

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS  
ESCUELA CENTROAMERICANA DE GEOLOGÍA

***PRÁCTICA DIRIGIDA PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
LICENCIATURA EN GEOLOGÍA***

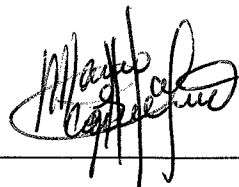
*CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL  
VERTEDERO DE RESIDUOS DE GOLFITO, PUNTARENAS.*

CARLOS DAVID ARAYA QUIRÓS

CIUDAD UNIVERSITARIA RODRIGO FACIO

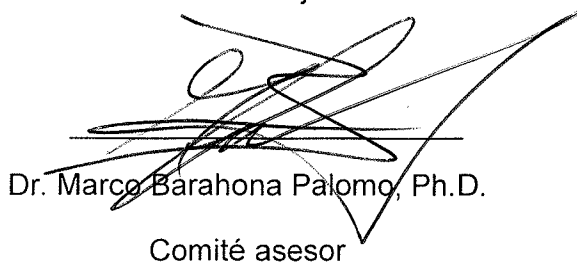
2017

Esta práctica dirigida fue revisada y aceptada por el Tribunal de trabajo final de Graduación como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Geología:



MSc Mario Arias Salguero

Director Trabajo final



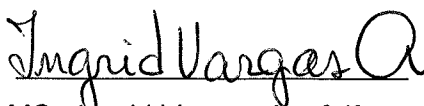
Dr. Marco Barahona Palomo, Ph.D.

Comité asesor



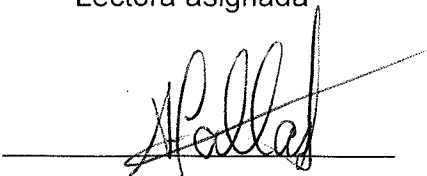
Dr. Maximiliano Garnier Villarreal, Ph.D.

Comité asesor



MSc Ingrid Vargas Azofeifa

Lectora asignada



Dr. Germán Vidaurre Fallas

Presidente del Tribunal examinador

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por permitirme culminar este proyecto.

A mis padres por su apoyo incondicional a lo largo de este proceso.

Al MSc Mario Arias Salguero, director de esta práctica dirigida por su ayuda y orientación brindada para la culminación de este documento.

A los miembros del Comité Asesor por sus valiosos aportes, comentarios y recomendaciones.

A los compañeros Mariel González Artavia, Hazel Barrantes, José Daniel López Oviedo, Juan Vargas y Ricardo Pastrana por su invaluable dedicación y apoyo durante el trabajo de campo efectuado para el desarrollo de esta investigación.

Al Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas y su personal, por apoyo y colaboración para la ejecución de este proyecto.

## Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	12
1.1 Problema .....	14
1.2 Justificación.....	14
1.3 Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo general .....	15
1.3.2 Objetivos específicos.....	15
1.4 Metodología.....	16
1.4.1 Actividades .....	16
1.4.2 Materiales y equipo.....	17
2. MARCO TEÓRICO .....	17
2.1 Balance hídrico .....	17
2.1.1 Metodología de Schosinsky (2006) .....	18
2.1.2 Zona de recarga acuífera.....	19
2.2 Hidrogeología.....	20
2.2.1 Definición de acuífero .....	20
2.2.2 Tipos de acuíferos.....	20
2.3 Vulnerabilidad hidrogeológica .....	21
2.3.1 Vulnerabilidad por metodología GOD .....	21
2.3.2 Riesgo a la contaminación.....	21
2.4 Métodos geofísicos .....	23
2.4.1 Resistividad eléctrica .....	23
2.4.2 Georadar (Ground Penetration Radar) .....	26
3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	28
3.1 Ubicación geográfica, topografía, actividades productivas .....	28
3.2 Hidrografía.....	28
3.2.1 Cuenca ríos Claro-Caracol .....	29
3.2.2 Microcuenca río Claro.....	29
3.2.3 Microcuenca Quebrada Manigordo .....	29
3.2.4 Microcuenca Quebrada Mina .....	30
3.2.4 Microcuenca del Río Caracol .....	30
3.3 Geomorfología .....	32

3.3.1	Formas de origen denudacional.....	32
3.3.2	Formas de origen fluvial.....	33
3.3.3	Formas de origen estructural.....	34
4.	GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	37
4.1	Geología Regional.....	37
4.1.1	Complejo ígneo Osa-Burica.....	37
4.1.2	Formación Fila de Cal.....	37
4.1.3	Formación Térraba.....	38
4.1.4	Depósitos Cuaternarios.....	39
4.2	Geología Local.....	41
4.2.1	Unidad de Areniscas finas Quebrada Manigordo .....	43
4.2.2	Unidad de Conglomerados Quebrada Mina.....	44
4.2.3	Unidad de Calizas Quebrada Tigra .....	46
4.2.4	Unidad de depósitos recientes.....	47
5.	BALANCE HÍDRICO DE SUELOS.....	50
5.1	Metodología de Schosinsky para balance hídrico de suelos.....	50
5.1.1	Meteorología .....	50
5.1.2	Cálculo de la evapotranspiración potencial.....	57
5.1.3	Pendiente del terreno .....	58
5.1.4	Uso de suelos .....	62
5.1.5	Profundidad de raíces .....	66
5.1.6	Fracción de lluvia retenida en el follaje.....	68
5.1.7	Características de suelos.....	70
5.1.8	Cálculo de la recarga potencial.....	90
6	PROSPECCIÓN GEOFÍSICA.....	104
6.1	Prospección geofísica por medio de Sondeos eléctricos verticales (SEVs).....	104
6.1.1	Resultados de los Sondeos eléctricos verticales realizados.....	107
6.2	Prospección geofísica en el sitio del botadero de basura de Golfito.....	121
6.2.1	Prospección por medio del radar de penetración del suelo (GPR).....	121
6.2.2	Prospección geofísica utilizando el dispositivo Ohmmapper .....	131
7.	MARCO HIDROGEOLÓGICO.....	134
7.1	Inventario de pozos y concesiones de agua .....	134

7.2 Modelo hidrogeológico conceptual .....	139
7.2.1 Unidades hidrogeológicas locales .....	143
7.3 Determinación de redes de flujo de agua subterránea.....	153
7.3.1 Unidad hidrogeológica La Esperanza .....	153
7.3.2 Unidad hidrogeológica Manigordo.....	156
8. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD HIDROGEOLÓGICA, FUENTES POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN Y RIESGO HIDROGEOLÓGICO.....	158
8.1 Valoración de Vulnerabilidad hidrogeológica.....	158
8.1.1 Análisis de vulnerabilidad hidrogeológica asociada a la Unidad hidrogeológica La Esperanza. ....	158
8.1.2 Análisis de vulnerabilidad hidrogeológica asociada a la Unidad hidrogeológica Manigordo.....	161
8.2 Identificación de fuentes potenciales de contaminación .....	164
8.2.1 Botadero Municipal de Golfito .....	164
8.2.2 Manejo de aguas negras en el poblado de la Esperanza.....	164
8.2.3 Contaminación por actividad pecuaria.....	165
8.2.4 Contaminación asociada a la presencia de cultivos extensivos .....	165
8.3 Análisis del riesgo a la contaminación .....	168
9. CONCLUSIONES .....	171
9.1 Generalidades del área de estudio.....	171
9.2 Contexto Geológico del área de estudio.....	172
9.3 Aplicación de balance hídrico de suelos.....	173
9.4 Prospección geofísica.....	174
9.5 Contexto hidrogeológico del área de estudio.....	175
9.6 Vulnerabilidad hidrogeológica, fuentes potenciales de contaminación y riesgo hidrogeológico.....	176
RECOMENDACIONES .....	177
LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	179
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	181
ANEXOS.....	187

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación del área de estudio. ....	13
Figura 2: Descripción del método GOD (tomado y modificado de Foster et al., 2002). ....	22
Figura 3: Método de evaluación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas (tomado y modificado de Foster et al., 2002). ....	23
Figura 4: Dispositivo geoelectrico, arreglo Schlumberger (Tomado de Arias, 2007). ....	24
Figura 5: Diagrama de funcionamiento del instrumento OhmMapper para la determinación de resistividad de un medio (Tomado y modificado de <a href="https://dl.sciencesocieties.org">https://dl.sciencesocieties.org</a> ). ....	25
Figura 6: Diagrama esquemático del funcionamiento del Georadar (GPR) como técnica de investigación del subsuelo (tomado y modificado de Daniels, 2004). ....	27
Figura 7: Delimitación de las subcuencas y microcuencas definidas para el área de estudio y ubicación de los principales cauces de la zona. ....	31
Figura 8: Mapa geomorfológico del área de estudio ....	36
Figura 9: Mapa geológico regional para el área de estudio ....	40
Figura 10: Mapa de afloramientos de roca visitados. ....	42
Figura 11: Mapa geológico Local del área de estudio. ....	48
Figura 12: Columna estratigráfica del área de estudio. ....	49
Figura 13: Perfil geológico del área de estudio ....	49
Figura 14: Mapa de ubicación estaciones meteorológicas. ....	51
Figura 15: Gráfico donde se muestra la distribución de la precipitación promedio mensual para el área de estudio. ....	53
Figura 16: Gráfico de temperaturas promedio para el área de estudio según los registros de la estación meteorológica Río Claro. ....	54
Figura 17: Distribución de la precipitación promedio anual, utilizada para la elaboración del balance hídrico de suelos. ....	56
Figura 18: Mapa de clasificación de pendientes en porcentaje para el área de estudio. ....	60
Figura 19: Mapa de factor de pendiente $K_p$ para el área de estudio. ....	61
Figura 20: Mapa de usos de suelo identificados en el área de estudio. ....	63
Figura 21: Mapa de $K_v$ para el área de estudio. ....	65
Figura 22: Mapa de distribución de la profundidad de las raíces para el área de estudio. ....	67
Figura 23: Mapa de distribución de la retención anual de lluvia en el follaje. ....	69
Figura 24: Distribución geográfica de cada una de las muestras de suelos colectadas ....	71
Figura 25: Mapa de texturas de suelos para el área de estudio. ....	73
Figura 26: Mapa de distribución de la densidad aparente de los suelos del área de estudio. ....	75
Figura 27: Mapa de distribución de porosidad de los suelos para el área de estudio. ....	77
Figura 28: Mapa de distribución de la capacidad de campo ....	78
Figura 29: Mapa de Distribución del punto de marchitez. ....	80
Figura 30: Distribución de las pruebas de infiltración realizadas en el área de estudio ....	82
Figura 31: Mapa de distribución de la infiltración promedio para el área de estudio ....	85
Figura 32: Mapa distribución del factor de infiltración por textura de suelo ( $K_{fc}$ ). ....	87
Figura 33: Mapa de coeficiente de infiltración ( $C_i$ ) para el área de estudio. ....	89

Figura 34: Mapa de precipitación que infiltra (Pi) anualmente para el área de estudio.....	92
Figura 35: Mapa de distribución de la evapotranspiración potencial real anual (ETPR).....	98
Figura 36: Mapa de distribución de la recarga potencial anual para el área de estudio. ....	100
Figura 37: Mapa de escorrentía superficial del área de estudio.....	103
Figura 38: Mapa de ubicación de los SEVs realizados.....	106
Figura 39: Mapa de ubicación de SEVs y pozos correlacionados .....	111
Figura 40: Gráficos obtenidos para los SEVs1-6. ....	112
Figura 41: Gráficos obtenidos para los SEVs 7-13.....	113
Figura 42: Mapa de ubicación de perfiles geoelectrónicos realizados. ....	115
Figura 43: Perfil geoelectrónico 1 (A-B).....	116
Figura 44: Perfil geoelectrónico 2 (C-D).....	117
Figura 45: Perfil geoelectrónico 3 (E-F).....	118
Figura 46: Perfil geoelectrónico 4 (G-H).....	119
Figura 47: Ubicación líneas de perfil realizadas como parte de la prospección geofísica en el botadero de basura.....	123
Figura 48: Radargrama obtenido mediante la aplicación del GPR, para el caso de la línea de perfil 1 con una profundidad de prospección de 4 m. ....	125
Figura 49: Radargrama obtenido mediante la aplicación del GPR, para el caso de la línea de perfil 1 con una profundidad de prospección de 8 m. ....	125
Figura 50: Radargrama línea de perfil 1 para una profundidad de prospección igual a 34 m...	126
Figura 51: Radargrama línea de perfil 2, con una profundidad de investigación de 8,0 m.....	127
Figura 52: Radargrama línea de perfil 2, con una profundidad de investigación de 8,0 m.....	128
Figura 53: Radargrama línea de perfil 3, con una profundidad de investigación de 34 m.....	129
Figura 54: Radargrama línea de perfil 4, con una profundidad de investigación de 8 m. ....	130
Figura 55: Radargrama línea de perfil 4, con una profundidad de investigación de 8 m. ....	131
Figura 56: Resultados obtenidos mediante la inversión de los datos obtenidos a partir de la aplicación del instrumento Ohmmapper .....	133
Figura 57: Mapa de ubicación de los pozos registrados ante SENARA y ubicados dentro o en los alrededores del área de estudio. ....	137
Figura 58: Ubicación de concesiones de agua. Fuente: Dirección de Aguas. ....	138
Figura 59: Mapa de ubicación de los perfiles hidrogeológicos elaborados. ....	140
Figura 60: Perfil hidrogeológico A-A” .....	142
Figura 61: Perfil hidrogeológico B- B” .....	143
Figura 62: Perfil hidrogeológico general para el área de estudio.....	151
Figura 63: Mapa hidrogeológico del área de estudio. ....	152
Figura 64: Mapa de líneas equipotenciales para la unidad hidrogeológica La Esperanza. ....	155
Figura 65: Mapa de líneas equipotenciales para el nivel inferior de agua subterránea de la Unidad hidrogeológica Manigordo.....	157
Figura 66: Vulnerabilidad para la Unidad hidrogeológica La Esperanza. ....	160
Figura 67: Vulnerabilidad hidrogeológica para la unidad hidrogeológica Manigordo.....	163
Figura 68: Fuentes potenciales de contaminación identificadas para el área de estudio. ....	167
Figura 69: Mapa de riesgo de contaminación para el área de estudio.....	170



Figura 70: Sitios propuestos para la ubicación de perforaciones.....	178
--	-----

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Listado de afloramientos de roca visitados, (coordenadas Lambert Sur) .....	41
Cuadro 2: Registros de precipitación promedio mensual y anual para el área de estudio .....	52
Cuadro 3: Distribución de temperaturas promedio para el área de estudio. ....	53
Cuadro 4: Cálculo de la evapotranspiración potencial para el área de estudio.....	58
Cuadro 5: Definición de factor de pendiente (Kp).....	59
Cuadro 6: Factor de infiltración por efecto de la cobertura vegetal, Schosinsky (2006). ....	64
Cuadro 7 : Resultados de muestreo de suelos. Donde FL: Franco limoso, FAa: Franco arcillo-arenoso, Fa: Franco arenoso, Aa: Arcillo arenoso, F: Franco. ....	72
Cuadro 8: Resultados de pruebas de infiltración realizadas .....	83
Cuadro 9: Listado de Sondeos eléctricos verticales realizados .....	105
Cuadro 10: Resultados obtenidos para cada SEV realizado .....	108
Cuadro 11: Información sobre pozos utilizados para la correlación de SEVs.....	110
Cuadro 12: Información líneas de perfil utilizadas en la prospección geofísica realizada en el botadero de basura de Golfito.....	122
Cuadro 13: Listado de pozos registrados en las bases de datos de SENARA y ubicado dentro o en los alrededores del área de estudio.....	135
Cuadro 14: Listado de concesiones de agua para el área de estudio. Fuente: Dirección de Aguas. ....	136
Cuadro 15: Resumen modelo hidrogeológico general definido para el área de estudio. ....	144
Cuadro 16: Pozos bajo los cuales se definió la Unidad Hidrogeológica Río Claro. ....	145
Cuadro 17: Pozos bajo los cuales se definió el nivel inferior de agua para la Unidad hidrogeológica Manigordo.....	148
Cuadro 18: Pozos bajo los cuales se definió el nivel de agua para la unidad hidrogeológica La Esperanza. ....	150
Cuadro 19: Ubicación de pozos utilizados para la definición de la red de flujo para la Unidad Hidrogeológica La Esperanza. ....	154
Cuadro 20: Ubicación de los pozos con los que se definió la red de flujo para el nivel de agua inferior de la Unidad Hidrogeológica Manigordo. ....	156
Cuadro 21: Análisis de vulnerabilidad hidrogeológica según el método de GOD para la Unidad Hidrogeológica La Esperanza. ....	158
Cuadro 22: Determinación del índice de vulnerabilidad para el nivel acuífero superior de la unidad hidrogeológica Manigordo. ....	162
Cuadro 23: Matriz para la determinación del riesgo a la contaminación hidrogeológica (Tomado y modificado de Arias, 2011).....	168
Cuadro 24: Sitios propuestos para la ubicación de perforaciones .....	177

## RESUMEN

Se realizó una caracterización hidrogeológica en el área del vertedero de basura de Golfito, en la provincia de Puntarenas, el área investigada se localiza entre la margen izquierda del Río Claro y la margen del derecha del Río Caracol, abarca un área de aproximadamente 48,7 Km<sup>2</sup>. La investigación incluye el desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual que describe las principales unidades hidrogeológicas, además de la estimación del grado de vulnerabilidad hidrogeológica asociado a cada una de estas y el desarrollo de un balance hídrico representativo para el área, con el fin de estimar la recarga potencial anual de la misma.

El modelo hidrogeológico establecido define la existencia de tres unidades hidrogeológicas principales, las cuales han sido nombradas de la siguiente manera: Unidad hidrogeológica La Esperanza, Unidad hidrogeológica Quebrada Manigordo y Unidad hidrogeológica Río Claro. La unidad hidrogeológica la Esperanza corresponde con la unidad acuífera más superficial y se encuentra asociada a los depósitos aluviales de la zona, mientras que la Unidad Hidrogeológica Manigordo corresponde con una unidad intermedia que se compone de dos niveles de agua, uno superficial que se encuentra extendido hacia la parte norte del área y un nivel profundo definido para la parte plana del área de estudio, el cual se localiza a una profundidad de alrededor de 80 m, la unidad hidrogeológica Río Claro representa la sección acuífera más profunda y se localiza a una profundidad cercana a los 120 m.

La vulnerabilidad hidrogeológica determinada para cada una de las unidades hidrogeológicas establecidas es moderada para el caso de la Unidad hidrogeológica la Esperanza y para el nivel superior de la Unidad hidrogeológica Quebrada Manigordo, las cuales corresponden con los niveles acuíferos más superficiales del área, mientras que para el nivel inferior de la Unidad hidrogeológica Manigordo y la Unidad hidrogeológica Río Claro el índice de vulnerabilidad obtenido es despreciable, al ser ambos niveles acuíferos profundos.

La recarga potencial anual para el área de estudio se ha estimado que oscila entre 1593 mm y 2532 mm, los valores máximos de recarga potencial se ubicaron de manera puntual en algunos sectores como en las cercanías del poblado de La Esperanza, la zona aledaña al botadero de basura y algunos sectores ubicados tanto hacia el norte como al este del área de estudio, sitios con un uso de suelo caracterizado por la presencia de pastos destinados principalmente a actividades de ganadería.

Por medio de la realización de una campaña de prospección geofísica en el sector del botadero de basura se logró obtener información de la geometría de dicho botadero, en concreto se logró determinar la profundidad a la que se encuentra la interface entre la

zona de acumulación de residuos y el basamento rocoso del botadero, el cual según los resultados obtenidos se localiza a una profundidad variable entre los 8 y 10 m.

# 1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de graduación se llevó a cabo en el área de influencia del vertedero municipal de Golfito, el cual se encuentra ubicado en la Fila Manigordo en la Esperanza de Río Claro, distrito de Guaycará cantón de Golfito, provincia de Puntarenas (Figura 1). Esta área de influencia fue determinada arbitrariamente considerando las condiciones geomorfológicas e hídricas de la zona, siendo limitada entre el margen izquierdo del Río Claro y el margen derecho del río Caracol, incluyendo a su vez a las microcuencas del río Caracol, Quebrada Manigordo, Quebrada Mina y la cuenca del río Claro- Caracol; e incluye a los poblados de La Esperanza, Cerro Café y Santiago de Caracol. Dicha área forma parte de las hojas topográficas 1:50000 Piedras Blancas y Golfito (número 3542-II y 3541-I respectivamente) del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

El área de estudio abarca un total de 48,7 km<sup>2</sup>, de los cuales aproximadamente 9,5 km<sup>2</sup> corresponden con una zona topográficamente elevada, mientras que aproximadamente 39,2 Km<sup>2</sup> corresponden con una zona de topografía plana. Es precisamente en esta última zona en donde se encuentra la mayor cantidad de información disponible para el área de estudio, principalmente por el hecho de que en ella se hallan los principales poblados y de igual forma por ser una zona con cultivos extensivos principalmente de palma.

De acuerdo con la información obtenida en instituciones como el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento (SENARA), Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) y el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), en la zona de estudio existen un total de 15 pozos registrados, 1 Asociación Administradora de Acueducto Rural (ASADA) y 5 estaciones meteorológicas.

Esta investigación se encuentra en el marco del proyecto desarrollado por el Centro de Investigaciones de Ciencias Geológicas de la Universidad de Costa Rica (CICG) inscrito bajo el número 830-B4-415, denominado: “Estudio de la Vulnerabilidad a la contaminación del recurso hídrico en el área de influencia directa del botadero de basura de la Municipalidad de Golfito” en convenio con la Dirección de Aguas del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE).

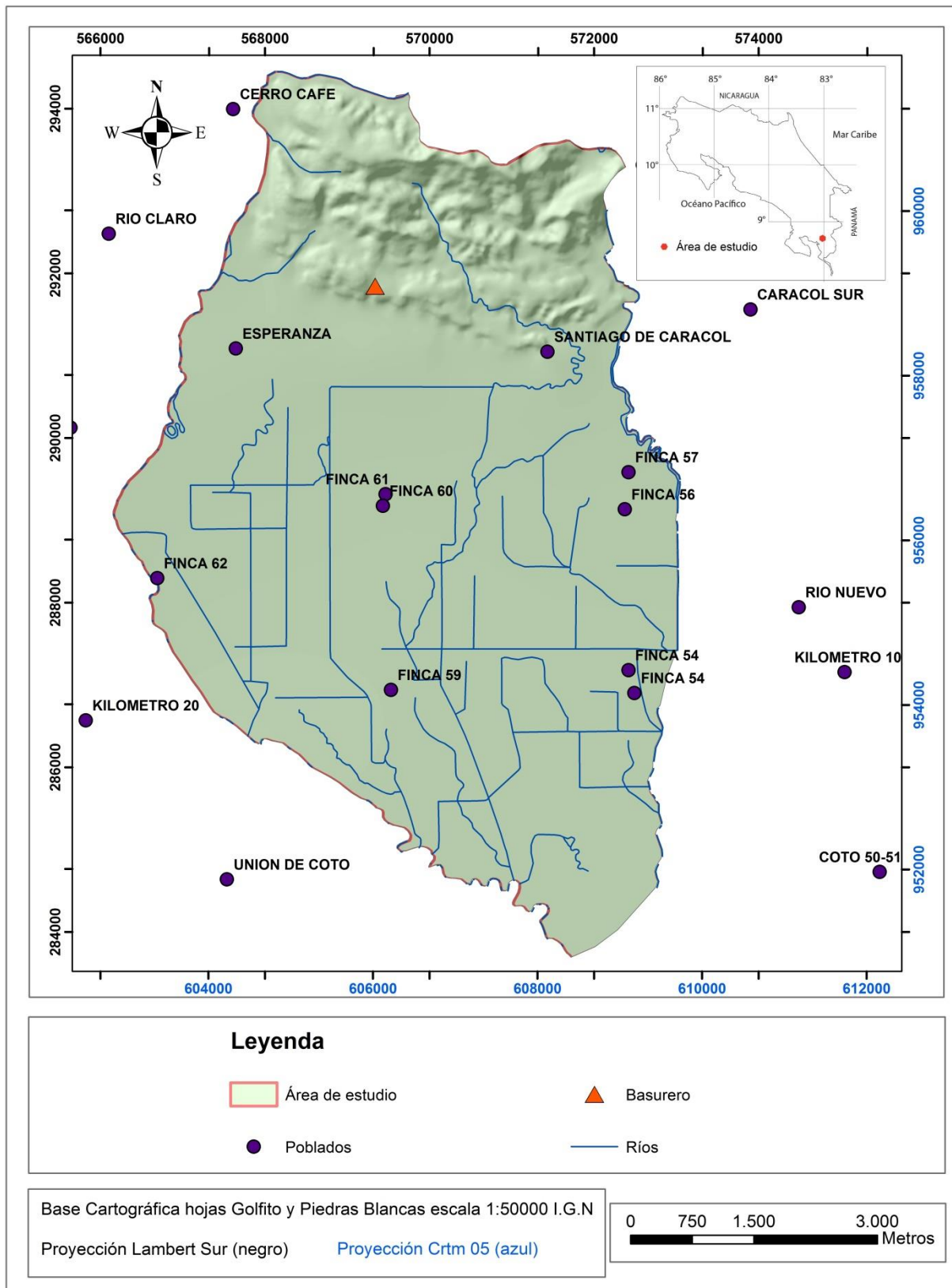


Figura 1: Ubicación del área de estudio.

## **1.1 Problema**

Desde el año 1980 la municipalidad de Golfito adquirió un terreno ubicado en las cercanías del poblado de la Esperanza de Río Claro con el fin de contar con un sitio que funcionase como vertedero para la disposición de los residuos sólidos generados en el cantón (Arroyo, 1997).

Dicho vertedero se mantuvo en funcionamiento a lo largo de las últimas tres décadas con el agravante de que en sus alrededores se encuentran varios pozos y una ASADA de donde se capta agua tanto para labores agrícolas como también para abastecimiento o consumo humano. Es por ello que la presencia de dicho vertedero puede representar una inminente fuente de contaminación para dichas captaciones de agua que abastecen a las comunidades, y podría afectar significativamente la calidad de las aguas de los acuíferos captados en la zona.

Debido a la carencia de estudios de esta índole en el área y la preocupación por la calidad de vida de las personas es necesario generar información que determine la vulnerabilidad de los acuíferos presentes en la zona, la calidad actual del agua y se establezca un plan de monitoreo para prevenir la contaminación del agua subterránea en el futuro.

## **1.2 Justificación**

El área en la cual se pretende llevar a cabo el presente proyecto se caracteriza por presentar una problemática importante desde el punto de vista de disponibilidad de información, ya que prácticamente no existen trabajos o investigaciones previas que describan geológica e hidrogeológicamente dicha área, razón por la cual resulta necesaria la generación de dicha información.

Mediante la presente investigación, se pretende generar la información necesaria para la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual, el cual incluya la vulnerabilidad intrínseca de él o los acuíferos de la zona de estudio, con el fin de definir la posible afectación del basurero Municipal de Golfito hacia las aguas subterráneas.

De acuerdo con los objetivos de esta investigación a través de la generación de un modelo hidrogeológico conceptual se logrará la caracterización del o los acuíferos presentes en el área, tomando en cuenta aspectos como su extensión, dirección de flujo del agua subterránea y profundidad, así como también la definición de las zonas de recarga de estos, lo cual serviría de insumo para dar un mejor manejo y uso racional

del recurso hídrico en la zona. Por otro lado gracias a la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del área se logrará conocer aquellos sitios en donde el medio ofrece una mayor susceptibilidad a la contaminación de las aguas tanto subterráneas como superficiales, permitiendo a su vez tomar las medidas necesarias para la regulación de las actividades que se realicen en dichas zonas y garantizando con ello una mejor protección al recurso hídrico.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Caracterizar hidrogeológicamente el área del vertedero de basura de Golfito y sus alrededores, a partir de la aplicación de cartografiado geológico y la recopilación de datos tanto bibliográficos como de campo, para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca del área de estudio.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- ❖ Plantear un modelo hidrogeológico conceptual que muestre la red de flujo del agua subterránea, la extensión de los acuíferos y las zonas de recarga; por medio de la interpretación de información existente referente a pozos, así como también de la correlación geológica y prospección geofísica.
- ❖ Evaluar las condiciones geológicas e hidrogeológicas presentes en el vertedero de residuos de Golfito, utilizando prospección geofísica, análisis de suelos, pruebas de infiltración, geomorfología y geología *in situ*.
- ❖ Estimar la recarga potencial acuífera del área, mediante la elaboración de un balance hídrico, con el fin de delimitar aquellas zonas con mayor potencial de recarga y con ello brindar las recomendaciones necesarias para su adecuada protección.
- ❖ Definir la vulnerabilidad intrínseca del área de estudio, mediante la aplicación de la metodología GOD (Foster et al. 2002), con el fin de reconocer aquellas áreas con mayor susceptibilidad a la contaminación de las aguas subterráneas.

## 1.4 Metodología

### 1.4.1 Actividades

Para el cumplimiento de los objetivos expuestos para este trabajo se realizaron las siguientes actividades:

- Recopilación y análisis de información hidrogeológica, geológica y meteorológica, disponible en bases de datos en instituciones públicas y/o bibliotecas.
- Se realizaron giras de campo para la recolección de datos geológicos, estructurales, hidrogeológicos, geomorfológicos y de uso de suelo.
- Recolección de muestras de suelo y su respectivo análisis en laboratorio para la obtención de información útil como punto de marchitez, capacidad de campo, textura y densidad, parámetros necesarios para la elaboración del balance hídrico.
- Ejecución de pruebas de infiltración utilizando la metodología de doble anillo, para obtener cuantitativamente la infiltración vertical del agua en los suelos.
- Realización de 13 sondeos eléctricos verticales, utilizando el dispositivo Schlumberger, estos se realizaron en la zona plana del área de estudio, ubicada al pie de la zona del vertedero.
- Aplicación del instrumento Ohmmapper (perfiles geoeléctricos) y la técnica del georadar en el área del vertedero de Golfito, con el fin de delimitar geométricamente las zonas empleadas como relleno de dicho vertedero.
- Ejecución de excavaciones exploratorias utilizando para ello una perforadora manual con una profundidad máxima de 2 metros, con el fin de obtener una red de monitoreo que permitiera medir los niveles del agua subterránea en la zona plana aguas abajo del vertedero.
- Correlación litológica e hidrogeológica de la información obtenida en las distintas bases de datos consultadas, así como de los datos colectados en campo.



- Elaboración de mapas, balance hídrico y red de flujo a partir del análisis y procesamiento de la información recabada.
- Análisis e interpretación de resultados.

#### **1.4.2 Materiales y equipo**

Para la realización de esta práctica dirigida se contó con el apoyo del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG) de la Universidad de Costa Rica, tanto desde el punto de vista logístico para la realización de las diferentes giras de campo, como también por medio del suministro de materiales y el equipo necesario para el cumplimiento de las actividades contempladas como parte de este trabajo.

Como parte del equipo utilizado y facilitado por el CICG se incluye: Vehículo de doble tracción, dispositivo de GPS marca garmin, piqueta, brújula, equipo para la realización de pruebas de infiltración mediante el método de doble anillo, equipo para la ejecución de la campaña de prospección geofísica que incluye el dispositivo de medición de resistividad eléctrica modelo SYSCAL\_R1/PLUS de la IRIS Instruments®, así como también el dispositivo OhmMapper de Geometric Inc. y el georadar (GPR) Gepard de la compañía OKM, y por último se dispuso del equipo necesario para la recolección de muestras de suelo.

De igual manera se contó con la ayuda del CICG en lo que respecta al financiamiento para la realización de los respectivos análisis de laboratorio para cada una de las muestras de suelos recolectadas. Por otro lado se dispuso del equipo de cómputo y software necesario para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos por medio de la prospección geofísica llevada a cabo.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Balance hídrico**

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2010) el término balance hídrico representa el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan a un sistema y los que salen del mismo en un intervalo de tiempo determinado.

A partir de un estudio de balance hídrico es posible hacer una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre. El conocimiento de la estructura del balance hídrico ya sea de lagos, cuencas

superficiales o aguas subterráneas es fundamental para conseguir un uso más racional de los recursos hídricos en el espacio y tiempo, así como para mejorar el control y la redistribución de los mismos (Instituto de Hidrología de España/UNESCO, 1981).

El estudio de balance hídrico se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de continuidad, el cual establece que para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada (Instituto de Hidrología de España/UNESCO, 1981).

### 2.1.1 Metodología de Schosinsky (2006)

En Costa Rica la metodología oficial para la determinación de la recarga potencial es la metodología de Schosinsky (2006). Este método permite estimar la cantidad de agua de lluvia que podría infiltrarse en el suelo para un área determinada, tomando en consideración algunas variables como lo son: la precipitación mensual, la pendiente del terreno, la cobertura vegetal y la infiltración básica de los suelos, además de la cantidad de lluvia que podría ser retenida en el follaje, cada una de estas de estas variables ha sido correlacionada por Schosinsky & Losilla, 2000, mediante la siguiente expresión:

$$I = (1 - Ki) * (Kp + Kv + Kfc) * P$$

Dónde:

I = Infiltración (mm/mes)

Ki = Fracción interceptada por el follaje (0,12)

Kp = Fracción que infiltra por efecto de la pendiente

Kv = Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal

Kfc = Fracción que infiltra por textura del suelo

P = Precipitación (mm/mes)

Adicionalmente esta metodología incluye un modelo para determinar la recarga potencial de un acuífero, en el cual se toma en cuenta variables como la precipitación mensual, la retención pluvial, la capacidad de infiltración del suelo, la cobertura vegetal, evapotranspiración, profundidad de las raíces, uso del suelo, pendiente, capacidad de campo y punto de marchitez, variables que influyen directamente en la recarga de los acuíferos (Schosinsky, 2006).

El cálculo de la recarga potencial de un acuífero está determinado entonces por la siguiente expresión (Schosinsky, 2006):

$$Rp = Pi + Hsi - Hsf - ETR$$

Dónde:

$R_p$  = Recarga potencial (mm/mes)

$P_i$  = Precipitación que infiltra (mm/mes)

$H_{si}$  = Humedad del suelo al inicio del mes

$H_{sf}$  = Humedad del suelo al final del mes

$ETR$  = Evapotranspiración

### **2.1.2 Zona de recarga acuífera**

Una vez aplicada la metodología descrita anteriormente, para determinar en primera instancia la penetración del agua de lluvia en los suelos y en segundo lugar la recarga potencial acuífera es posible determinar o delimitar aquellas regiones que representan un mayor potencial de recarga para un área determinada, y a partir de lo cual tomar las previsiones o restricciones pertinentes para su adecuada protección.

Se define la recarga como el proceso por el cual se incorpora a un acuífero, agua procedente del exterior del contorno que lo limita. Esta recarga puede proceder ya sea de la infiltración de la lluvia (generalmente la más importante) o de las aguas superficiales (importante en climas poco lluviosos), o bien por la transferencia de agua desde otro acuífero, (Custodio, 1998).

Por su parte en lo que respecta a la legislación nacional, el proyecto de Ley para la gestión integrada del recurso hídrico de Costa Rica (Expediente N°17.742) define las zonas de recarga acuífera como aquellas áreas del terreno donde el agua se infiltra al suelo y que alimenta la zona saturada del acuífero.

El proyecto de ley para la gestión integral del recurso hídrico de Costa Rica establece en su artículo 35 que el Ministerio de Ambiente y Energía mediante Decreto ejecutivo podrá declarar áreas de protección absoluta aquellas áreas de recarga o descarga acuífera o fracción de ellas, necesarias para asegurar y garantizar el suministro de agua para el consumo humano actual o futuro.

## 2.2 Hidrogeología

### 2.2.1 Definición de acuífero

Fetter (2001) define un acuífero como una unidad geológica que puede almacenar y transmitir el agua a velocidades lo suficientemente rápidas, para suministrar cantidades razonables a pozos.

Tarback & Lutgens (2005) dicen que un acuífero está compuesto por estratos de roca o sedimentos porosos y permeables que transmiten libremente el agua subterránea.

Custodio & Llamas (2001) denominan un acuífero como aquel estrato rocoso o formación geológica que permitiendo la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus necesidades.

La Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS, 2009) define un acuífero como una formación geológica que almacena agua y que es capaz de transmitirla de manera que pueda ser aprovechada como recurso.

De las definiciones anteriores se puede extraer que un acuífero consiste en una capa de rocas o sedimentos porosos y permeables que permitan la circulación y el almacenamiento del agua a tasas aprovechables.

### 2.2.2 Tipos de acuíferos

Los acuíferos se pueden clasificar en términos de la presión hidrostática a la que se encuentra el agua almacenada en ellos de la siguiente manera: Acuífero libre, los cuales son aquellos en los que la zona saturada está limitada en su parte superior por una superficie en la que el agua se encuentra a presión atmosférica, Acuífero confinado es aquel que se encuentra aislado de la atmósfera por unidades geológicas impermeables, estando siempre saturado de agua y en todos sus puntos a una presión mayor a la atmosférica, y por último el Acuífero semiconfinado es aquel en el que las unidades confinantes permiten un cierto flujo de agua desde el acuífero hacia el exterior o viceversa (Martínez et al. 2006).

## **2.3 Vulnerabilidad hidrogeológica**

Foster et al 1991 utiliza el término de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos para representar las características intrínsecas de los estratos que separan la zona saturada del acuífero de la superficie del terreno, las cuales determinan la sensibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante aplicada en la superficie.

### **2.3.1 Vulnerabilidad por metodología GOD**

Esta metodología desarrollada por Foster (1987) determina la vulnerabilidad hidrogeológica de un acuífero (sensibilidad de un acuífero a ser afectado adversamente), tomando en cuenta 3 variables representadas por sus siglas en inglés GOD (Foster et al. 2002):

- G (Groundwater occurrence): grado de confinamiento hidráulico del acuífero en consideración.
- O (Overall aquifer class): ocurrencia del sustrato supra yacente en términos de características litológicas y grado de consolidación, que determinan su capacidad de atenuación de contaminantes.
- D (Depth): distancia al agua determinada como: la profundidad al nivel del agua en acuíferos no confinados o la profundidad al techo de acuíferos confinados.

A estos tres parámetros se les asignan valores de 0 a 1 en una serie de etapas que ubican al acuífero en el rango de vulnerabilidad correspondiente.

El índice de vulnerabilidad se calcula mediante la multiplicación de las tres variables. Y entre mayor sea el valor obtenido más susceptible es el acuífero en cuestión a ser contaminado (Figura 2).

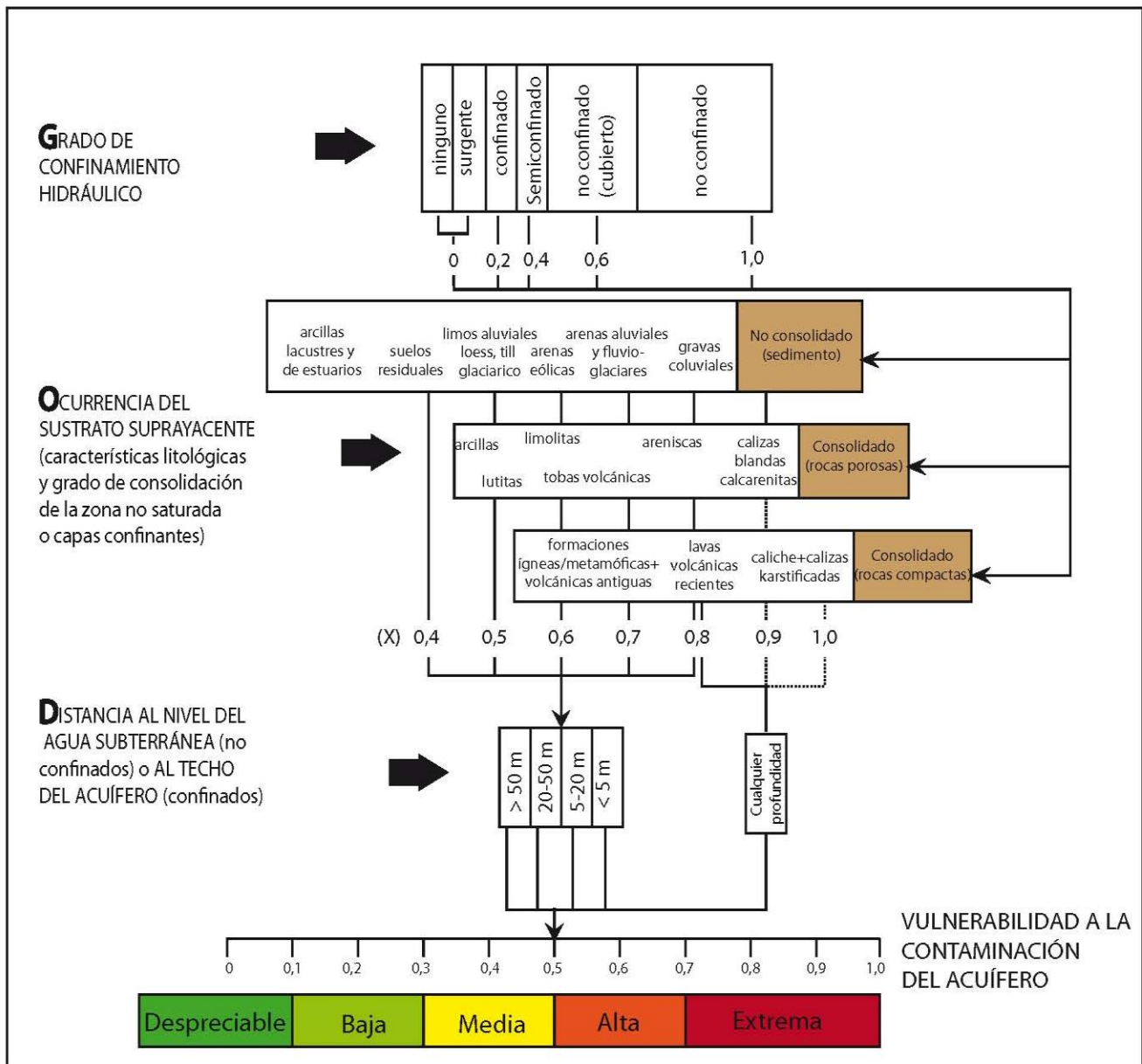
### **2.3.2 Riesgo a la contaminación**

El término de riesgo de contaminación se define como la probabilidad de que las aguas subterráneas se contaminen con concentraciones por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la calidad de agua de consumo humano (Foster & Hirata, 1991).

Estos autores presentan una metodología para evaluar el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, misma que se basa en la interacción de la carga de contaminante que es, será o pudiera ser aplicada al subsuelo como resultado de las actividades humanas y la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación debido a las

características naturales de los substratos que lo cubren y separan de la superficie. Dicha metodología se ilustra en la **Figura 3**.

La evaluación de los peligros de contaminación de acuíferos es un prerequisite esencial para la protección de los recursos hídricos subterráneos, ya que identifica aquellas actividades humanas que tienen la mayor probabilidad de tener impactos negativos sobre el acuífero y así indica la priorización de medidas de control y mitigación necesarias (Foster et al., 2002)



**Figura 2: Descripción del método GOD (tomado y modificado de Foster et al., 2002).**

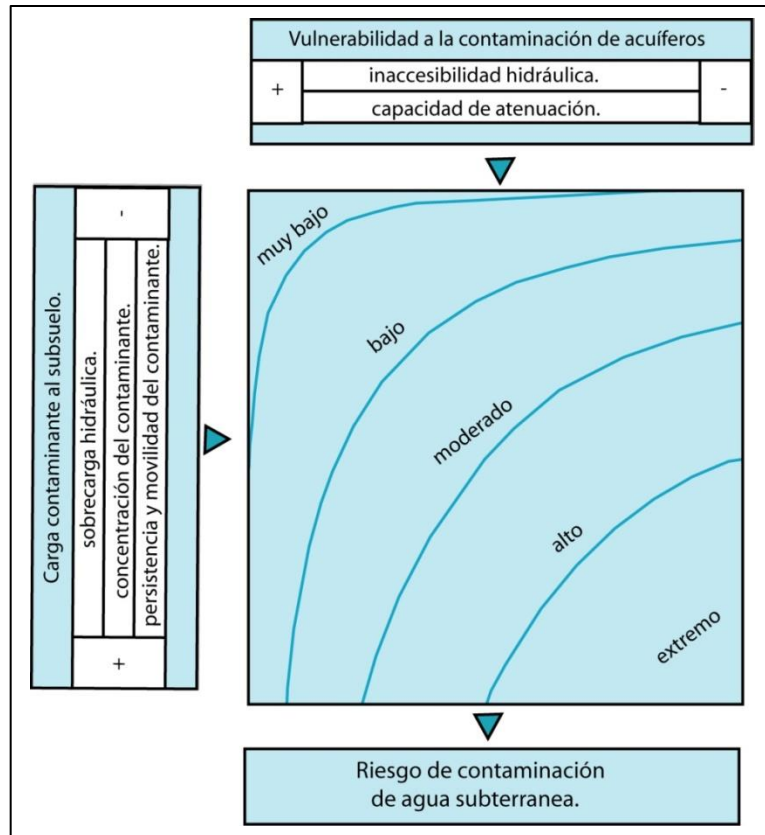


Figura 3: Método de evaluación del riesgo a la contaminación de las aguas subterráneas (tomado y modificado de Foster et al., 2002).

## 2.4 Métodos geofísicos

### 2.4.1 Resistividad eléctrica

En el desarrollo de este proyecto se tomó en consideración la implementación tanto de los métodos de resistividad por corriente directa como lo son los sondeos eléctricos verticales (SEVs) y el método de resistividad por acoplamiento capacitivo (instrumento Ohmmapper).

El uso de métodos resistivos con corriente continua (CC) aplicados a estudios de aguas subterráneas es bien conocido. La estimación de la resistividad del subsuelo a partir de su resistividad aparente se utiliza como un instrumento para evaluar los espesores de capas geológicas, las profundidades de niveles freáticos, e incluso las zonas de dispersión salina, entre otros (Murillo, 2008).

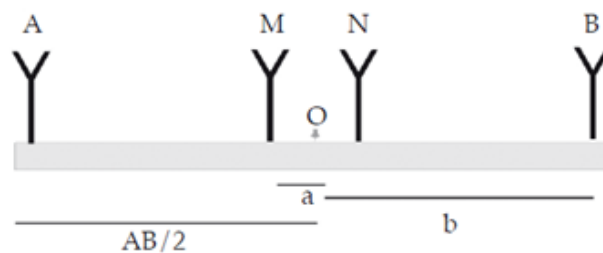
El método de resistividad eléctrica utiliza una fuente generadora de corriente (I), que es inyectado en el suelo a través de dos electrodos (A y B), la corriente produce una diferencia potencial (V) que es medida en los electrodos de potencial (M y N). La disposición de los electrodos es conocida también como arreglo geoelectrico y su escogencia depende de las características del objeto de estudio (Murillo, 2008).

#### **2.4.1.1 Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs)**

El sondeo eléctrico vertical es un método geofísico que tiene como objetivo investigar los cambios de resistividad a profundidad en el subsuelo, estos cambios están asociados a las características y propiedades de cada roca (Arias, 2002).

