan las mismas características presentes en las tablas 4.20, 4.21 y 4.22 y luego se multiplicaron por su respectivo valor de recarga mostrado en la tabla 4.26, el resultado se muestra a continuación.

	IA (m <sup>2</sup> )	IB (m <sup>2</sup> )	IC (m <sup>2</sup> )	ID (m <sup>2</sup> )
<b>Total</b>	20,077,775	5,293,003	4,398,318	202,373

	IIA (m <sup>2</sup> )	IIB (m <sup>2</sup> )	IIC (m <sup>2</sup> )	IID (m <sup>2</sup> )	IIE (m <sup>2</sup> )
<b>Total</b>	1,989,799	2,126,257	18,821,377	16,581,476	477,188

	IIIA (m <sup>2</sup> )	IIIB (m <sup>2</sup> )	IIIC (m <sup>2</sup> )
<b>Total</b>	10,008,159	2,827,730	1,459,805

$$RECARGA (IA) = 20077775 \text{ m}^2 * 1.27101 \frac{\text{m}}{\text{año}} = 25,519,052.8 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

$$RECARGA (IB) = 5293003 \text{ m}^2 * 0.97895 \frac{\text{m}}{\text{año}} = 5,181,585.287 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

$$RECARGA (IC) = 4398318 \text{ m}^2 * 1.26806 \frac{\text{m}}{\text{año}} = 5,577,331.123 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

$$RECARGA (ID) = 202373 \text{ m}^2 * 0.07136 \frac{\text{m}}{\text{año}} = 14,441.337 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

$$RECARGA (IIA) = 1989799 \text{ m}^2 * 0.60581 \frac{\text{m}}{\text{año}} = 1,205,440.132 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

$$RECARGA (IIB) = 2126257 \text{ m}^2 * 0.07409 \frac{\text{m}}{\text{año}} = 157,312.111 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

$$RECARGA (IIC) = 18821377 \text{ m}^2 * 0.08587 \frac{\text{m}}{\text{año}} = 1,616,191.643 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

$$RECARGA (IID) = 16581476 \text{ m}^2 * 0.16211 \frac{\text{m}}{\text{año}} = 2,688,023.074 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

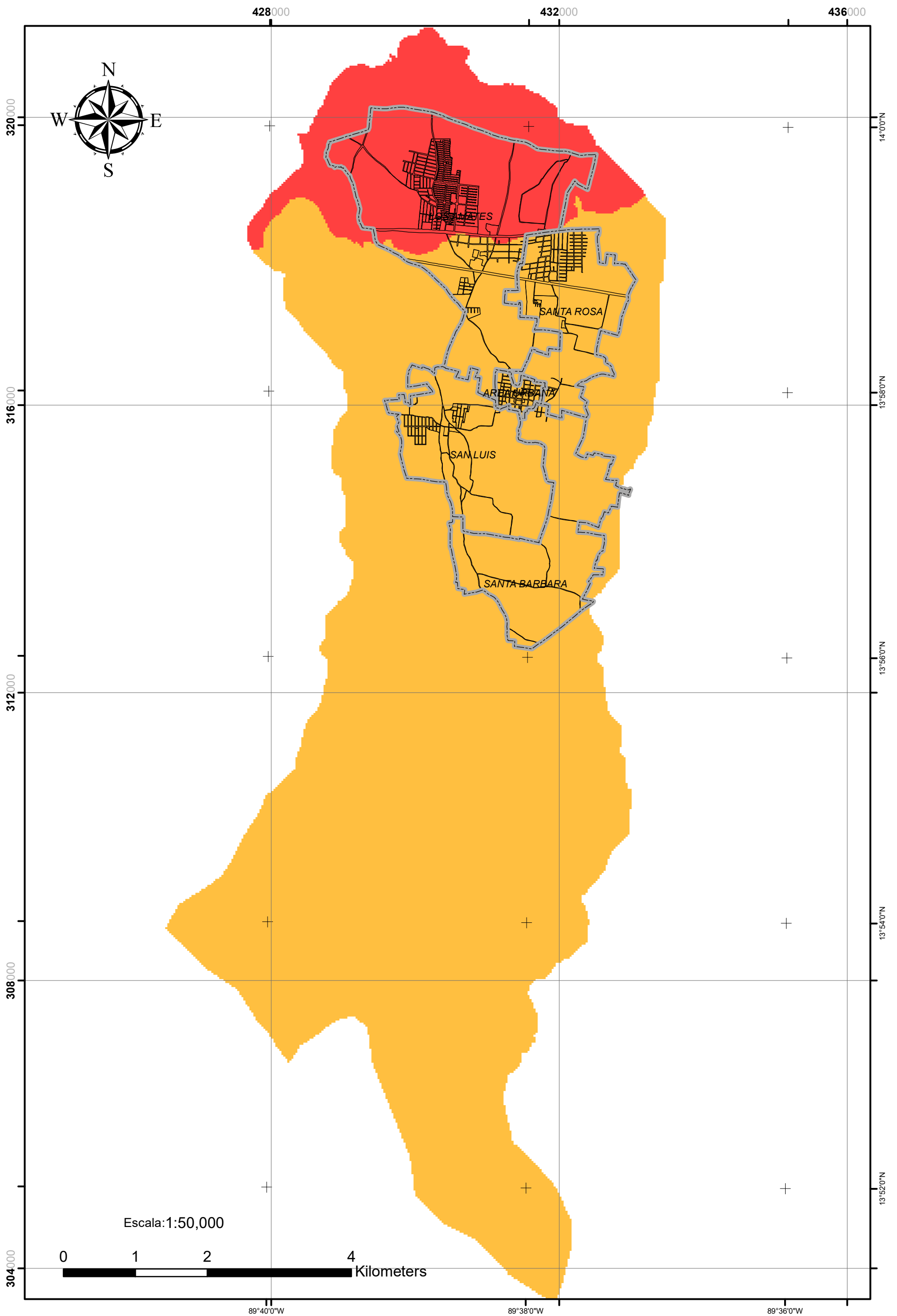
$$RECARGA (IIE) = 477188 \text{ m}^2 * 0.52743 \frac{\text{m}}{\text{año}} = 251,683.267 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$


$$RECARGA (IIIA) = 10008159 \text{ m}^2 * 1.15552 \frac{\text{m}}{\text{año}} = 11,564,627.89 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

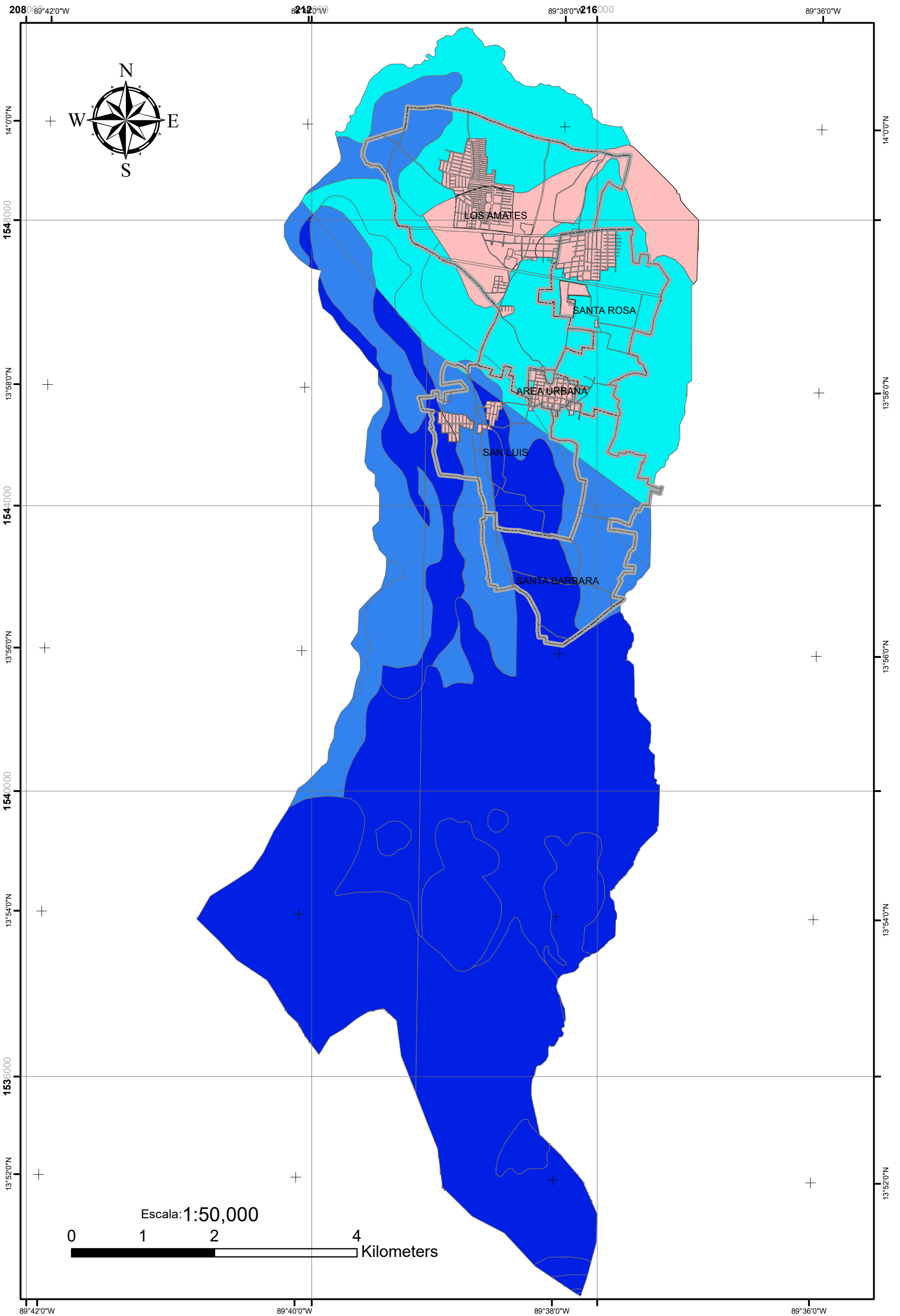
$$RECARGA (IIIB) = 2827730 \text{ m}^2 * 0.85457 \frac{\text{m}}{\text{año}} = 2,416,493.226 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

$$RECARGA (IIIC) = 1459805 \text{ m}^2 * 1.15175 \frac{\text{m}}{\text{año}} = 1,681,330.409 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

El valor de la recarga anual total se obtuvo sumando todos los resultados obtenidos anteriormente dando una recarga potencial total de 62, 348, 426 m<sup>3</sup>/año.



 <p><b>Universidad de El Salvador</b> Hacia la libertad por la cultura</p>	<p>MAPA DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA DEL ACUIFERO ANEXO IV-I</p>	<p>UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL TRABAJO DE GRADUACION: CARACTERIZACION HIDROGEOLOGICA DEL MUNICIPIO DE SAN SEBASTIAN SALITRILLO SANTA ANA PRESENTA: WUILLIAM JHOVANNY ANAYA MELENDEZ FLAVIO AMILCAR LINARES LOPEZ KATYA ALEJANDRA MENDEZ LUCERO</p>	<p><b>SIMBOLOGIA</b> <b>Mapa de Vulnerabilidad</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: orange; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Media</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: red; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Alta</li> <li><span style="display: inline-block; border-bottom: 1px dashed gray; width: 20px; margin-right: 5px;"></span> Limite de Cantones</li> <li><span style="display: inline-block; border-bottom: 1px solid gray; width: 20px; margin-right: 5px;"></span> Limite de Manzanas</li> </ul>
---	--	---	--



MAPA DE RECARGA  
POTENCIAL DEL ACUIFERO  
ANEXO IV-II

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
TRABAJO DE GRADUACION:  
CARACTERIZACION HIDROGEOLOGICA  
DEL MUNICIPIO DE SAN SEBASTIAN SALITRILLO SANTA ANA  
PRESENTA:  
WUILLIAM JHOVANNY ANAYA MELENDEZ  
FLAVIO AMILCAR LINARES LOPEZ  
KATYA ALEJANDRA MENDEZ LUCERO

SIMBOLOGIA	
Recarga Potencial	
RECARGA	
	71.4 - 121.5
	121.6 - 350.6
	350.7 - 604.0
	604.1 - 980.0
	980.1 - 1271.0
	LIMITE DE CANTON