Se utiliza un arreglo eléctrico mediante el cual se le inyecta un flujo de corriente al suelo; existen varios tipos de arreglos, en este caso se utilizará el arreglo tipo Schlumberger, el cual consiste en la colocación de cuatro electrodos en el suelo, dos de los cuales inyectan una corriente (AB) y los otros dos miden el potencial generado (MN) (Figura 4), la profundidad de investigación va a depender de la separación de los electrodos (Arias, 2007).

La distancia y el tiempo de recorrido de la corriente determina la variación vertical de la resistividad en la subsuperficie, con ellas es posible obtener datos como espesor, porcentaje de saturación, porosidad, geometría de capas del subsuelo, entre otros (Kearey et al., 2002).



**Figura 4: Dispositivo geoelectrico, arreglo Schlumberger (Tomado de Arias, 2007).**

La mayor eficacia del método corresponde en el caso en que los SEVs se efectúan sobre un terreno compuesto por capas lateralmente homogéneas en lo que respecta a la resistividad, y limitadas por planos paralelos a la superficie del terreno (medio estratigráfico), (Nieto, 2007).

El equipo utilizado para la realización de los sondeos eléctricos verticales fue el modelo SYSCAL\_R1/PLUS de la marca IRIS Instruments®. Los datos obtenidos para cada



SEV fueron procesados mediante la utilización de los software libres IPI2WIN® y QWSELN®.

#### 2.4.1.2 Instrumento OhmMapper

El OhmMapper es un sistema diseñado para la medición de resistividades del subsuelo, especial para aquellas regiones en donde la exploración utilizando un sistema de resistividad convencional (SEV) resulta impráctico, lento y extensivo. Consiste de un dipolo transmisor, receptor y una consola registradora. Su funcionamiento se basa en la propagación de una corriente eléctrica emitida por un transmisor electrónico, la cual electrifica dos cables coaxiales (dipolo transmisor), y es a su vez acoplada a la tierra a través de la capacitancia del cable, por su parte un receptor sintonizado automáticamente a la frecuencia del transmisor se encarga de medir el voltaje asociado recogido por los cables del dipolo receptor como una respuesta del medio ante el paso de la corriente emitida, este voltaje será proporcional a la resistividad del suelo ubicado en medio de los dipolos (Figura 5). El OhmMapper está diseñado para ser arrastrado a lo largo del terreno ya sea por una persona o un vehículo proporcionando un perfil de resistividad aparente del medio casi continuo. Algunas de sus ventajas con respecto a los sistemas de medición de resistividad convencionales es por ejemplo el poder ser manipulado por una sola persona, el no requerir electrodos metálicos, su bajo consumo de poder, además de un rápido ensamblaje y obtención de datos (información tomada de: <http://www.geometrics.com/>).

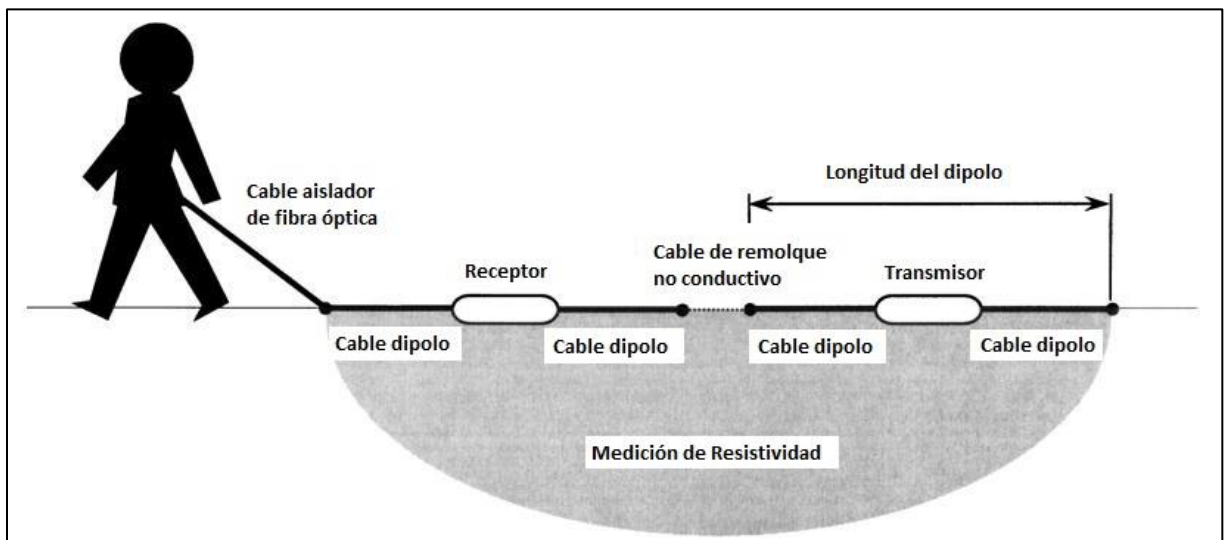


Figura 5: Diagrama de funcionamiento del instrumento OhmMapper para la determinación de resistividad de un medio (Tomado y modificado de <https://dl.sciencesocieties.org>).

#### 2.4.2 Georadar (Ground Penetration Radar)

El método del georadar o GPR hace referencia a una serie de técnicas electromagnéticas diseñadas principalmente para la localización de objetos o interfaces enterradas bajo la superficie de la tierra o que se encuentren dentro de una estructura visualmente opaca. Esta metodología proporciona un método seguro y no invasivo para la realización de búsquedas especulativas o investigaciones sin la necesidad de realizar excavaciones o perturbaciones en el medio (Daniels, 2004).

El georadar se basa en la emisión de impulsos electromagnéticos de corta duración (1-10 ns) en la banda de frecuencias de VHF-UHF (comúnmente centradas entre los 100 MHz – 1 GHz). Mediante una antena emisora se generan dichos impulsos, los cuales en su trayectoria a través del subsuelo pueden encontrarse con un cambio de sustrato o algún tipo de objeto enterrado u obstáculo, detectándose esto como un cambio en las propiedades eléctricas de los medios atravesados, esto produce que parte de esta energía sea reflejada de vuelta hacia la superficie mientras el resto continua su camino (**Figura 6**). Disponiendo de una antena emisora en la superficie es posible detectar estas reflexiones y con ellas generar una serie de registros espacio-tiempo. Al ir desplazando las antenas sobre la superficie se van registrando el conjunto de reflexiones producidas, con lo que se obtiene una imagen bidimensional de la historia de reflexiones bajo la línea de desplazamiento de la antena (Lorenzo & Hernández, 1995).

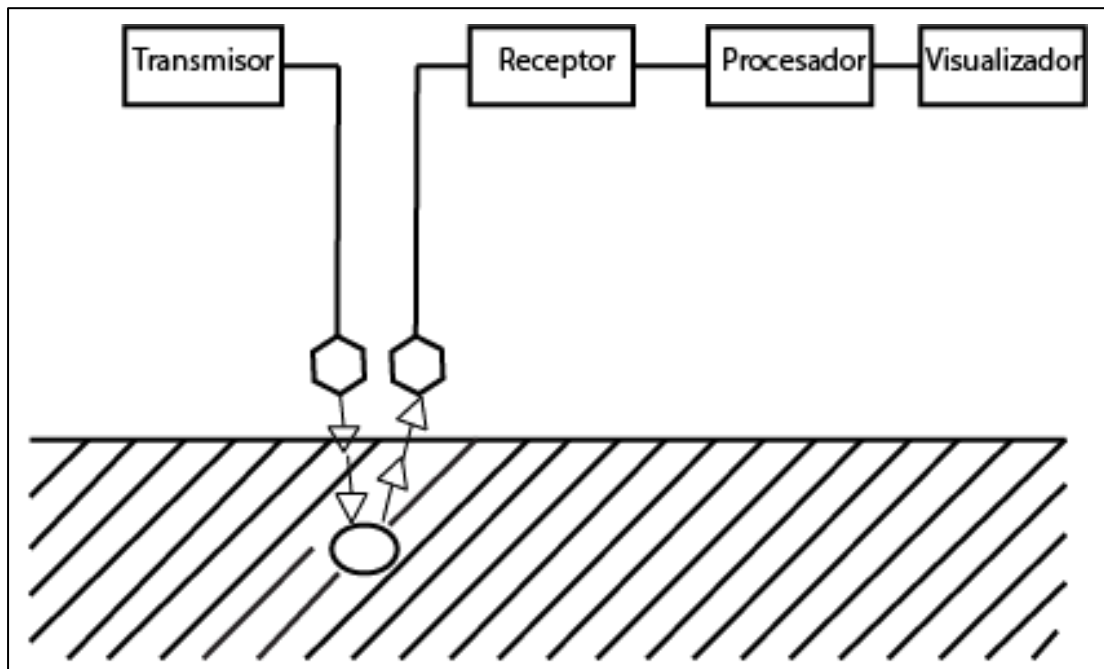
Para que el georadar sea capaz de detectar la interface entre dos capas, o bien de localizar algún objeto enterrado en el medio a auscultar se deben dar una serie de condiciones específicas entre las que destaca en primer lugar que la potencia emitida por el receptor sea la suficiente para que la señal alcance al reflector y su reflexión realice el camino de vuelta a la superficie, además se debe procurar que el medio de propagación de las ondas sea lo suficientemente resistivo para evitar la total atenuación de la señal antes de completar su trayecto, de igual forma resulta idóneo que el tamaño del reflector sea comparable con la longitud de onda de la señal emitida, y por último que el contraste de las propiedades electromagnéticas entre las distintas capas del medio sea el suficiente como para que se produzca una reflexión apreciable (Lorenzo & Hernández, 1995).

La prospección por medio del georadar permite obtener una profundidad de investigación variable que dependerá tanto de las características electromagnéticas del medio sobre el cual se desarrolla la prospección y de las características del equipo utilizado.

En general la profundidad de investigación va a variar fuertemente con el tipo de suelo, dependiendo de factores tales como su composición, porosidad, grado de humedad y

conductividad eléctrica, además de depender de las características de la señal utilizada, tales como la frecuencia, divergencia geométrica entre otros (Bonomo & De la Vega, 2006).

La relación entre frecuencia y profundidad de investigación es inversamente proporcional, es decir a mayor frecuencia utilizada, menor profundidad de investigación y mejor resolución vertical y horizontal se obtendrá, en contraparte al reducir la frecuencia implementada se obtendrá una mayor profundidad de investigación pero menor será la resolución obtenida.



**Figura 6: Diagrama esquemático del funcionamiento del Georadar (GPR) como técnica de investigación del subsuelo (tomado y modificado de Daniels, 2004).**

### **3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO**

#### **3.1 Ubicación geográfica, topografía, actividades productivas**

El área de interés para la presente investigación se encuentra localizada en el distrito de Guaycará, cantón de Golfito en la provincia de Puntarenas, específicamente en los alrededores del poblado de Río Claro, está incluida como parte de las hojas cartográficas Piedras Blancas y Golfito escala 1:50000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

La zona de estudio se encuentra comprendida entre la margen izquierda del río Claro y la margen derecha del río Caracol, esta se caracteriza por presentar un marcado contraste topográfico manifestado por la presencia una densa llanura o planicie aluvial con pendientes muy bajas inferiores a los 5° de inclinación, la cual se extiende a lo largo de la parte sur y central del área de estudio, esta planicie aluvial colinda hacia el norte con una fila de cerros y una importante zona montañosa, dentro de la cual a su vez se localiza el vertedero de basura del cantón de Golfito, el cual representa uno de los ejes centrales de la presente investigación.

Como característica fundamental de la zona de estudio está el hecho de que gran parte de la misma está destinada al desarrollo de actividades agrícolas, siendo especialmente dominante el desarrollo de cultivos extensivos de palma, los cuales ocupan un área considerable de la parte plana del área de estudio, sin dejar de lado además la presencia de algunos otros cultivos menores como maíz dentro de dicha área, así como también el desarrollo de otras actividades como por ejemplo la ganadería, implantada en algunos sectores de la parte norte del área.

#### **3.2 Hidrografía**

Como se mencionó en la sección anterior el área de estudio se encuentra delimitada en sus extremos occidental y oriental por los cauces de los ríos Claro y Caracol respectivamente, los cuales fluyen con una dirección predominante hacia el sur desde las regiones montañosas ubicadas al norte de dicha área, es precisamente la acción erosiva de estos ríos aunado a la presencia de un cambio abrupto en la topografía del área la que ha contribuido en gran medida a la formación de una extensa llanura aluvial, formada a partir de la acumulación de sedimentos arrastrados desde las zonas montañosas por los cuerpos fluviales de la zona.

El área de interés se encuentra enmarcada dentro de la cuenca llamada Río Claro-Caracol, está a su vez se ha subdividido en 4 microcuencas, ubicadas en el sector montañoso y separadas entre sí debido a una clara influencia de factores litológicos-Tectónicos, los que provocan un cambio de dirección en el flujo de agua con respecto a la dirección de flujo general, en la **Figura 7** se muestra la delimitación de cada una de las subcuencas y microcuencas definidas.

A continuación se presenta una breve descripción de cada una de las cuencas y microcuencas definidas en esta investigación.

### **3.2.1 Cuenca ríos Claro-Caracol**

Presenta una dirección de flujo hacia el sur-sureste, y comprende los ríos y quebradas limitados por la margen izquierda del Río Claro y la margen derecha del Río Caracol. Tanto el Río Claro como el Caracol presentan en sus sectores planos, patrones de drenaje de tipo meándrico y anastomosado, presentando el Río Claro una distancia en la zona de influencia indirecta de unos 16 km, mientras que el Río Caracol presenta una distancia aproximada de 10 km.

Dentro de esta cuenca se incluyen todos los ríos y quebradas ubicadas en el sector plano del área de estudio, cabe mencionar estos ríos presentan alteraciones de tipo antrópico, debido a que algunos se han encauzado formando canales interconectados. En algunos sectores donde las quebradas no han sido modificadas se observan patrones de drenaje de tipo meándrico, y algunas desviaciones.

Es importante mencionar que las microcuencas ubicadas en los sectores montañosos confluyen dentro de esta cuenca, ya sea de forma directa (descargando en los ríos Claro o Caracol) como indirecta (descargan en la zona de canales).

### **3.2.2 Microcuenca río Claro**

Esta microcuenca está representada por una quebrada sin nombre ubicada a unos 800 m al norte del poblado de La Esperanza de Río Claro, la cual descarga de manera directa al cauce del río Claro. Su dirección de flujo varía de suroeste para el caso del extremo norte de la quebrada a oeste conforme se aproxima a la confluencia con el Río Claro. Cuenta con una longitud aproximada de alrededor de 1500 m.

### **3.2.3 Microcuenca Quebrada Manigordo**

La quebrada Manigordo nace en la parte noreste del área de estudio. La microcuenca posee un área de unos 0,5 km<sup>2</sup>. Presenta una dirección de flujo hacia el oeste la cual

cambia redirigiendo al río hacia el noroeste, dicho cambio de dirección puede deberse a un control estructural producido por la tectónica y la litología de la zona.

La quebrada manigordo presenta una longitud de aproximadamente de 900 m, posee un patrón de drenaje de tipo paralelo y desemboca en el cauce del Río Claro.

#### **3.2.4 Microcuenca Quebrada Mina**

La microcuenca de la Quebrada Mina, se encuentra localizada en la parte central del sector montañoso. Es posible que el área de la zona del Proyecto, incluya o forme parte de esta microcuenca (esto debido a que el basurero de Golfito se ubica en una divisoria de aguas). Presenta una longitud aproximada de 2,2 km y un patrón de drenaje muy característico tipo rectangular-angular, lo cual indica la incidencia de un factor externo en el curso de agua, ya sea de tipo litológico o estructural, lo que hace que muchos de sus afluentes recorran mayor distancia de lo esperado para desembocar en la Quebrada Mina.

La quebrada Mina, además presenta un desplazamiento de tipo sinistral de al menos 1 km al llegar a la zona plana.

#### **3.2.4 Microcuenca del Río Caracol**

Presenta un área de aproximadamente 2,7 km<sup>2</sup>. Se encuentra conformada por una quebrada sin nombre que descarga directamente al Río Caracol. Presenta una dirección de flujo hacia el sur la cual cambia redirigiendo al río hacia el este, dicho cambio de dirección, genera un patrón de drenaje de tipo Rectangular el cual, puede deberse a un control estructural producido por la tectónica y la litología de la zona. Con una longitud de aproximadamente de 1600 m, el río es alimentado por varias quebradas las cuales presentan en apariencia una mayor complejidad de drenajes (Tipo dendrítico).

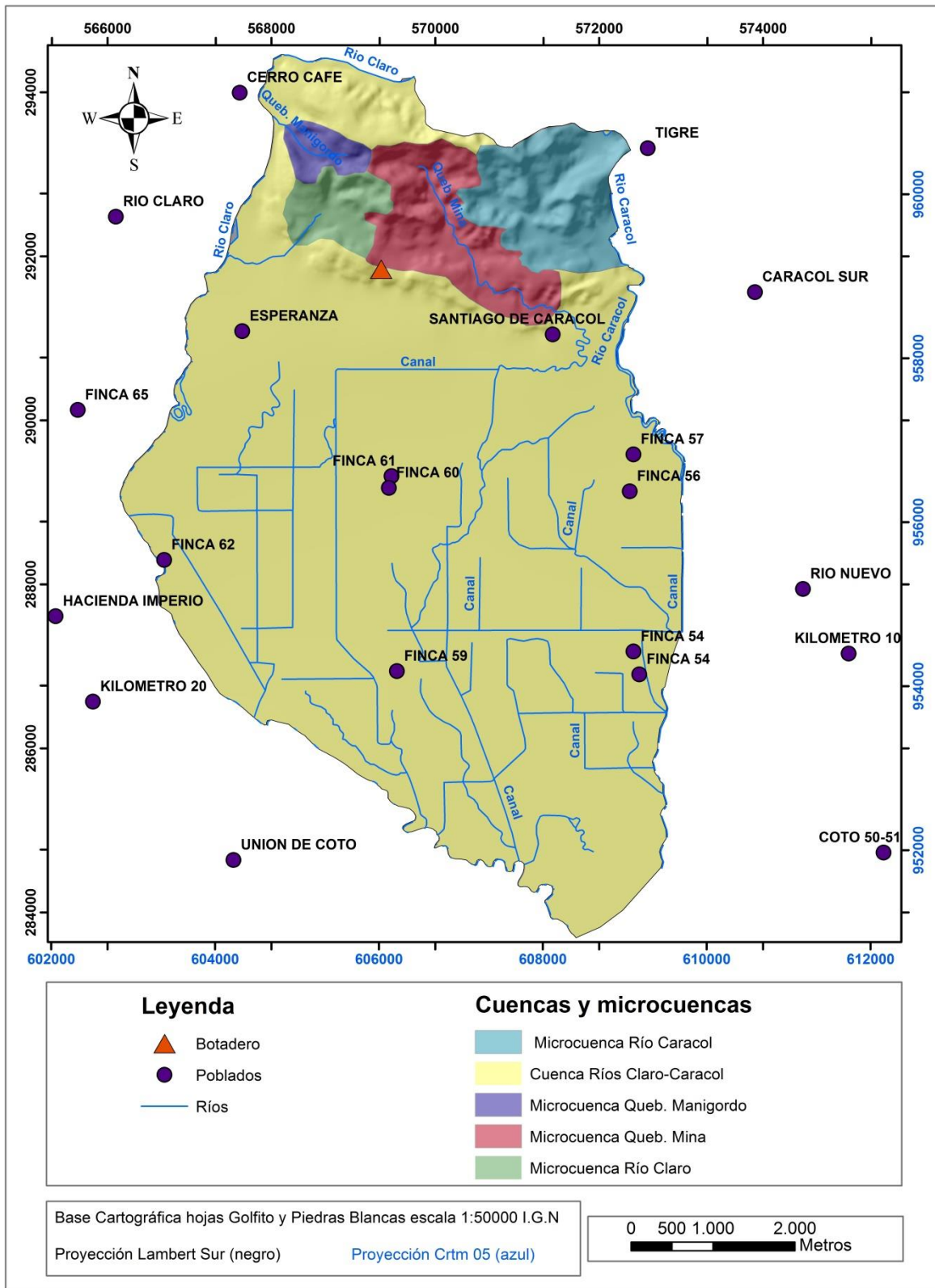


Figura 7: Delimitación de las subcuencas y microcuencas definidas para el área de estudio y ubicación de los principales cauces de la zona.

### 3.3 Geomorfología

La geomorfología del área de estudio se caracteriza por el predominio de relieves de génesis sedimentaria. La topografía actual del área ha estado bajo la influencia de los esfuerzos tectónicos imperantes en la parte sur de Costa Rica, los cuales se asocian con la deformación causada por la existencia de esfuerzos compresivos relacionados con el proceso de subducción de las placas Cocos y Caribe, a partir del cual se han generado estructuras tectónicas significativas en esta región, siendo la falla Longitudinal una de las más importantes. En general la geomorfología del área se destaca por la existencia de un marcado contraste topográfico, ubicándose zonas con una topografía abrupta o de fuerte pendiente correspondientes a las zonas montañosas y cerros del área de interés, los cuales al erosionarse han generado un importante aporte de sedimentos que han sido transportados por la acción de los ríos y quebradas y depositados en las zonas de relieves más bajos, generando con ello la formación de una densa llanura de inundación que cubre gran parte del área de estudio.

La caracterización geomorfológica planteada, se definió a partir de la elaboración de un Modelo de Elevación Digital del terreno (DEM), con el fin de observar mejor su topografía; además se realizó una clasificación por pendientes basándose en la metodología propuesta por Van Zuidam (1986), en donde las pendientes se clasifican en: Pendiente baja (menor a 8°), pendiente moderada (entre 8° y 16°), pendiente fuerte (entre 16° a 35°) y pendiente muy fuerte (mayor a 35°).

Con base en estas caracterizaciones las geoformas dominantes se han agrupado en tres grandes grupos, de acuerdo a su origen; estas son: formas de origen denudacional, formas de origen fluvial y formas de origen estructural, las cuales se han representado en el mapa geomorfológico (**Figura 8**) que se presenta al final de esta sección y serán descritas en detalle a continuación.

#### 3.3.1 Formas de origen denudacional

##### ***Laderas denudacionales de moderada a fuerte pendiente***

Comprenden parte de los cerros y montañas ubicados en el norte del área de estudio correspondientes con la Fila Manigordo, comprende un área de alrededor de 5,7 km<sup>2</sup> cuya pendiente supera los 16° de inclinación.

En general esta unidad presenta un patrón de drenaje dendrítico en sus partes más altas, pasando a ser rectangular-angular en las partes medias y bajas, este tipo de patrón puede estar relacionado ya sea a la dirección estratigráfica de la zona, la cual



presenta un rumbo predominante en sentido SE-NW, así también como a la tectónica local.

Sobre esta unidad se depositan materiales coluviales, por lo que en ciertos sectores se pueden presentar deslizamientos producto de la combinación entre el agua y materiales poco estables y muy meteorizados.

Se pueden apreciar rasgos que demuestran una etapa juvenil de erosión geomorfológica (relieves fuertes, laderas subverticales, valles fluviales en "V", perfiles longitudinales de los ríos).

Además algunas quebradas entre ellas la Manigordo presentan desplazamientos hacia la izquierda los cuales pueden estar asociados a la tectónica local o a factores estratigráficos.

El origen de esta unidad se encuentra relacionado con el levantamiento tectónico de la zona posiblemente relacionado con la Falla Longitudinal, lo cual genera superficies de aplanamiento separadas por zonas de fuertes escarpes, generando una topografía escalonada a esto se le abona la dirección estratigráfica de las rocas locales, la cual es similar al trazo de la falla Longitudinal

Litológicamente esta unidad se encuentra constituida por alternancias de Lutitas y areniscas, además de la presencia de calizas.

### **3.3.2 Formas de origen fluvial**

#### ***Llanura de inundación de los ríos Claro y Caracol***

Esta unidad abarca una extensión de aproximadamente 41,7 Km<sup>2</sup>, siendo la unidad geomorfológica de mayores dimensiones dentro del área de investigación, el poblado de la Esperanza y una serie de fincas Bananeras se asientan sobre esta unidad, la cual presenta una pendiente plana entre los 0° y 8°.

Sobre la llanura de inundación, se han desarrollado un sistema de cauces trenzados, anastomosados y meándricos los cuales presentan una dirección de flujo hacia el sureste hasta desembocar en el río Coto Colorado. Además se presentan una serie de canales de origen antropogénico que han modificado el patón hídrico original de ciertos ríos.

En los sectores cercanos a las partes montañosas, se muestran cauces de quebradas desviados los cuales podrían ser producto de la tectónica regional.

Con respecto al origen de esta unidad, podría estar asociada a una cuenca sedimentaria asociada a la tectónica tal vez de tipo pull apart, en donde los ríos que vienen transportando sedimentos de las zonas montañosas descargan el material en los sectores de topografía plana.

### **3.3.3 Formas de origen estructural**

#### ***Fila de Cerros aislados***

Esta unidad se encuentra ubicada en el sector sur de Fila Manigordo y comprende una fila de laderas y montañas de formas alargadas con una dirección sureste, esta fila presenta las mismas características que la unidad Laderas y Montañas de Fuerte pendiente, con pendientes mayores a 16° y patrones de drenaje de tipo rectangular y angular; sin embargo esta unidad se encuentra separada del resto de la Fila Manigordo por una serie de zonas planas conformadas por la erosión de ríos desplazados. Esto sugiere la erosión de zonas de fragilidad de esta parte de la Fila producto ya sea de la presencia de fallas de desplazamiento o de rumbos estratigráficos que favorecen una rápida erosión de la roca.

Es importante mencionar esta parte de la fila corta con la fluidez normal de los ríos obligándolos a desplazarse y fluir una mayor distancia para alcanzar la zona de topografía plana, además la fila presenta divisorias anchas, una de las cuales se aprovechó para la instalación del Área del botadero de basura, lo que puede ocasionar la influencia de contaminantes para ambos lados de la Fila.

#### ***Fallas y alineamientos***

Para la zona de estudio se han identificado una serie de fallas geológicas (Denyer et al., 2003) y alineamientos los cuales presentan un rumbo predominante hacia el noroeste. Además se observan fuertes indicios que podrían evidenciar la presencia de un fallamiento activo en la zona, destacando por ejemplo la existencia de rocas basculadas y fracturadas, además de la presencia de cauces de ríos desplazados y alineados en sentido paralelo a las estructuras (alineamientos). Otro factor a tomar en cuenta es la litología local, ya que las rocas predominantes en el sector son de tipo sedimentario, con direcciones estratigráficas con rumbo noroeste y con buzamientos hacia el noreste.

## **Falla Longitudinal de Costa Rica**

El sistema de falla Longitudinal de Costa Rica representa la principal estructura tectónica regional para el área de estudio, este sistema de falla tiene una orientación NW-SE, extendiéndose desde el sector de Parrita hasta el occidente de Panamá, con una longitud de aproximadamente 300 Km, representando el principal accidente tectónico en el continente costarricense, poniendo en contacto en la región sureste del país rocas Paleógenas de la fila Costeña con las planicies aluviales y marinas del cuaternario (Alvarado, 2005).

Montero et al, 2008 la describe como una falla de alto ángulo con una inclinación mayor a 70° orientada N55W e inclinada hacia el NE, con un movimiento de tipo inverso que presenta una componente de desplazamiento de rumbo probablemente dextral. Por su parte Alvarado (2005) afirma que la falla presenta diversos tipos de movimiento a lo largo de su traza, sin embargo menciona que existe una mayor concordancia con un movimiento inverso.

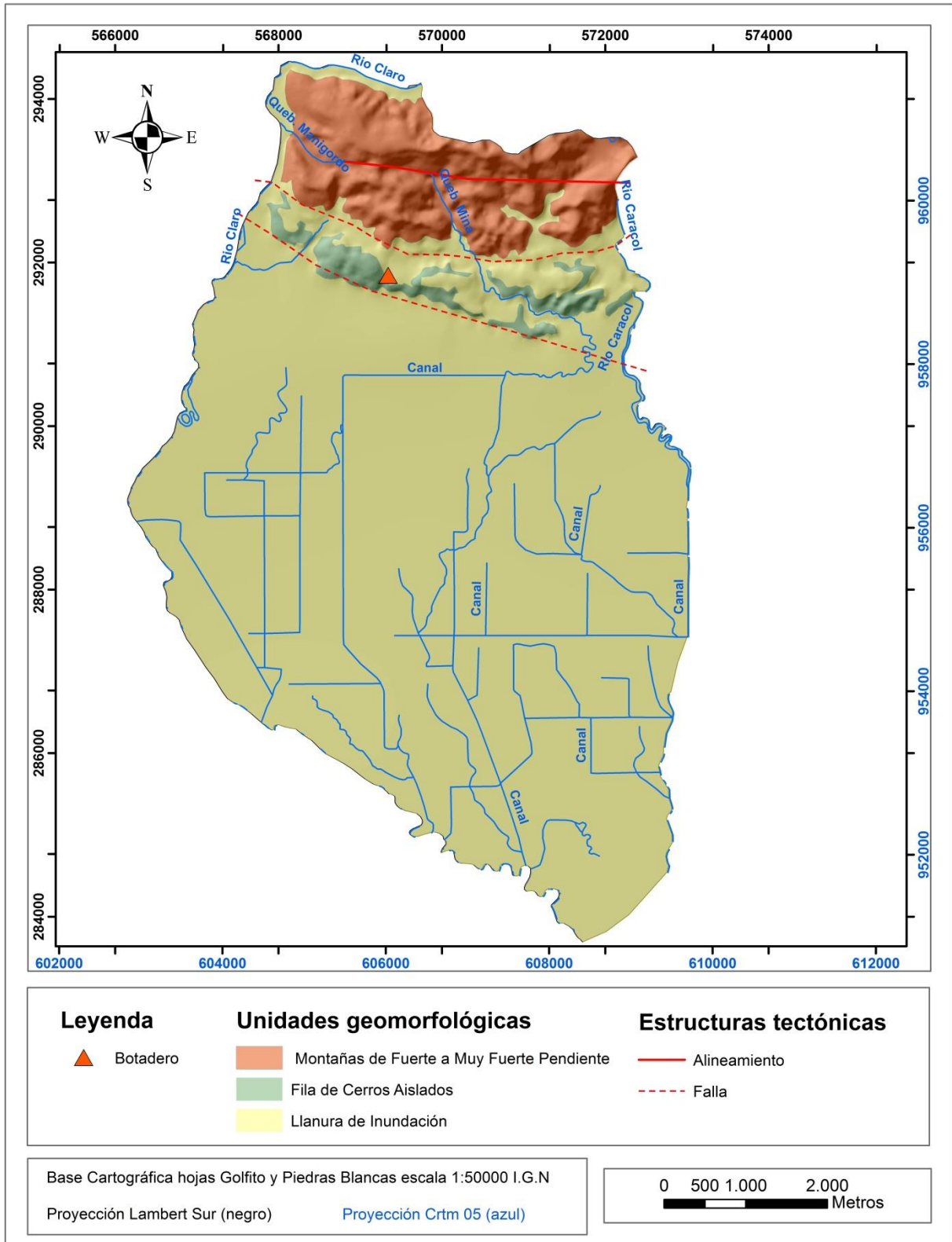


Figura 8: Mapa geomorfológico del área de estudio

## **4. GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO**

### **4.1 Geología Regional**

Para el área de interés en la presente investigación no se cuenta con referencias directas o trabajos previos que brinden información referente a las unidades geológicas aflorantes en la zona, sin embargo existen algunas investigaciones en sectores cercanos a la misma y que fueron utilizados como referencia para su descripción geológica, en específico algunas de las referencias consultadas corresponden con la campaña geológica de 1997 (Arroyo,1997), donde se expone un cuadro con la estratigrafía de la zona de Golfito. Además se utilizó como referencia el mapa geológico de Costa Rica escala 1:400000 (Denyer & Alvarado, 2007).

A continuación se describe en orden cronológico ascendente las principales formaciones geológicas inherentes al área de estudio según la investigación de las fuentes bibliográficas consultadas, mismas que se representan en la **Figura 9**.

#### **4.1.1 Complejo ígneo Osa-Burica**

Alvarado & Gans, 2012 mencionan la existencia en la región sur de Costa Rica de rocas máficas de origen submarino, con una historia geológica muy compleja, Denyer et al, 2006 y Denyer & Gazel, 2009 interpretan estas rocas como fragmentos acrecionados de un plateau o parte del CLIP, los cuales se diferencian de las rocas del complejo de Nicoya en varios aspectos entre los que destacan la presencia de cuerpos básicos intruyendo o intercalados, deformando sedimentos del Campaniano Tardío hasta por lo menos eoceno (Berrangé & Thorpe, 1988; Berrangé et al, 1989, Di Marco, 1994), además de la presencia de basaltos vesiculares y picriticos (Berrangé & Thorpe, 1988, Berrangé et al, 1989), rocas similares a los granófiros (Buchs et al, 2010) y abundantes vetillas de cuarzo (Alvarado & Gans, 2012).

#### **4.1.2 Formación Fila de Cal**

Definida por Lundberg (1982) y posteriormente descrita por Calvo (1987), quien incluye en esta formación a todos los sistemas carbonatados de plataforma y rampas carbonatadas a macroforaminíferos y algas calcáreas, las cuales considera se desarrollaron en el eoceno a causa de un ascenso tectónico generalizado, representando la época de máxima sedimentación carbonatada de la región centroamericana meridional.

Mora (1979) califica esta formación como compuesta por calizas arrecifales y detríticas pobremente estratificadas, de color blanco amarillento y con gran cantidad de foraminíferos orbitoides y otros fósiles.

Linkimer & Aguilar (2000) afirman que las calizas de esta formación contienen macroforaminíferos, especialmente Nummulites y algas como constructores principales, además de otros grupos ecológicos como corales, hidrozoos y moluscos.

El espesor máximo es de 200 m y se encuentra en contacto superior transicional con la Formación Térraba. Dentro de esta formación se encuentran, según Henningsen (1965):

Subunidad arrecifal: compuesta por boundstone de color amarillo claro de estratificación gruesa a masiva, con foraminíferos y otros fósiles.

Subunidad detrítica: compuesta por los sedimentos producidos por la erosión del sistema arrecifal, varía de color gris a blanco, y está compuesta por algas, foraminíferos, radiolarios y oolitos.

#### **4.1.3 Formación Térraba**

Dengo (1962) fue el primero en describir esta intercalación de lutitas calcárea, algunas veces silíceas, y calizas impuras de poco espesor. El tamaño de grano es variable y abarca limolitas, areniscas y conglomerados.

Henningsen (1965) describe que la formación Térraba se caracteriza por la presencia de lutitas calcáreas, a veces silíceas, intercaladas por frecuentes bancos de calizas impuras.

Mora (1979) subdividió a la formación Térraba en dos Unidades:

##### ***Unidad Zapote***

Consiste turbiditas de profundidad intermedia compuestas por areniscas, limonitas y arcillositas, con intercalaciones de productos de vulcanismo submarino (aglomerados, brechas, vulcarenitas y conglomerados volcánicos). Generalmente la matriz es arcillosa y en raras ocasiones el cemento es carbonatado. En la localidad tipo Quebrada Zapote sobreyace de forma concordante a la Formación Fila de Cal; y subyace a la Unidad Lagarto. Su espesor es de 1200 m. La edad asignada es Oligoceno Inferior a Medio.

### ***Unidad Lagarto***

Consiste en facies proximales, con predominio de conglomerados, areniscas y depósitos turbidíticos de canal. La localidad tipo se encuentra en el caserío de Lagarto en el río Terraba. Su espesor total varía entre 1200 y 1500 m esta subyacida por la Unidad Zapote y sobreyacida concordantemente por la Formación Curré. La edad asignada según los fósiles presentes es de Oligoceno Superior a Mioceno Inferior.

#### **4.1.4 Depósitos Cuaternarios**

Tournon & Alvarado (1997) describen los depósitos cuaternarios que se extienden a lo largo de la costa pacífica, en la zona sur en las poblaciones de Sierpe y Coto como depósitos Aluviales, palustres hasta fluvio marinos (manglares).

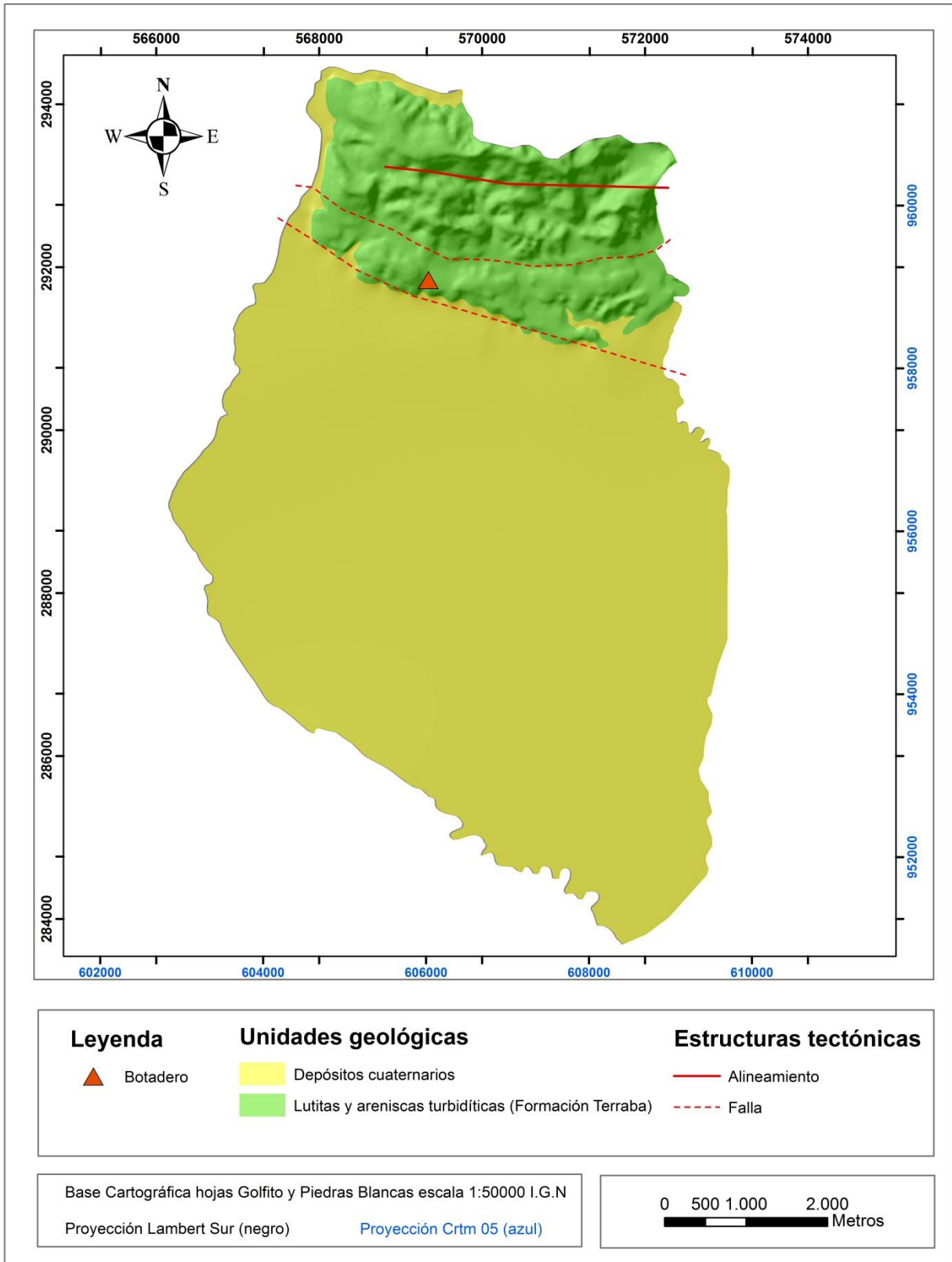


Figura 9: Mapa geológico regional para el área de estudio



## 4.2 Geología Local

Con base en el trabajo de campo realizado se logró obtener una caracterización general sobre la geología existente dentro del área de interés. Como parte de dicha labor se identificaron un total de 29 afloramientos de roca (Cuadro 1 y Figura 10), los cuales se hallan ubicados principalmente hacia la parte norte del área, lográndose reconocer con ello la existencia de 4 diferentes unidades litológicas en la zona.

**Cuadro 1: Listado de afloramientos de roca visitados, (coordenadas Lambert Sur)**

Afloramiento	Longitud	Latitud	Litología observada
GF-1	569298	292011	Conglomerado
GF-2	569219	292023	Conglomerado
GF-3	569075	291949	Conglomerado
GF-4	569402	292593	Areniscas finas grises, presencia de fósiles de gasterópodos y bivalvos
GF-5	568690	292671	Arenisca fina grisácea
GF-6	568744	292750	Arenisca fina grisácea
GF-7	569080	291947	Conglomerado
GF-8	572060	293196	Calizas blancas masivas
GF-9	572243	293485	Arenisca fina café claro
GF-10	567472	293935	Arenisca fina café claro
GF-11	568396	294670	Caliza café claro, alterada
GF-12	568544	295272	Caliza color gris claro
GF-13	568342	294506	Arenisca fina
GF-14	568413	294413	Depósito de aluvión
GF-15	570294	294805	Calizas
GF-16	569231	294025	Arenisca fina grisácea
GF-17	569272	293998	Arenisca fina grisácea
GF-18	569468	293926	Arenisca fina grisácea
GF-19	572266	293406	Arenisca fina grisácea
GF-20	568385	291812	Depósito de aluvión
GF-21	571829	291496	Arenisca fina grisácea
GF-22	571682	291493	Conglomerado
GF-23	571913	291375	Conglomerado
GF-24	571951	291479	Conglomerado
GF-25	572045	291548	Conglomerado
GF-26	567076	291485	Depósito de aluvión
GF-27	567219	291659	Depósito de aluvión
GF-28	572341	291491	Depósito de aluvión
GF-29	572306	291396	Depósito de aluvión

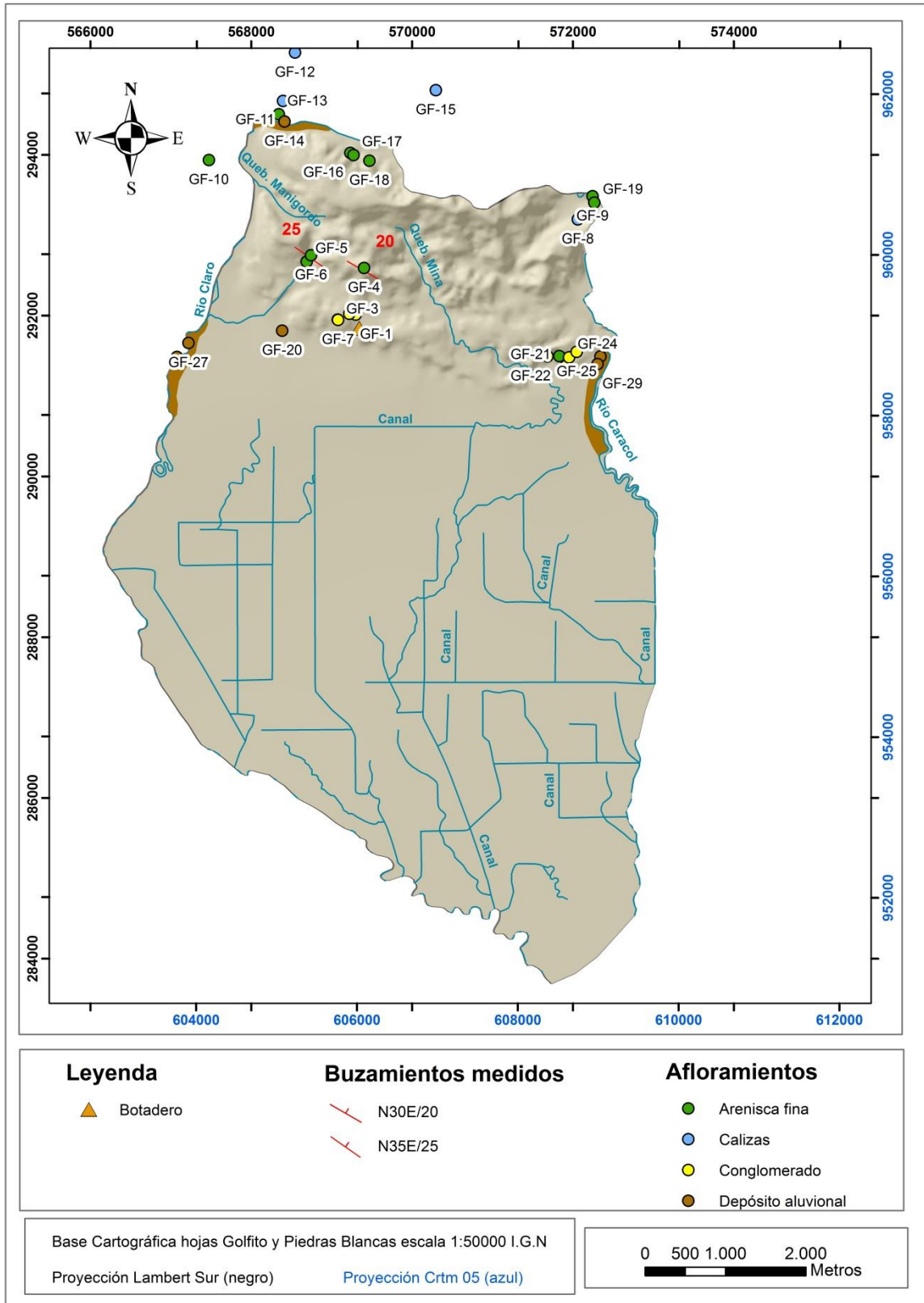


Figura 10: Mapa de afloramientos de roca visitados

A continuación se presenta una breve descripción de las principales características observadas para cada una de las unidades de roca definidas en el presente estudio, mismas que a su vez se representan en la **Figura 11**. Por su parte en la **Figura 12** y **Figura 13** se muestran la columna estratigráfica y el perfil geológico correspondiente al área de estudio.

#### **4.2.1 Unidad de Areniscas finas Quebrada Manigordo**

Esta unidad de roca se encuentra aflorando en diferentes puntos a lo largo del sector norte y noreste del área de estudio, abarcando un área aproximada de unos 9,1 Km<sup>2</sup>. Litológicamente se describe como una arenisca fina de color grisáceo en aquellos afloramientos en donde la roca se muestra más sana, variando significativamente su coloración a un tono café claro para aquellas secciones en donde la misma presenta un mayor grado de alteración o meteorización. Como principales características de esta unidad destaca el hecho de presentar comúnmente una meteorización de tipo esferoidal, con una textura variable entre masiva en algunos afloramientos y con fractura de tipo concoide a una textura más bien estratificada y con presencia de estructuras estratigráficas como laminación paralela planar y laminación cruzada. Se determinó que esta secuencia de areniscas se encuentra buzando con una dirección preferente de N30°E con un ángulo de inclinación variable entre los 20° y 25°, además se logró determinar la existencia de algunos planos de fractura para estas areniscas con rumbos predominantemente hacia el N.

Como dato particular cabe mencionar que para el caso específico del afloramiento GF-5, ubicado en las coordenadas 568690 E y 292671 N, se observó la presencia de fósiles de bivalvos y gasterópodos ubicados en estratos de areniscas medias color café, los cuales a su vez se encuentran acuñados dentro de esta secuencia de areniscas finas grisáceas.

Según la bibliografía existente, esta unidad de areniscas ha sido asociada a la formación Térraba, específicamente a la unidad Lagarto como una fase proximal de turbiditas, en las cuales se da el predominio de areniscas, conglomerados y depósitos turbidíticos de canal.



**Fotografía 1: Areniscas finas grisáceas aflorando en el margen izquierdo del Río Claro (coordenadas 642702 E y 75828 N).**

#### **4.2.2 Unidad de Conglomerados Quebrada Mina**

Esta unidad se encuentra aflorando en la parte central-norte del área de estudio, afloramientos bien expuestos de estos conglomerados se hallan en las cercanías del vertedero de basura de Golfito, así como en diferentes puntos a lo largo del camino que comunica a dicho vertedero con la carretera Interamericana Sur, lo mismo que en los alrededores del poblado de Santiago de Caracol.

Estos conglomerados se caracterizan por la presencia de un conjunto de clastos de diversa composición tanto ígneos como sedimentarios, los cuales se hallan inmersos en una matriz arcillosa color café-naranja, en una relación clastos-matriz de aproximadamente 70-30%.

Estos clastos generalmente se presentan en contacto de tipo flotante con la matriz, con formas variables entre subredondeados a redondeados, generalmente con alta

esfericidad, sus tamaños varían entre milimétricos hasta centimétricos. En general estos conglomerados se observan con un importante grado de meteorización, siendo común la generación de estructuras tipo cárcavas en aquellas regiones en donde es palpable una mayor alteración.

La relación estratigráfica entre esta unidad de conglomerados y la unidad de areniscas finas grisáceas descrita en el punto anterior no es del todo clara, ya que en algunos sectores estos conglomerados parecen estar subyaciendo a dichas areniscas, mientras que en otros afloramientos parecen estar más bien sobre yaciéndolas, por lo que en este caso se han interpretado como una sección intercalada entre la Unidad de Areniscas Finas Quebrada Manigordo.



**Fotografía 2: Unidad de Conglomerados aflorando en las cercanías del poblado de Santiago de Caracol.**

### 4.2.3 Unidad de Calizas Quebrada Tigra

Se encuentran aflorando sobre la margen derecha del río Claro, específicamente en el extremo norte del área de estudio. Se describen como una secuencia de calizas de color gris oscuro a gris azulado, con una textura masiva y alta dureza, las rocas pertenecientes a esta unidad en general se muestran con un ligero grado de alteración y poco fracturadas, destacando la presencia de nodulos algales y algunos clastos alterados dentro de la misma. Según las mediciones realizadas esta unidad de calizas se encuentra buzando en una dirección N05E con una inclinación de 10 °.

Hacia la parte noreste del área de estudio, siempre fuera de la misma, específicamente en la parte norte de la quebrada Tigra se logró divisar una secuencia de calizas con una coloración blancuzca con presencia de macroforaminíferos y algas, las calizas presentan una textura masiva con una alta dureza y recristalizadas. De acuerdo con la estratigrafía observada en el campo se interpreta que esta secuencia de calizas se halla sobreyaciendo a la unidad de areniscas finas grisáceas.



Fotografía 3: Calizas aflorando sobre la margen derecha del Río Claro, en el extremo norte del área de estudio.

#### 4.2.4 Unidad de depósitos recientes

Esta unidad litológica es la de mayor extensión dentro del área de estudio, ocupando aproximadamente unos 39 Km<sup>2</sup>, se encuentra aflorando a lo largo de la parte central y sur de la misma, coincidiendo con las zonas cuya topografía plana han favorecido la acumulación de sedimentos transportados por los ríos desde las regiones montañosas ubicadas al norte y derivados de los procesos de meteorización y erosión de las rocas aflorantes en dichas zonas montañosas.

Según la información reportada en los registros de pozos ubicados en el área, este depósito se compone de una serie de intercalaciones entre arcillas, arenas finas y gravas, siendo más abundantes las secuencias de composición arcillosa, llegando a alcanzar un espesor máximo superior a los 60 m para este depósito.

Además dentro de esta unidad se incluyen los depósitos de aluvión ubicados en los márgenes de los ríos Claro y Caracol, los cuales se encuentran compuestos por clastos tanto de arenisca como de roca caliza, cuyos tamaños varían entre centimétricos a métricos y con formas generalmente subredondeados a redondeadas, mismos que se hallan inmersos en una matriz arenosa color café grisáceo, los clastos en general se encuentran en contacto flotante con la matriz y presentan una mala selección.



**Fotografía 4: Secuencia aluvional perteneciente a la unidad de depósitos recientes expuesta sobre el margen del Río Claro.**

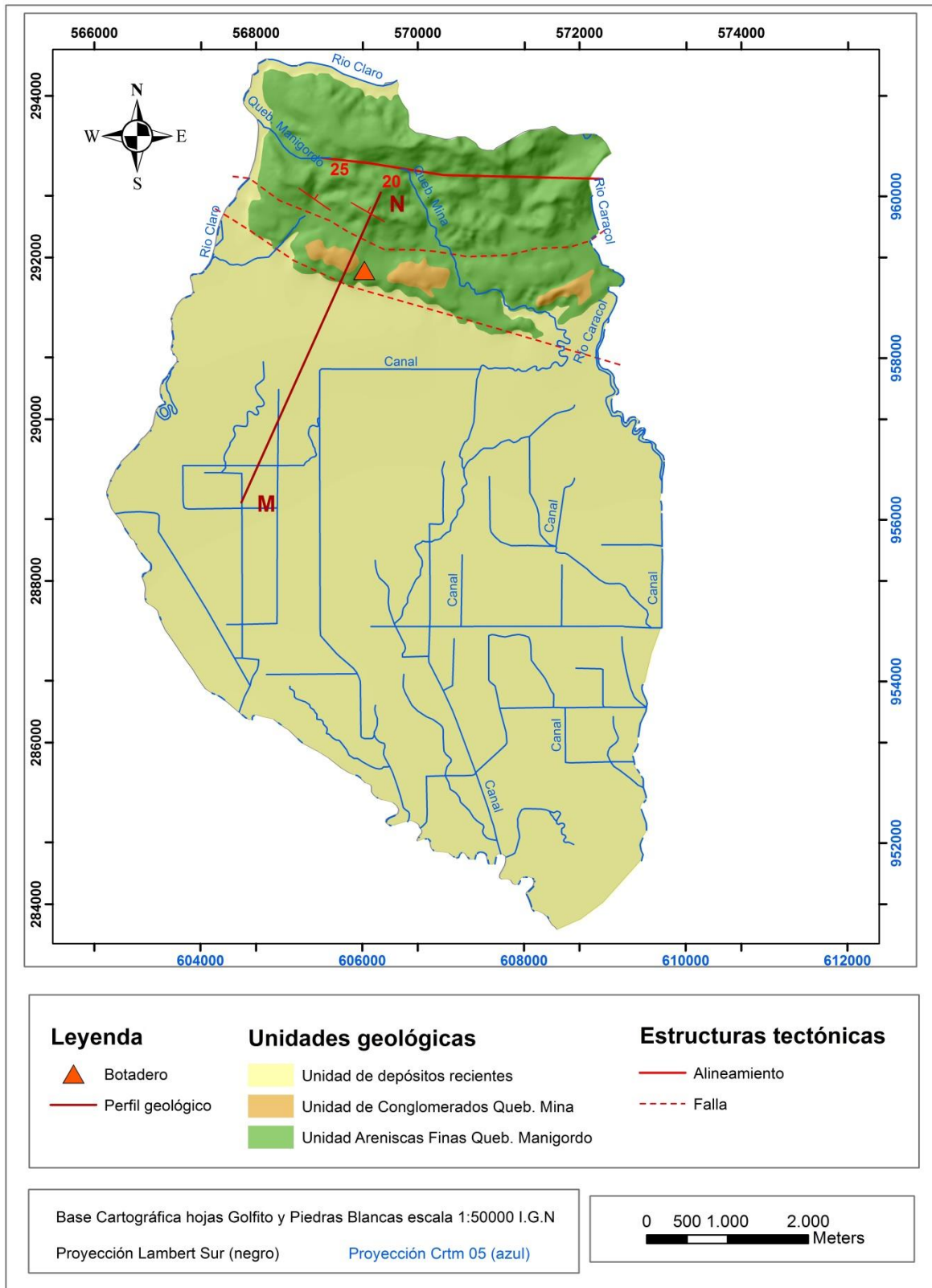
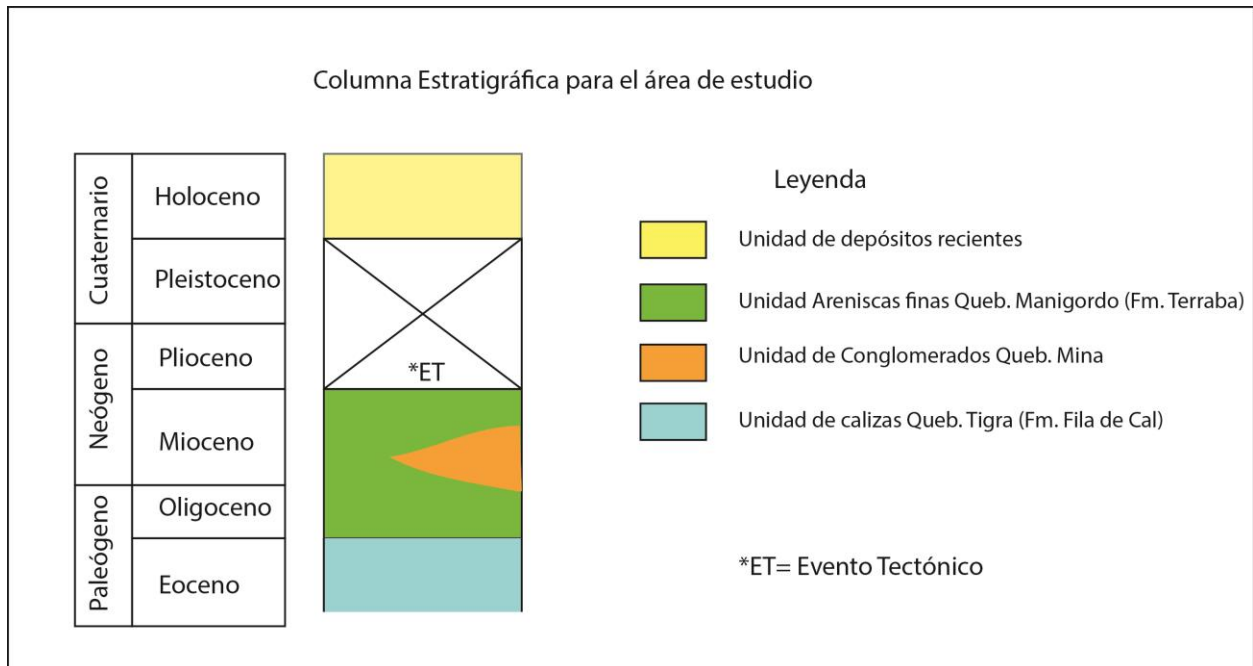
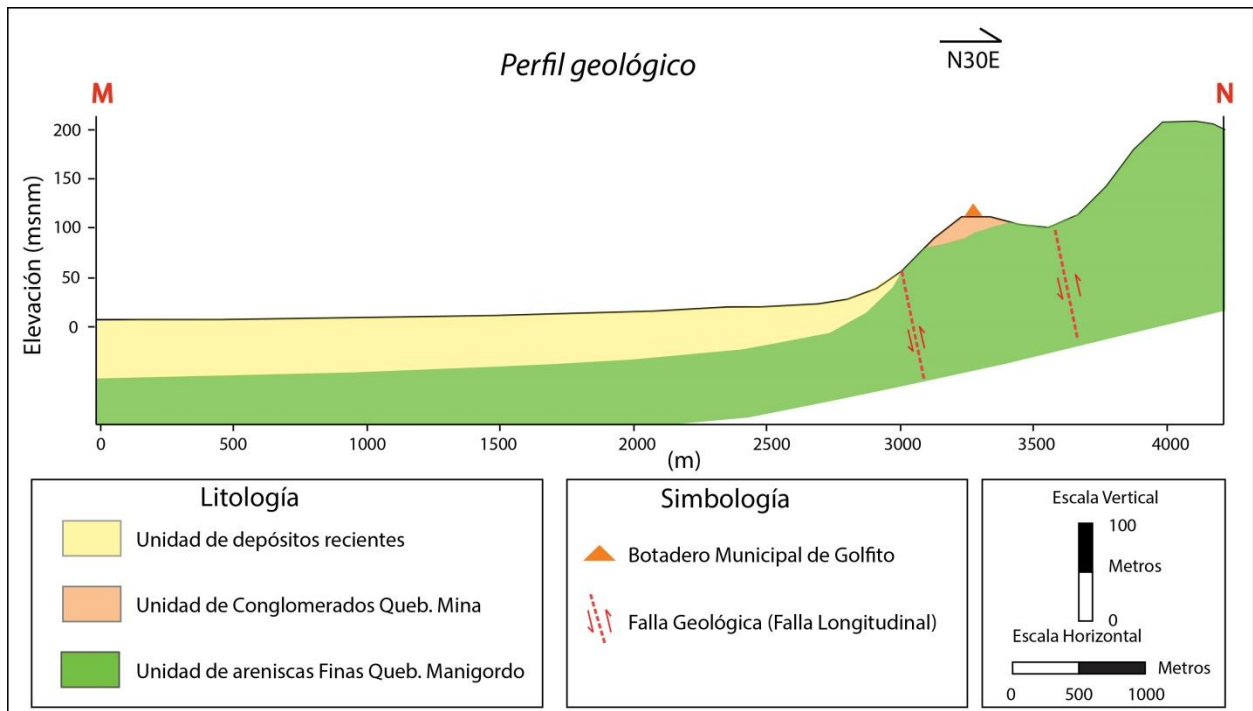


Figura 11: Mapa geológico Local del área de estudio





**Figura 12: Columna estratigráfica del área de estudio.**



**Figura 13: Perfil geológico del área de estudio**

## **5. BALANCE HÍDRICO DE SUELOS**

### **5.1 Metodología de Schosinsky para balance hídrico de suelos**

La metodología de Schosinsky (2006) es un mecanismo que pretende cuantificar la recarga potencial de un acuífero basado en la distribución de la precipitación y de los coeficientes de infiltración de los suelos.

Esta metodología contempla la evaluación de una serie de parámetros que tienen una gran relevancia en el proceso de infiltración del agua en el suelo y en la recarga de los acuíferos, entre los cuales destacan: a) los aspectos meteorológicos, tomando en cuenta los rangos de precipitación y temperaturas promedio, b) las propiedades del terreno, específicamente el relieve o la pendiente del mismo, c) las características de la zona no saturada del suelo, como lo son la capacidad de campo, punto de marchitez, densidad aparente, textura, tasa de infiltración y profundidad de raíces extractoras de agua, d) y por último se toma en consideración el uso de la tierra y su cobertura vegetal.

Mediante el análisis en conjunto de cada uno de estos parámetros y la sobreposición de los mismos es posible definir zonas con características específicas y únicas, las cuales deben ser evaluadas de manera individualizada para la elaboración del balance hídrico.

A continuación se presenta de manera detallada el análisis de cada uno de los parámetros de balance incluidos en la metodología de Schosinsky (2006).

#### **5.1.1 Meteorología**

La información meteorológica para el área de estudio fue obtenida a partir de los registros de las estaciones meteorológicas pertenecientes al Instituto Meteorológico Nacional (IMN), y ubicadas dentro del área de estudio o en sus alrededores, en específico para la realización de este balance hídrico se tomó en cuenta los registros de 5 estaciones, las cuales corresponden con las estaciones Río Claro, Coto 58, Coto 54, Coto 52 y Coto 50, cuya distribución geográfica dentro del área se muestra en la **Figura 14**.

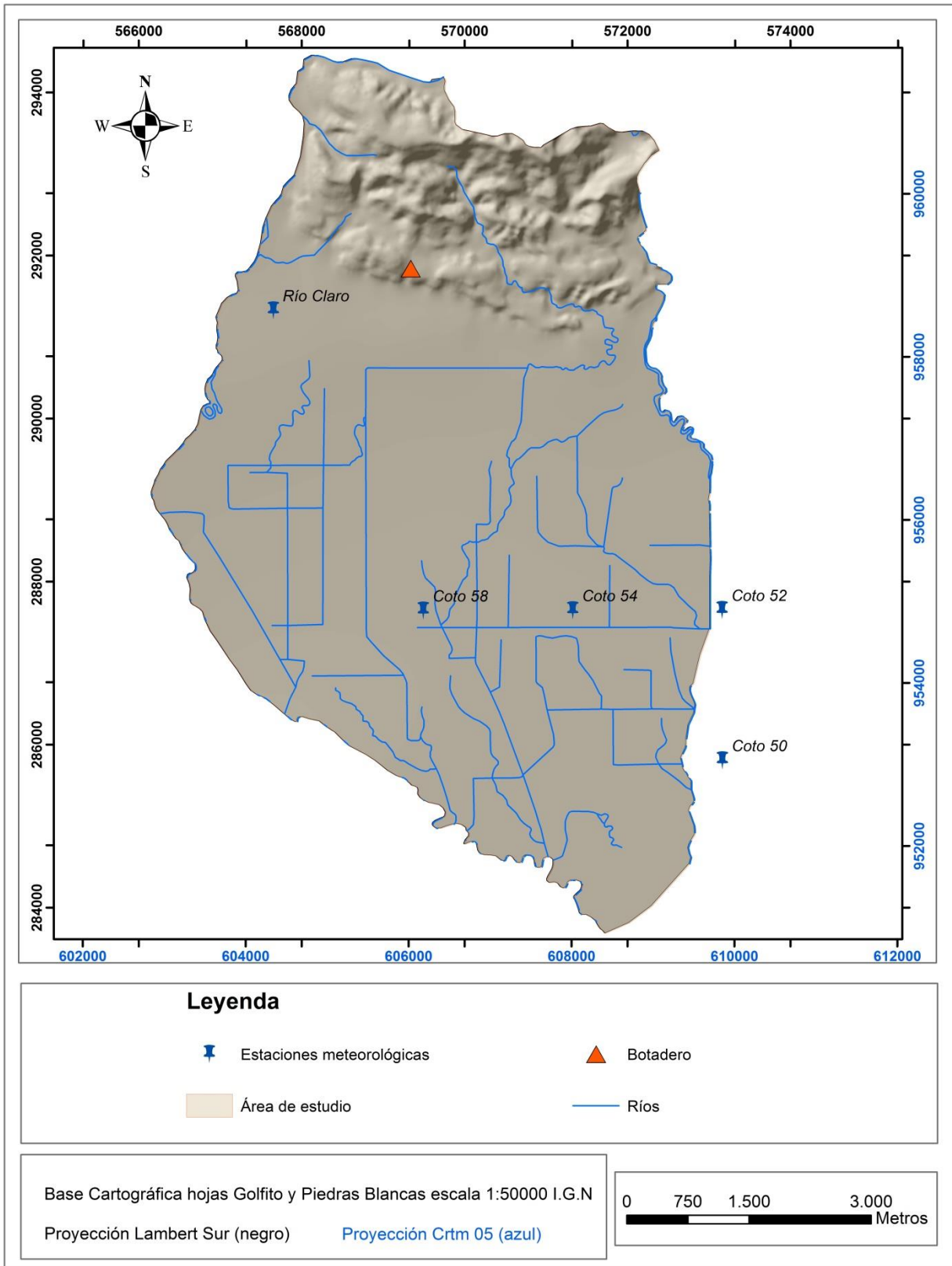


Figura 14: Mapa de ubicación estaciones meteorológicas

Los registros de las estaciones meteorológicas mencionadas anteriormente presentan información referente tanto a precipitación mensual como anual, destacando que los períodos de registro o evaluación de cada una de las diferentes estaciones suelen no ser uniformes para el caso de la precipitación, mientras que para la temperatura únicamente la estación Río Claro presenta información referente a este parámetro, de tal manera que para efectos de la elaboración del balance hídrico dichas temperaturas fueron consideradas como representativas para la totalidad del área de estudio.

En el Cuadro 2 se presentan los datos registrados en cuanto a precipitación promedio para cada una de las estaciones meteorológicas consultadas, mientras que en el Cuadro 3 se muestran las temperaturas promedio registradas por la estación Río Claro.

**Cuadro 2: Registros de precipitación promedio mensual y anual para el área de estudio**

Mes	Río Claro	Coto 58	Coto 54	Coto 52	Coto 50	Promedio
Enero	133,3	111,4	110,4	110,5	88,1	110,740
Febrero	108,5	92,9	98,1	98,0	57,4	90,980
Marzo	177,2	117,4	124,3	134,4	113,1	133,280
Abril	281,5	276,2	245,3	249,1	230,6	256,540
Mayo	504,8	448,1	448,9	504,9	450,6	471,460
Junio	485,6	453,1	438,7	477,7	435,2	458,060
Julio	546,3	478,7	486,3	527,3	482,3	504,180
Agosto	589,8	531,7	528,6	606,1	565,4	564,320
Septiembre	625,8	521,5	549	575,8	547,9	564,000
Octubre	690,1	617,3	579,5	634,2	615,9	627,400
Noviembre	554,2	463,3	456,8	517,6	457,8	489,940
Diciembre	280,7	214,6	205,3	203,1	178,1	216,360
Anual	4977,8	4326,2	4271,2	4638,7	4222,4	4487,260
Periodo	1985-2011	1964-2010	1950-2010	1960-2010	1954-2010	

En la Figura 15 se muestra la distribución de la precipitación promedio mensual para la totalidad del área de estudio, obtenida a partir de los datos registrados por cada una de las estaciones meteorológicas consultadas, se aprecia como las precipitaciones máximas en la zona se dan entre los meses de setiembre y octubre alcanzando valores que oscilan entre los 564 y 627 mm promedio, además en el mes de mayo se observa un incremento en las precipitaciones con respecto a los meses anteriores, llegando a los 450 mm, marcando el inicio de la época lluviosa en la zona. A partir de finales de julio y hasta el mes de octubre las precipitaciones incrementan, noviembre marca el límite de la estación lluviosa en la zona. Los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y abril conforman la estación seca, muy marcada con una cantidad de precipitación que no supera los 250 mm mensuales, febrero corresponde con el mes más seco con

menos de 100mm. Por su parte la precipitación promedio anual para la zona ha sido cifrada en 4487,26 mm.

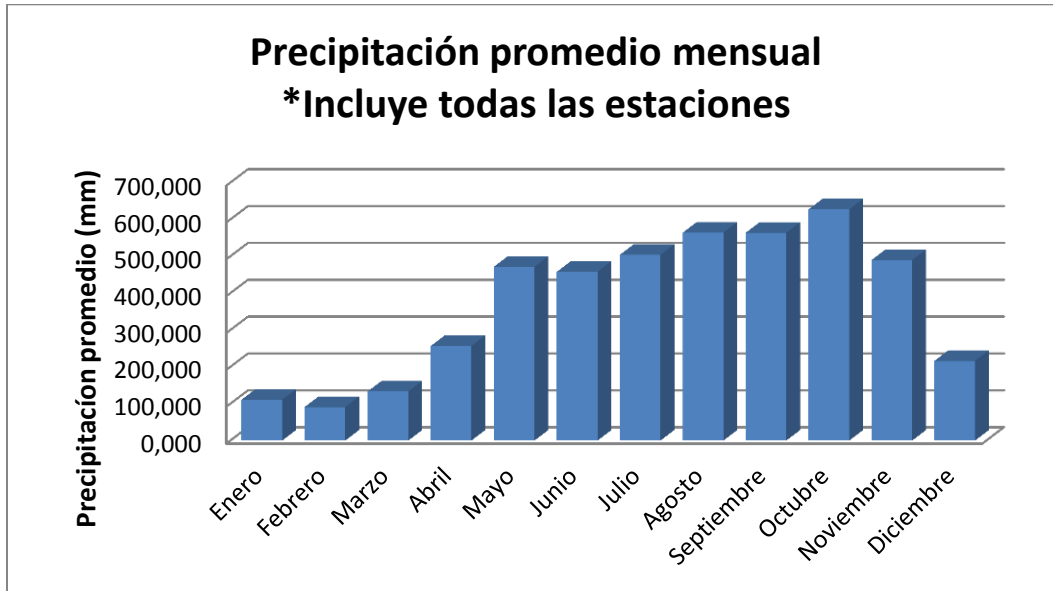
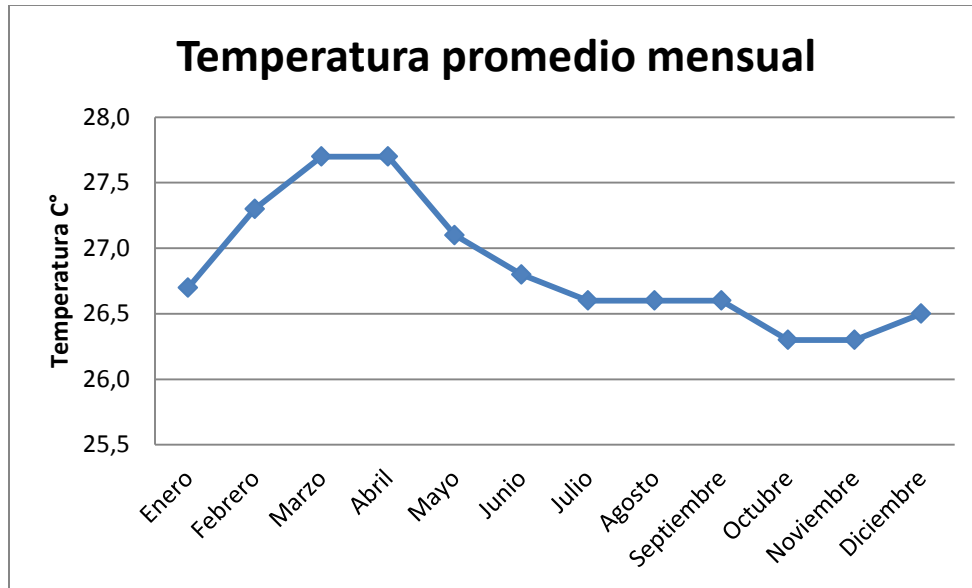


Figura 15: Gráfico donde se muestra la distribución de la precipitación promedio mensual para el área de estudio.

Cuadro 3: Distribución de temperaturas promedio para el área de estudio.

Mes	Río Claro
Enero	26,7
Febrero	27,3
Marzo	27,7
Abril	27,7
Mayo	27,1
Junio	26,8
Julio	26,6
Agosto	26,6
Septiembre	26,6
Octubre	26,3
Noviembre	26,3
Diciembre	26,5
Anual	26,9



**Figura 16: Gráfico de temperaturas promedio para el área de estudio según los registros de la estación meteorológica Río Claro.**

La **Figura 16** muestra el comportamiento de la temperatura promedio mensual en el área de estudio, según los registros de la estación meteorológica Río Claro, se puede observar como en general existe una ligera variación entre los 26,3 y 27,7 ° C, siendo los meses de octubre y noviembre donde se reporta la menor temperatura, mientras que los meses de marzo y abril corresponden con los más cálidos. La temperatura anual promedio para el área de estudio es de 26,9 ° C.

### Mapa de precipitación

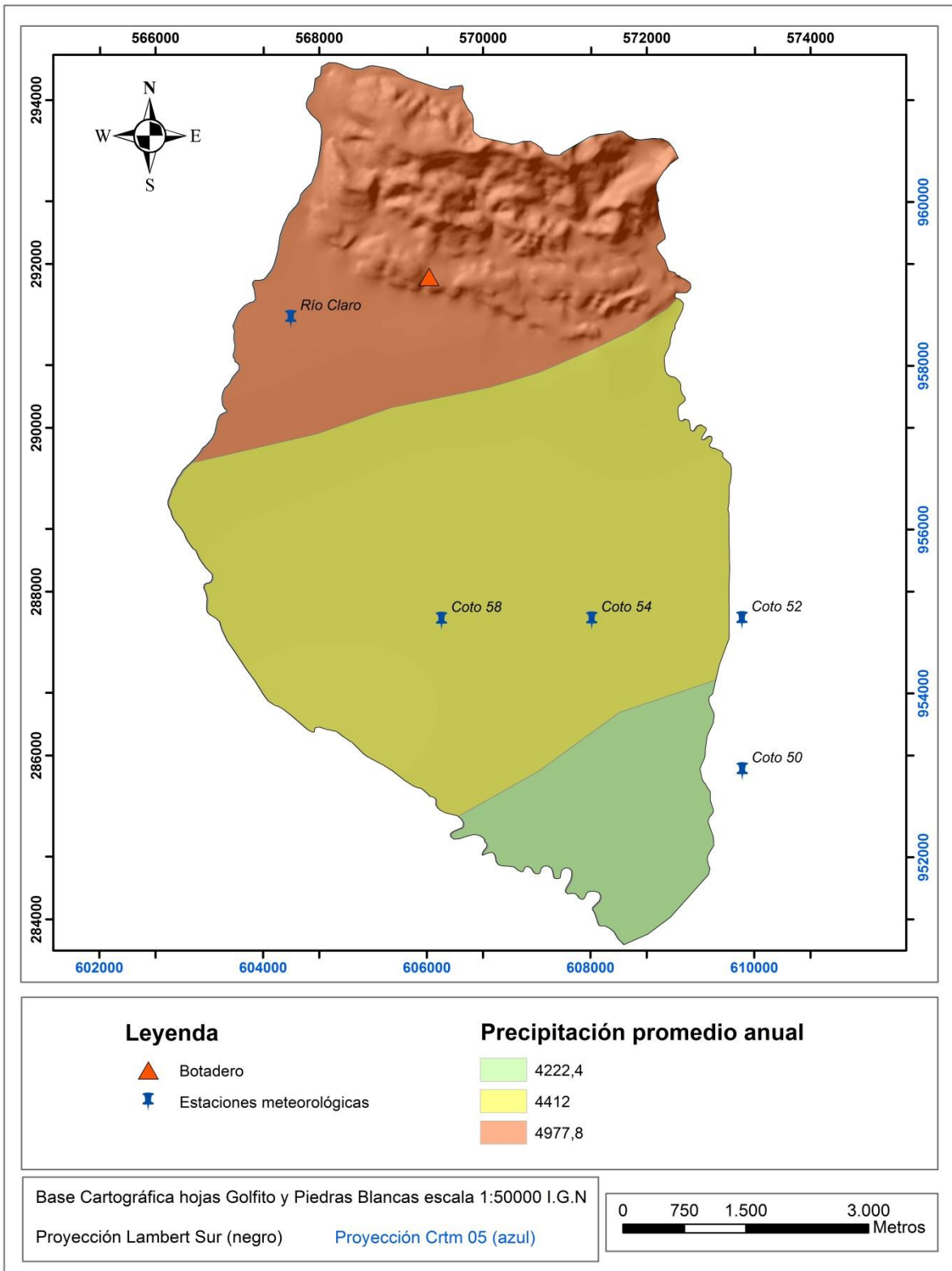
Como parte de la metodología utilizada para el desarrollo del balance hídrico se construyó un mapa de precipitación representativo para el área de estudio, el cual con base en los diferentes valores de precipitación promedio reportados en el **Cuadro 2** mostrará la distribución de la precipitación dentro de dicha área.

El procedimiento seguido en este caso consistió en subdividir el área de estudio en diferentes zonas de acuerdo con la ubicación geográfica y los valores de precipitación reportados por cada una de las diferentes estaciones meteorológicas analizadas, esta subdivisión se hizo siguiendo la metodología de polígonos de Thyssen para definir el área de influencia de cada estación meteorológica en relación a su ubicación y la distancia existente entre cada una de ellas.

En este caso el área de estudio ha sido subdividida en tres diferentes zonas tal y como se muestra en la **Figura 17**, una región norte para la cual se tomó como referencia la información registrada por la estación Río Claro, una región central que se definió con base a lo reportado por las estaciones Coto 58, Coto 54 y Coto 52, para lo cual se

procedió a calcular un valor promedio de precipitación que fuera representativo para esta zona, utilizando para ello los datos de esas tres estaciones, mientras que finalmente para la región sur se tomó como base la información registrada por la estación Coto 50.

De acuerdo con los resultados obtenidos se determinó que la parte norte del área de estudio es la zona que presenta los valores máximos de precipitación promedio anual con un valor de 4977,8 mm, coincidiendo este máximo de precipitación con la región montañosa y topográficamente más elevada del área de estudio, mientras que hacia la parte central se registró una tasa de precipitación promedio intermedia de 4412 mm, y finalmente hacia el extremo sur del área de estudio se obtuvo el mínimo de precipitación promedio anual con un valor de 4222,4 mm



**Figura 17: Distribución de la precipitación promedio anual, utilizada para la elaboración del balance hídrico de suelos.**



### 5.1.2 Cálculo de la evapotranspiración potencial

La fundación Centro Internacional de hidrología Subterránea (FCIHS) define la evapotranspiración como el proceso por el cual el agua pasa de estado líquido a gaseoso retornando a la atmósfera, ya sea de manera directa a través de un proceso físico mediante la evaporación o bien de forma indirecta a través del metabolismo de las plantas.

En general para una cuenca o una sección de esta, resulta prácticamente imposible determinar la evapotranspiración generada por la vegetación, debido a la gran variedad de vegetación y grado de desarrollo de las plantas existentes en la cuenca o una zona de la misma, por este motivo, resulta conveniente asumir una evapotranspiración que se estime como promedio, la cual se considerará como igual a la evapotranspiración potencial (ETP), (Schosinsky, 2006).

Tal y como lo sugiere la metodología de Schosinsky (2006), para el cálculo de la ETP se utilizó la ecuación de Blaney & Criddle (ONU, 1972), la cual se muestra a continuación:

$$ETP \left( \frac{mm}{mes} \right) = (8,10 + 0,46T)Ps \text{ Ecuación 1}$$

Dónde:

*ETP= Evapotranspiración potencial (mm/mes)*

*T= Temperatura media mensual (C°)*

*Ps= Porcentaje de horas de luz solar mensual*

En el **Cuadro 4** se presentan los resultados obtenidos del cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP), tomando en consideración los porcentajes de horas de luz solar para la latitud 10° del hemisferio norte, mientras que los datos de temperatura promedio fueron tomados de los registros de la estación meteorológica Río Claro, la cual fue la única que incluyó datos de temperatura para la zona.

**Cuadro 4: Cálculo de la evapotranspiración potencial para el área de estudio.**

Mes	T mensual	Ps	ETP (mm/mes)
Enero	26,7	8,13	165,71
Febrero	27,3	7,47	154,32
Marzo	27,7	8,45	176,11
Abril	27,7	8,37	174,45
Mayo	27,1	8,81	181,19
Junio	26,8	8,6	175,68
Julio	26,6	8,86	180,18
Agosto	26,6	8,71	177,13
Septiembre	26,6	8,25	167,77
Octubre	26,3	8,34	168,45
Noviembre	26,3	7,91	159,77
Diciembre	26,5	8,1	164,35
	<b>ETP anual</b>		<b>2045,09</b>

### 5.1.3 Pendiente del terreno

Otro de los factores tomados en cuenta por la metodología de Schosinsky para la ejecución de un balance hídrico de suelos es la pendiente del terreno. La topografía juega un papel preponderante en la determinación de la infiltración del agua en el subsuelo y en la inminente recarga de los acuíferos, en general regiones con topografía plana o relativamente plana tienden a ser más favorables para que se produzca una mayor tasa de infiltración de agua en los suelos, con la consecuente probabilidad de que se genere una mayor recarga acuífera para estos sitios, en contraparte zonas con topografías o pendientes abruptas tienden a ser más favorables para que se lleven a cabo los procesos de escorrentía a través de la superficie, reduciendo con ello la tasa de infiltración del agua en los suelos.

#### **Mapa de pendientes**

Mediante la utilización de un sistema de información geográfica (SIG) y a partir de la base cartográfica de la zona se generó un modelo de elevación digital del terreno, con el cual fue posible realizar una caracterización de pendientes para el área de estudio. Esta clasificación de pendientes fue realizada en unidades porcentuales, en concordancia con lo propuesto por Schosinsky (2006). Dicha clasificación se representa en la **Figura 18**.

Una vez generado el mapa de pendientes con su respectiva clasificación porcentual es posible obtener el correspondiente factor de pendiente (Kp) para cada una de las categorías de pendientes definidas en la metodología de Schosinsky (2006), tal y como se representa en el **Cuadro 5**.

**Cuadro 5: Definición de factor de pendiente (Kp).**

Por pendiente	Pendiente	Kp
Muy plana	0,02-0,06 %	0,3
Plana	0,3-0,4 %	0,2
Algo plana	1%-2%	0,15
Promedio	2-7%	0,1
Fuerte	mayor de 7%	0,06

Debido a que la metodología de Schosinsky (2006) no contempla datos entre 0,06-0,3% y entre 0,4- 1% fue necesario realizar una reconfiguración a la clasificación anterior, con el objetivo de no excluir rangos de pendientes que se encontraran dentro de dichos intervalos y evitar con ello la generación de un balance hídrico errado, es por ello que para efectos de esta investigación se decidió asignar un factor de pendiente de 0,2 a todas aquellas pendientes que se encuentren entre los 0,06 y 1% considerándose las mismas en todo caso como de pendiente plana.

Es así como el mapa de pendientes mostrado en la **Figura 18** se convierte en el mapa de factor de pendiente Kp, mismo que se muestra en la **Figura 19**.

Tanto el mapa de pendientes como el de Kp muestran la existencia de 4 diferentes categorías de pendientes para la zona de estudio, observándose como la región norte se caracteriza por presentar predominantemente pendientes que superan el 7 % con un factor de pendiente (Kp) de 0,06, sin dejar de lado la existencia para esta misma región de algunas zonas más puntualizadas con pendientes consideradas como promedio, cuyos rangos de inclinación del terreno oscilan generalmente entre 5 y 6 %, situación que se presenta principalmente en la zona que se encuentra entre la fila de cerros aislados y la zona montañosa. Mientras que los sectores central y sur del área de estudio se caracterizan por presentar categorías de pendientes que varían entre promedio (2-7%, Kp= 0,10), algo plana (1-2%, Kp=0,15) y plana (0,06-1%, Kp= 0,20), siendo la parte central del área de estudio la que presenta el menor porcentaje de inclinación.

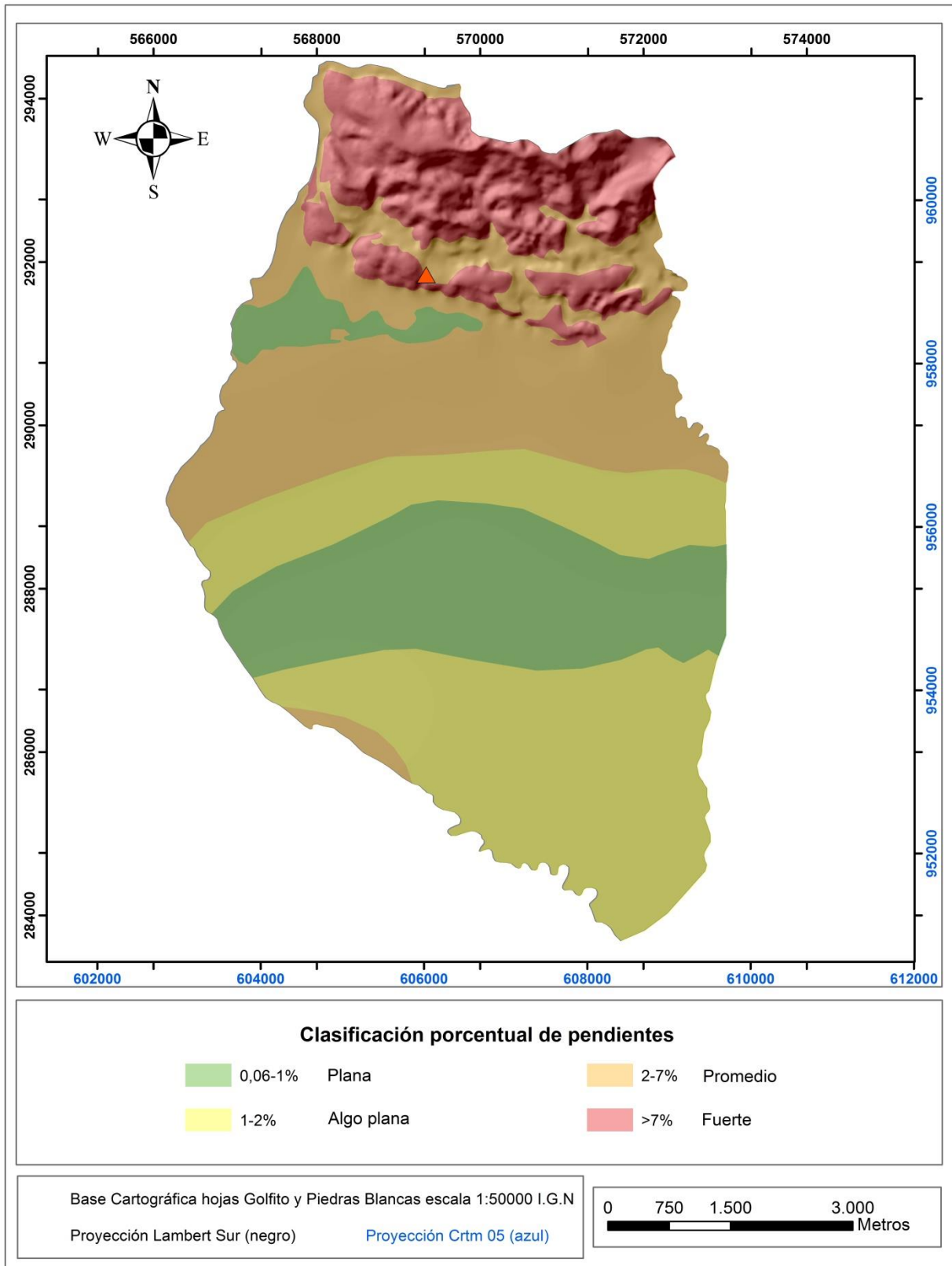
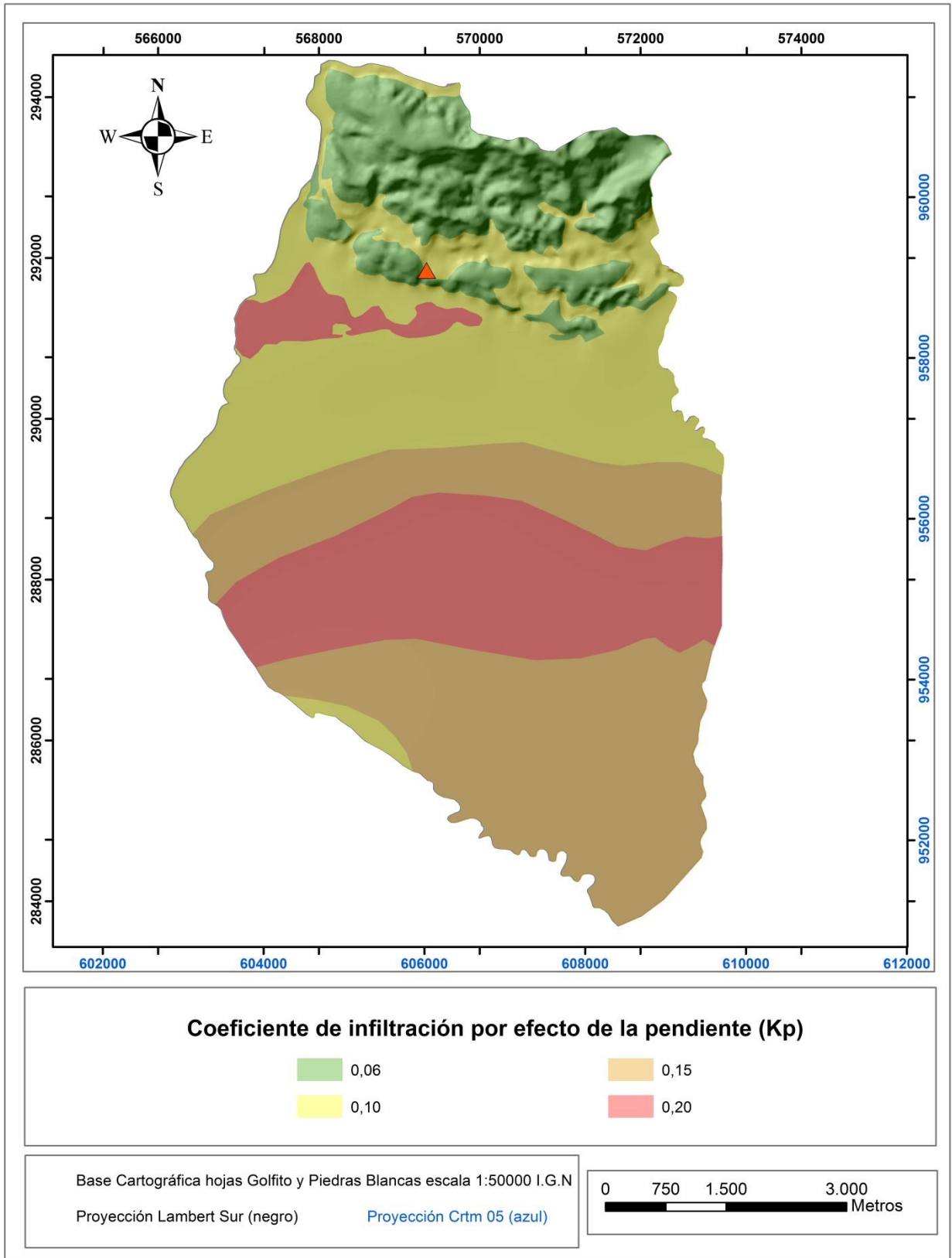


Figura 18: Mapa de clasificación de pendientes en porcentaje para el área de estudio.



**Figura 19: Mapa de factor de pendiente Kp para el área de estudio.**

#### 5.1.4 Uso de suelos

Uno de los parámetros tomados en cuenta por la metodología de Schosinsky (2006) para el desarrollo de balances hídricos es el uso de suelo, el cual juega un papel fundamental en la determinación de la tasa de infiltración de agua en el subsuelo y consecuentemente en la proporción de recarga de los acuíferos.

Para la elaboración del mapa de usos de suelos en el área de estudio se tomó como referencia el mapa de zonificación de uso de suelo para Golfito, sector Guaycará, Golfito y Pavón Norte (2009), escala 1:50000, elaborado por el Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (PRODUS) de la Universidad de Costa Rica, además dicha información fue complementada mediante la consulta y observación de fotografías aéreas del proyecto Terra 1997, sin dejar de lado la comprobación de campo realizada lo largo de toda el área de estudio.

De acuerdo con el análisis efectuado se lograron identificar 6 categorías de usos de suelo principales para el área de estudio, los cuales corresponden con: Bosques, zonas de cultivos, pastos, áreas destinadas al desarrollo de actividades agropecuarias, centros poblacionales no consolidados y zonas con suelos parcialmente descubiertos. La distribución de cada uno de estos usos de suelos se presenta en la **Figura 20**.

Se determinó que el uso de suelo más desarrollado en la zona corresponde con las áreas dedicadas a cultivos, las cuales se encuentran abarcando prácticamente la totalidad de la zona plana del área de estudio y corresponden con aproximadamente un 70 % de la totalidad del área analizada, siendo el cultivo de Palma el más ampliamente desarrollado, sin dejar de lado la presencia en menor proporción de algunos otros cultivos como por ejemplo maíz.

Como segundo uso de suelo de mayor importancia destacan las zonas consideradas como boscosas, las cuales ocupan aproximadamente un 20 % del área de estudio, estas se encuentran ubicadas hacia la parte norte de la misma, coincidiendo con las zonas topográficamente más elevadas.

El 10 % restante se encuentra destinado a usos de suelo de carácter más puntual incluyendo zonas de pastos o pastizal, zonas con desarrollo agropecuario como por ejemplo porquerizas y por último algunos pequeños centros de población.

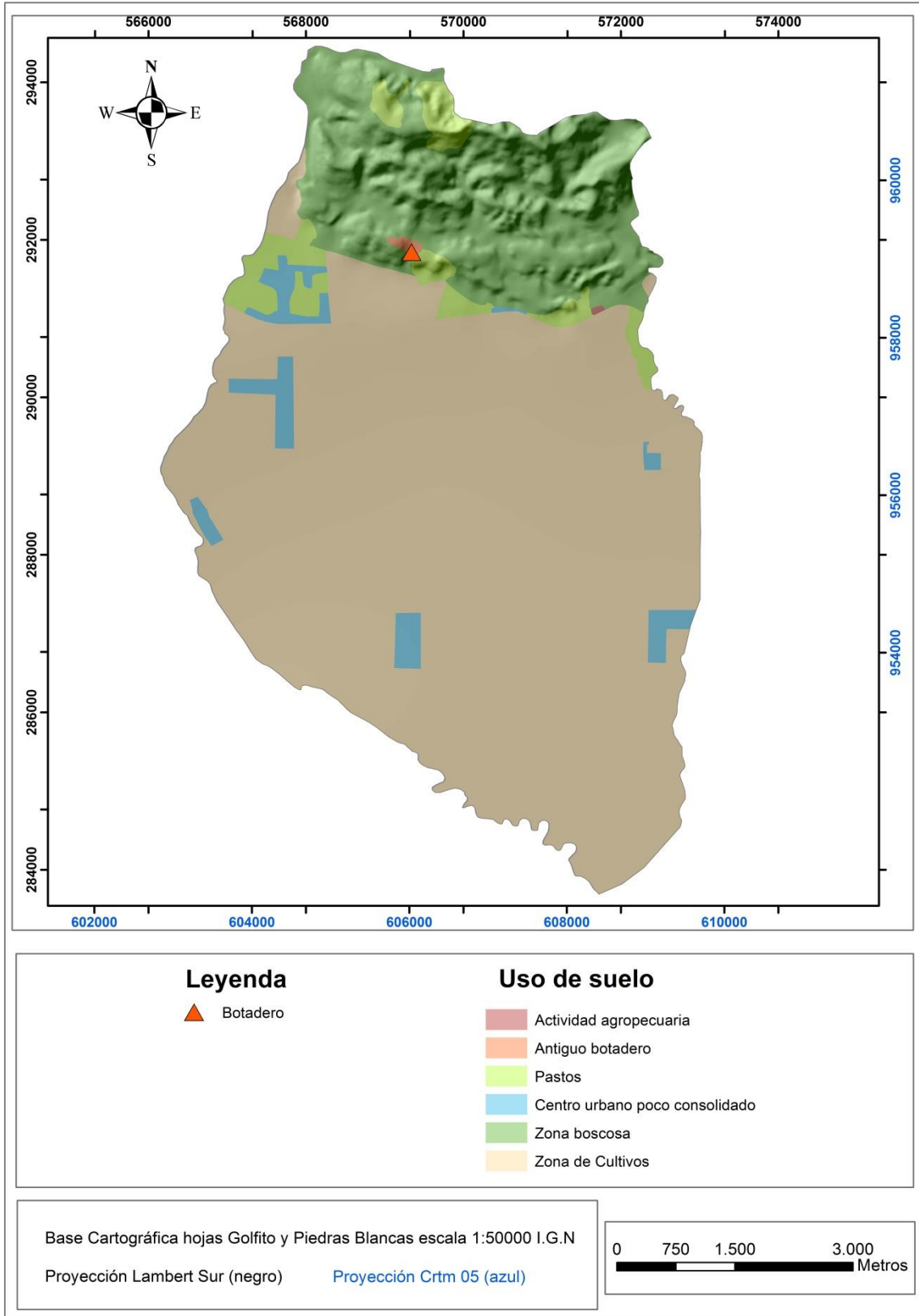


Figura 20: Mapa de usos de suelo identificados en el área de estudio.

A partir de la delimitación de los usos de suelos imperantes en la zona y mostrados en la figura anterior se realizó una reclasificación de dichos usos, según lo establece la metodología de Schosinsky (2006), asignándole a cada uso de suelo identificado un coeficiente o factor de infiltración por efecto de la cobertura vegetal (Kv), los diferentes valores de este factor según lo establece la metodología se presentan en el **Cuadro 6**.

**Cuadro 6: Factor de infiltración por efecto de la cobertura vegetal, Schosinsky (2006).**

Cobertura	Kv
Cobertura con zacate menos de 50 %	0,09
Terrenos cultivados	0,1
Cobertura con pastizal	0,18
Bosques	0,2
Cobertura con zacate más de 75%	0,21

En consecuencia a lo anterior una vez asignado el respectivo valor de Kv a los diferentes usos de suelo desarrollados en la zona fue posible transformar el mapa de uso de suelo en el mapa Kv, el cual se representa en la **Figura 21**.

En general se asignó un Kv de 0,09 a todas aquellas zonas en las que se ubican los diferentes centros poblacionales identificados en el mapa de usos de suelos, esto debido a que, si bien es cierto la presencia de viviendas o infraestructura tiende a producir una mayor impermeabilización en los suelos, restringiendo con ello la infiltración, estos centros poblacionales no se hallan ampliamente desarrollados, siendo más bien un grupo de viviendas, por lo general separadas las unas de las otras por zonas verdes ubicadas en sus alrededores, por lo cual se decidió asignar dicho valor de Kv. Por su parte a todas aquellas zonas caracterizadas por la presencia de pastos destinados a actividades ganaderas se le asignó un valor de Kv igual a 0,18. En el caso específico del área del botadero de basura se le asignó un Kv igual a 0,09 fundamentado en el hecho de que en dicha zona se ubican suelos parcialmente descubiertos, con algunas zonas cubiertas por pastos y zacate en sus alrededores.

Una vez más podemos observar como el valor del parámetro Kv más representativo para la zona de interés es de 0,10, mismo que corresponde con el uso de suelo más desarrollado, el cual se asocia con los campos de cultivos, como segundo valor de Kv más importante tenemos el asociado a las zonas boscosas (0,2), las cuales corresponden con el segundo uso de suelo predominante en el área. Finalmente se localizan los restantes valores de Kv, asociados a usos de suelos más puntuales o de menor rango de importancia dentro del área de estudio.



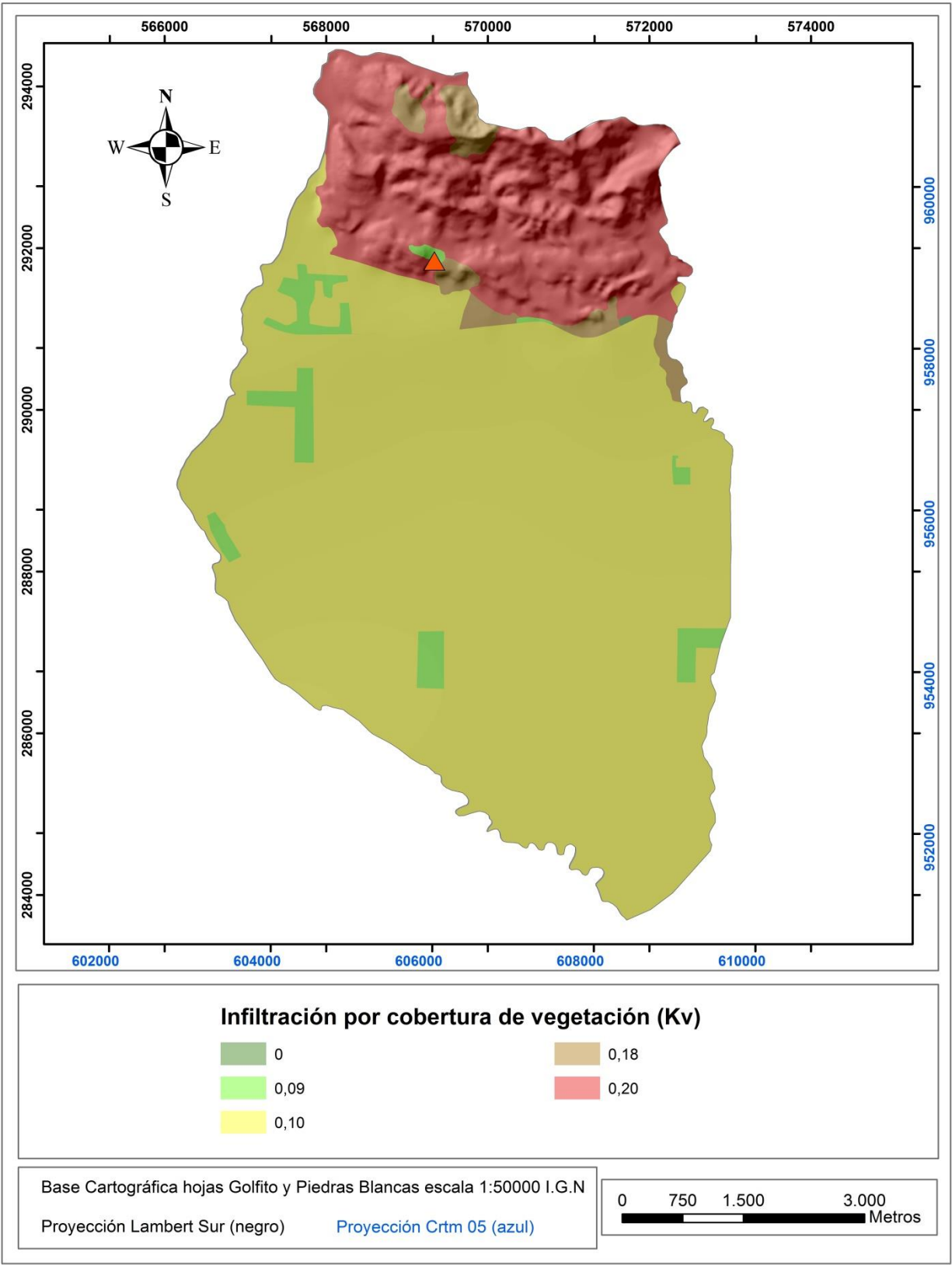


Figura 21: Mapa de Kv para el área de estudio.

### 5.1.5 Profundidad de raíces

Un factor adicional tomado en cuenta por la metodología Schosinsky (2006) y relacionado con el uso de suelo es la profundidad de las raíces de los diferentes cultivos o plantas imperantes en la zona, factor que juega un papel preponderante en la estimación de la evapotranspiración, al ser este el horizonte en el cual las plantas absorben el agua necesaria para satisfacer sus necesidades vitales.

La designación de las profundidades de raíces para los cultivos y plantas existentes en el área de estudio ha sido basada en lo establecido por Grassi (1976), es así como por ejemplo para el caso de los centros poblacionales no consolidados se ha definido una profundidad aproximada 300 mm, tomando en cuenta la inspección de campo realizada, en la cual se determinó la presencia de zonas cubiertas por zacate en los alrededores de las viviendas que componen dichos centros poblacionales, mientras que en el caso de las áreas cubiertas por pastos según lo establecido por dicho autor se ha definido una profundidad aproximada de 1000 mm, por su parte para el caso de las zonas boscosas ubicadas en la parte norte del área de estudio se estimó una profundidad promedio igual a 2500 mm, tomando como referencia el rango de profundidad establecido por el autor para este tipo de cobertura el cual oscila entre los 2000 y 3000 mm.

En el caso específico de las profundidades de raíces para los cultivos existentes en la zona, cabe mencionar que para el caso de los cultivos de palma se ha cifrado una profundidad aproximada de 2000 mm, mientras que en el caso de los cultivos de maíz se definió una profundidad aproximada de 1000 mm.

La distribución espacial definida para las profundidades de las raíces en el área de estudio se presenta en la **Figura 22**.

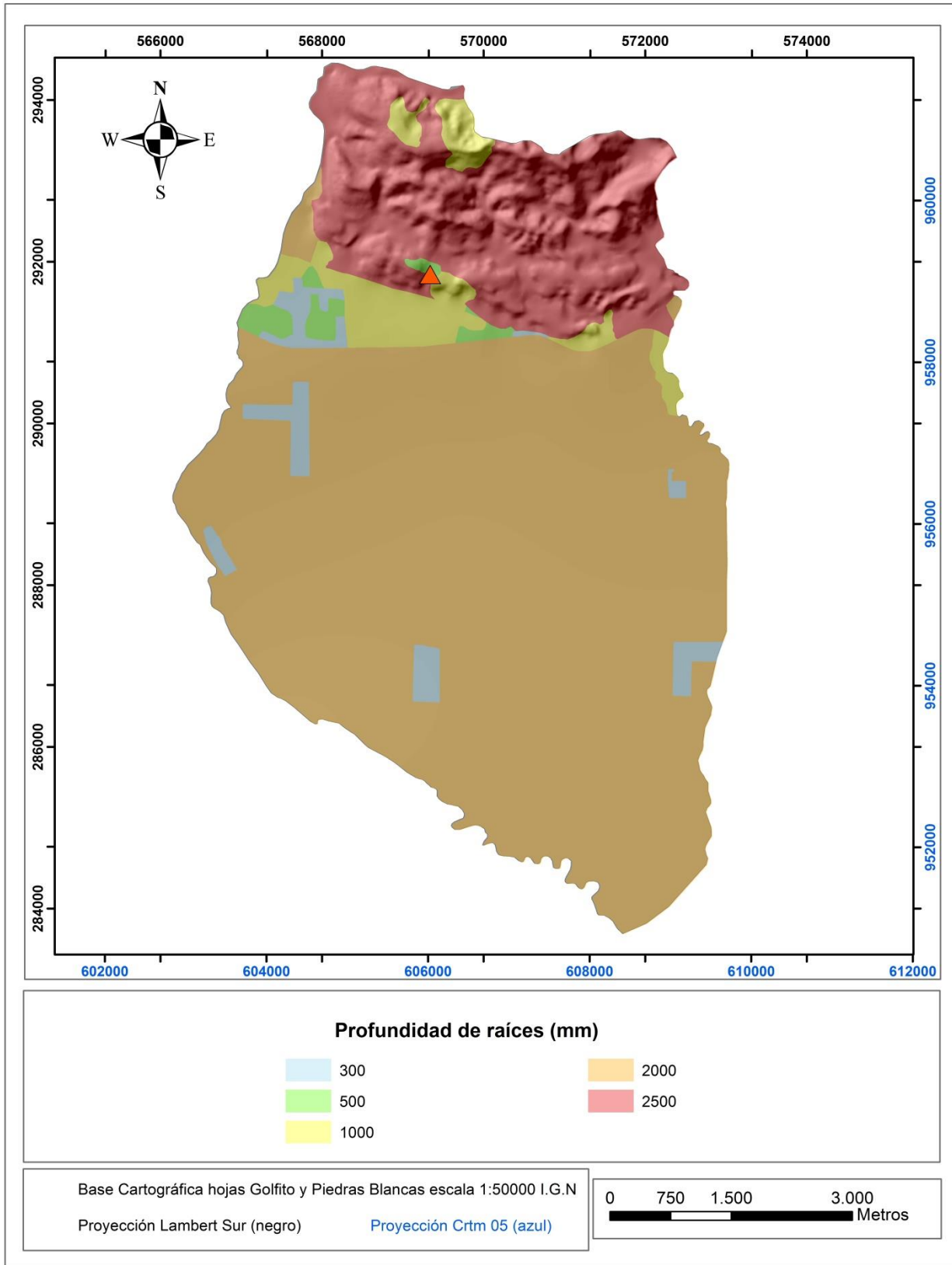


Figura 22: Mapa de distribución de la profundidad de las raíces para el área de estudio.

### 5.1.6 Fracción de lluvia retenida en el follaje

Uno de los factores que se debe tomar en cuenta en la elaboración de un balance hídrico es la fracción de lluvia interceptada por el follaje, manifestada según la metodología de Schosinsky (2006) por el coeficiente de follaje (Cfo).

Lluvias menores a 5 mm mensuales, no generarán infiltración, ya que se considera que en un mes con lluvia al menos 5 mm son retenidos por el follaje sin llegar al suelo (Schosinsky & Losilla, 2000). Por otro lado se considera que la retención de la lluvia en el follaje es el 12 % de la precipitación mensual (Butler, 1957), sin embargo para el caso de bosques muy densos se considera la retención en un 20 % de la precipitación mensual (Linsley et al., 1958).

De acuerdo a lo anterior se define el coeficiente de follaje como el porcentaje de lluvia mensual que es retenida en el follaje, expresada en tanto por uno. Para el 12 % de retención  $Cfo = 0,12$ , mientras que para el 20 % de retención el  $Cfo = 0,20$  % (Schosinsky, 2006).

Es así como el cálculo de la retención de lluvia en el follaje según la metodología de Schosinsky (2006) está definida por las siguientes expresiones:

$$RET = P, \text{ si } P \text{ es } \leq 5 \text{ mm/mes} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$RET = (P)(Cfo), \text{ si el producto de } (P)(Cfo) \text{ es } \geq 5 \text{ mm/mes}$$

$$RET = 5, \text{ si } P > 5 \text{ mm/mes y el producto de } (P)(Cfo) \text{ es } < 5 \text{ mm/mes}$$

Para efectos de la definición de este parámetro se procedió a realizar el cálculo de la retención mensual para cada una de las zonas de balance definidas, esto por medio de la utilización de una hoja de cálculo de Excel, para luego calcular por medio de una suma algebraica el valor de la retención anual para cada zona. Los valores de retención anual fueron introducidos en un sistema de información geográfica para su representación en un mapa de distribución de la retención para el área de estudio, mismo que se representa en la **Figura 23**.

La retención máxima se obtuvo en las zonas montañosas del área de estudio, región en donde se desarrolla una importante cobertura boscosa y en la cual se presentan las precipitaciones más altas del área, mientras que hacia la parte sur y central de la misma se reporta la retención más baja, justificada por los menores índices de precipitación promedio registrados para estas zonas.

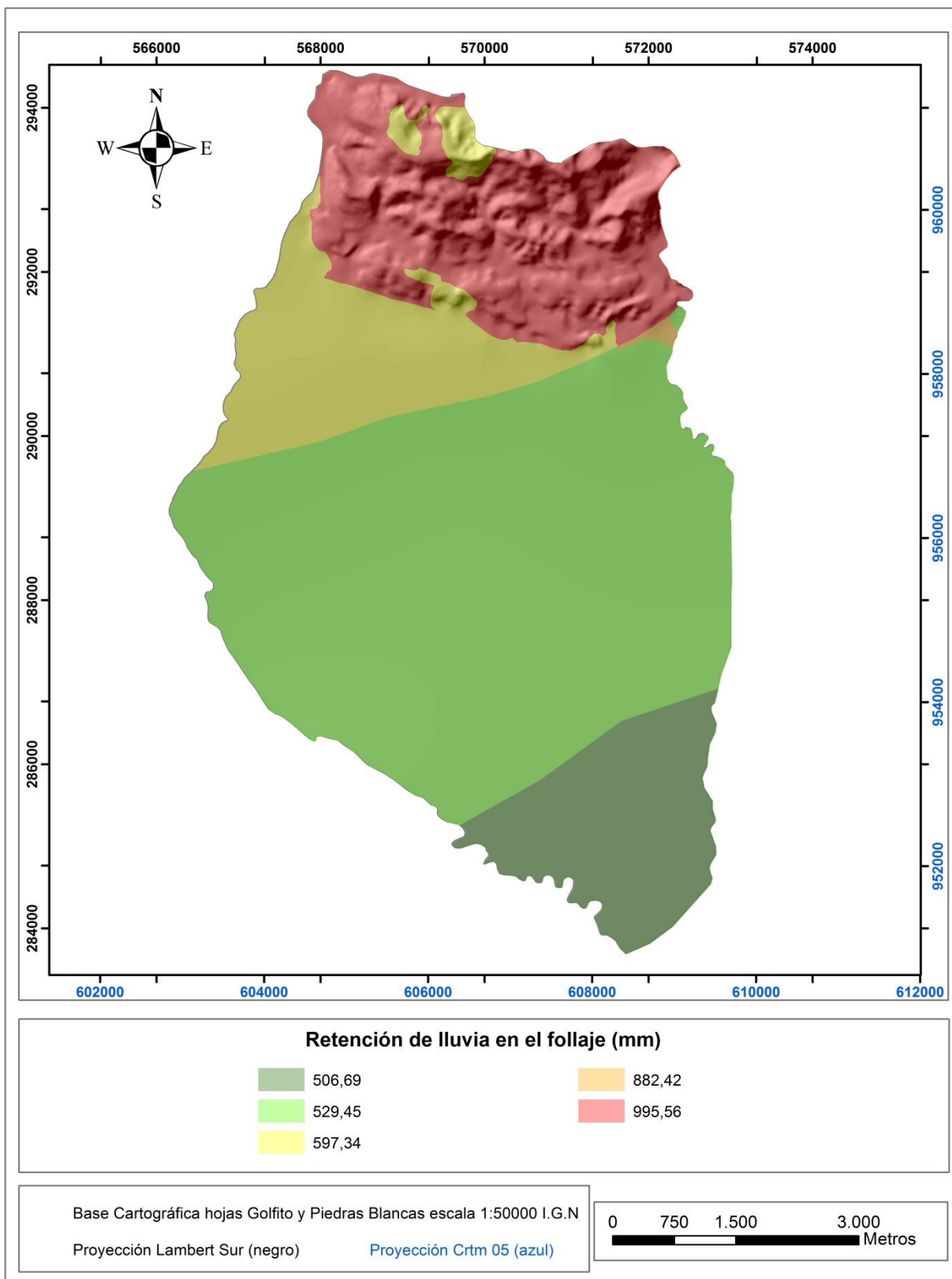


Figura 23: Mapa de distribución de la retención anual de lluvia en el follaje.

### 5.1.7 Características de suelos

Para la elaboración del balance hídrico de suelos fue necesario el análisis de algunos parámetros o características de los suelos existentes en el área de estudio, entre estos parámetros se encuentran la capacidad de campo, punto de marchitez, densidad aparente, textura, conductividad hidráulica entre otros, los cuales fueron obtenidos por medio de la recolección de muestras de suelo para su posterior análisis en los laboratorios del Instituto de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA).

En total se realizó el levantamiento de 12 muestras de suelo ubicadas de manera aleatoria, procurando abarcar la mayor parte del área de estudio, dándole un especial énfasis a la zona del botadero de basura, sitio en donde se llevó a cabo el levantamiento de 4 muestras de suelo, esto con el fin de obtener una mayor precisión en las propiedades de los suelos para dicha zona, misma que representa uno de los ejes centrales de esta investigación. La ubicación geográfica de los puntos de muestreo seleccionados se representa en la **Figura 24**.

Por su parte los resultados de los análisis efectuados a cada una de las muestras de suelos recolectadas se muestran en el **Cuadro 7**.

Cabe mencionar que para incorporar en el balance hídrico los datos obtenidos a partir del análisis de las muestras de suelos tomadas, se implementó el criterio geopedológico, el cual consiste en asociar las propiedades o características de los suelos según la geoforma en la que estos se encuentren, asumiendo una continuidad o uniformidad en las condiciones de las mismas. Es así como para el caso del presente estudio se procedió a analizar conjuntamente aquellas muestras de suelo ubicadas en una misma unidad geomorfológica, obteniendo con ello un valor promedio representativo de cada uno de los parámetros de suelos que definen el balance hídrico para cada unidad geomorfológica definida en la presente investigación.

Una vez aplicada esta metodología se procedió a confeccionar los respectivos mapas de textura de suelos, capacidad de campo, punto de marchitez y densidad aparente.

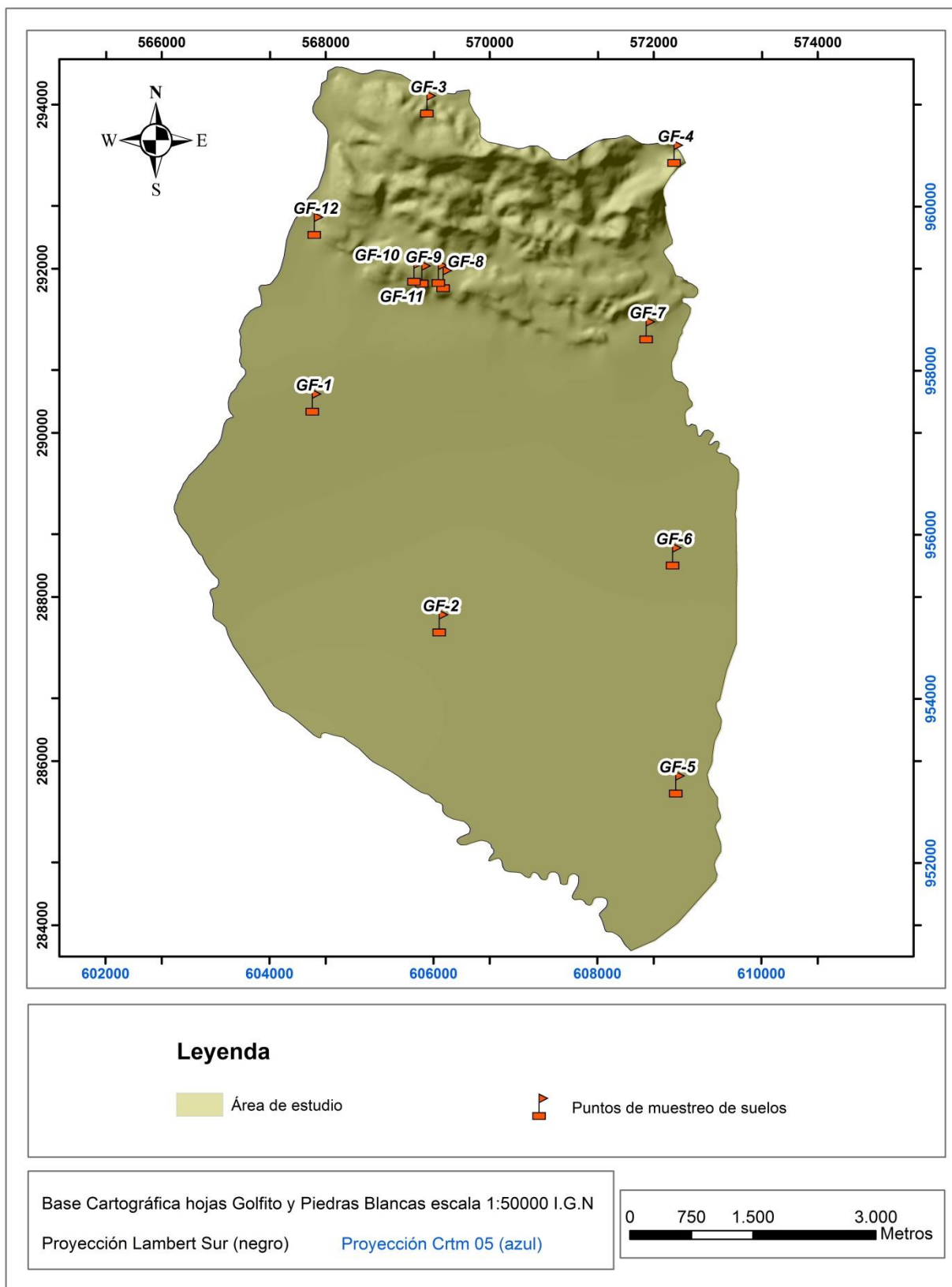


Figura 24: Distribución geográfica de cada una de las muestras de suelos colectadas

**Cuadro 7 : Resultados de muestreo de suelos. Donde FL: Franco limoso, FAa: Franco arcillo-arenoso, Fa: Franco arenoso, Aa: Arcillo arenoso, F: Franco.**

Código muestra	Latitud	Longitud	Arena	Arcilla	Limo	Textura	Densidad aparente	Densidad real	C. Campo	P. Marchitez	Conduc. Hidráulica (C/hora)
GF-1	290374	567854	26	22	52	FL	1,05	2,07	34,9	21,08	5,1
GF-2	287684	569401	30	20	50	FL	1,01	2,03	35,9	20,97	4,9
GF-3	294008	569252	50	30	20	FAa	1,11	2,15	37,28	21,44	3,8
GF-4	293406	572266	64	18	18	Fa	1,18	2,23	24,2	16,87	7,2
GF-5	285720	572285	18	32	50	FAL	1,08	2,07	38	21,78	4,3
GF-6	288500	572247	18	30	52	FAL	1,11	2,13	38,1	22,01	4,6
GF-7	291255	571924	62	16	22	Fa	1,17	2,22	23,6	15,93	7,8
GF-8	291878	569448	34	16	50	Fa	1,15	2,24	24,2	16,47	8,1
GF-9	291935	569190	50	38	12	Aa	1,14	2,19	34,7	20,84	5,3
GF-10	291958	569093	60	18	22	Fa	1,19	2,26	24,4	16,18	7,9
GF-11	291941	569391	46	22	32	F	1,04	2,01	30,5	19,37	5,2
GF-12	292528	567878	18	26	56	F.L/FAL	1,09	2,12	37,3	20,72	4,6

### ***Textura de suelos***

De acuerdo con los datos mostrados en el **Cuadro 7**, se realizó un análisis de las texturas obtenidas para cada una de las muestras, con el fin de determinar las texturas de suelos predominantes para el área de estudio, las cuales se aprecian en la **Figura 25** correspondiente al mapa de textura de suelos.

Según lo observado en el mapa de texturas de suelo y en concordancia con los tipos de suelos resultantes se puede destacar como dato particular el hecho de que hacia la parte norte del área de estudio por lo general se da el predominio de suelos con una granulometría o textura más gruesa de tipo arenosa o arcillo arenosa derivados a partir de los procesos de meteorización de las rocas que componen dicha región, las cuales son fundamentalmente areniscas, mientras que en contraste con lo anterior hacia la parte central y sur del área de estudio se da el predominio de suelos con texturas más finas de tipo arcillas o limos, los cuales tienen su origen a partir de los procesos de transporte y deposición de materiales provenientes de las regiones montañosas ubicadas al norte y que son transportadas por acción de los ríos. La reducción en las granulometrías de los suelos hacia la región central y sur se debe al mayor grado de desgaste o retrabajo sufrido por los materiales como consecuencia del acarreo por los cuerpos fluviales.



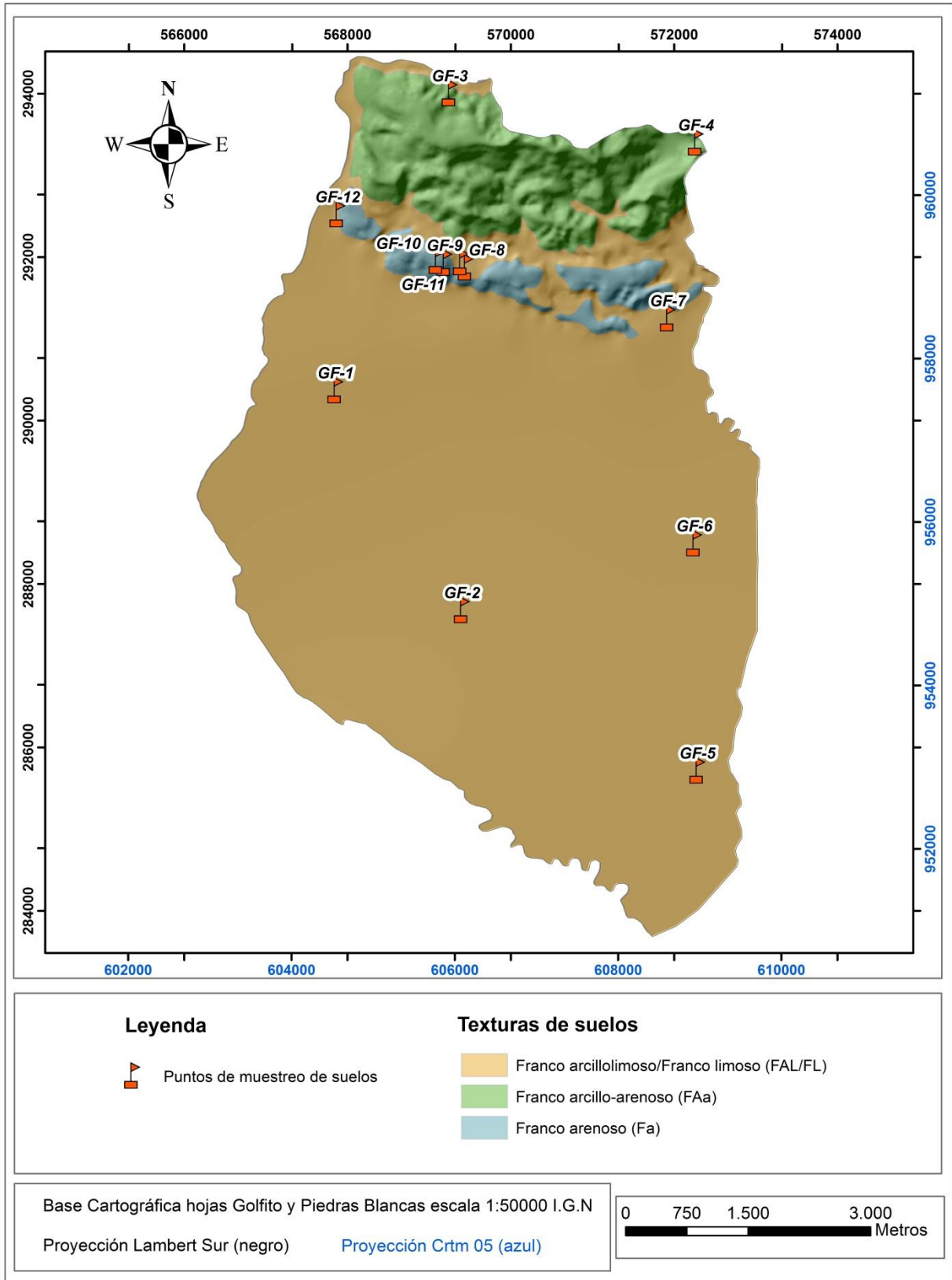


Figura 25: Mapa de texturas de suelos para el área de estudio.

### **Densidad aparente**

La densidad aparente del suelo se puede definir como la relación entre la masa o peso del suelo seco (peso de la fase sólida) y el volumen total, incluyendo al espacio poroso. Esta medida permite ver la facilidad de penetración de las raíces al suelo, permite la predicción de la transmisión de agua y la transformación de los porcentajes de humedad gravimétrica del suelo en términos de humedad volumétrica, además de permitir el cálculo de la porosidad total de un suelo cuando se conoce la densidad de las partículas, siendo el valor de densidad aparente un buen índice de la compactación de un suelo (Flores & Alcalá, 2010).

Según los valores mostrados en el **Cuadro 7** para este parámetro y en concordancia con lo mostrado en la **Figura 26**, los valores más altos de densidad aparente se reportaron en la parte norte del área de estudio, coincidiendo con la zona montañosa de la misma, sitio en donde se determinó una densidad aparente promedio igual a 1,15 g/cm<sup>3</sup>, mientras que para la zona cercana al botadero de basura se reportó una densidad aparente de 1,13 g/cm<sup>3</sup>, finalmente hacia la zona del relleno aluvial correspondiente con la parte central y sur del área de estudio se obtuvieron los valores de densidad aparente más bajos, con un valor promedio de 1,06 g/cm<sup>3</sup>.

### **Porosidad**

El espacio poroso de un suelo es la parte del mismo que en su estado natural está ocupado por aire y/o agua. El volumen de este espacio poroso va a depender de la disposición de las partículas sólidas. Una porosidad reducida repercute directamente en propiedades físicas desfavorables debidas a una menor aireación del suelo, menor capacidad de infiltración del agua y una mayor dificultad de penetración de raíces en el suelo (Flores & Alcalá, 2010).

Se estimó la porosidad de los suelos para el área de estudio mediante la relación entre la densidad aparente y la densidad real, tal y como se expresa en la siguiente fórmula:

$$Porosidad = \left( \frac{Densidad\ real - Densidad\ aparente}{Densidad\ real} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

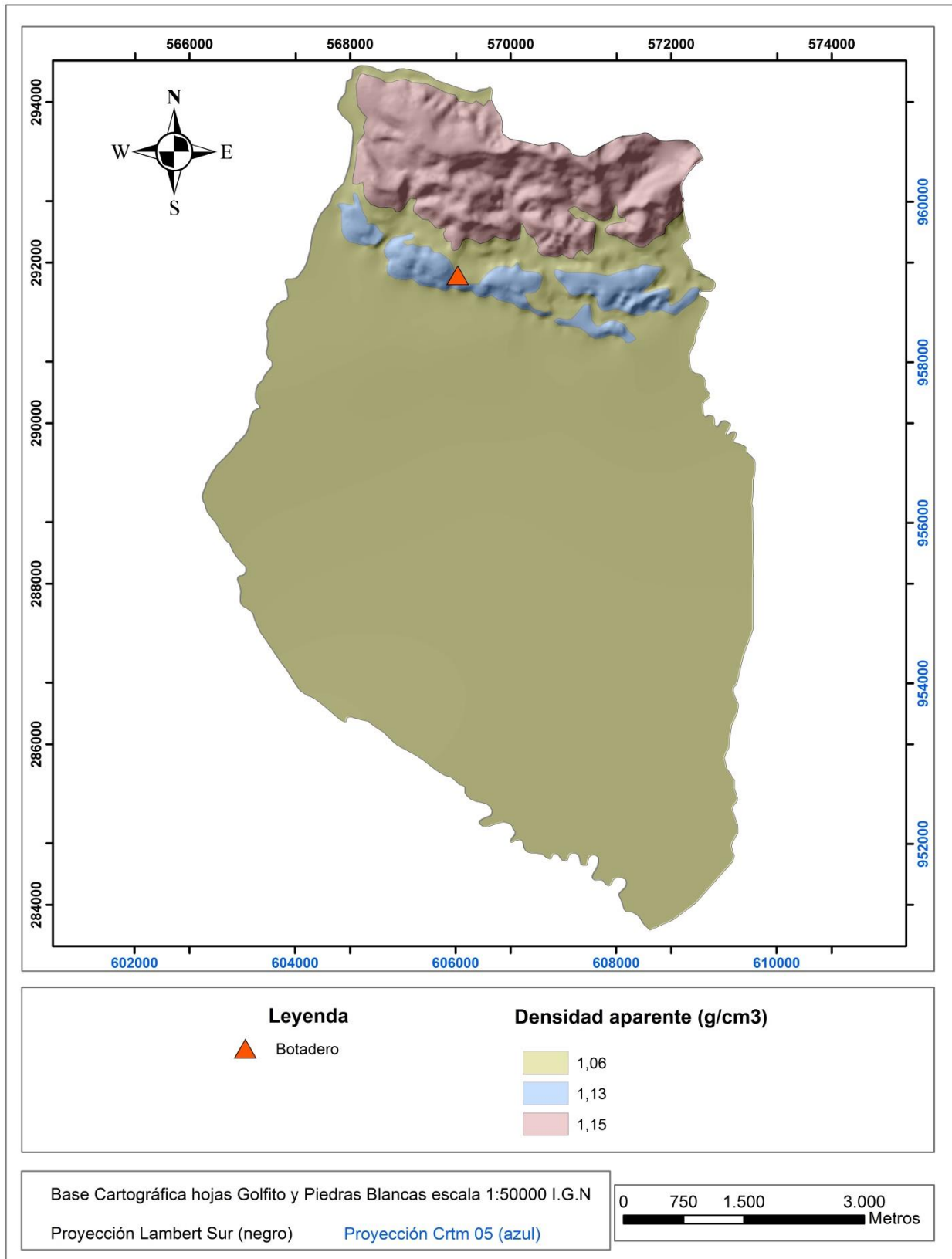


Figura 26: Mapa de distribución de la densidad aparente de los suelos del área de estudio.

La **Figura 27** muestra los diferentes valores de porosidad obtenidos para los suelos del área de estudio, en términos generales se obtuvieron valores muy uniformes de porosidad a lo largo de toda la zona, con cifras que oscilaron entre un 47 y 49 %, por lo que se consideran los suelos del área como de porosidad intermedia, siendo esta condición favorable para el proceso de infiltración de agua en los suelos, siempre y cuando exista una efectiva interconexión entre los distintos poros del suelo.

### **Capacidad de campo**

La capacidad de campo representa la cantidad máxima de agua que puede ser retenida en un suelo en contra de la fuerza de la gravedad, después de un riego o lluvia que ha humedecido el suelo, siendo en este punto el drenaje interno insignificante (Flores & Alcalá, 2010).

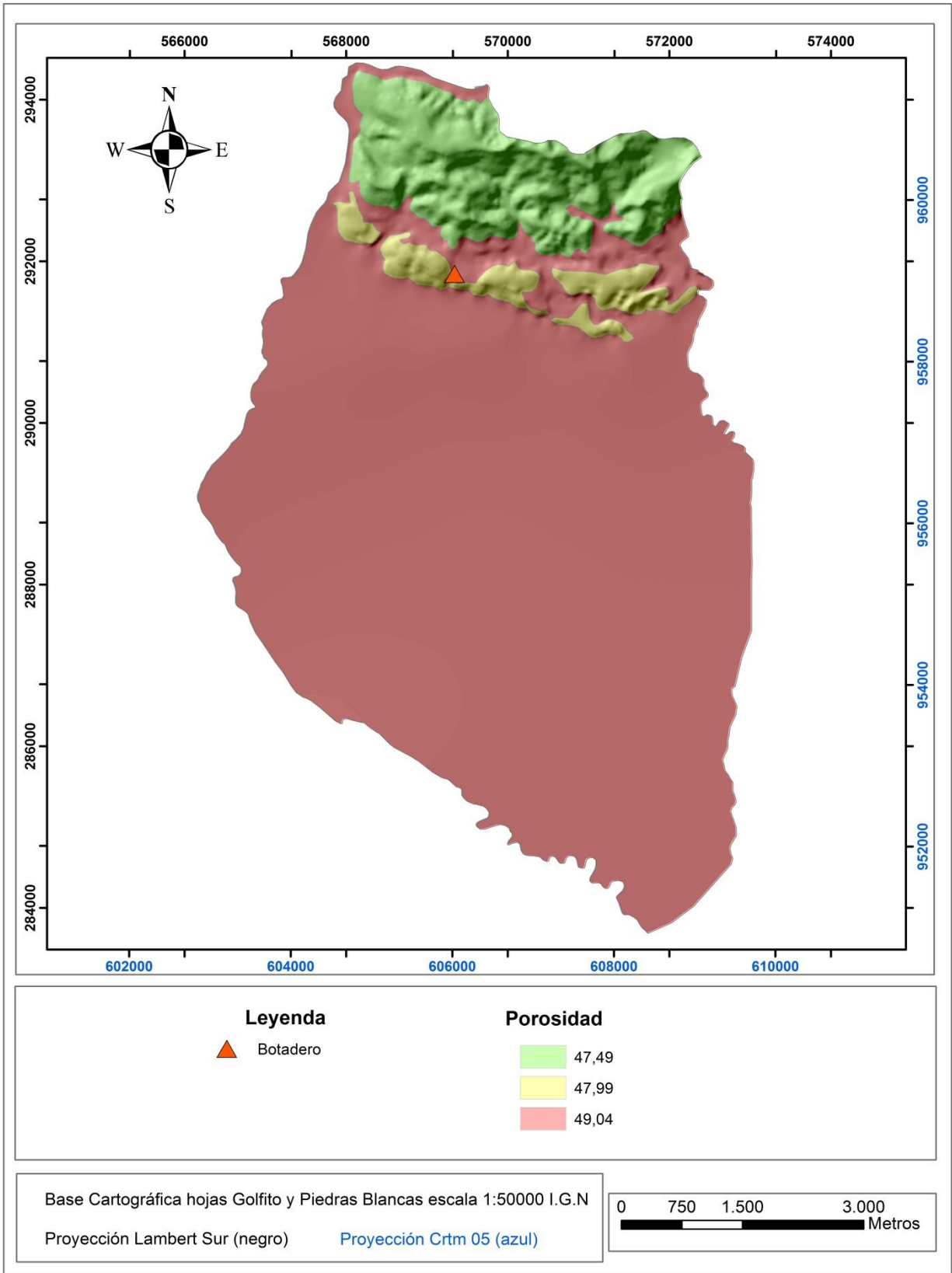
Se considera entonces la capacidad de campo como la máxima humedad que puede tener un suelo que no se encuentre saturado, siendo entonces cuando las plantas tienen la máxima capacidad de transpiración (Schosinsky, 2006).

Para la elaboración del balance hídrico la metodología de Schosinsky (2006) requiere la utilización de los parámetros de capacidad de campo y punto de marchitez expresados en unidades de milímetros de agua, en vista de que comúnmente estos parámetros suelen ser expresados en porcentaje por peso de suelo seco por parte de los laboratorios de suelos, es necesario realizar una transformación de tales parámetros para mantener una consistencia con dicha metodología. Para lograr tal transformación se utilizó la siguiente relación establecida por Schosinsky (2006):

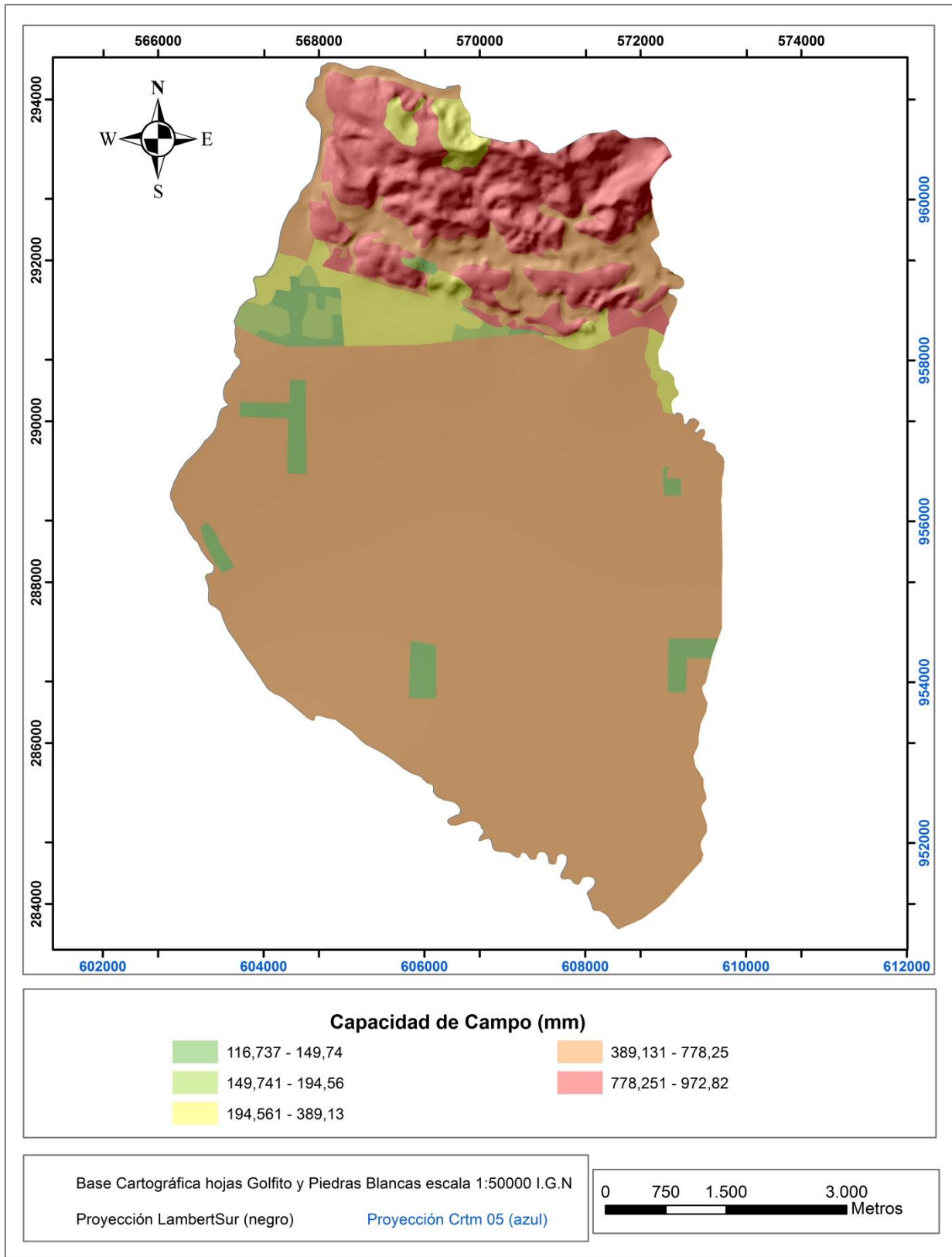
#### **Ecuación 4**

$$\text{mm de agua} = \% \text{ por peso de suelo seco} * \text{densidad aparente} * \text{profundidad de raíces}$$

Tomando en cuenta la expresión anterior, para la obtención del mapa de capacidad de campo se procedió a relacionar, por medio de la herramienta de cálculo del software Arcgis 10.2, los valores promedio de capacidad de campo en porcentaje por peso de suelo seco, con los valores promedio de densidad aparente, ambos obtenidos de los análisis de laboratorio de suelos, y los valores promedio de profundidad de raíces para la zona, obtenidos a partir del mapa de uso de suelos, dando como resultado la obtención del mapa de capacidad de campo en mm de agua, el cual se muestra en la **Figura 28**.



**Figura 27: Mapa de distribución de porosidad de los suelos para el área de estudio.**



**Figura 28: Mapa de distribución de la capacidad de campo**

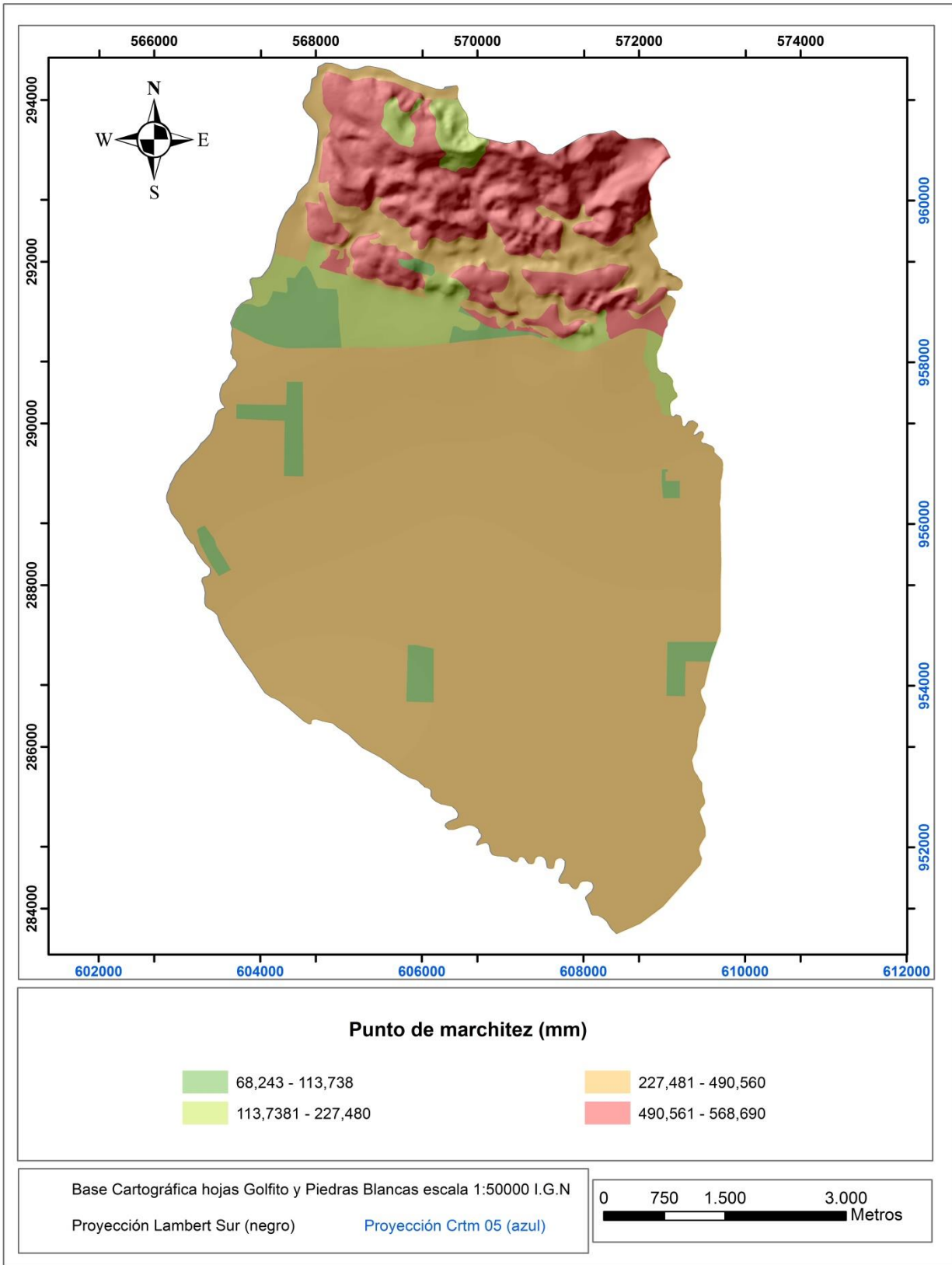
En la **Figura 28** podemos observar como los valores más altos obtenidos de capacidad de campo suelen concentrarse hacia la parte norte del área de estudio, coincidiendo con la zona montañosa de la misma, la cual se caracteriza por presentar un uso de suelo fundamentalmente ocupado por áreas boscosas, lo que se traduce en una mayor profundidad de las raíces extractoras de agua para dicha zona, generando con ello un incremento significativo en la capacidad de retención de humedad en los suelos de esta región, el valor máximo de capacidad de campo reportado para esta zona es de 972,82 mm. A su vez en la misma figura se aprecia cómo se da una mayor recurrencia de valores de capacidad de campo entre los 740 y 778 mm, los cuales se presentan de manera extendida a lo largo de la zona plana del área de estudio, sitio que se caracteriza por la presencia de extensas zonas de cultivos de palma, con una profundidad de raíces que ronda los 2000 mm, causando una considerable capacidad de retención de agua en los suelos de esta zona, por otro lado se observa como los valores mínimos de capacidad de campo se concentran en aquellas zonas en donde se ubican los centros poblacionales del área de estudio, sitios que se caracterizan por la presencia de una cobertura vegetal compuesta por zacate o pastos cuya profundidad de raíces suele ser baja, o bien zonas sin cobertura vegetal o parcialmente impermeabilizadas por la presencia de viviendas, incidiendo en una baja significativa en la capacidad de retención de agua de los suelos, misma situación que se da en la zona cercana al botadero de basura en donde la presencia de suelos parcialmente descubiertos sin cobertura vegetal ocasionan la obtención de una capacidad de campo más baja (149,7 -164,6 mm) con respecto a los valores obtenidos para el resto del área.

### ***Punto de marchitez***

El punto de marchitez se define como el grado de humedad que posee un suelo en el que la fuerza de succión de las raíces de las plantas ya no es capaz de extraer agua (Martínez et al., 2006).

De tal manera que el punto de marchitez corresponde con la mínima humedad que puede tener un suelo, ya que con humedades menores a este punto las plantas mueren (Schosinsky, 2006).

Para la obtención del mapa de distribución de punto de marchitez del área de estudio, se siguió el mismo procedimiento de transformación de humedad en porcentaje por peso de suelo seco a humedad en milímetros, tal y como lo exige la metodología de Schosinsky (2006), utilizando para ello la ecuación 4. Dicho mapa se presenta en la **Figura 29**.



**Figura 29: Mapa de Distribución del punto de marchitez.**



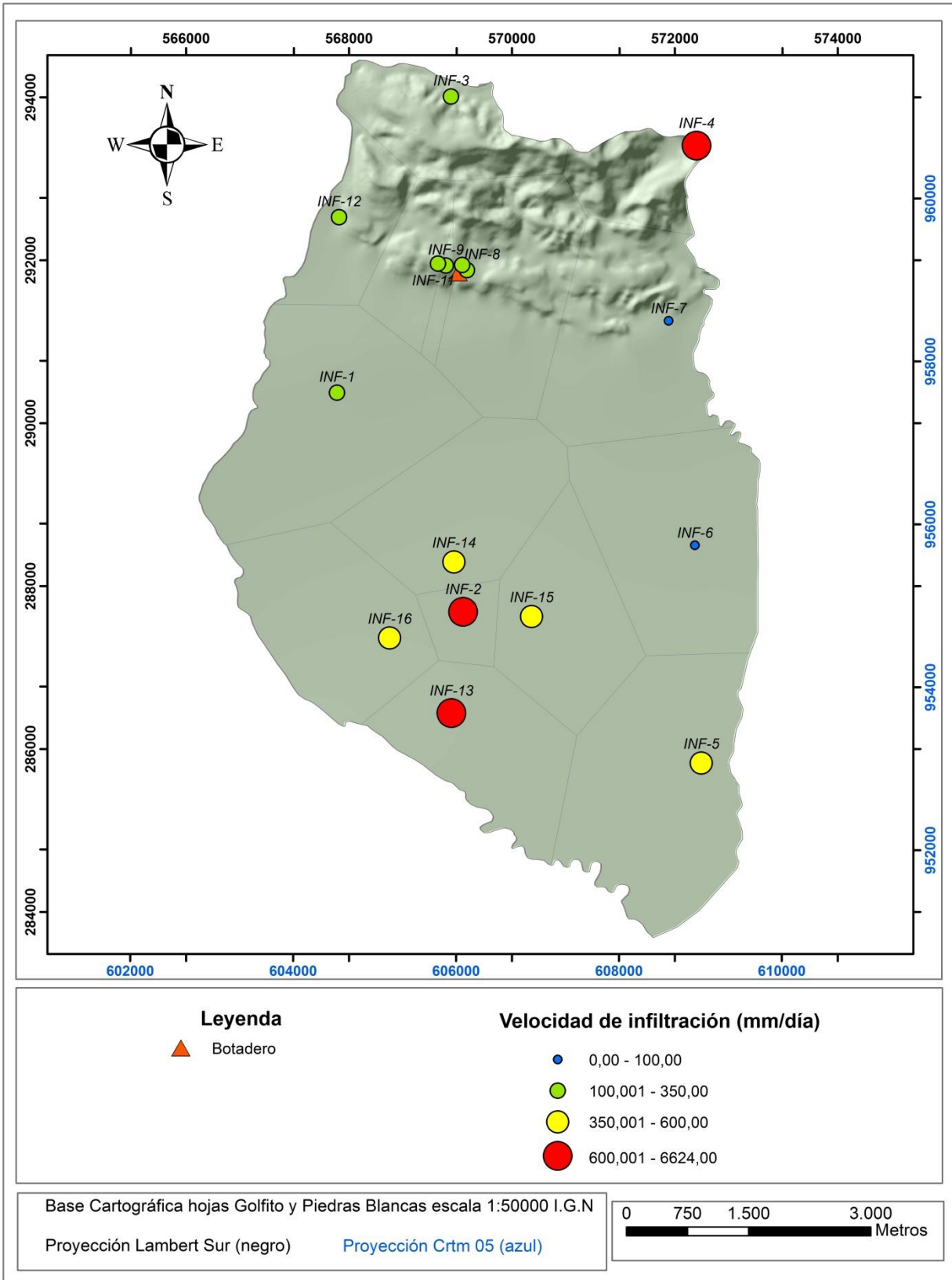
Podemos observar en la figura anterior como los valores máximos de punto de marchitez se concentran hacia la parte montañosa del área de estudio, sitio en donde según la estimación de profundidad de raíces realizada se reporta la mayor profundidad de penetración de estas, provocando con ello incremento significativo en los valores de capacidad de campo y punto marchitez para dicha zona. Por su parte para la zona plana del área de estudio se da el predominio de valores de punto de marchitez entre los 450 y 490 mm, y al igual que en el caso de la capacidad de campo los valores mínimos de punto de marchitez se ubicaron en los alrededores de los centros poblacionales del área de estudio, además de la zona del botadero de basura, con valores que oscilaron entre los 113 y 68 mm, los cuales se justifican con base en la ausencia de una cobertura vegetal densa para estas zonas o bien por la presencia de suelos parcialmente descubiertos o impermeabilizados originando una menor profundidad de penetración de las raíces en el suelo y con ello una disminución en la retención de humedad en estos.

### ***Capacidad de infiltración***

Uno de los parámetros tomados en cuenta por la metodología de Schosinsky (2006) para la elaboración de balances hídricos y estimación de recarga potencial es la capacidad de infiltración de agua en los suelos. La Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS, 2010) define la capacidad de infiltración como la máxima cantidad de agua que puede absorber un suelo por unidad de tiempo para unas condiciones iniciales determinadas.

Para evaluar la capacidad de infiltración de los suelos en el área de estudio fue necesaria la realización de 16 pruebas de infiltración por el método del doble anillo, las cuales fueron distribuidas de manera aleatoria en distintos puntos a lo largo del área de estudio.

Las ubicaciones geográficas de cada una de las pruebas de infiltración realizadas, así como también los rangos de infiltración obtenidas se muestran en la **Figura 30**.



**Figura 30: Distribución de las pruebas de infiltración realizadas en el área de estudio**

Por su parte los valores obtenidos de velocidad de infiltración para cada una de las pruebas efectuadas se muestran en el **Cuadro 8**.

**Cuadro 8: Resultados de pruebas de infiltración realizadas**

Prueba	Longitud	Latitud	Ubicación	Infiltración (cm/min)	Infiltración (mm/d)
INF-1	567854	290374	Palma Tica	0,008	115,2
INF-2	569401	287684	Palma Tica	0,3	4320
INF-3	569252	294008	Margen izquierda Río Claro	0,01	144
INF-4	572266	293406	Cerca de Quebrada Tigra	0,355	5112
INF-5	572325	285827	Palma Tica	0,033	475,2
INF-6	572247	288500	Palma Tica	0	0
INF-7	571924	291255	Santiago de Caracol	0,002	28,8
INF-8	569448	291878	Botadero Golfito	0,024	345,6
INF-9	569190	291935	Botadero Golfito	0,01	144
INF-10	569093	291958	Botadero Golfito	0,01	144
INF-11	569391	291941	Botadero Golfito	0,011	158,4
INF-12	567878	292528	Tajo Río Claro	0,01	144
INF-13	569257	286440	Palma Tica	0,46	6624
INF-14	569289	288295	Palma Tica	0,04	576
INF-15	570242	287626	Palma Tica	0,027	388,8
INF-16	568499	287363	Palma Tica	0,033	475,2

Según lo observado en la **Figura 30** y el **Cuadro 8** se deduce una tendencia general en el área de estudio a presentarse valores de infiltración que oscilan entre bajos a moderados, siendo mucho más recurrentes los rangos de infiltración entre los 100 y 350 mm/día.

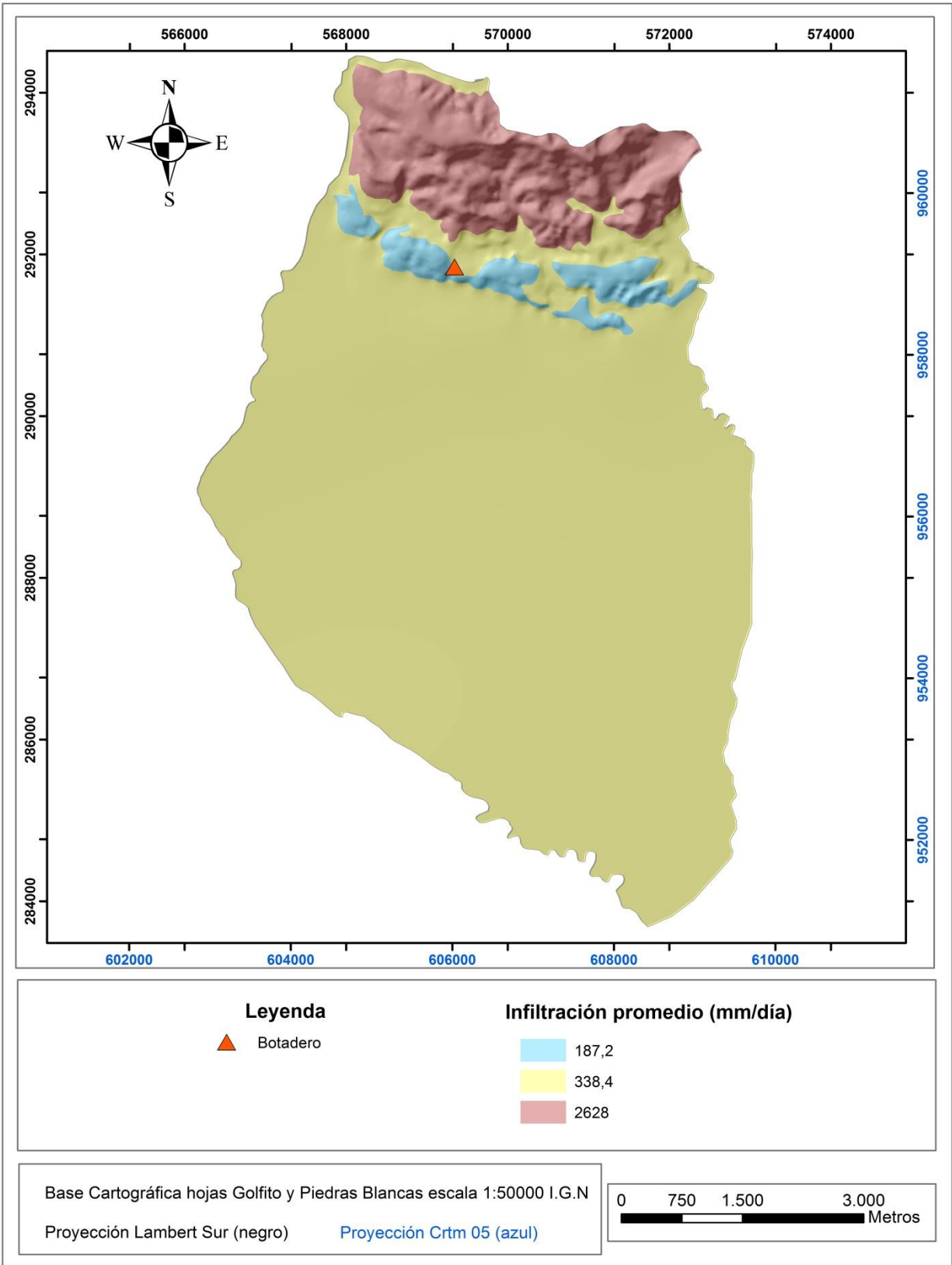
Para efectos del desarrollo del balance hídrico se procedió a aplicar la misma metodología de criterios geopedológicos para obtener los valores promedio de infiltración, en este caso el procedimiento seguido consistió en agrupar todas aquellas pruebas de infiltración realizadas en cada una de las diferentes unidades geomorfológicas definidas en el presente estudio para posteriormente obtener un valor promedio de infiltración representativo para cada una de estas unidades.

Una vez aplicada esta metodología fue posible elaborar el mapa de capacidad de infiltración promedio para el área de estudio, el cual se representa en la **Figura 31**.

Podemos observar en dicha figura como las mayores tasas de infiltración promedio se obtuvieron para el sector norte del área de estudio, coincidiendo con las áreas

montañosas de la misma, sitios en donde según los análisis realizados a las muestras de suelos recolectadas se definieron texturas más arenosas o arcillo-arenosas, las cuales suelen resultar más favorables para la infiltración de agua en los suelos.

En el caso de la parte central y sur del área de estudio, la cual corresponde con la zona plana de la misma, según las pruebas de infiltración realizadas se obtuvo una tasa de infiltración que oscila entre baja y moderada con un valor promedio de 338,4 mm/día, la cual se podría asociar con la presencia en la zona de suelos con una textura mayoritariamente de tipo arcillosa o arcillo-limosa, causando como consecuencia una menor capacidad de infiltración para esta zona. Cabe mencionar además que para esta misma área de manera puntual se obtuvieron algunas velocidades de infiltración considerablemente elevadas (pruebas INF-2 y INF-13), las cuales distan en demasía con las tasas de infiltración obtenidas para el resto de las pruebas realizadas en esta área en específico, por lo cual se consideran que no son valores de infiltración representativos para la totalidad del área, ya que se considera que pueden haber sido influenciados por un mayor grado de alteración de los suelos por efecto de las actividades propias de los cultivos de palma que imperan en esta zona.



**Figura 31: Mapa de distribución de la infiltración promedio para el área de estudio**

### ***Coefficiente de infiltración por textura de suelo***

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 ( $K_{fc}$ ), dicho parámetro está dado por la siguiente ecuación (Schosinsky & Losilla, 2000):

$$K_{fc} = 0,267 \ln(fc) - 0,000154fc - 0,723 \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde:

*K<sub>fc</sub>*: Coeficiente de infiltración (fracción que infiltra por textura del suelo)

*F<sub>c</sub>*: Infiltración básica del suelo (mm/día)

Cabe mencionar que para poder aplicar esta ecuación, el rango de  $f_c$  ha de encontrarse entre los 16 y 1568 mm/día, si el valor de  $f_c$  es menor a 16 mm/día se debe aplicar la siguiente relación:  $K_{fc} = 0,0148f_c/16$ , mientras que en el caso de valores mayores a 1568 mm/día corresponde aplicar un valor de  $K_{fc} = 1$ , Schosinsky, (2006).

Siguiendo el procedimiento descrito y en relación con los valores de infiltración promedio obtenidos se logró crear el mapa de distribución de infiltración debido a la textura del suelo, mismo que se presenta en la **Figura 32**.

Según lo mostrado en dicha figura se determinó que los valores mínimos de  $K_{fc}$  se presentan en la sección de la fila de cerros aislados, sitio en donde se reportaron los valores más bajos de infiltración, mientras que para el caso de las zonas de topografía relativamente plana los valores de  $K_{fc}$  presentaron un ligero aumento con respecto a lo reportado en los cerros aislados, rodando entre 0,714 y 0,78, finalmente los valores más altos de  $K_{fc}$  se obtuvieron hacia la parte norte del área de estudio, con un valor de  $K_{fc}$  igual a 1, coincidiendo en este caso con la zona montañosa y en la cual se presentó el valor de infiltración promedio más alto.

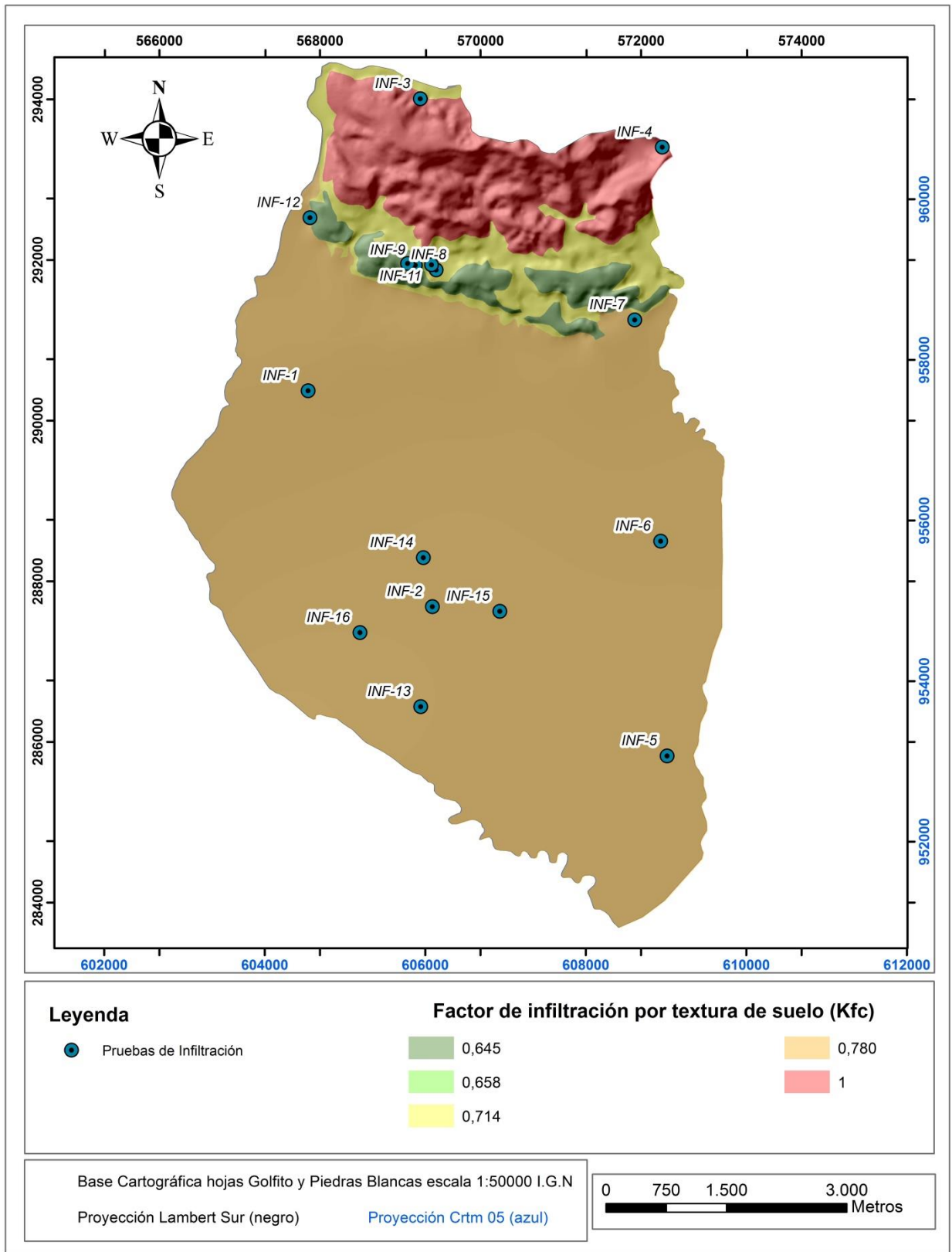


Figura 32: Mapa distribución del factor de infiltración por textura de suelo (Kfc).

### **Coeficiente de infiltración del suelo (Ci)**

Uno de los factores a determinar durante la aplicación de un balance hídrico de suelos mediante la metodología de Schosinsky (2006) es el coeficiente de infiltración del suelo, el cual se define como el factor por el cual hay que multiplicar la precipitación mensual para obtener el agua que se infiltra hacia el suelo.

El coeficiente de infiltración (Ci) está definido por la interacción entre tres coeficientes descritos anteriormente como lo son: el coeficiente de infiltración por textura del suelo, el coeficiente de infiltración por pendiente del terreno y el coeficiente de infiltración por cobertura de la vegetación, tal y como se muestra en la siguiente ecuación (ONU, 1972):

$$\text{si } Kp + Kv + Kfc > 1, Ci = 1 \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\text{Si } Kp + Kv + Kfc < \text{o igual a } 1, \text{ entonces } Ci = Kp + Kv + Kfc$$

Dónde:

Ci= Coeficiente de infiltración

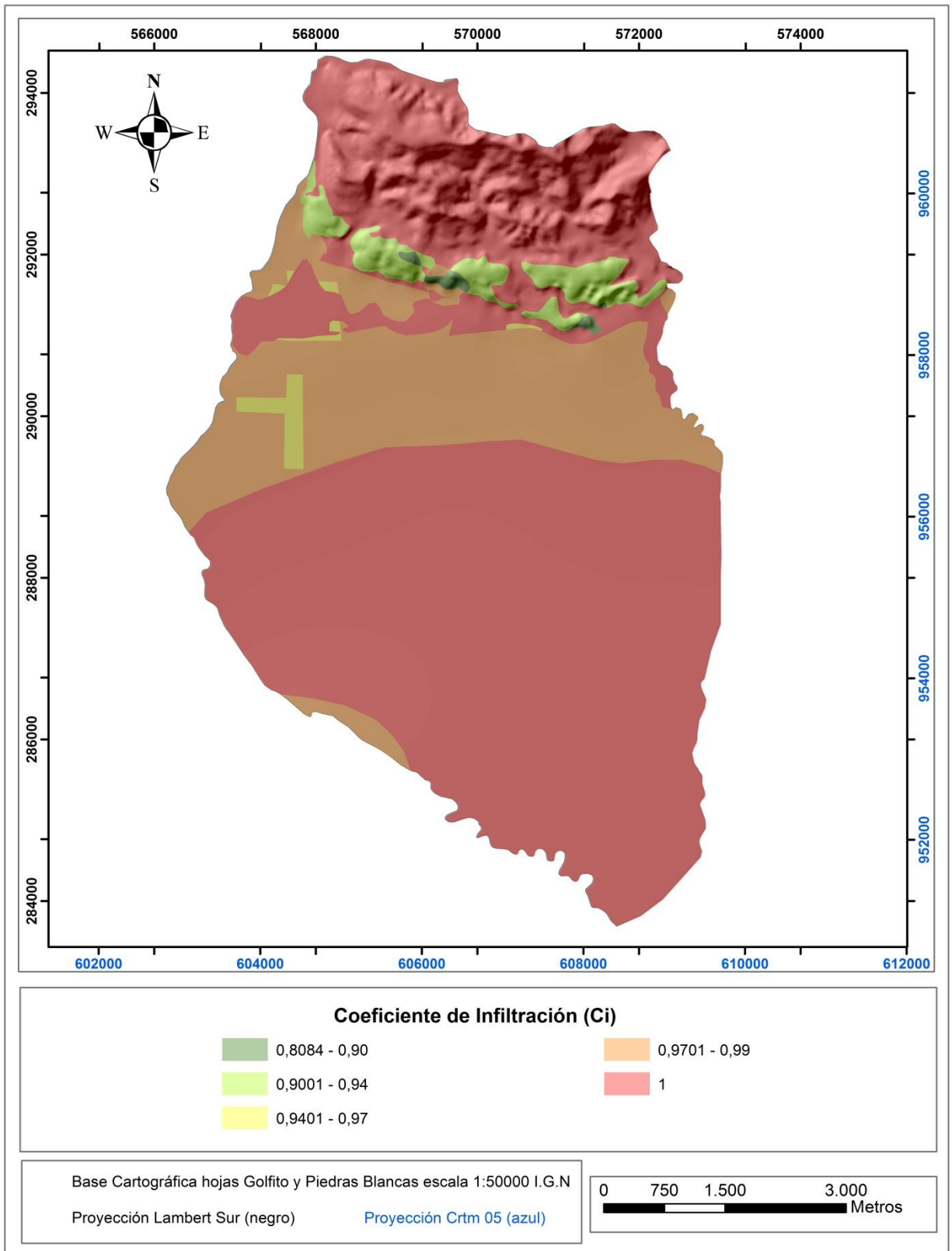
Kp= Coeficiente de infiltración por pendiente del terreno

Kv= Coeficiente de infiltración por cobertura de la vegetación

Kfc= Coeficiente de infiltración por textura del suelo

Para la estimación de este parámetro se utilizó la herramienta de cálculo del software Arcgis 10.2, mediante la suma de los tres coeficientes de infiltración antes mencionados y que fueron asignados para cada una de las zonas de balance definidas, permitiendo obtener el cálculo de Ci para cada una de ellas, una vez obtenidos los diferentes valores de Ci se logró construir el mapa de distribución de coeficiente de infiltración Ci para el área de estudio, el cual se representa en la **Figura 33**.





**Figura 33: Mapa de coeficiente de infiltración (Ci) para el área de estudio.**

Se observa en la figura anterior el predominio de coeficientes de infiltración altos ( $C_i = 1$ ) para el área de estudio, estos se localizan tanto hacia el sector norte, central y sur de dicha área, siendo favorecidos por algunos factores como lo son las altas tasa de infiltración promedio obtenidas, además de la presencia de zonas con amplia cobertura boscosa como es el caso de la parte norte del área de estudio, lo cual inhibe la formación de escorrentía favoreciendo la infiltración, mientras que otro aspecto que termina siendo fundamental para la obtención de un  $C_i$  alto es la presencia de una topografía relativamente plana que impera en gran parte del área de estudio.

Por su parte los valores mínimos de  $C_i$  fueron determinados en la zona de la fila de cerros aislados y más específicamente en las cercanías del botadero de basura, sitio en donde se obtuvo un valor de  $C_i$  igual a 0,80. Cabe mencionar que para esta área se determinaron los mínimos de infiltración promedio de toda el área de estudio, situación que explicaría este descenso en los valores de  $C_i$ , además de la presencia de una topografía que varía de fuerte a promedio, siendo más favorable a la formación de escorrentía antes que la infiltración del agua en los suelos.

#### 5.1.8 Cálculo de la recarga potencial

Según Schosinsky (2006) se produce la recarga potencial de un acuífero cuando la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar el suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante una vez satisfecha la capacidad de campo y la evapotranspiración es la que finalmente recarga al acuífero, la cual se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$R_p = P_i + H_{si} - H_{sf} - ETR \quad \text{Ecuación 7}$$

Dónde:

$R_p$ = Recarga potencial mensual (mm/mes)

$P_i$ = Precipitación que infiltra (mm/mes)

$H_{si}$ = Humedad del suelo al inicio del mes (mm/mes)

$H_{sf}$ = Humedad del suelo al final del mes (mm/mes)

$ETR$ = Evapotranspiración real (mm/mes)

El procedimiento seguido para estimar la recarga potencial en cada una de las zonas de balance definidas consistió en primera instancia en el cálculo de manera individualizada del valor mensual de cada uno de los parámetros incluidos en la ecuación 7, esto se logró mediante la utilización de una hoja de cálculo de Excel, una vez obtenidos estos valores mensuales, se procedió a estimar la recarga potencial

mensual para cada zona, posteriormente se realizó la respectiva suma de estos valores para la obtención de la recarga potencial anual, que es la que se representará en el mapa de recarga potencial elaborado para el presente estudio.

A continuación se presenta el detalle del cálculo de cada uno de los parámetros incluidos en la ecuación 7, necesarios para la estimación de la recarga potencial.

### ***Cálculo de la precipitación que infiltra***

De acuerdo con Schosinsky (2006) para el cálculo de la precipitación que infiltra se deben considerar los siguientes factores: la precipitación mensual, la retención pluvial mensual en el follaje y el coeficiente de infiltración ( $C_i$ ). Es así como la precipitación que infiltra está dada por la siguiente expresión:

$$P_i = (C_i) * (P - Ret) \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde:

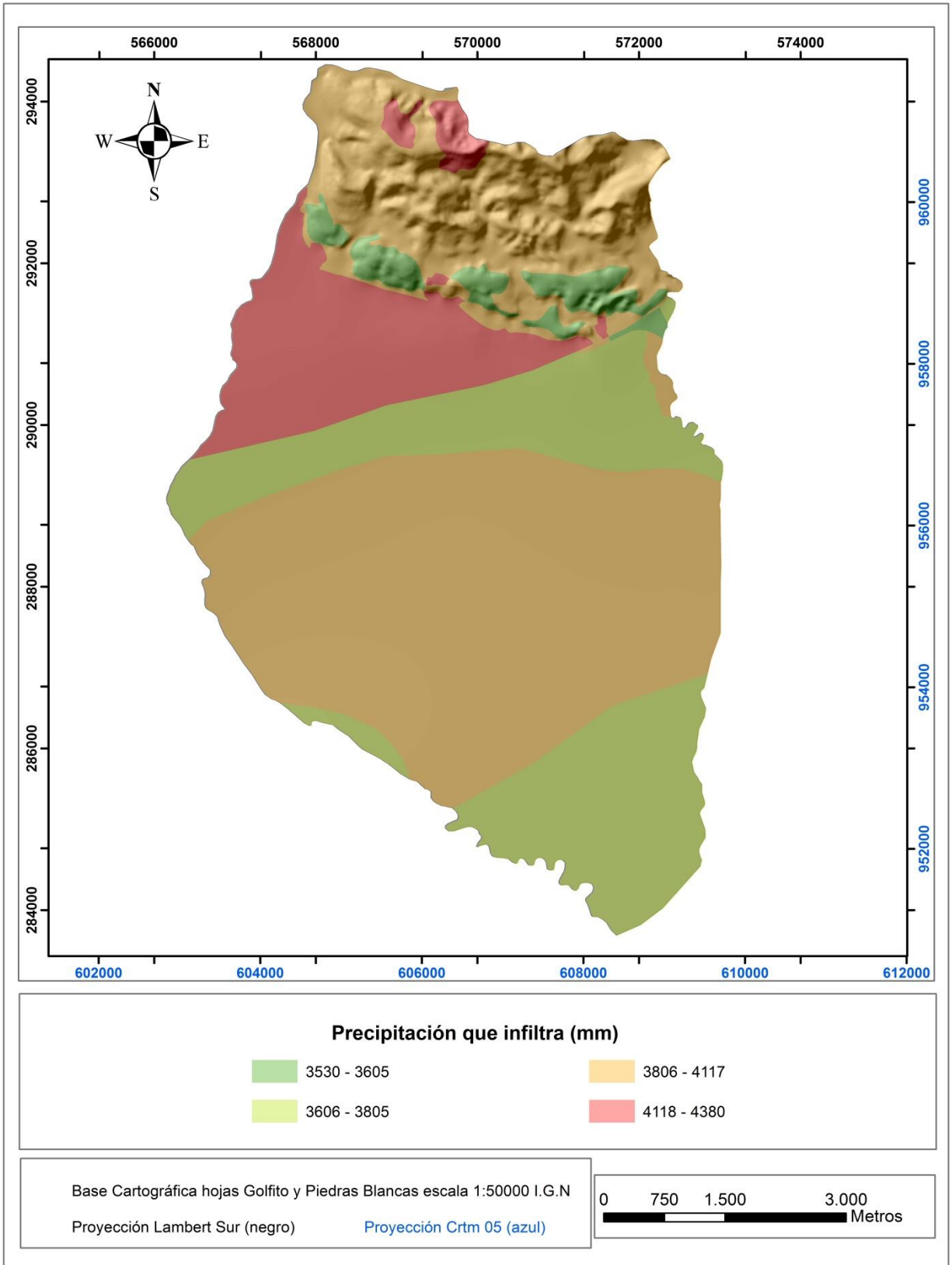
$P_i$ = Precipitación que infiltra (mm/mes)

$C_i$ = Coeficiente de infiltración (adimensional)

$P$ = Precipitación mensual (mm)

$Ret$ = Retención de lluvia en el follaje (mm/mes)

Para cada una de las zonas de balance definidas se procedió a calcular mediante la ecuación 8 la precipitación que infiltra en cada mes, para posteriormente mediante una suma algebraica obtener la precipitación que logra infiltrar anualmente. Con base a los valores obtenidos se construyó el mapa de precipitación que infiltra ( $P_i$ ) anualmente, mostrado en la **Figura 34**.



**Figura 34: Mapa de precipitación que infiltra (Pi) anualmente para el área de estudio.**

Se puede observar en la **Figura 34** como el máximo valor de  $P_i$  (4380 mm) se ubicó en las cercanías del poblado de la Esperanza de Río Claro, sitio en donde el proceso de infiltración de agua en los suelos se ve favorecido por la presencia de una topografía plana, esto según el análisis de pendientes realizado, además cabe mencionar que en general para esta zona y para toda la región norte del área de estudio se determinaron los valores máximos de precipitación promedio, situación que provoca un incremento en la disponibilidad de agua y con ello una mayor probabilidad de infiltración en los suelos. Otros sitios en donde se logró determinar valores máximos de  $P_i$  fueron en el extremo norte del área de estudio y en las zonas circundantes al botadero de basura, lugares en donde aparte de las condiciones de altas precipitaciones promedio, se detectaron condiciones de suelos favorables para la infiltración (valores máximos de infiltración promedio para el área de estudio), además de la existencia de un uso de suelo caracterizado por la presencia de pastos o incluso suelos parcialmente descubiertos que provocan un menor porcentaje de retención de agua por efecto del follaje y una mayor disponibilidad de esta para infiltrar.

Por otro lado se observa un descenso en los valores de  $P_i$  obtenidos para la parte central y sur del área de estudio, el cual se justifica por la baja en los valores de precipitación promedio obtenidos para dichas zonas, al igual que por la presencia de amplias zonas de cultivos de palma que podrían incidir en un incremento en el porcentaje de lluvia retenida en el follaje, reduciendo con ello la infiltración, misma situación que se presenta en la zona montañosa ubicada en la parte norte del área de estudio, en donde la presencia de fuertes pendiente y una amplia cobertura boscosa provocan una baja en los valores de  $P_i$ .

Los valores mínimos de  $P_i$  para el área de estudio se determinaron en la fila de cerros aislados, sitio en donde se presentaron los suelos con menor capacidad de infiltración de toda el área.

### ***Conceptos de $H_{si}$ , $H_{sf}$ y $HD$***

Para cuantificar la recarga potencial a partir de un balance hídrico es necesario realizar un análisis sobre la variación en el grado de humedad del suelo a lo largo de un mes.

Es así como al iniciar un mes cualquiera el suelo tendrá una humedad inicial ( $H_{si}$ ), la cual para efectos de la realización del balance hídrico se calcula iniciando desde el primer mes posterior al mes con la mayor precipitación que infiltra ( $P_i$ ), esto debido a que se considera que el suelo inicia saturado, con lo que el valor de  $H_{si}$  será equivalente al valor de la capacidad de campo (López, 2015). Según los resultados obtenidos a partir del cálculo de la  $P_i$  para cada una de las zonas de balance se determinó el mes de octubre como el mes con la mayor  $P_i$ , por lo cual para efectos del

balance se tomará como humedad inicial la correspondiente al mes de noviembre, mientras que para los meses restantes se tomará como humedad inicial la humedad final del mes anterior, tal y como se muestra en la siguiente expresión:

$$H_{si} = H_{sf} \text{ del mes anterior} \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

H<sub>sf</sub>= Humedad del suelo al final del mes anterior (mm)

Por su parte para realizar el cálculo de la humedad del suelo al final del mes (H<sub>sf</sub>) Schosinsky (2006) define las siguientes ecuaciones:

$$H_{sf} = HD + PM - ETR \text{ si } (HD + PM - ETR \leq CC) \quad \text{Ecuación 10}$$

$$H_{sf} = CC \text{ si } (HD + PM - ETR > CC) \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde:

H<sub>sf</sub>= Humedad del suelo al final del mes (mm)

HD= Humedad disponible (mm/mes)

PM= Punto de marchitez (mm)

ETR= Evapotranspiración real (mm/mes)

CC= Capacidad de campo (mm)

Cabe mencionar además que el valor de la H<sub>sf</sub> nunca debe ser superior al valor de la capacidad de campo.

Por otro lado Schosinsky (2006) define la humedad disponible (HD) como aquella humedad que pueden tomar las raíces de las plantas para poder evapotranspirar. La humedad disponible está dada por la siguiente expresión:

$$HD = H_{si} + P_i - PM \quad \text{Ecuación 12}$$

Dónde:

HD= Humedad disponible (mm/mes)

H<sub>si</sub>= Humedad del suelo al inicio del mes (mm)

P<sub>i</sub>= Precipitación mensual que infiltra (mm)

PM= Punto de marchitez

**Evapotranspiración potencial real (ETPR)**

Uno de los parámetros fundamentales para la estimación de la recarga potencial a partir de la ejecución de un balance hídrico es la evapotranspiración potencial real (ETPR), el cual según Schosinsky (2006) se considera como un factor que es proporcional a la humedad del suelo, comparado con la diferencia de humedad entre la capacidad de campo y el punto de marchitez, siendo definida mediante la siguiente ecuación:

$$ETPR = (HS - PM)(ET)/(CC - PM) \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

ETPR= Evapotranspiración potencial real (mm/mes)

HS= Humedad del suelo (%)

PM = Punto De Marchitez (%)

ET = Evapotranspiración de la planta a capacidad de campo (mm/mes)

CC =Capacidad de Campo (%)

Tal y como se mencionó en secciones anteriores determinar el valor de la evapotranspiración de la vegetación para una cuenca o zona en específico es prácticamente imposible, debido a la inmensa variedad de plantas que podrían intervenir en dicha cuenca o zona, razón por la cual se realizó el cálculo de un valor promedio de la evapotranspiración (ETP), tal y como lo sugiere la metodología de Schosinsky (2006), los diferentes valores de ETP mensuales obtenidos a partir de la aplicación de la ecuación 1 fueron mostrados en el **Cuadro 4**.

Schosinsky (2006) define el coeficiente de humedad del suelo, el cual es expresado de la siguiente manera:

$$Ch = (Hs - PM) / (CC - PM) \quad \text{Ecuación 14}$$

Como se puede observar este coeficiente de humedad (Ch) se encuentra incluido en la ecuación 13 para el cálculo de la ETPR, además el autor redefine este coeficiente de humedad en dos modalidades diferentes, las cuales se les nombra como C1 y C2.

El coeficiente C1 define el grado de humedad del suelo al final del mes sin llegar a considerar la evapotranspiración, de tal manera que el valor de C1 correspondería con el coeficiente de humedad máximo del suelo, ya que toma en cuenta la humedad del

suelo al inicio del mes, más la infiltración de la lluvia, asumiendo que no ocurriese evapotranspiración (Schosinsky, 2006). Este coeficiente se define mediante la siguiente expresión:

$$C1 = (Hsi - PM + Pi)/(CC - PM) \quad \text{Ecuación 15}$$

Dónde:

C1= Coeficiente de humedad del suelo al final del mes sin considerar la evapotranspiración.

Hsi= Humedad del suelo al inicio del mes (mm)

PM= Punto de Marchitez (mm)

Pi = Precipitación que infiltra (mm/mes)

CC= Capacidad de campo (mm)

En contraparte el coeficiente C2 corresponde con el valor de humedad mínimo, ya que está calculado considerando la humedad del suelo definida con el coeficiente C1 pero restándole la evapotranspiración mensual, estimada con el coeficiente de humedad máximo C1. Por lo tanto el coeficiente C2 se aproxima al coeficiente de humedad al final del mes (Schosinsky, 2006), definiéndose mediante la siguiente ecuación:

$$C2 = (Hsi - PM + Pi - ETR1)/(CC - PM) \quad \text{Ecuación 16}$$

$$\text{Dónde } ETR1 = (C1)(ETP)$$

Dónde:

C2= Coeficiente de humedad al final del mes considerando la evapotranspiración

ETR1= Evapotranspiración potencial real (mm/mes)

ETP= Evapotranspiración potencial (mm/mes)

Cabe mencionar que ninguno de los coeficientes de humedad C1 y C2 deben ser superiores a 1 o inferiores a 0. En caso de que C1 o C2 sean superiores 1 se tomara como igual a 1 y si tomaran valores negativos se les asignaría un valor de 0 (Schosinsky, 2006).

Tomando en consideración que tanto la infiltración y la evapotranspiración ocurren durante el mes, y asumiendo los coeficientes C1 y C2 como los valores máximos y mínimos de humedad que podría tener un suelo respectivamente, se estima que el



coeficiente de humedad del mes corresponde al promedio de C1 y C2, esto quiere decir que la evapotranspiración potencial real ocurrida en un mes está dada por:

$$ETPR = \left(\frac{C1+C2}{2}\right)ETP \quad \text{Ecuación 17}$$

Cabe mencionar que según lo establecido por Schosinsky (2006) el valor de evapotranspiración potencial real para un área determinada va a depender del cálculo de la humedad disponible (HD) para dicha área, tal y como se manifiesta en las siguientes expresiones:

$$Si \left(\frac{C1+C2}{2}\right)ETP \leq HD, entonces ETPR = \left(\frac{C1+C2}{2}\right)ETP \quad \text{Ecuación 18}$$

$$Si \left(\frac{C1+C2}{2}\right)ETP > HD, entonces ETPR = HD \quad \text{Ecuación 19}$$

Para efectos del área de estudio se calculó la evapotranspiración potencial real siguiendo el procedimiento descrito anteriormente para cada una de las diferentes zonas de balance establecidas, utilizando para ello una hoja de cálculo de Excel, obteniendo así un valor de evapotranspiración para cada mes, lo cual a su vez permitió, por medio de la suma de los diferentes valores mensuales cuantificar la evapotranspiración potencial real anual para cada zona, tal y como se muestra en la **Figura 35**.

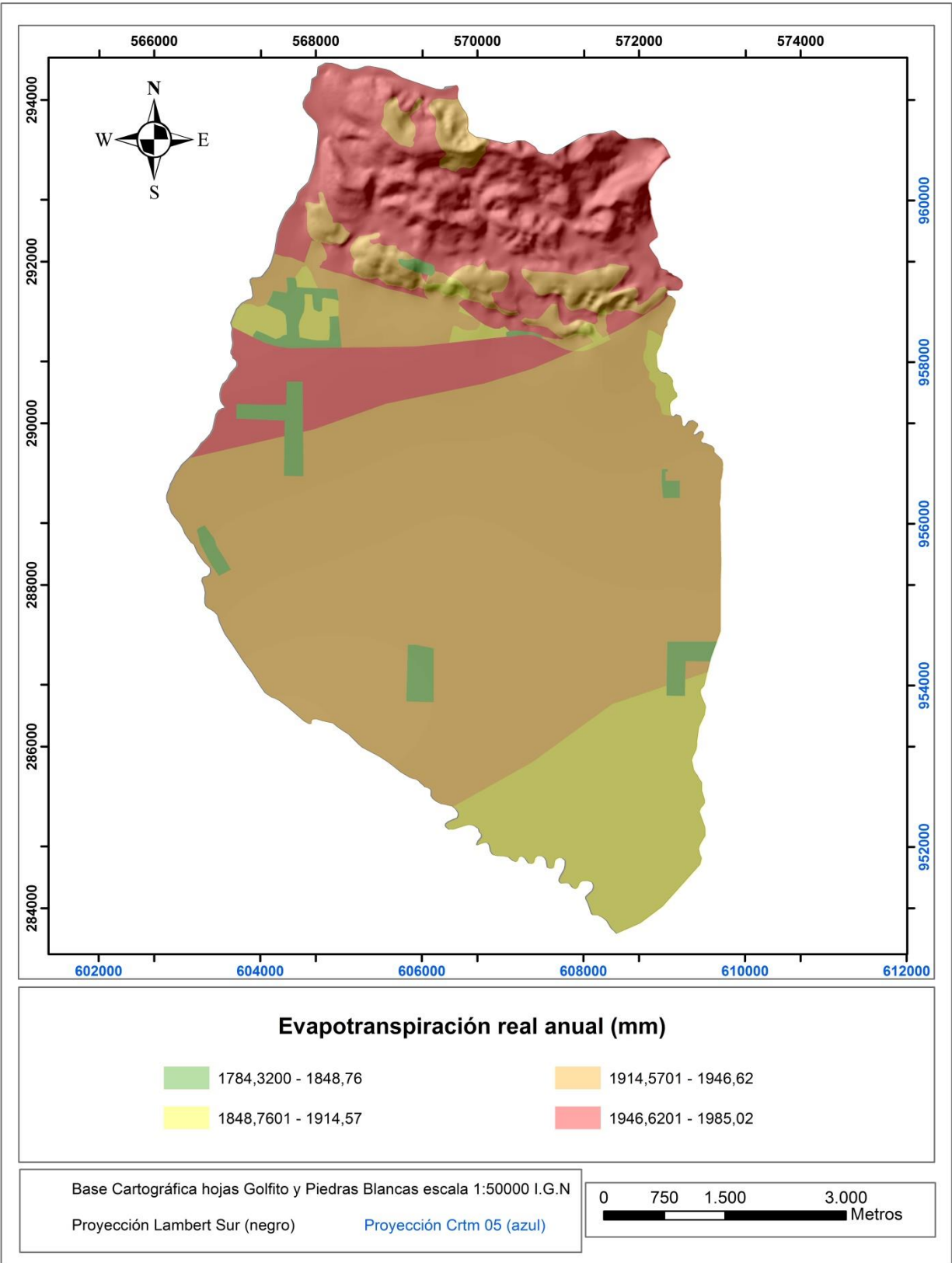
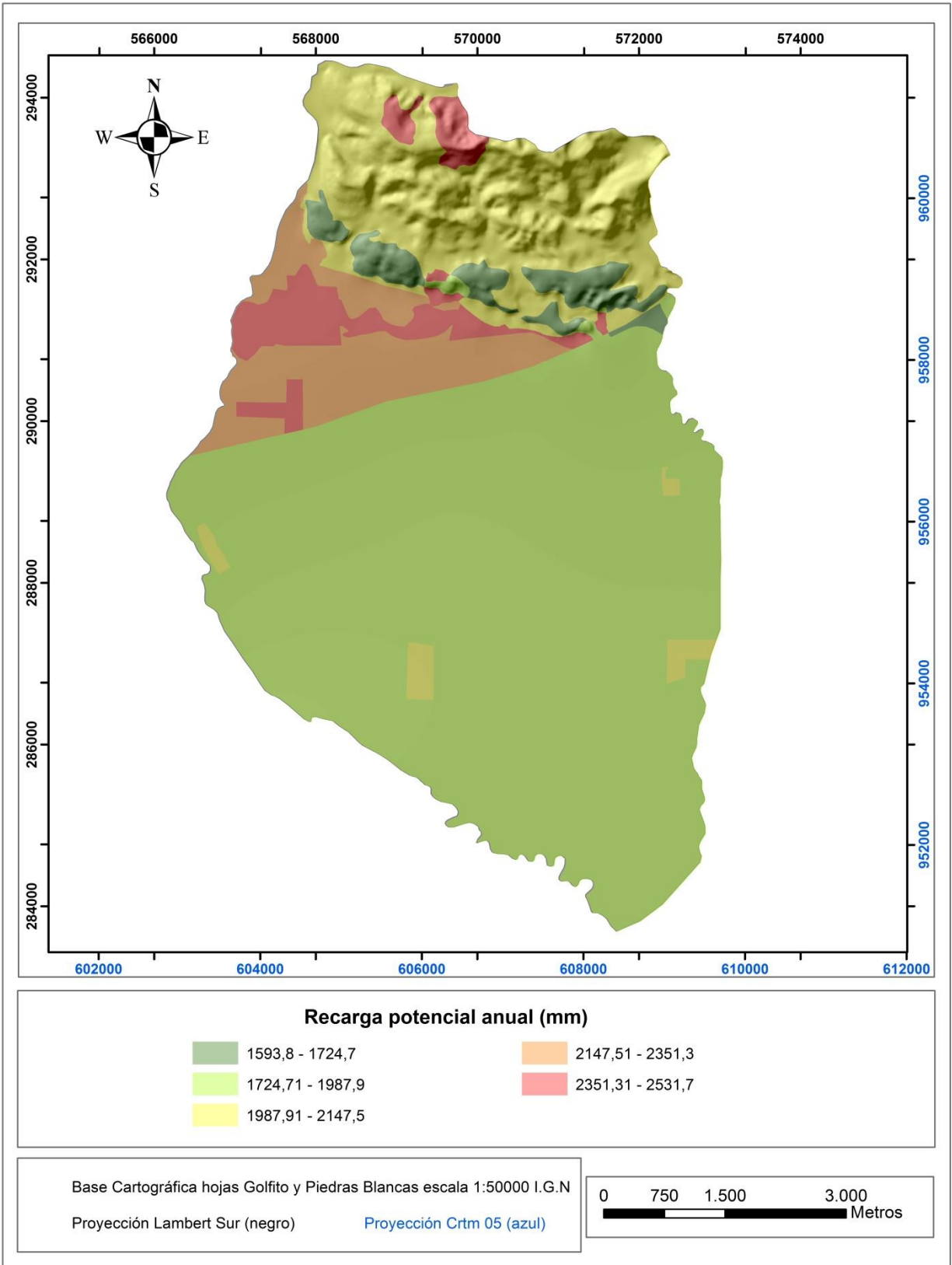


Figura 35: Mapa de distribución de la evapotranspiración potencial real anual (ETPR).

En términos generales podemos observar en la **Figura 35** como los valores máximos de evapotranspiración real coinciden con aquellas zonas en donde se reportaron las precipitaciones promedio más altas del área de estudio, como lo es en toda la parte norte de dicha área, alcanzando una evapotranspiración máxima de 1985 mm anuales, además estos valores máximos de evapotranspiración suelen coincidir con zonas en donde se presenta un uso de suelo caracterizado por la presencia de zonas boscosas o bien zonas de cultivos de palma, los cuales se caracterizan por presentar en ambos casos una importante capacidad de profundización de sus raíces, generando un mayor rango de absorción de agua por parte de la vegetación. Además se logra determinar un descenso gradual en la ETPR hacia la parte central y sur del área de estudio, concordando esta situación con el comportamiento descendente de la precipitación promedio hacia la parte sur del área. Los valores de ETPR mínimos se reportaron principalmente en las zonas ocupadas por los centros poblacionales y el área del botadero de basura, sitios que se caracterizan por presentar una vegetación escasa, principalmente zacate o pastos, los cuales no demandan grandes cantidades de agua para efectos de evapotranspiración.

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

Una vez obtenidos los parámetros de precipitación que infiltra ( $P_i$ ), humedad inicial del suelo ( $H_{si}$ ), humedad final del suelo ( $H_{fi}$ ) y evapotranspiración potencial real (ETPR) para cada mes y para cada una de las zonas de balance establecidas, fue posible mediante la aplicación de la ecuación 7 calcular en primera instancia la recarga potencial mensual y posteriormente la recarga potencial anual para cada zona. Dicho cálculo se llevó a cabo bajo el mismo procedimiento seguido para la obtención de los parámetros anteriores, por medio de la utilización de una hoja de cálculo de Excel, una vez obtenidos los diferentes valores de recarga para cada zona, se procedió a introducir estos valores en un sistema de información geográfica (SIG) para su representación por medio de un mapa de distribución de recarga potencial para el área de estudio. Este mapa se representa en la **Figura 36**.



**Figura 36: Mapa de distribución de la recarga potencial anual para el área de estudio.**

De acuerdo con los valores obtenidos de recarga potencial anual representados en la **Figura 36** se determina que las zonas con mayor potencial de recarga a los acuíferos en general se ubican en las áreas circundantes al poblado de La Esperanza de Río Claro, sitio en donde se determinó una recarga máxima de 2531 mm anuales. Este alto potencial de recarga se ve favorecido por factores como las altas precipitaciones promedio, la presencia de una topografía relativamente plana, además de la escasa cobertura de vegetación, caracterizada principalmente por la presencia de áreas cubiertas por zacate, pastos o bien cultivos de poca profundidad de sus raíces, aspectos que en conjunto interactúan para producir un mayor índice de infiltración de agua en los suelos y con ello un incremento en el potencial de recarga de los acuíferos. Algunos otros sectores en donde se registraron valores máximos de recarga se encuentran hacia la parte norte del área de estudio y en las cercanías del botadero de basura, sitios en los cuales el uso de suelo compuesto mayoritariamente por pastos o zacate, sin dejar de lado las altas tasas de infiltración reportadas y la presencia de suelos parcialmente descubiertos causan un incremento notable en el potencial de recarga.

De igual manera para la parte norte del área de estudio se obtuvieron valores de recarga potencial que rondan los 2000 mm, sitio en donde la mayor cobertura boscosa provoca tanto un incremento en la demanda de agua por evapotranspiración así como también una mayor retención de lluvia en el follaje, aspectos que en conjunto y sumados a la presencia de una topografía fuerte provocan un descenso en el porcentaje de recarga. Por último se determinó una tendencia a la baja en la recarga potencial hacia el sector central y sur del área de estudio, este descenso se justifica por las menores precipitaciones promedio obtenidas en estas zonas, mientras que los valores mínimos de recarga potencial se ubicaron una vez más en la fila de cerros aislados, región en donde se estimó una recarga promedio cercana a los 1666 mm anuales.

### ***Escorrentía superficial***

Otra de las variables tomadas en cuenta por la metodología de Schosinsky (2006) para el desarrollo de balances hídricos es la escorrentía superficial, la cual corresponde con la precipitación mensual menos la retención de lluvia en el follaje menos la infiltración. La escorrentía mensual se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$ESC = P - RET - Pi \quad \text{Ecuación 20}$$

Dónde:

*ESC*= Escorrentía superficial (mm/mes)

*P*= Precipitación mensual (mm/mes)

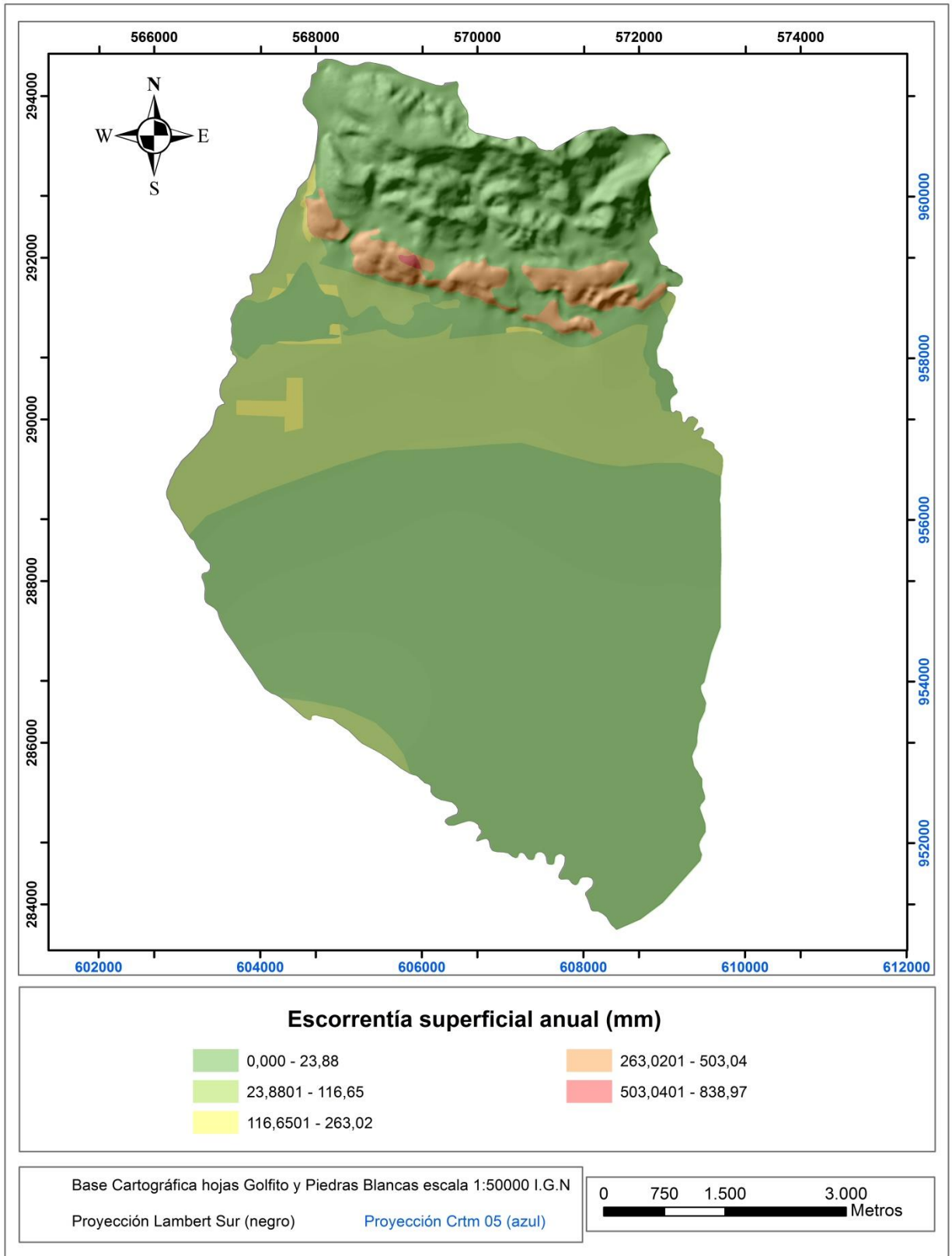
*RET*= Lluvia retenida en el follaje (mm/mes)

*P<sub>i</sub>* = Precipitación que infiltra (mm/mes)

Para estimar esta variable en cada una de las diferentes zonas de balance establecidas se siguió el mismo procedimiento desarrollado para el cálculo de las variables anteriores, calculando los valores mensuales de escorrentía, mediante la utilización de una hoja de cálculo de Excel, para posteriormente obtener la escorrentía anual para cada zona, los cuales se representaran en el mapa de distribución de la escorrentía anual mostrado en la **Figura 37**.

En términos generales se determinó el predominio de valores bajos de escorrentía superficial para el área de estudio, esto debido a la combinación de varios aspectos como lo son por ejemplo: la presencia de una topografía plana o relativamente plana que ocupa un alto porcentaje del área de estudio, además de la presencia de suelos con potencial de infiltración que comúnmente oscila entre moderado o alto, sin dejar de lado la ocurrencia de áreas con una importante cobertura de vegetación, ya sea áreas boscosas como las ubicadas hacia la parte norte del área de estudio o bien zonas de cultivos extensivos como lo es el caso de la parte central y sur de dicha área, donde predominan los cultivos de palma, ocasionando un incremento significativo en la cantidad de lluvia retenida en el follaje.

Los valores más altos de escorrentía superficial se ubicaron en la zona de la fila de cerros aislados, zona que coincide precisamente con la región de menor capacidad de infiltración de los suelos reportados para toda el área. El valor máximo de escorrentía reportado en este caso es de 838,97 mm anuales, el cual se registró en la zona del botadero de basura de Golfito, influenciado por la ausencia de una vegetación densa en la zona y por la baja capacidad de infiltración de agua en los suelos en este punto.



**Figura 37: Mapa de escorrentía superficial del área de estudio.**

## **6 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA**

La finalidad de una prospección geoelectrica es conocer la forma, composición y dimensiones de estructuras o cuerpos inmersos en el subsuelo a partir de medidas en la superficie. Mediante la prospección geoelectrica conseguimos trazar una cartografía de resistividades aparentes del subsuelo que nos darán información sobre las estructuras que en él subyacen. Existen dos tipos de prospecciones geoelectricas que son: los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) y las Calicatas Eléctricas (CE), (Nieto, 2007).

Para efectos de la presente investigación se implementó la técnica de los SEVs, a través del desarrollo de una campaña geofísica, la cual se llevó a cabo en gran parte del área de estudio, específicamente en la parte plana de la misma, esto con el fin de obtener los distintos valores de resistividad propios de cada material que compone el subsuelo, estableciendo con ello un modelo estratigráfico del relleno aluvial que caracteriza esta zona.

Es así como mediante la realización de esta campaña geofísica se logró obtener una fuente adicional de información, con la cual fue posible lograr una mejor caracterización de la estratigrafía de la zona de estudio, información que a su vez fue complementada y correlacionada con los datos de campo recolectados referentes a geología y con la información disponible de los registros de pozos existentes en la zona. Mediante el análisis en conjunto de esta información fue posible establecer el modelo hidrogeológico conceptual planteado en el presente estudio.

### **6.1 Prospección geofísica por medio de Sondeos eléctricos verticales (SEVs)**

Los SEVs son una técnica geofísica que permite medir la variación vertical de la resistividad aparente debajo de un punto único, siendo utilizados para estimar la posición y espesor de capas litológicas horizontales en profundidad (Murillo, 2008).

La finalidad de los SEVs es averiguar la distribución vertical en profundidad de las resistividades aparentes bajo el punto sondeado a partir de medidas de la diferencia de potencial en la superficie. Es utilizado comúnmente para detectar y establecer los límites de capas horizontales de suelos estratificados (Nieto, 2007).

Se realizaron en total 13 Sondeos Eléctricos Verticales distribuidos en el sector central y sur del área de estudio, específicamente sobre el relleno aluvial ubicado entre los márgenes de los ríos Claro y Caracol, esto con el objetivo de mediante la correlación de los diferentes valores de resistividad obtenidos en cada sondeo, realizar algunos



perfiles geoelectricos que muestren de manera general la estratigrafía de la zona, además de la obtención de información importante como espesor del relleno aluvial y presencia de niveles de agua subterránea.

En el **Cuadro 9** se enlistan los diferentes sondeos eléctricos verticales realizados, además en la **Figura 38** se muestra la ubicación geográfica de cada uno de los sondeos realizados.

**Cuadro 9: Listado de Sondeos eléctricos verticales realizados**

<b>Código</b>	<b>Latitud Coordenadas Lambert Sur</b>	<b>Longitud Coordenada Lambert Sur</b>
SEV1	292128	567672
SEV2	286701	568262
SEV3	288256	567771
SEV4	288988	567771
SEV5	290346	567765
SEV6	286704	572272
SEV7	288199	572273
SEV8	288920	572266
SEV9	289694	572272
SEV10	286609	570765
SEV11	288289	570763
SEV12	289057	570762
SEV13	289709	570763

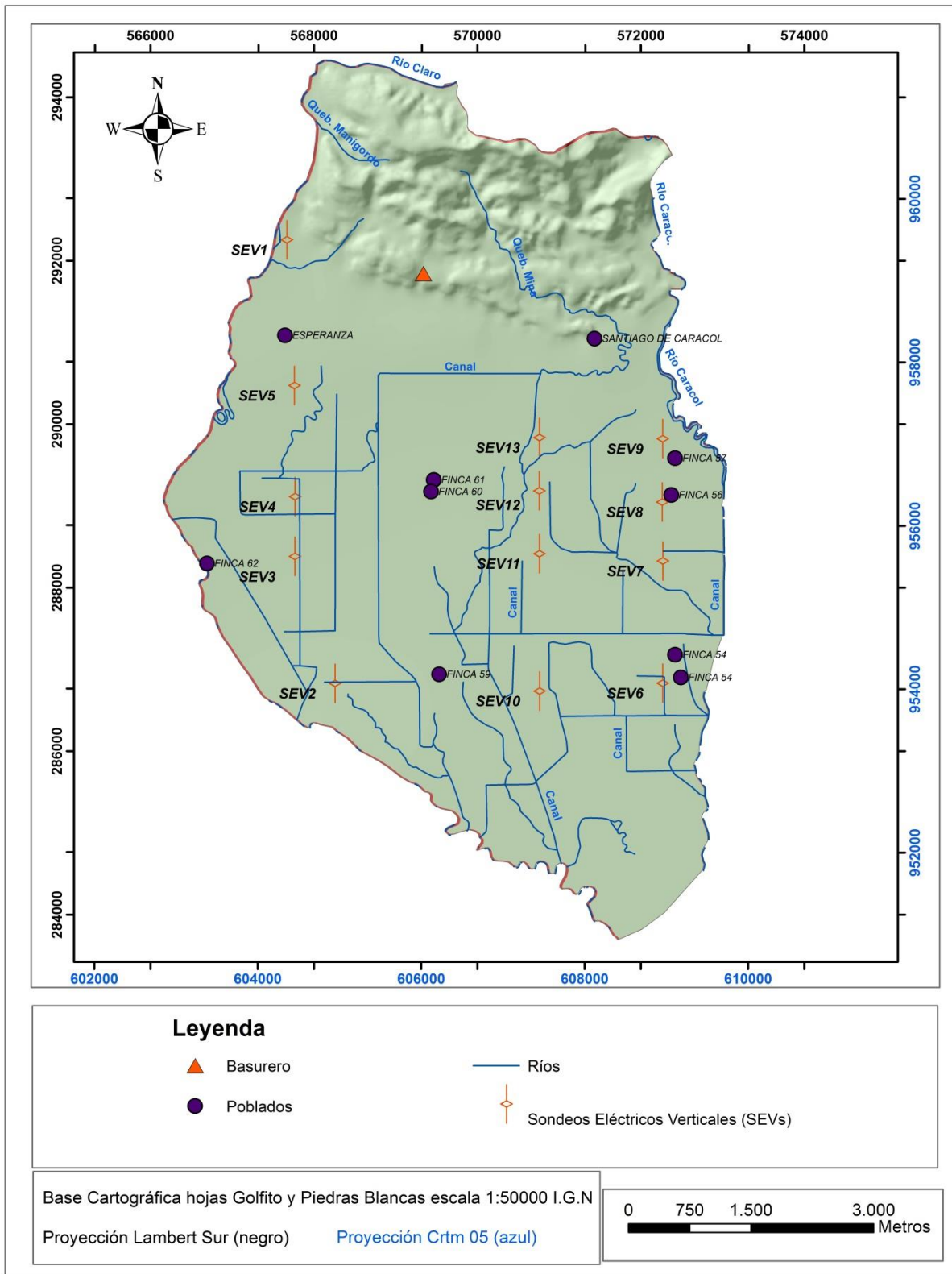


Figura 38: Mapa de ubicación de los SEVs realizados

### 6.1.1 Resultados de los Sondeos eléctricos verticales realizados

Una vez obtenidos los diferentes valores de resistividad aparente para cada uno de los sondeos realizados se llevó a cabo el procesamiento de dichos datos, esto mediante la utilización del software libre IP2WIN, realizando con ello la respectiva inversión de los mismos y obteniendo a su vez los valores de resistividad real correspondiente para cada una de las diferentes capas geoelectricas definidas.

A partir de la obtención de los valores de resistividad real de las capas se procedió a correlacionar estos con la información litológica disponible en los registros de pozos más cercanos al sitio en que se realizó cada sondeo, esto con el objetivo de verificar la concordancia de los datos obtenidos y con ello corroborar la confiabilidad del método.

Es importante mencionar que por lo general la separación promedio entre los diferentes pozos y SEVs correlacionados fue en la mayoría de los casos superior a 1 Km de distancia, alcanzando incluso en algunos casos hasta los 2 Km, por lo cual al momento de establecer la respectiva correlación se tomó en consideración la existencia de posibles cambios laterales en la composición del relleno aluvial y que podrían incidir en la imposibilidad de obtener un grado de correlación total entre la descripción litológica de pozos y los datos recabados a partir de los SEVs.

De igual manera cabe mencionar que en algunos casos no fue posible establecer una correlación entre los SEVs y pozos, debido principalmente a la ausencia de pozos cercanos al sitio de realización de los sondeos, sobre ello es importante recalcar que para la definición del modelo geoelectrico y su respectiva interpretación geológica se le dio más peso a aquellos SEVs que sí pudieron ser correlacionados con algún pozo cercano.

En el **Cuadro 10** se muestran los diferentes valores de resistividad obtenidos para cada una de las capas geoelectricas definidas para cada sondeo y su respectiva interpretación geológica, mientras que en el **Cuadro 11** y **Figura 39** se presentan los pozos que fueron utilizados para correlacionar los diferentes sondeos,

Para facilitar la interpretación en conjunto de la información recabada a partir de cada SEV se procedió a definir diferentes rangos de resistividad, con los cuales a su vez se logró establecer las capas geoelectricas incluidas en el modelo establecido.

Esta clasificación de resistividades facilitó la respectiva interpretación geológica para cada capa geoelectrica definida, es así como para las capas cuyas resistividades oscilan entre 0 y 15 ohmm se consideran asociadas a secuencias de sedimentos finos arcillosos, mientras que las resistividades entre 15 y 35 ohmm se han relacionado a sedimentos finos arenosos, de igual manera los valores de resistividad ubicados entre

35 y 100 ohmm han sido considerados como sedimentos arenosos, y por último las resistividades mayores a 100 ohmm se han interpretado como secuencias de aluvión grueso (arenas y gravas).

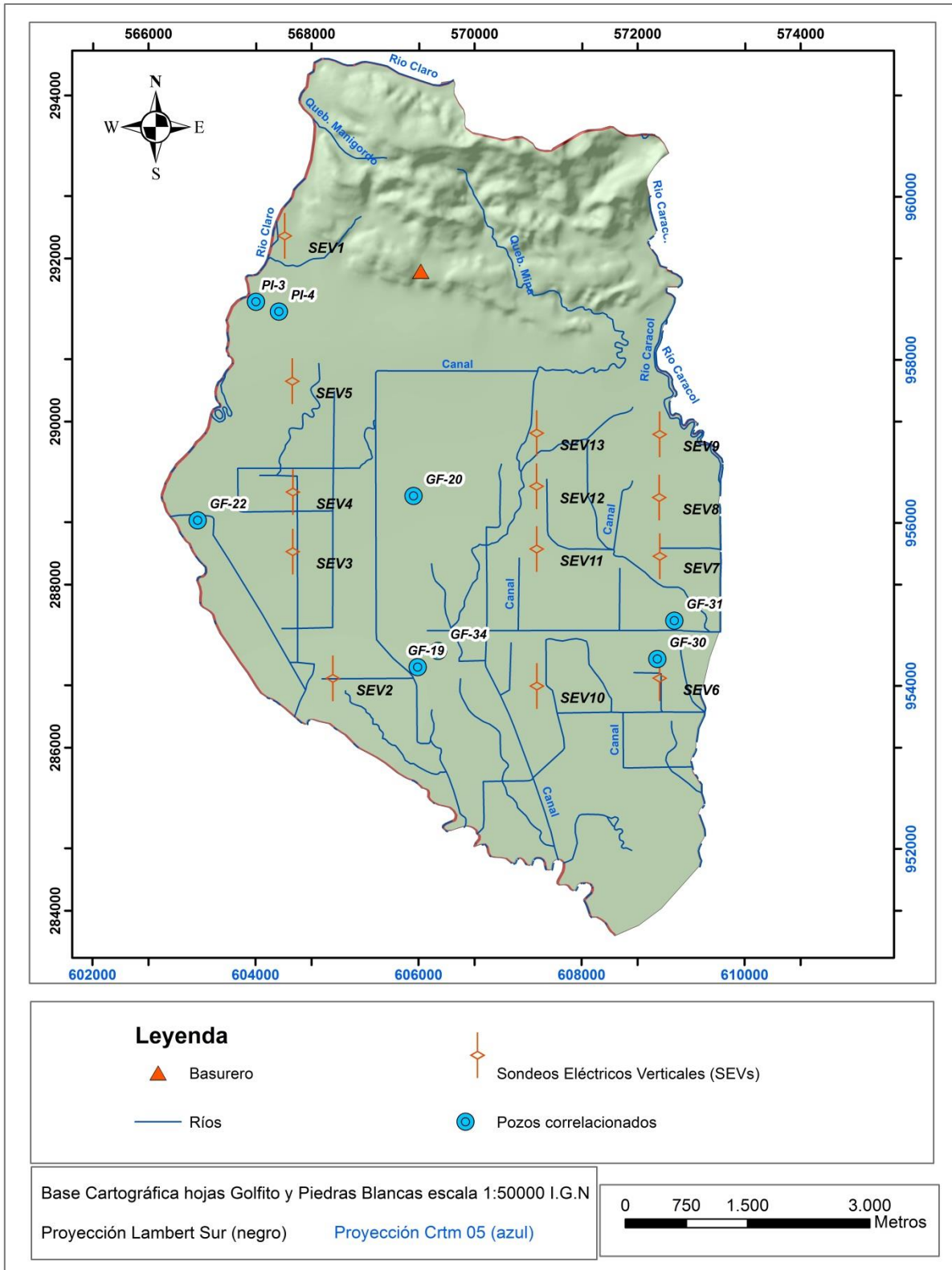
**Cuadro 10: Resultados obtenidos para cada SEV realizado**

SEV	N° de capa	Resistividad real (Ohmm)	Espesor (m)	Material asociado
1	1	48	1	Material de relleno
	2	167	2	Aluvión grueso
	3	17	2	Sedimentos finos con arena
	4	54	61	Arenas
	5	14	No definido	Sedimentos finos
2	1	37	0,5	Material de relleno
	2	0.7	0.2	Material de relleno
	3	9	63	Sedimentos finos
	4	14	No definido	Sedimentos finos con arena
3	1	17	4	Sedimentos finos con arena
	2	7	9	Sedimentos finos
	3	24	5	Sedimentos finos con arena
	4	1	9	Sedimentos finos
	5	12	No definido	Sedimentos finos con arena
4	1	25	14	Sedimentos finos con arena
	2	12	22	Sedimentos finos
	3	32	25	Sedimentos finos
	4	1	No definido	Sedimentos finos
5	1	17	2	Material de relleno
	2	7	2	Material de relleno
	3	59	8	Sedimentos finos
	4	6	6	Sedimentos finos
	5	21	No definido	Sedimentos finos con arena
6	1	24	0,5	Material de relleno
	2	2	0,15	Material de relleno
	3	12	3	Sedimentos finos
	4	7	22	Sedimentos finos
	5	15	No definido	Sedimentos finos con arena

7	1	19	0,5	Material de relleno
	2	6	9	Sedimentos finos
	3	3	7	Sedimentos finos
	4	33	22	Arenas finas
	5	3	22	Sedimentos finos
	6	12	No definido	Sedimentos finos
8	1	30	0,5	Material de relleno
	2	11	8	Sedimentos finos
	3	5	12	Sedimentos finos
	4	40	42	Arenas
	5	4	No definido	Sedimentos finos
9	1	11	0,5	Material de relleno
	2	3	0.2	Material de relleno
	3	10	5	Sedimentos finos
	4	7	24	Sedimentos finos
	5	26	30	Arenas finas
	6	11	No definido	Sedimentos finos
10	1	24	0.5	Material de relleno
	2	10	7	Sedimentos finos
	3	2	3	Sedimentos finos
	4	10	40	Sedimentos finos
	5	3	9	Sedimentos finos
	6	10	No definido	Sedimentos finos
11	1	7	1	Sedimentos finos
	2	9	13	Sedimentos finos
	3	1	16	Sedimentos finos
	4	769	No definido	
12	1	11	0.5	Material de relleno
	2	6	2	Sedimentos finos
	3	22	4	Sedimentos finos con arena
	4	1	5	Sedimentos finos
	5	11	No definido	Sedimentos finos
13	1	16	0.5	Material de relleno
	2	7	0.6	Material de relleno
	3	25	2	Sedimentos finos con arena
	4	6	20	Sedimentos finos
	5	20	5	Sedimentos finos con arena
	6	9	No definido	Sedimentos finos

**Cuadro 11: Información sobre pozos utilizados para la correlación de SEVs**

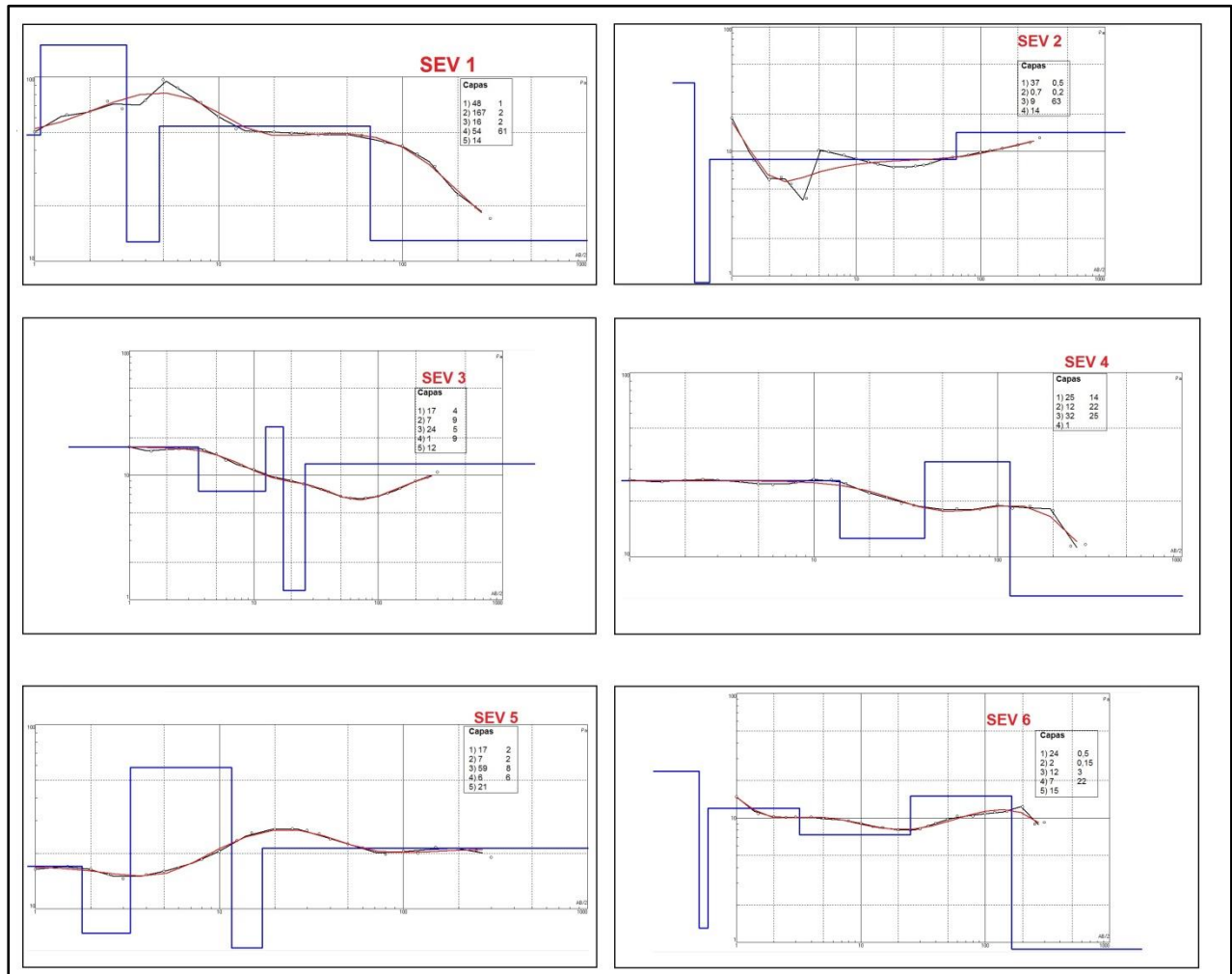
<b>SEV</b>	<b>Pozo correlacionado</b>	<b>Distancia (m)</b>	<b>% de Error estimado</b>
1	PI-3 y PI-4	850 y 880	5,72
2	GF-19	1035	16,1
3	GF-22	1235	2,49
4	GF-22	1200	3,61
5	-	-	2,2
6	GF-30	300	3,51
7	GF-31	780	1,99
8	GF-31	1480	4,85
9	-	-	3,7
10	GF-34	1300	2,34
11	-	-	27,6
12	GF-20	1500	7,19
13	-	-	1,8



**Figura 39: Mapa de ubicación de SEVs y pozos correlacionados**

En general según los resultados obtenidos para cada sondeo se logró definir un modelo que varía entre 4 y 6 capas geoelectricas, mostrándose una tendencia a presentar una sucesión de capas más resistivas intercaladas con capas de características más conductoras, esta situación se manifiesta en la morfología de las curvas obtenidas para cada SEV.

Los gráficos obtenidos una vez procesados los datos de cada SEV se presentan en las **Figura 40 y Figura 41**.



**Figura 40: Gráficos obtenidos para los SEVs1-6.**



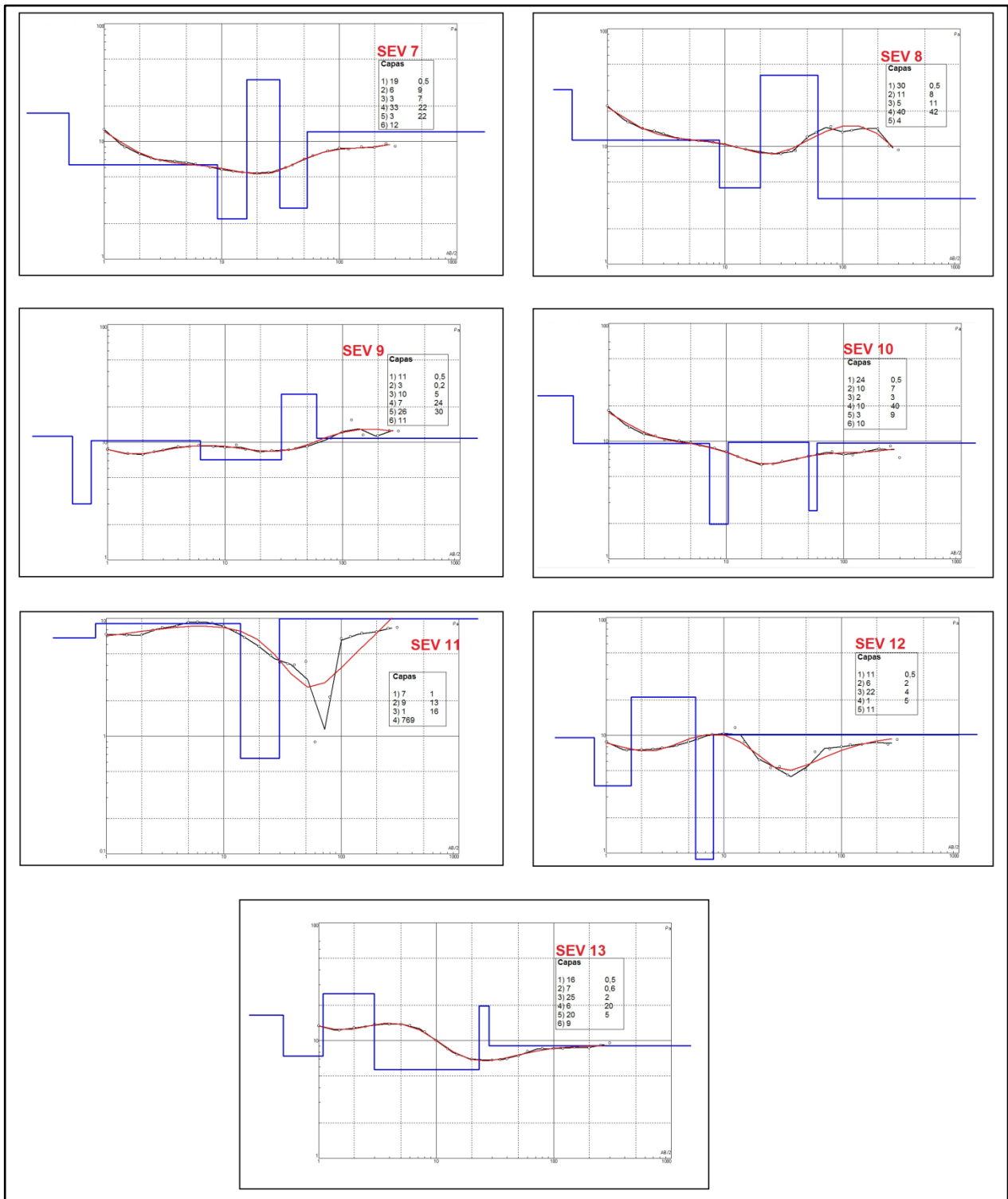


Figura 41: Gráficos obtenidos para los SEVs 7-13.

### ***Perfiles geoelectricos***

A partir de la interpretación de los resultados obtenidos para cada uno de los SEVs y en concordancia con la respectiva correlación realizada con base a la información disponible referente a pozos en la zona de estudio, se procedió a hacer un análisis en conjunto de los diferentes SEVs realizados, para tal fin se elaboraron una serie de perfiles geoelectricos con el objetivo de caracterizar la estratigrafía del relleno aluvial sobre el que se llevó a cabo la campaña geofísica.

Se realizaron un total de 4 perfiles geoelectricos, los cuales fueron distribuidos de manera estratégica a lo largo de la zona plana del área de estudio con base en la ubicación de los diferentes sondeos. En específico se realizaron dos perfiles geoelectricos con una orientación norte-sur sobre los extremos este y oeste de dicha zona plana, más otros dos perfiles con orientación oeste-este en la parte central y sur de la misma respectivamente. En la **Figura 42** se muestra la ubicación y orientación de cada uno de estos perfiles geoelectricos.

En la **Figura 43** se muestra el perfil geoelectrico 1 (perfil A – B), el cual se ubicó a lo largo del extremo oeste del relleno aluvial, tiene una orientación N-S y una longitud aproximada de 5645 metros, para su elaboración se tomó en consideración la información obtenida de 5 sondeos eléctricos, los cuales corresponden con el SEV1, SEV2, SEV3, SEV4 y SEV5. A partir del análisis en conjunto de los diferentes valores de resistividad obtenidos para cada uno de estos SEVs se logró definir un modelo geoelectrico de 5 capas, en el cual se logra observar como hacia el extremo norte del perfil se da la existencia de capas de mayor resistividad, manifestadas en primera instancia por la presencia de una capa superficial con una resistividad de 167 ohmm y de unos 3 m de espesor, la cual se asocia con una secuencia de aluvión grueso.

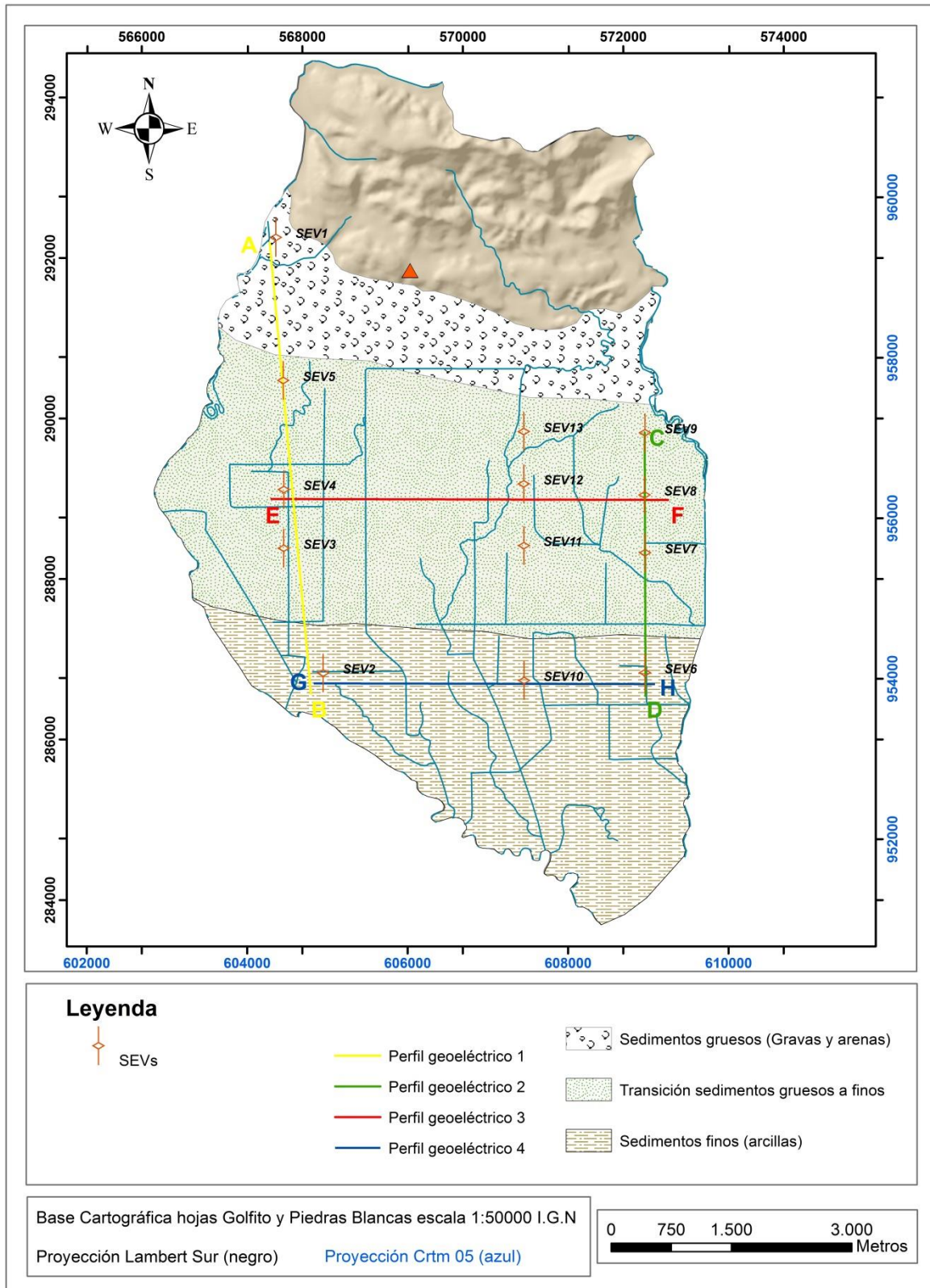
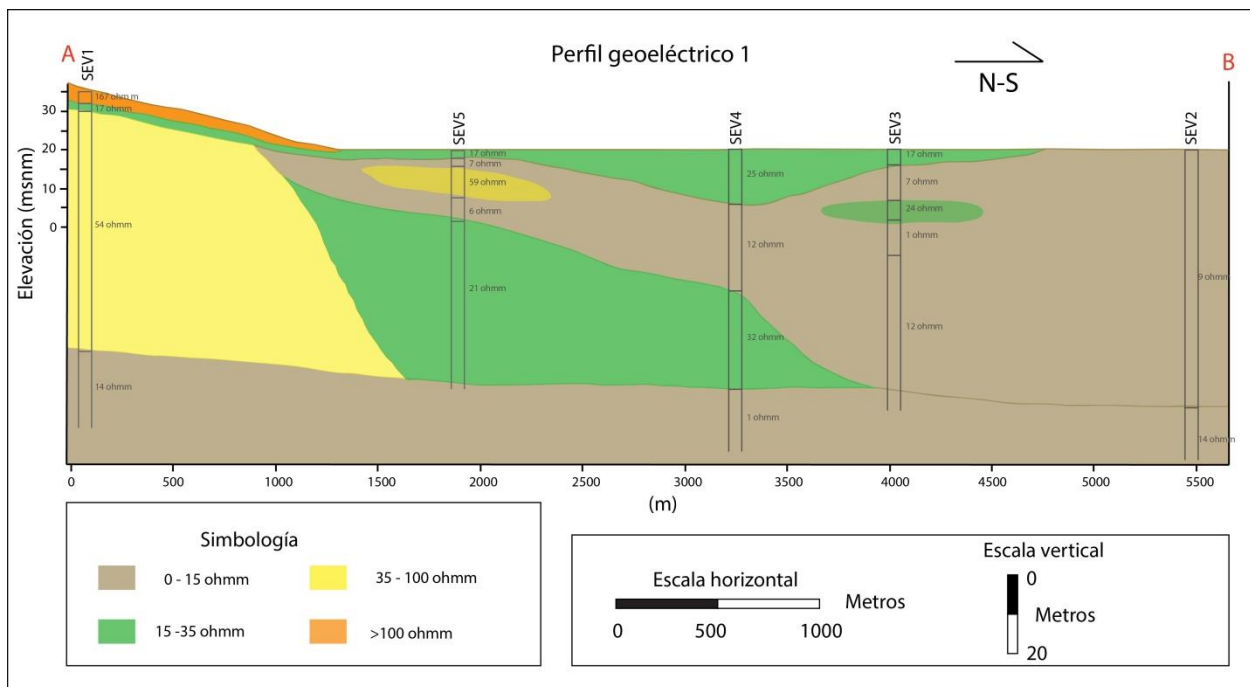


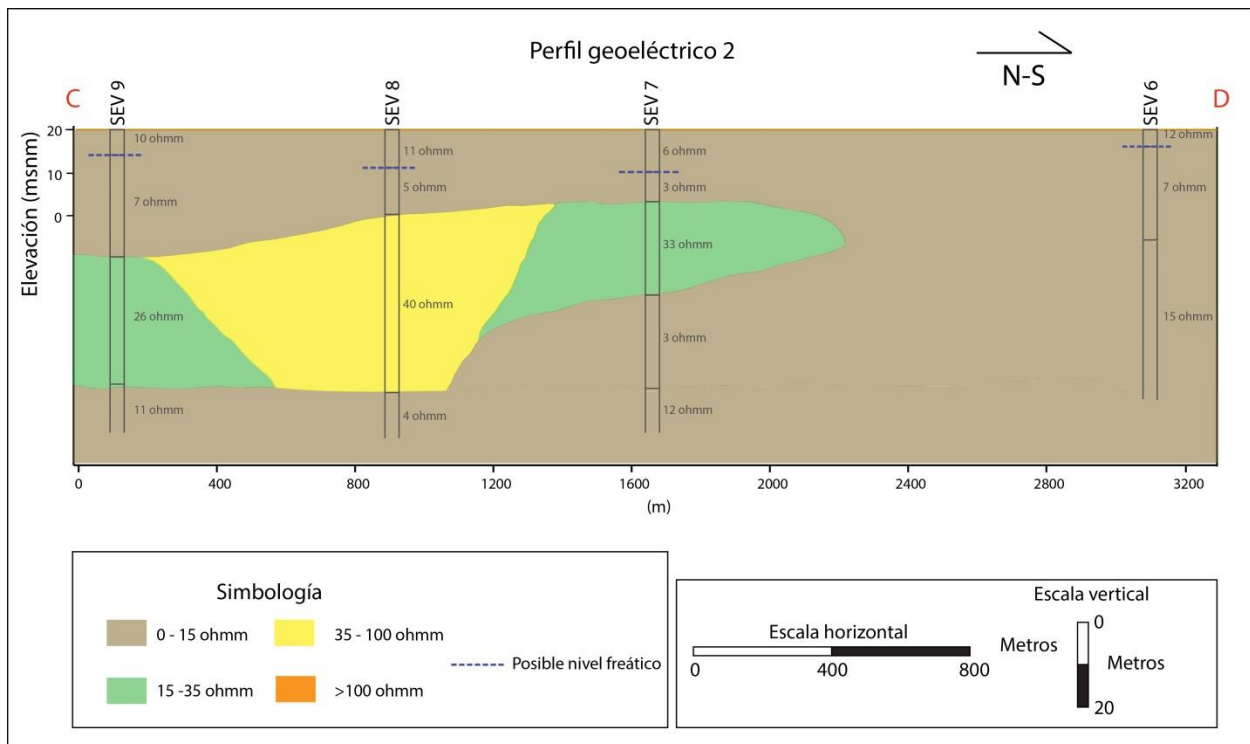
Figura 42: Mapa de ubicación de perfiles geoelectricos realizados.

Por debajo de esta primera capa resistiva se logra detectar para el sector norte del perfil la presencia de una extensa capa de resistividad intermedia (54 ohmm) y con un espesor cercano a los 50 m, la cual se interpreta según la correlación realizada por medio de los registros de pozos como una secuencia aluvional compuesta por arenas y gravas. Según el modelo establecido esta capa reduce gradualmente su valor de resistividad y espesor hacia la parte central del perfil, zona en la cual según los resultados del SEV4 y SEV5 su resistividad oscila entre 21 y 32 ohmm, está disminución en la resistividad se interpreta como un decrecimiento en la granulometría del depósito hacia la parte central del mismo, situación que se confirma aún más al analizar las resistividades obtenidas en los SEVs 3 y 2, correspondientes al extremo sur del perfil, sitio en donde los valores de resistividad obtenidos en general fueron inferiores a los 15 ohmm y se han asociado a un incremento en la fracción arcillosa del depósito para esta zona. Por otro lado cabe mencionar que a profundidades mayores a los 60 m todos los sondeos incluidos en este perfil reportaron valores uniformes de resistividad promedio cercana a los 14 ohmm, esta sección ha sido asociada a la presencia de una secuencia de roca ampliamente arcillitizada, esto en concordancia con la información consultada mediante los registros de pozos en la zona.



**Figura 43: Perfil geoelectrico 1 (A-B).**

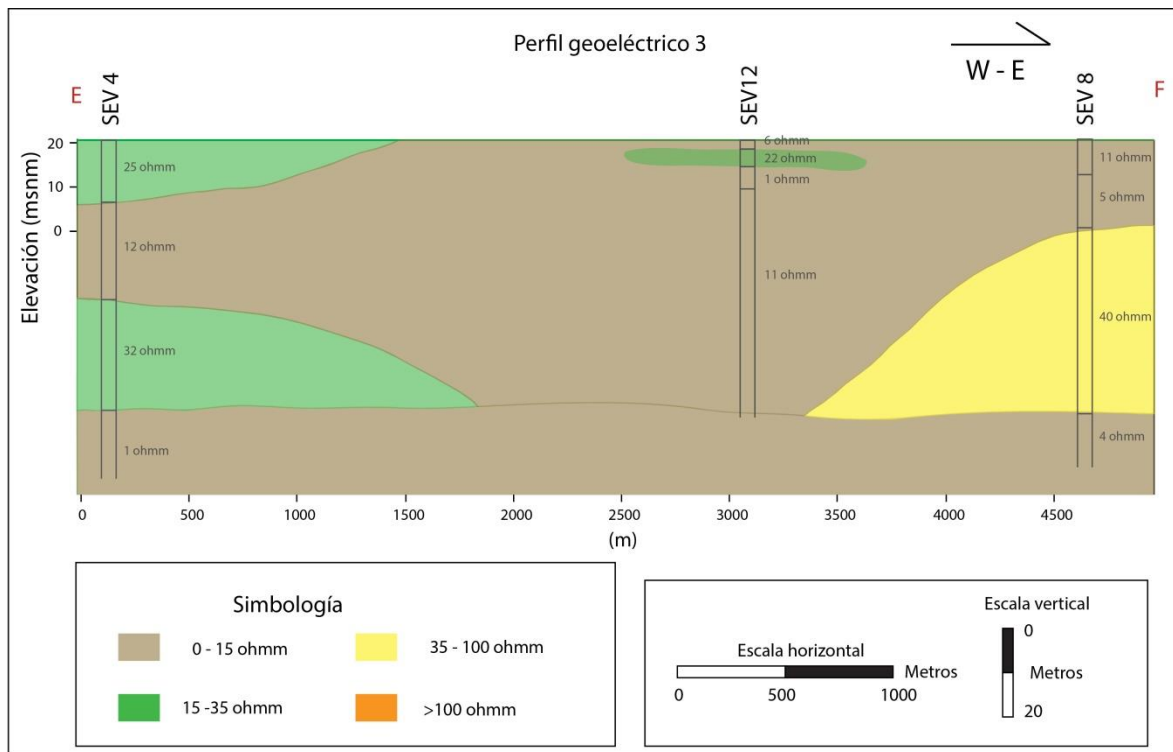
En el caso del perfil geoelectrico 2 (perfil C – D), mostrado en la **Figura 44** se realizó con una orientación norte-sur en el extremo este del relleno aluvial, con una longitud de 3300 m., tomando en cuenta la información obtenida a partir del SEV9, SEV8, SEV7 y SEV6, se logra determinar la presencia hacia la parte norte y central del perfil de una capa de resistividad intermedia (26-40 ohmm) y con un espesor máximo de 42 m, la cual se ha relacionado con una secuencia arenosa o areno-arcillosa, misma que tiende gradualmente a desaparecer hacia la parte central y sur del área de estudio, sitio en donde al igual que lo evidenciado en el perfil geoelectrico 1 se da el predominio de secuencias poco resistivas con valores inferiores a los 15 ohmm, reflejando una condición más arcillosa del depósito.



**Figura 44: Perfil geoelectrico 2 (C-D)**

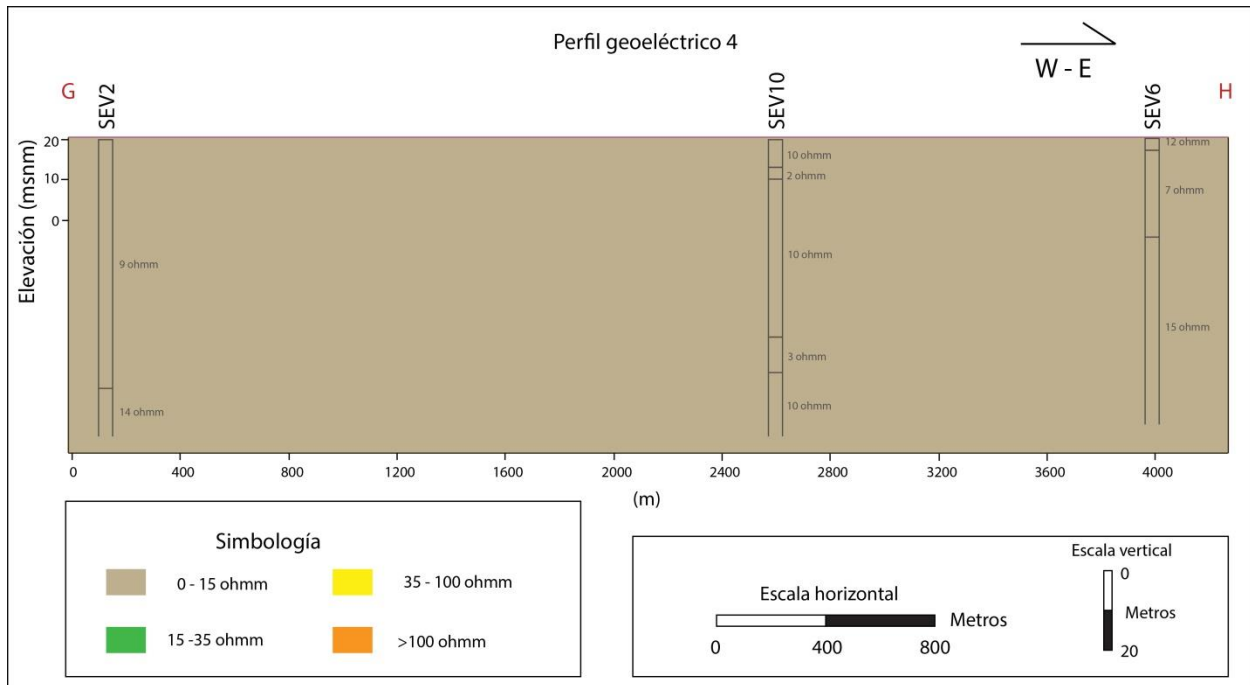
En la **Figura 45** se muestra el perfil geoelectrico 3, el cual se ubicó en la parte central de la zona del relleno aluvial, toma en consideración la información obtenida del SEV 4, SEV 12 y SEV8, con una orientación oeste-este y una longitud de 4955 m. Se observa como hacia el extremo oeste del perfil se presentan dos capas geoelectricas con resistividades de entre 25 y 32 ohmm, la más superficial de ellas cuenta con un espesor de 14 m y la segunda se halla ubicada a una profundidad de 36 m. y con un espesor de alrededor de 25 m., ambas capas se encuentra separadas por una secuencia de baja resistividad (12 ohmm) con 22 m. de espesor, la cual se asocia con un horizonte de sedimentos finos arcillosos. Por otro lado hacia el extremo este se aprecia nuevamente una capa de resistividad intermedia (40 ohmm) ubicada a una

profundidad de alrededor de 20 m, misma que es relacionada con la misma secuencia arenosa evidenciada en el perfil geoelectrico 2. Como dato particularidad en este perfil se logra observar como las capas de resistividad intermedia asociadas a sedimentos de composición arenosa se detectan únicamente hacia los extremos oriental y occidental del relleno aluvial, coincidiendo con la ubicación de los ríos Claro y Caracol, los cuales limitan el área de estudio, mientras que hacia la parte central del área analizada en el perfil se observa un predominio de valores de resistividad bajos por lo general inferiores a los 15 ohmm, evidenciando con ello una vez más un cambio en la granulometría o textura del relleno aluvial imperando las texturas de tipo arcillosa en la parte central del relleno.



**Figura 45: Perfil geoelectrico 3 (E-F).**

El perfil geoelectrico 4 se muestra en la **Figura 46**, en este caso fue realizado con una orientación oeste-este en la parte sur de la zona del relleno aluvial, basado en la información obtenida del SEV 2, SEV10 y SEV 6, por medio de los cuales se logró comprobar la uniformidad en la composición del relleno en contraste con lo presentado en los sectores central y norte del mismo, en este caso se logra apreciar como las resistividades obtenidas en los tres sondeos analizados son en todos los casos inferiores a los 15 ohmm, situación que asociado a la información consultada en los registros de pozos de la zona refleja la naturaleza arcillosa del relleno para esta área en específico.



**Figura 46: Perfil geoelectrico 4 (G-H).**

### **Modelo geoelectrico**

De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de la ejecución de los diferentes SEVS y de su respectivo análisis en conjunto por medio de la elaboración de los perfiles geoelectricos se logró comprobar la heterogeneidad del relleno aluvial analizado, esta heterogeneidad se manifiesta básicamente por el cambio en la textura o granulometría del material que compone dicho relleno (Figura 42), es así como por ejemplo se logró determinar la existencia de zonas en donde hay un predominio de granulometrías medias o gruesas, las cuales se definieron con base en la obtención de valores de resistividad intermedios en algunos de los SEVs realizados, siendo interpretadas como horizontes compuestos por arenas y gravas de acuerdo con la correlación efectuada por medio de la información de pozos. Estos horizontes de resistividad intermedia se localizaron principalmente en los SEVs efectuados en el sector norte del relleno aluvial, además de los efectuados en los extremos este y oeste de dicho relleno, alcanzando espesores máximos de hasta 50 m. como fue el caso del SEV1 ubicado en el extremo norte del área analizada. Por otro lado se logró evidenciar como estos horizontes de resistividad intermedia disminuyen gradualmente tanto su espesor como su valor de resistividad conforme se extienden hacia la parte central del relleno, llegando incluso a desaparecer hacia la parte sur del mismo, sitio en donde los diferentes SEVs realizados reportaron de manera uniforme la existencia de materiales

de muy baja resistividad, por lo general inferiores a 15 ohmm, los cuales fueron asociados con la presencia de sedimentos finos de tipo arcilloso.

De igual manera si analizamos el relleno de manera transversal, es decir en sentido oeste-este vemos un comportamiento muy similar en donde se ubican secciones de resistividad intermedias en los extremos este y oeste del relleno, desapareciendo gradualmente hacia la parte central del mismo, en donde al igual que en el sector sur del área analizada se presenta el predominio de bajos valores de resistividad, reflejando una mayor composición arcillosa del relleno.

Estos cambios detectados en la granulometría del relleno aluvial se explican básicamente por la dinámica depositacional de los cuerpos fluviales de la zona, es así como hacia la parte norte del relleno es común el depósito de sedimentos gruesos de tipo arenas o gravas, esto debido a la mayor cercanía con las zonas montañosas, esto provoca un depósito diferenciado de los sedimentos acarreados por los ríos, descargando los sedimentos más gruesos en la zona norte y depositando las fracciones más finas conforme avanzan hacia el sur y se alejan de la zona montañosa. Situación similar ocurre en el sentido transversal al relleno, en donde las secciones de resistividad intermedia detectadas en los sectores oeste y este del área analizada se relacionan con la mayor cercanía de estas zonas con los principales cuerpos fluviales del área, correspondientes a los ríos Claro y Caracol, por lo cual es de esperar un mayor aporte de sedimentos gruesos para dichas zonas, disminuyendo gradualmente el tamaño de grano de los sedimentos hacia la parte central del relleno conforme se aleja de ambos cuerpos fluviales.

Por otro lado según la información de los SEVs y de la respectiva correlación efectuada con la información de pozos se ha estimado el espesor total del relleno aluvial en alrededor de 60 metros. A partir de los 60 metros de profundidad los resultados de los SEVs reflejan la continuidad de un material de baja resistividad, oscilando entre 20 y 1 ohmm, el cual en concordancia con la información de pozos se considera que podría tratarse de una secuencia de roca altamente arcillitizada que se podría asociar con la secuencia de areniscas finas observadas en la parte norte del área de estudio.

Por último cabe mencionar que para algunos de los SEVs realizados se logró identificar en las capas más superficiales un ligero descenso en los valores de resistividad reportados, este es el caso por ejemplo del SEV6, SEV7, SEV8 y SEV9, los cuales se representan en el perfil geoelectrico 2 (**Figura 44**), este descenso en la resistividad se detectó a profundidades que varían entre los 4 y 9 metros y se considera que podría corresponder con un posible nivel freático.



## **6.2 Prospección geofísica en el sitio del botadero de basura de Golfito**

Tomando en consideración el faltante de información referente a las condiciones geológicas, hidrogeológicas y estratigráficas del sitio en específico del botadero municipal de Golfito, así como también del diseño o geometría de dicho botadero, se ha considerado como parte del desarrollo de esta investigación la ejecución de una campaña de prospección geofísica en el lugar, esto con el objetivo de conocer al menos de manera preliminar o indirecta dichas condiciones o características, estableciendo con ello un modelo que permita inferir con base en la información obtenida la posible influencia que este botadero está teniendo en el medio, y más específicamente sobre los niveles de agua subterránea en la zona.

Para dicha prospección se decidió implementar tanto métodos electromagnéticos, como lo es el radar de penetración del suelo (GPR), así como también métodos de resistividad eléctrica a través de un sistema de prospección de resistividad por acoplamiento capacitivo (dispositivo OhmMapper).

Los resultados obtenidos a través de la realización de esta campaña de prospección serán de utilidad para describir las condiciones geológicas e hidrogeológicas de esta área propiamente, al igual que para la definición del grado de vulnerabilidad hidrogeológica correspondiente, contrarrestando así el faltante de información existente para esta zona.

### **6.2.1 Prospección por medio del radar de penetración del suelo (GPR)**

El radar de penetración del suelo o más comúnmente conocido como georadar corresponde con un método de prospección geofísica que se basa en el análisis de la dinámica de propagación de las ondas electromagnéticas a través del subsuelo, permitiendo con ello conocer las características o propiedades del mismo.

Para la ejecución de la campaña de prospección geofísica por medio del método electromagnético del georadar se utilizó el dispositivo Gepard- GPR de la marca OKM.

La metodología seguida consistió en la definición de una serie de líneas de perfil sobre las cuales se desplazó el dispositivo de GPR, en concreto se desarrollaron un total de 4 líneas, distribuidas de manera no uniforme sobre distintas zonas del área del botadero (**Fotografía 5**) para las cuales se tenía conocimiento de que fueron utilizadas para la disposición y acumulación de los residuos. Para cada línea se llevaron a cabo un total de 4 repeticiones, variando en cada una de estas la longitud de las antenas, obteniendo con ello distintas profundidades de prospección. Estas profundidades variaron entre un mínimo de 4 y un máximo de 34 metros.

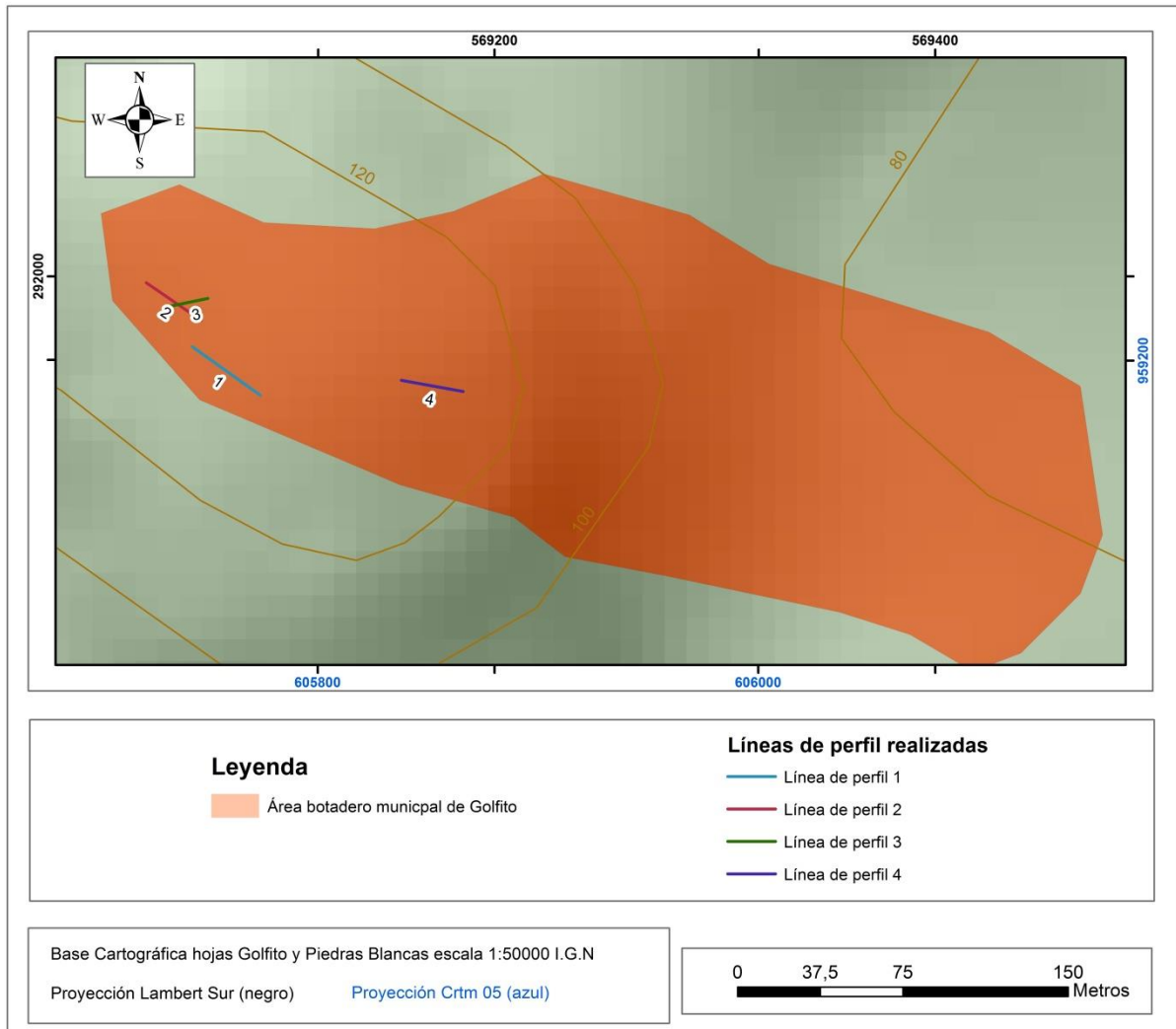


**Fotografía 5: Operación del dispositivo GPR en el sitio del botadero de basura de Golfito.**

En el **Cuadro 12** se muestra el detalle de la información referente a cada una de las líneas de perfil definidas. Por su parte en la **Figura 47** se muestra la ubicación de cada una de las líneas de perfil realizadas.

**Cuadro 12: Información líneas de perfil utilizadas en la prospección geofísica realizada en el botadero de basura de Golfito.**

Línea de perfil	Longitud (E)	Latitud (N)	Configuración línea	Longitud (m)
Perfil 1	642529	73775	Inicio	38
	642498	73797	Final	
Perfil 2	642477	73826	Inicio	30
	642502	73809	Final	
Perfil 3	642505	73819	Inicio	19
	642486	73815	Final	
Perfil 4	642593	73782	Inicio	28
	642621	73777	Final	



**Figura 47: Ubicación líneas de perfil realizadas como parte de la prospección geofísica en el botadero de basura**

**Resultados de la aplicación del georadar de penetración (GPR)**

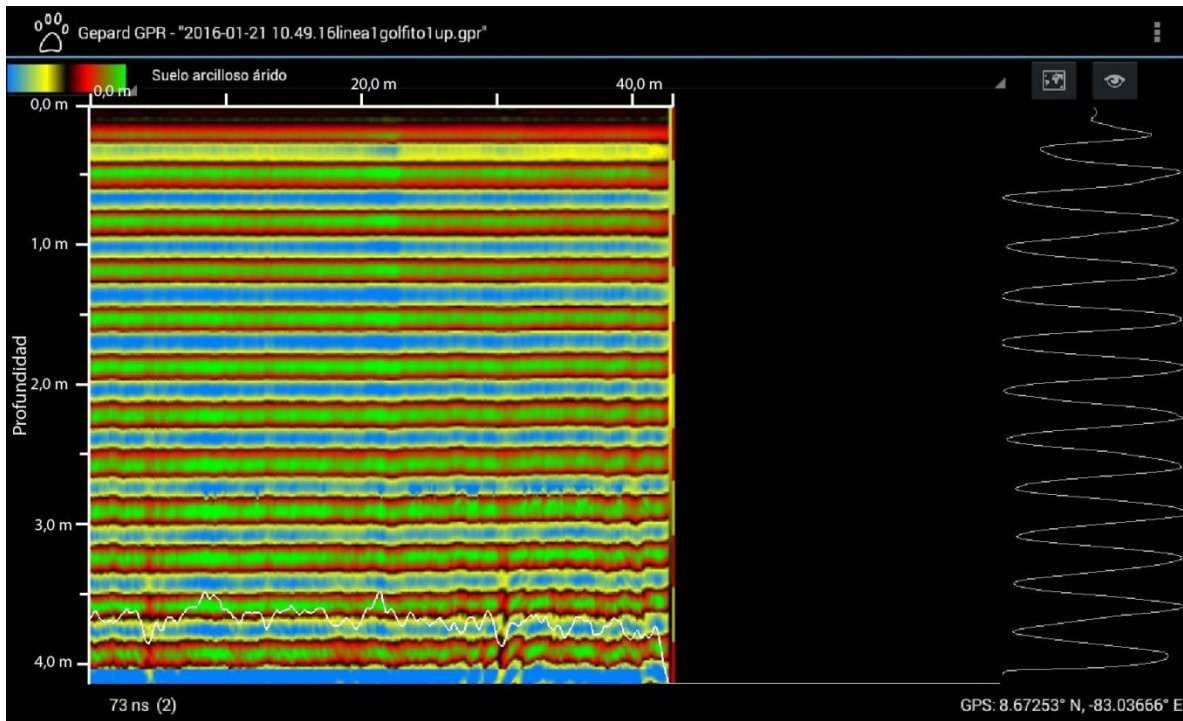
A continuación se describen los resultados obtenidos a partir de la aplicación del GPR para cada una de las líneas de perfil definidas para el área del botadero (**Cuadro 12**).

**Línea de perfil 1**

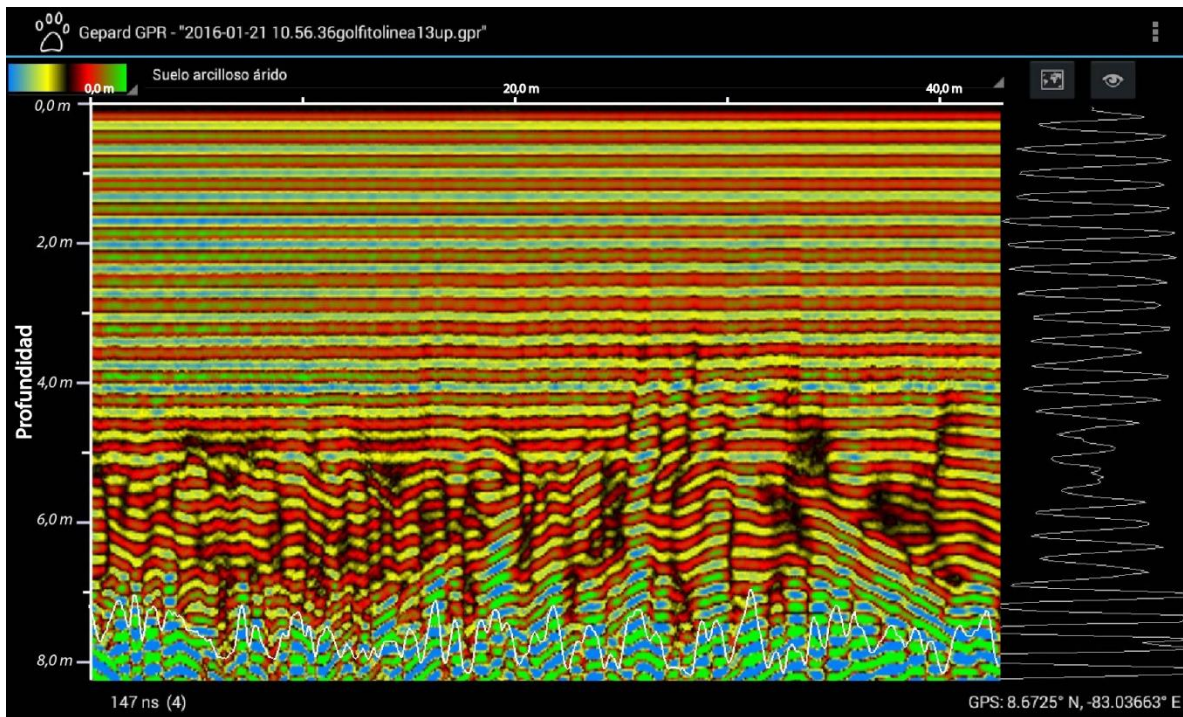
Como se mencionó anteriormente para cada una de las líneas de perfil definidas se realizaron varias repeticiones, modificando para cada una de ellas la longitud de las antenas del dispositivo, esto con el fin de evaluar el medio mediante la aplicación de distintos valores de frecuencia (60MHz -300 MHz) y con ello obtener resultados para distintas profundidades de investigación

Para el caso de la línea de perfil 1 se obtuvieron tres distintos radargramas a partir de las repeticiones aplicadas, las profundidades de prospección obtenidas fueron de 4, 8 y 34 m. Para el primer radargrama obtenido (**Figura 48**), con una profundidad de investigación igual a 4 m se puede observar como para los primeros 10 o 20 centímetros evaluadas se tiene registro de una zona de baja amplitud de la onda reflejada, la cual pudiera estar asociada con el relleno arcilloso superficial correspondiente al camino sobre el cual se llevó a cabo la prospección, de igual forma esta capa de baja reflectancia puede estar asociada con la disipación de parte de la energía emitida por la separación antena-suelo. Por debajo de los 50- 70 cms de profundidad se puede observar un incremento significativo en la amplitud de la onda reflejada, la cual se mantiene de manera uniforme hasta los 4 m de profundidad, esta secuencia se interpreta como el depósito superficial de basura.

Por su parte en la **Figura 49** se muestra el radargrama obtenido para una profundidad de auscultación igual a 8 m, en el cual se logra apreciar la misma capa de alta reflectancia en la parte superficial del perfil y que corresponde con un primer nivel de acumulación de desechos o basura, esta sección se estima que se extiende hasta una profundidad de entre 4 y 5 m, manifestándose como un patrón uniforme en el radargrama, por debajo de esta sección se observa un cambio en la morfología de la traza, la cual se manifiesta con un patrón contorneado, el cual a su vez presenta patrones alargados de manera vertical que en general indican una baja en la amplitud de la onda reflejada, los cuales se interpretan como posibles fracturas o bien la presencia de posibles canales de drenaje de fluidos o lixiviados, de acuerdo con lo observado en el radargrama obtenido esta sección se extiende desde los 5 m hasta alrededor de los 8 m de profundidad y se podría interpretar ya sea como una capa de desechos compactada y deformada o bien una zona con aumento en las condiciones de humedad o saturación, manifestada por el descenso visualizado en la amplitud de la onda reflejada.

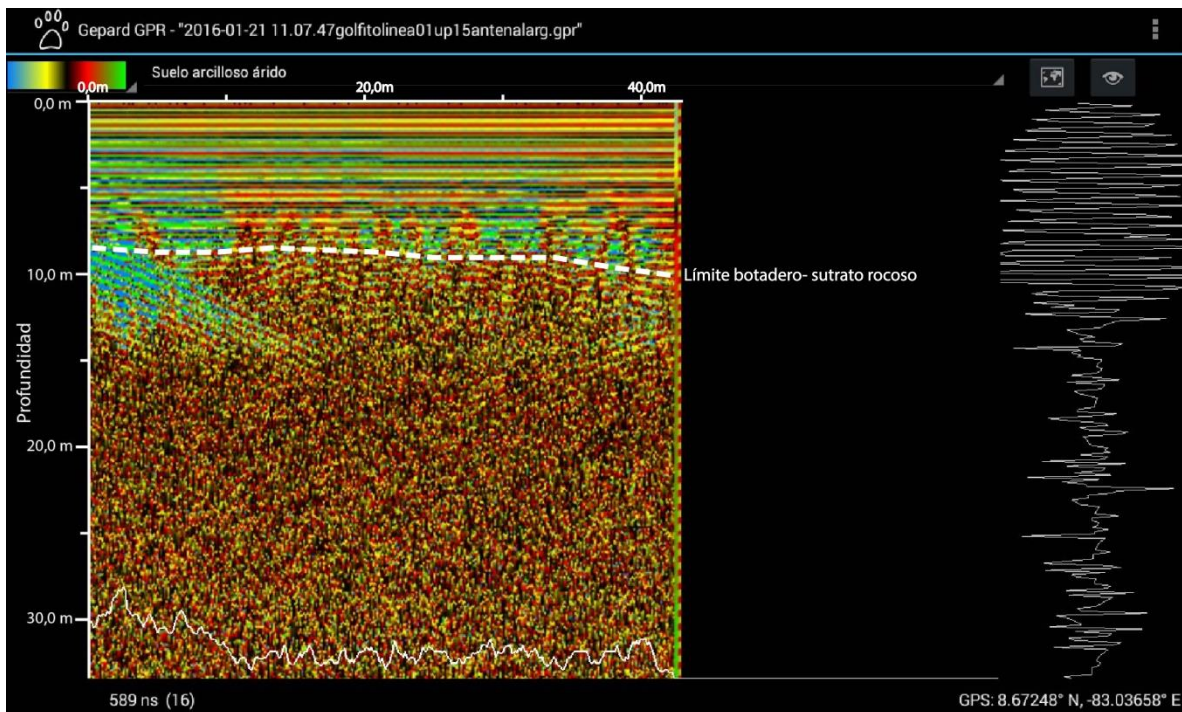


**Figura 48: Radargrama obtenido mediante la aplicación del GPR, para el caso de la línea de perfil 1 con una profundidad de prospección de 4 m.**



**Figura 49: Radargrama obtenido mediante la aplicación del GPR, para el caso de la línea de perfil 1 con una profundidad de prospección de 8 m.**

Finalmente para la línea de perfil 1 se obtuvo un radargrama profundo igual a 34 m de profundidad, el cual se muestra en la **Figura 50**, se logra apreciar en dicha figura la interface o límite entre el área de depósito o acumulación de desechos con el basamento o sustrato rocoso de la zona, límite que se ubicó a una profundidad que varía entre los 7 y 8 m, esta superficie se manifiesta por un cambio notorio en la traza de la reflectancia obtenida, con una primera sección de alta reflectancia que representa el depósito de basura y baja considerable en la amplitud de la onda reflejada a partir de los 7 u 8 m, la cual se mantiene de manera uniforme hasta la parte final de la sección analizada y que se asocia con el sustrato rocoso de la zona.



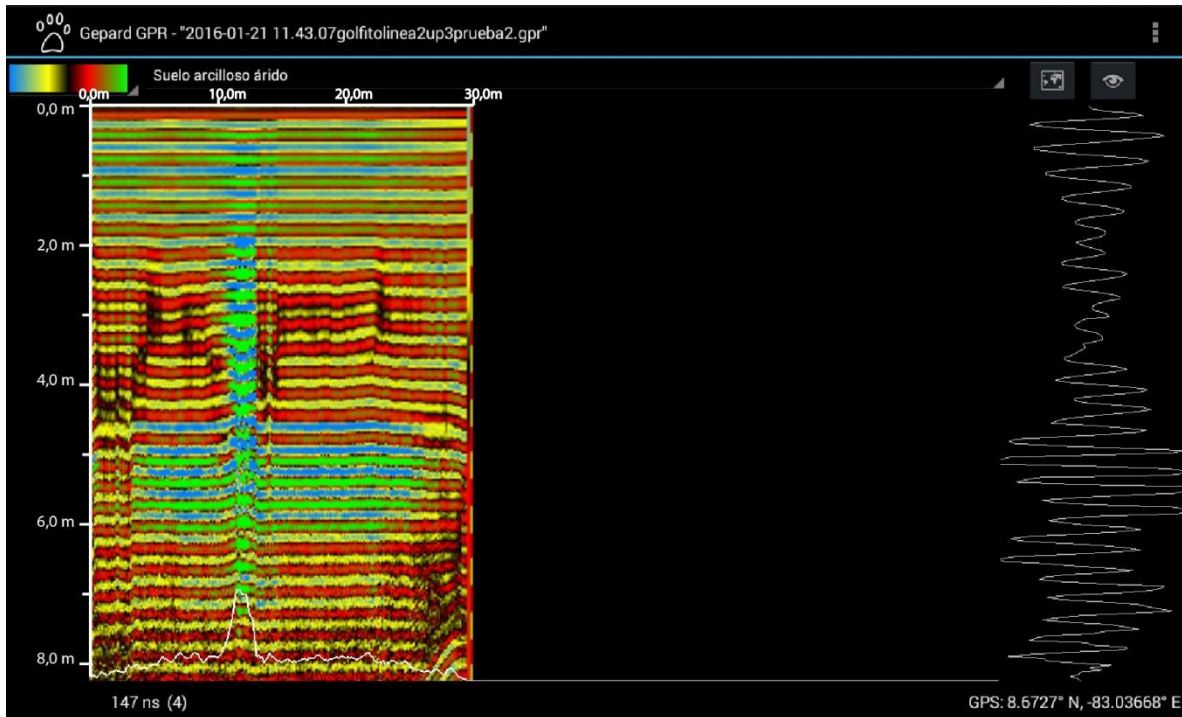
**Figura 50: Radargrama línea de perfil 1 para una profundidad de prospección igual a 34 m.**

### **Línea de perfil 2**

Los resultados obtenidos para el caso de la línea de perfil 2 son en general muy similares a los descritos para el caso de la línea 1, la **Figura 51** muestra el radargrama obtenido para una profundidad de 8 m, en el cual se logra distinguir una primera sección de alta reflectancia la cual muestra un patrón uniforme y se extiende hasta una profundidad cercana a los 2,5 m, esta primera sección se interpreta como un primer nivel o celda de acumulación de basura, por debajo de esta capa se aprecia una sección que muestra como característica una reducción significativa en la amplitud de la onda reflejada, con la presencia de patrones alargados de baja reflectancia que podrían corresponder con canales o drenajes de lixiviados, esta sección se extiende

desde los 2,5 m hasta los 4,5 m de profundidad y se interpreta que pudiera corresponder con una interface o material de relleno entre dos celdas o niveles de acumulación de basura.

Por debajo de los 4,5 m se registra nuevamente una zona de anomalía con una alta reflectancia que se extiende hasta la parte final de la sección analizada a una profundidad aproximada de 8 m, esta anomalía se interpreta como una segunda sección de acumulación de basura.



**Figura 51: Radargrama línea de perfil 2, con una profundidad de investigación de 8,0 m.**

El límite entre la zona depósito de basura y el sustrato rocoso se determinó para el caso de la línea de perfil 2 a una profundidad cercana a los 9 m, tal y como se muestra en la **Figura 52**.

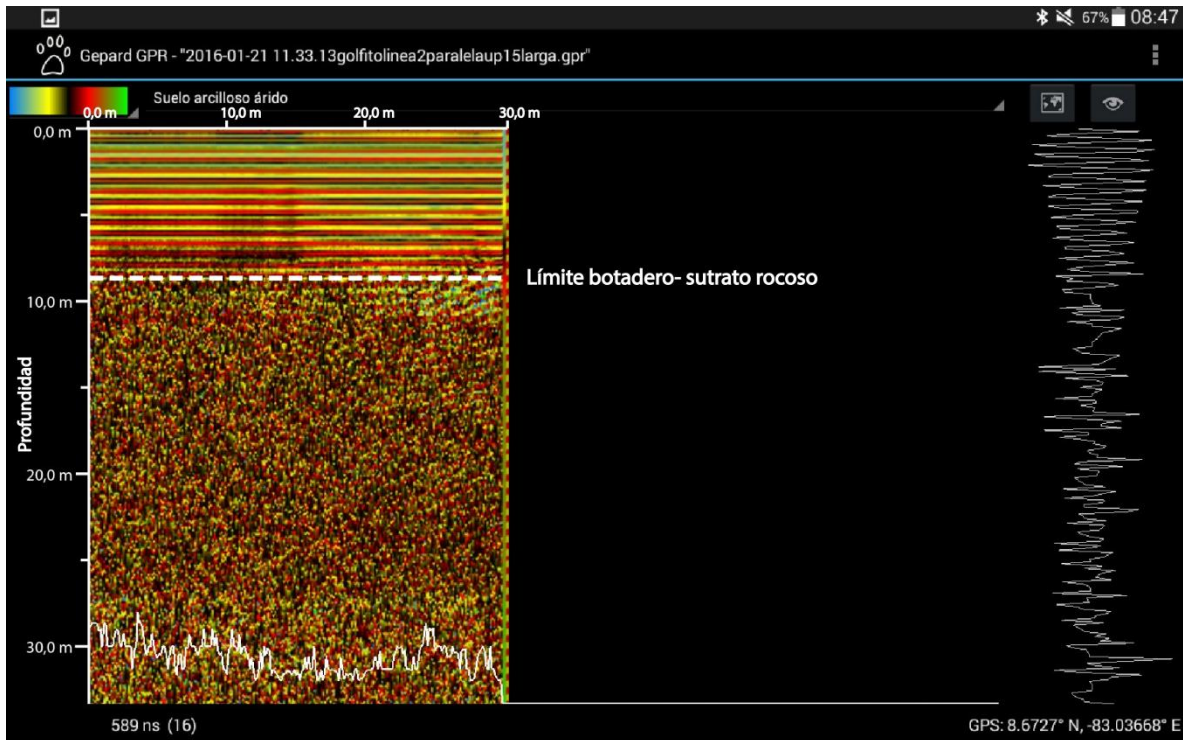
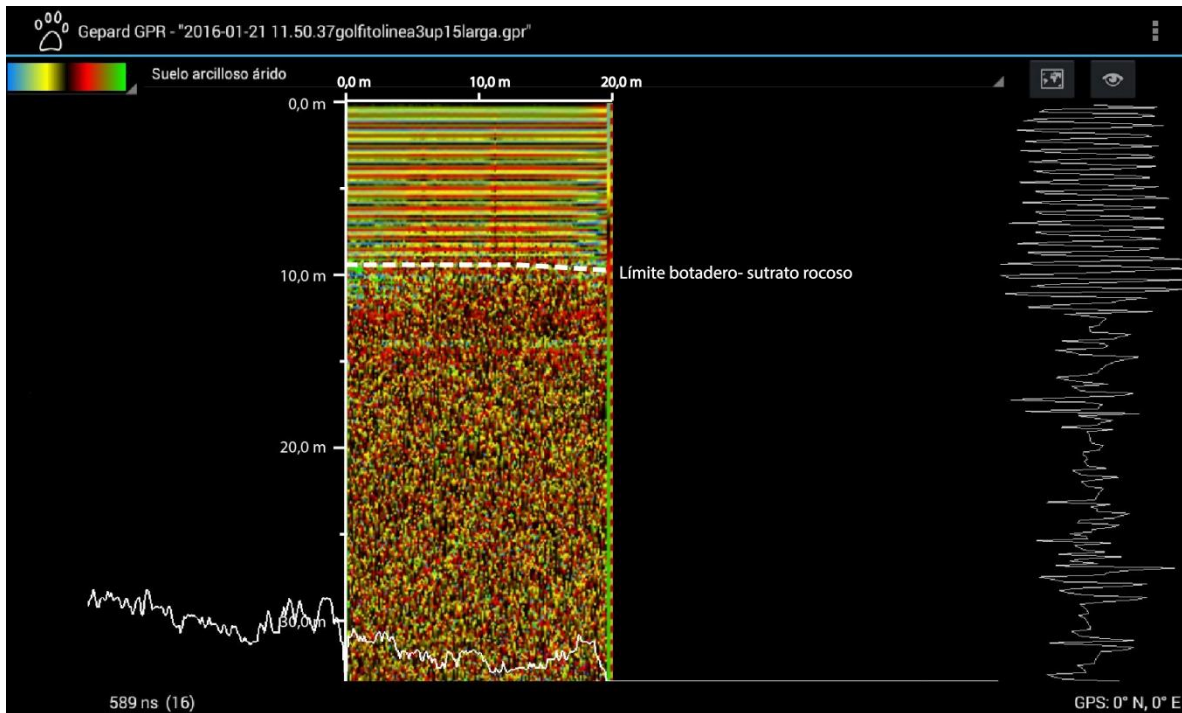


Figura 52: Radargrama línea de perfil 2, con una profundidad de investigación de 8,0 m.

### Línea de perfil 3

La línea de perfil 3 fue realizada de manera transversal a la línea de perfil 2, según el análisis efectuado los resultados obtenidos para ambas líneas son bastante consistentes, obteniéndose radargramas muy similares para ambos casos. La **Figura 53** muestra el radargrama correspondiente para una profundidad de 34 m a través de la línea de perfil 3, en él se logra apreciar una vez más la presencia de una traza uniforme de alta reflectancia entre los 0 y 9 m de profundidad la cual se interpreta como la capa de basura, misma que limita en profundidad con una sección uniforme de menor reflectancia que se extiende hasta los 34 m y que se relaciona con el sustrato rocoso de la zona.





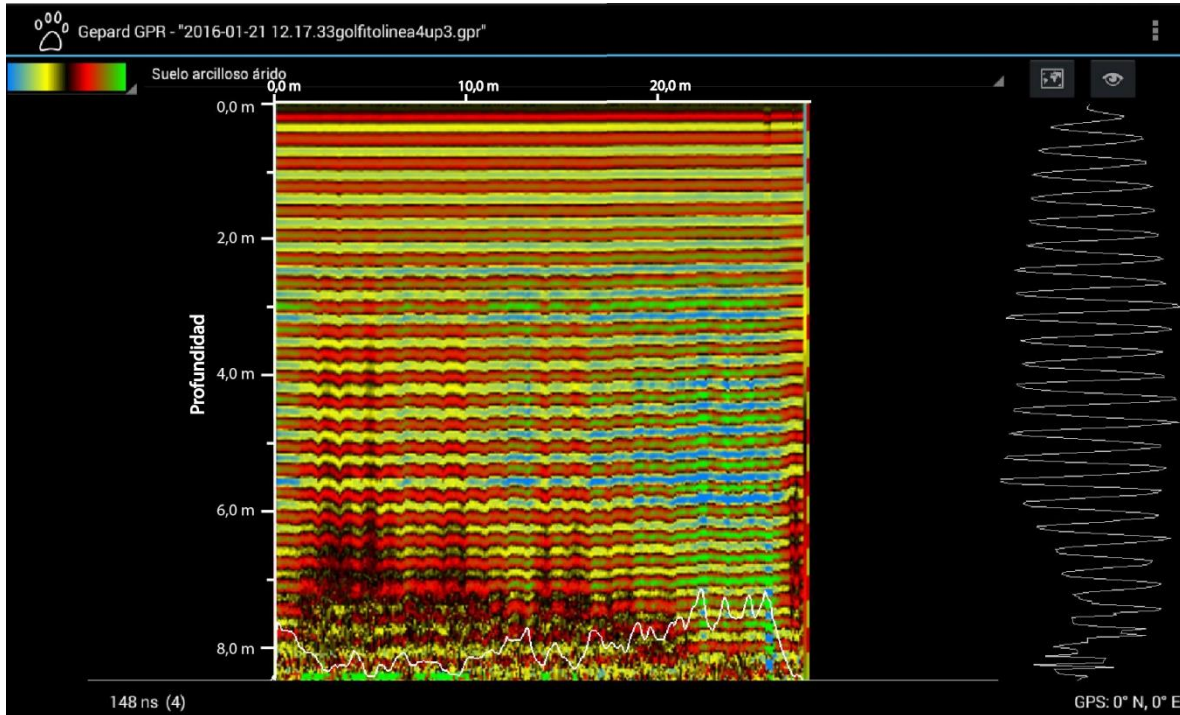
**Figura 53: Radargrama línea de perfil 3, con una profundidad de investigación de 34 m.**

#### **Línea de perfil 4**

Esta línea de perfil se desarrolló sobre el área del botadero municipal de Golfito que en su momento estuvo destinada para la disposición de los desechos médicos, los radargramas mostrados en la **Figura 54** y **Figura 55** muestran los resultados obtenidos para una prospección de 8 y 34 m de profundidad respectivamente.

En la **Figura 54** podemos visualizar como se obtuvo para los primeros 2 m de profundidad de la sección analizada una reflectancia moderada, la cual presenta un ligero aumento con la profundidad y conforme se dio el desplazamiento hacia la parte final de la línea de perfil, esta sección de moderada reflectancia se puede interpretar como una capa de suelo arcilloso que recubre el depósito de basura. A partir de los dos metros de profundidad y hacia la parte final de la línea de desplazamiento (aproximadamente entre los 10 y 28 m) se muestra una amplia zona de anomalía, en la que la reflectancia muestra un aumento progresivo en su amplitud, misma que ha sido interpretada como la secuencia de basura o de desechos médicos, extendiéndose hasta los 8 m de profundidad para la parte final del perfil. Por su parte se logra apreciar además para la parte inicial e intermedia de la línea de desplazamiento del perfil (desde 0 m y hasta alrededor de los 20 m) una sección de atenuación de la señal reflejada, la cual se localiza entre los 6 y 8 m de profundidad, presentando una morfología alargada

a lo largo de la línea de perfil analizada y que además presenta algunos patrones verticales y alargados que pudieron corresponder con canales o drenajes los cuales pudieran relacionarse con zonas de acumulación de humedad o bien algún tipo de fluido o sustancia lixiviada.



**Figura 54: Radargrama línea de perfil 4, con una profundidad de investigación de 8 m.**

En la **Figura 55** se muestra el radargrama obtenido para la línea de perfil 4 con una profundidad de investigación igual a 34 m, en la cual es posible visualizar claramente la interface entre la celda de acumulación de basura y el sustrato rocoso subyacente, en este caso dicha interface se localizó al igual que en las líneas de perfil analizadas anteriormente a una profundidad cercana a los 9 m.

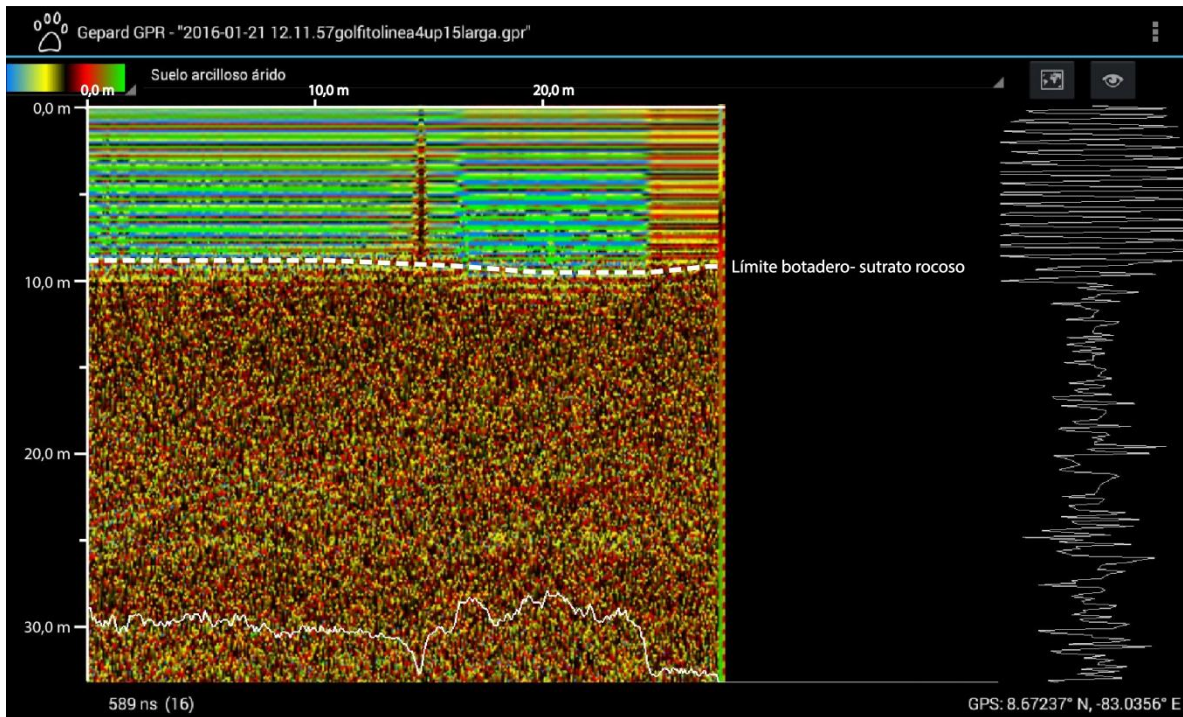


Figura 55: Radargrama línea de perfil 4, con una profundidad de investigación de 8 m.

## 6.2.2 Prospección geofísica utilizando el dispositivo Ohmmapper

Una de las técnicas geofísicas aplicadas como parte de la campaña de prospección realizada en el sector del botadero de basura de Golfito fue la implementación del instrumento Ohmmapper TR1 de la empresa Geometrics INC.

El instrumento Ohmmapper se compone de un dispositivo transmisor, un receptor, una consola, cables de electrodos, una barra de fibra óptica, un cable de arrastre, un peso, una cuerda, cables conectores de la consola, un cinturón y un Harnees, la **Fotografía 6** muestra los distintos componentes del equipo.



**Fotografía 6: Instrumento Ohmmapper y sus componentes**

La utilización del equipo en el área del botadero de basura se realizó mediante la definición de 4 líneas de perfil, para lo cual se utilizaron las mismas líneas establecidas mediante la aplicación del georadar de penetración (Figura 47) , la Fotografía 7 muestra la utilización del instrumento en el sitio.

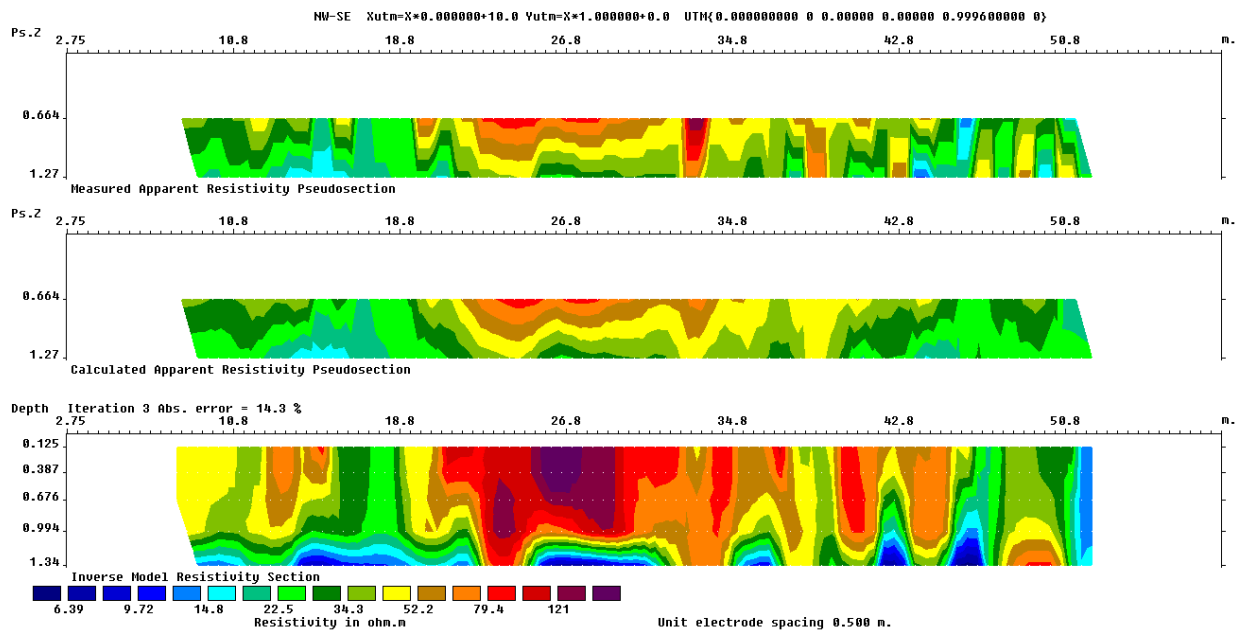


**Fotografía 7: Utilización del instrumento Ohmmapper como parte de la prospección geofísica en el botadero de basura de Golfito.**

## Aplicación del método y resultados

Como ya se mencionó anteriormente el dispositivo Ohmmapper fue utilizado como un complemento a la información obtenida por medio de la utilización del Georadar de penetración de suelo (GPR) y de la inspección de campo realizada en el botadero de basura de Golfito, el método se utilizó en distintas zonas del botadero utilizando para ello las líneas de perfil aplicadas para el caso del GPR.

La aplicación del Ohmmapper en el sitio tuvo como gran limitante el espacio disponible en el lugar para desarrollar la metodología aplicando distintas separaciones entre los electrodos transmisor y receptor, esto debido a que en el momento en el que se realizó la prospección el sitio ya se encontraba con una cobertura de vegetación de considerable altura en gran parte del mismo, situación que impidió la utilización de líneas de perfil más extensas que permitieran obtener una profundidad de investigación mayor. Esta situación redujo considerablemente la aplicabilidad del método para efectos de la investigación que se pretendía llevar a cabo, puesto que una vez realizada la inversión de los datos obtenidos en el campo únicamente se logró alcanzar una profundidad de prospección de 1,3 m, profundidad que representa apenas la capa superficial del suelo utilizada como relleno del botadero, tal y como se muestra en la **Figura 56**.



**Figura 56: Resultados obtenidos mediante la inversión de los datos obtenidos a partir de la aplicación del instrumento Ohmmapper**

## 7. MARCO HIDROGEOLÓGICO

En vista de que en la zona de interés para la presente investigación no existen estudios hidrogeológicos previos, fue necesario recurrir a la consulta y análisis de los registros de pozos incluidos en las bases de datos del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), información que sirvió de fundamento para plantear la interpretación hidrogeológica mostrada en los siguientes apartados, esta información además fue complementada con el análisis e interpretación de los datos obtenidos a partir de la realización de la campaña de prospección geofísica, que incluyó la ejecución de varios Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs), permitiendo así definir un modelo hidrogeológico general para el área de estudio, mismo que se planteará en el presente capítulo.

### 7.1 Inventario de pozos y concesiones de agua

Como parte de la investigación se llevó a cabo un inventario de pozos existentes dentro o en los alrededores del área de estudio, tomando como referencia los pozos que se encuentran debidamente inscritos en las bases de datos del SENARA. En total se contabilizaron 16 pozos, los cuales se enumeran y describen en el **Cuadro 13**, mientras que la ubicación geográfica de cada uno de los pozos localizados se muestra en la **Figura 57**.

Un aspecto importante a mencionar además es el hecho de que los diferentes centros poblacionales ubicados dentro del área de estudio se abastecen principalmente de aguas subterráneas por medio de pozos o sistemas de acueductos rurales, como es el caso del Acueducto Rural de la Esperanza de Río Claro.

Adicionalmente a la información obtenida a partir de las bases de datos de SENARA, como parte del trabajo de campo se realizó un recorrido a lo largo de toda el área de estudio con el fin de ubicar posibles pozos no inscritos, actividad con la cual únicamente se logró localizar un pozo de tipo excavado en las coordenadas Lambert Sur 567726 E y 290300 N, el cual es utilizado fundamentalmente para labores de riego y actividades de tipo doméstico, según la medición efectuada se determinó que el nivel estático en dicho pozo se encuentra a una profundidad de 1,5 m.b.n.s. (metros bajo el nivel de la superficie), de acuerdo con el aforo realizado a dicho pozo se obtuvo un caudal de extracción de 0,576 L/seg.

**Cuadro 13: Listado de pozos registrados en las bases de datos de SENARA y ubicado dentro o en los alrededores del área de estudio.**

Latitud Lambert Sur	Longitud Lambert Sur	Código	Elevación (m.s.n.m.)	Profundidad (m.b.n.s.)	Nivel estático (m)	Tipo de pozo	Uso
287559	572452	GF-31	20	125	Artesiano	Perforado	Industrial
283189	572802	GF-41	17	35	3,64	Perforado	
287389	572452	GF-32	20	123,83	Artesiano	Perforado	Industrial
289188	572302	GF-21			s.d.		
286788	572302	GF-17	20	118,95	s.d.	Perforado	Industrial
286988	569302	GF-19	20	88	Artesiano	Perforado	Industrial
287189	569552	GF-34	20	94,83	Artesiano	Perforado	Industrial
289089	569252	GF-20	20	82,35	s.d.	Perforado	Industrial
287189	572802	GF-18	20	127,49	Artesiano	Perforado	Industrial
288789	566603	GF-22	20	89,79	s.d.	Perforado	Industrial
287138	572627	GF-33	20	126,17	s.d.	Perforado	Industrial
290089	565702	GF-14	20	11,29	s.d.	Perforado	Industrial
287088	572242	GF-30	20	122,61	Artesiano	Perforado	Industrial
290888	565602	GF-15	20	10	s.d.	Perforado	Industrial
291470	567318	PI-3	23	60	11,44	Perforado	
291350	567600	PI-4	26	40	16	Perforado	
293500	565500	PI-5		33	5,64	Perforado	Doméstico

\*sd: sin datos

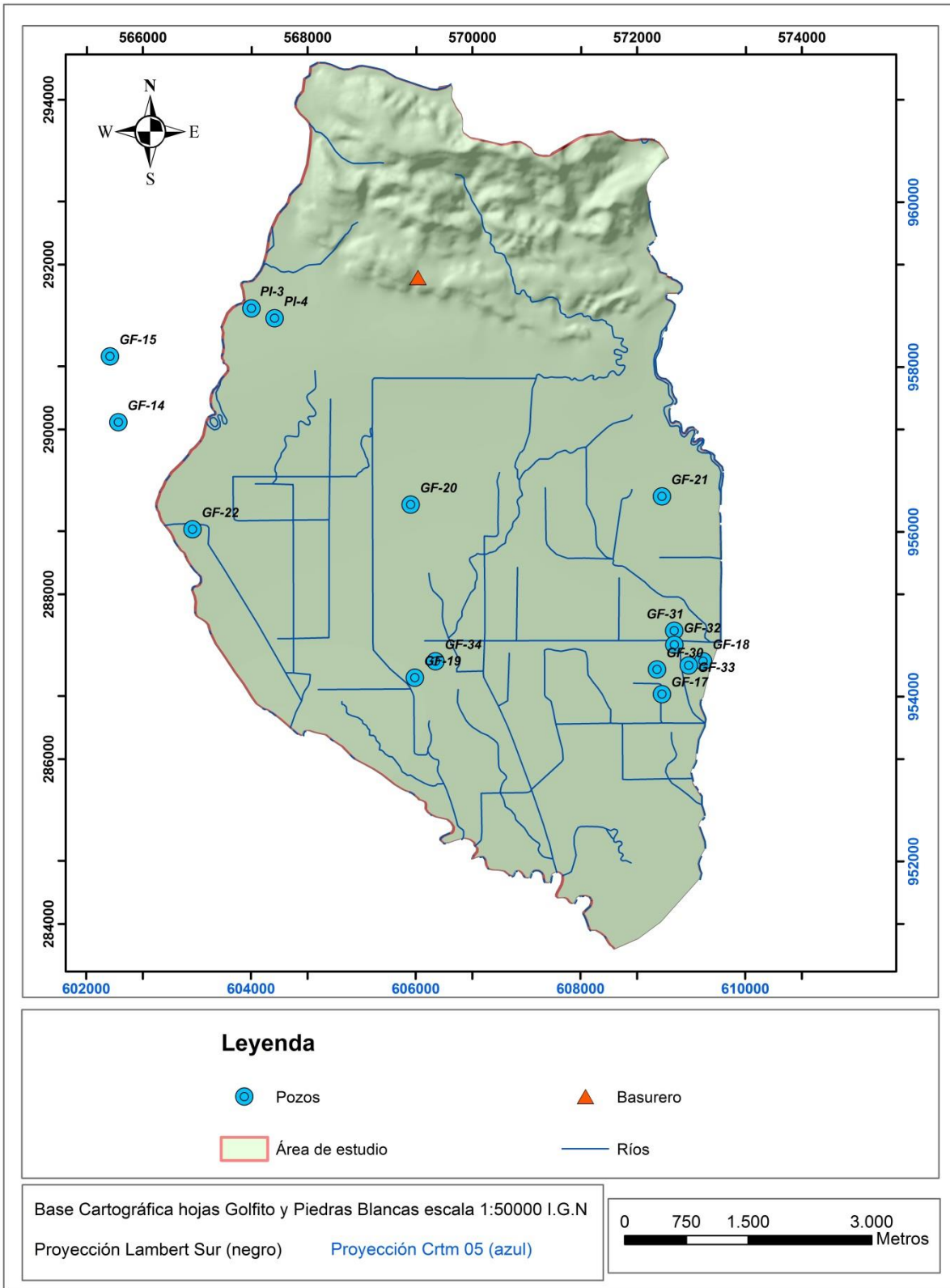
Por otro lado para complementar la información recabada mediante los registros de pozos de SENARA se procedió a consultar las bases de datos de otras instituciones como lo es el caso por ejemplo de la Dirección de Aguas, lográndose localizar así un total de 9 concesiones de agua dentro del área de estudio.

En el Cuadro 14 se presenta la información referente a estas concesiones, no obstante se debe mencionar que la información reportada no incluye datos de carácter hidrogeológico o información sobre caudales concesionados, únicamente se logró conocer su ubicación y que las mismas corresponden con pozos pertenecientes a la empresa Palma Tica S.A. La Figura 58 muestra la ubicación de cada una de las concesiones identificadas.

**Cuadro 14: Listado de concesiones de agua para el área de estudio. Fuente: Dirección de Aguas.**

<b>Expediente</b>	<b>Tipo concesión</b>	<b>Coordenadas Lambert Sur x</b>	<b>Coordenadas Lambert Sur y</b>	<b>Código de concesión</b>	<b>Propietario</b>
6257P1	Pozo	287647	572583	Pozo 15	Palma Tica S.A
6257P2	Pozo	287546	572383	Pozo 16	Palma Tica S.A
6257P3	Pozo	287946	571983	Pozo 17	Palma Tica S.A
6257P4	Pozo	287446	571983	Pozo 18	Palma Tica S.A
6257P5	Pozo	287346	571782	Pozo 19	Palma Tica S.A
6257P6	Pozo	289546	571883	Pozo 20	Palma Tica S.A
6257P7	Pozo	287646	569582	Pozo 21	Palma Tica S.A
6257P8	Pozo	287246	569482	Pozo 22	Palma Tica S.A
6257P9	Pozo	289846	568983	Pozo 23	Palma Tica S.A





**Figura 57: Mapa de ubicación de los pozos registrados ante SENARA y ubicados dentro o en los alrededores del área de estudio.**

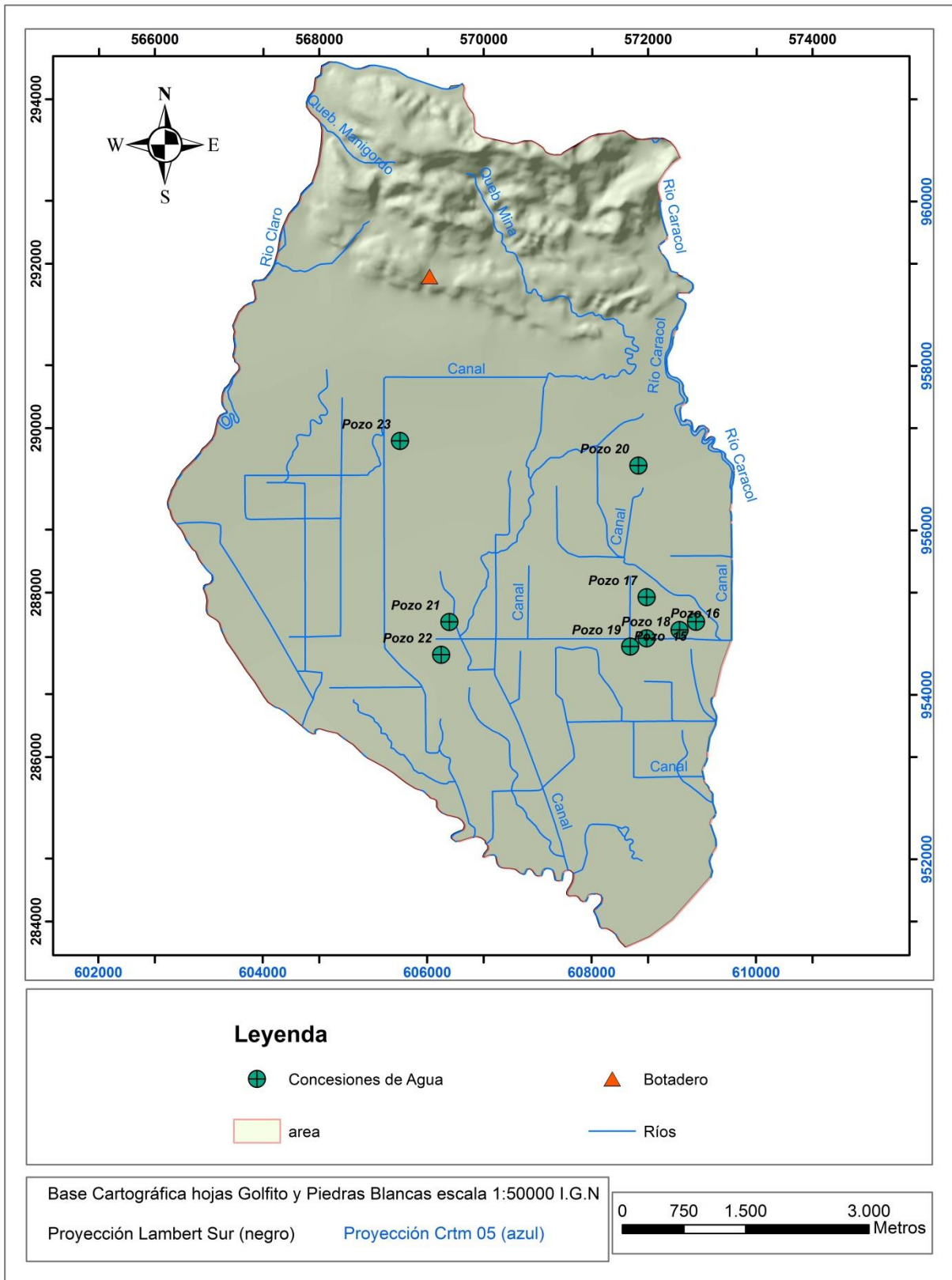


Figura 58: Ubicación de concesiones de agua. Fuente: Dirección de Aguas.

## 7.2 Modelo hidrogeológico conceptual

Con base en el análisis e interpretación de la información disponible en las bases de datos del SENARA referentes a pozos registrados dentro de la zona de estudio, además de la información obtenida por medio de la campaña geofísica y el reconocimiento geológico realizado en la zona, se procedió a establecer una correlación de la totalidad de la información recabada, con el objetivo de definir un modelo hidrogeológico regional representativo para el área de estudio, el cual se desarrollará en el presente apartado.

Se realizaron un total de tres perfiles hidrogeológicos basados en la información disponible de pozos, dos de estos perfiles representan la zona del relleno aluvial, sitio en donde se contó con la mayor cantidad de información referente a pozos, se hizo además un tercer perfil que muestra de manera esquemática las diferentes unidades hidrogeológicas establecidas en el presente modelo y el cual se mostrará en la parte final de este capítulo.

En la **Figura 59** se muestra la disposición de cada uno de los perfiles hidrogeológicos diseñados en el presente modelo, mismos que serán explicados a continuación.

En la **Figura 60** se muestra el perfil hidrogeológico 1 (A-A”), el cual toma en cuenta la información litológica disponible en los registros de los pozos PI-3, GF-20 y GF-30, la línea de perfil tiene una longitud de 7385 metros y una orientación aproximada de S60E, con una dirección transversal a la zona del relleno aluvial.

Por su parte en la **Figura 61** se presenta el perfil hidrogeológico 2 (B-B'-B''), mismo que corresponde a un perfil compuesto con una primera sección de orientación S60E y una longitud aproximada de 3275 metros, incluyendo la información de los pozos GF-22 y GF-19, además de una segunda sección la cual tiene una orientación oeste-este, con una longitud de 2995 metros, tomando en cuenta la información litológica disponible para los pozos GF-34 y GF-30.

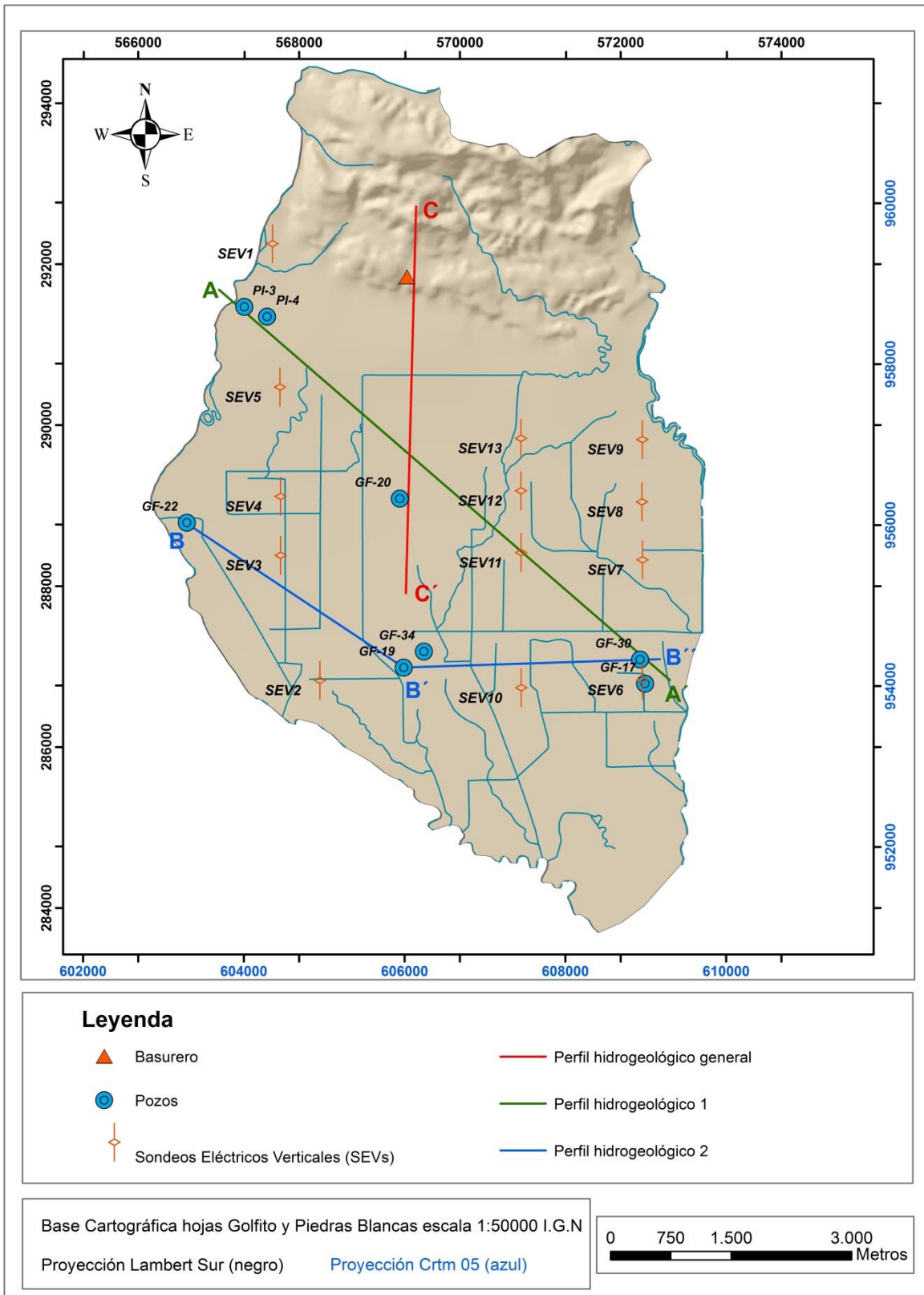


Figura 59: Mapa de ubicación de los perfiles hidrogeológicos elaborados.

Mediante la elaboración de ambas líneas de perfil se logró determinar la existencia de al menos tres niveles acuíferos para la zona plana del área de estudio, destacando un primer nivel superficial definido con base en la información de pozos y los resultados obtenidos a partir de los SEVs a una profundidad variable entre los 3 y 10 metros, correspondiendo al acuífero aluvial del área de estudio, el cual está siendo captado por la mayor parte de los pozos ubicados en el sector N y NE de dicha área. Por su parte el segundo nivel acuífero de la zona se ubicó a una profundidad aproximada de 80 metros, este nivel se definió con base en la información de los pozos ubicados en la región central del relleno aluvial, mismos que ubican sus rejillas en este nivel de agua. Mientras que el nivel acuífero más profundo se localizó a una profundidad aproximada de 120 metros, siendo captado por la mayor parte de los pozos ubicados en el sector sureste del área de estudio.

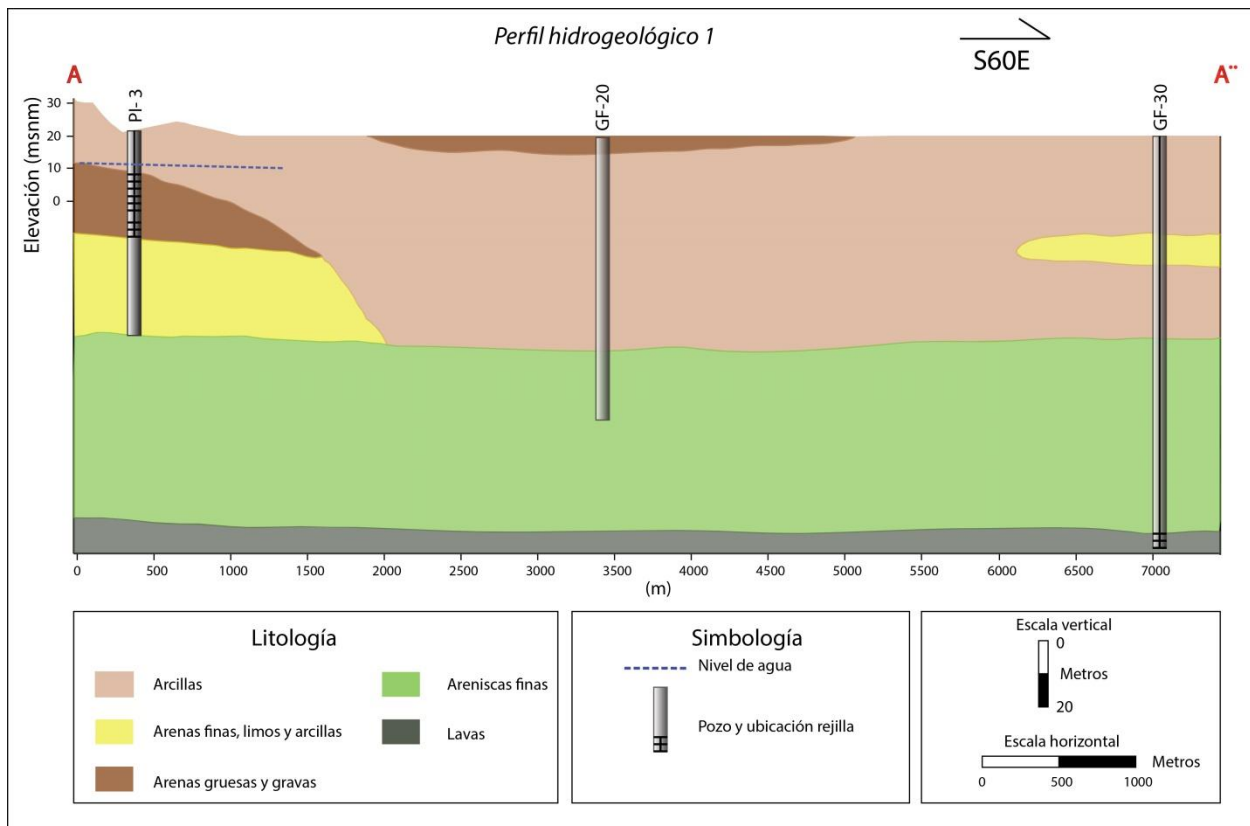
En lo que respecta a la estratigrafía general para la parte plana del área, mostrada en la **Figura 60** y **Figura 61** se ha definido la presencia de un importante relleno aluvial hacia la parte superior del modelo, el cual según las estimaciones hechas con base a la información de pozos y complementado con los resultados de los SEVs realizados tendría un espesor de aproximadamente unos 60 metros, este relleno aluvial estaría compuesto mayoritariamente por secuencias de tipo arcillosas, las cuales en algunos casos llegan a alcanzar incluso la totalidad del espesor estimado para este relleno aluvial (60 m).

De manera más específica se destaca además la presencia de algunas secciones dentro de este relleno aluvial en donde su composición cambia hacia una mayor proporción de sedimentos de tipo arenosos o gravosos, tal es el caso del extremo noroeste del perfil hidrogeológico 1, sitio en donde según las descripciones de los pozos (PI-3 y PI-4) a partir de los 10 metros de profundidad se presenta una serie de intercalaciones entre arenas gruesas, gravas, arenas finas y limos, llegando a alcanzar un espesor de hasta 50 metros. La determinación de este horizonte compuesto por material aluvial más grueso concuerda con los resultados obtenidos de los SEVs realizados en esta misma zona, en donde se reportaron valores de resistividad intermedia (entre 25 y 60 ohmm) que se relacionan con este tipo de materiales. Otros sectores en donde se identificó la presencia de horizontes de composición arenosa dentro del relleno aluvial fueron de manera superficial en la parte central del mismo, y hacia la parte este del área a una profundidad cercana a los 30 m, en ambos casos el espesor de estos horizontes arenosos no llegó a superar los 10 metros.

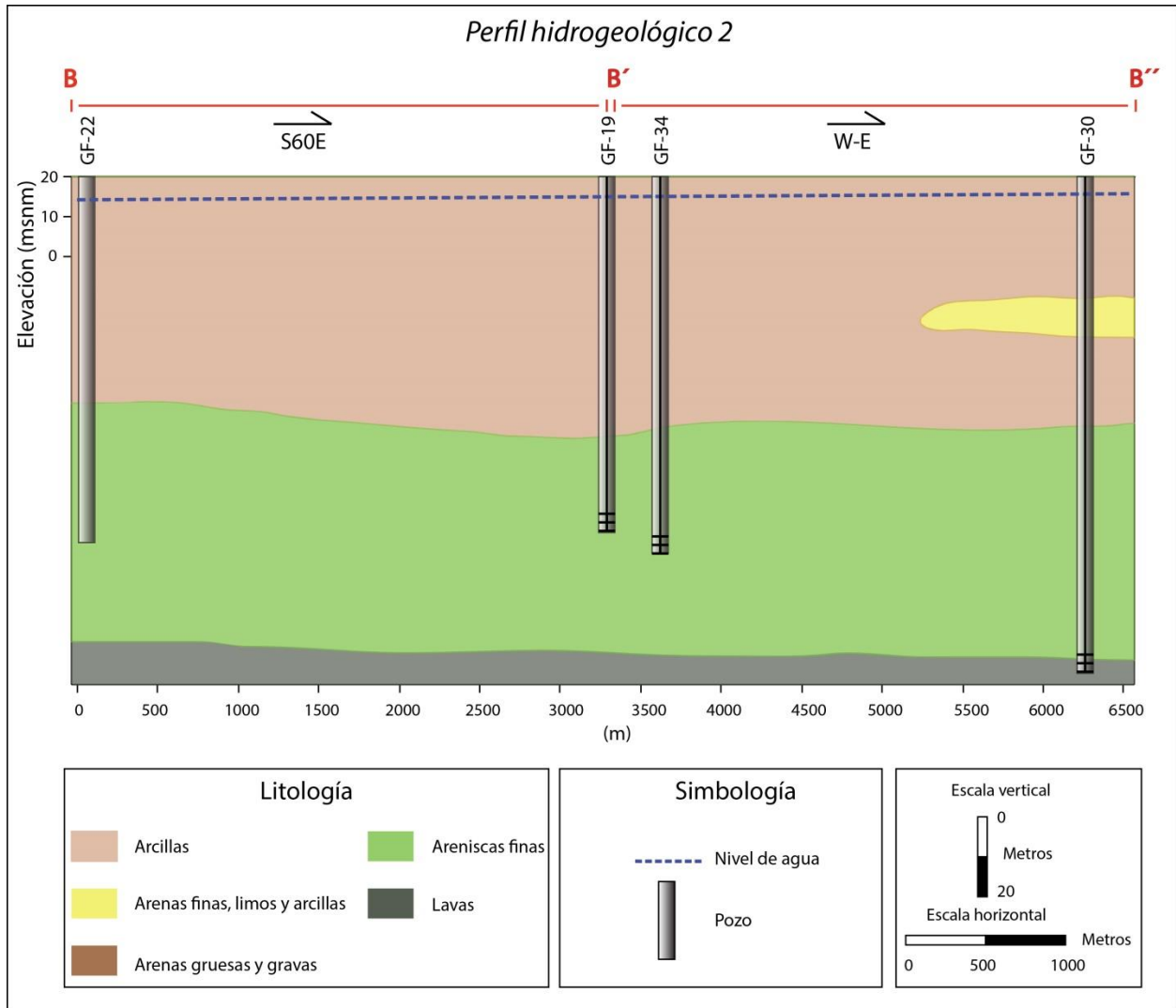
Por debajo de este relleno aluvial según las descripciones de pozos se ha definido la presencia de una importante secuencia de arcillas compactas con presencia de restos de conchas o bivalvos, además de fragmentos de rocas, esta secuencia llega a alcanzar un espesor máximo de hasta 60 metros.

Este horizonte ha sido interpretado en la presente investigación como una secuencia de roca ampliamente arcillitizada que podría asociarse tomando en cuenta su contenido fósil con la unidad de areniscas finas grisáceas aflorantes a lo largo de la parte norte del área de estudio. Dentro de este mismo horizonte se ha localizado el segundo nivel de agua subterránea definido en el modelo, el cual según las descripciones de los pozos se ubica en secciones en donde se da un incremento en la proporción de fragmentos de roca, estas secciones bien podrían asociarse con las secuencias de conglomerados vistos en los afloramientos en superficie de manera intercalada dentro de esta unidad de areniscas.

A una profundidad cercana a los 120 metros se ha identificado según las descripciones de pozos una sección litológica compuesta por fragmentos de roca y arenas gruesas, las cuales según la interpretación realizada se considera podrían corresponder con algún tipo de secuencia de lava perteneciente al Complejo Ígneo de Osa. A esta profundidad precisamente se ubicó el nivel acuífero más profundo identificado para el área de estudio, y del cual se están abasteciendo la mayor parte de los pozos ubicados en el sector sureste de dicha área.



**Figura 60: Perfil hidrogeológico A-A''**



**Figura 61: Perfil hidrogeológico B- B''**

### 7.2.1 Unidades hidrogeológicas locales

Con base en la información recabada a partir de los perfiles hidrogeológicos citados anteriormente y de los datos adquiridos mediante la realización de la campaña geofísica se han definido en el presente modelo hidrogeológico la presencia de tres unidades hidrogeológicas para el área de estudio, las cuales han sido nombradas de manera informal como: Unidad hidrogeológica La Esperanza, Unidad hidrogeológica Manigordo y Unidad hidrogeológica Río Claro.

La Unidad Hidrogeológica Río Claro está constituida por una secuencia de rocas volcánicas posiblemente asociadas al Complejo Ígneo de Osa, se ubica a una profundidad superior a los 100 m.

La Unidad Hidrogeológica Manigordo está representada por una serie de rocas arcillitizadas posiblemente asociadas a la Unidad de Areniscas Finas Quebrada Manigordo, las cuales fueron definidas en el presente estudio, y que se encuentran aflorando en superficie hacia la parte norte del área, mientras que hacia la parte central y sur se determinó que esta misma secuencia de areniscas se encuentra a una profundidad aproximada de 60 m, subyaciendo al relleno aluvial de la zona y se extiende hasta una profundidad superior a los 100 m, en donde se encuentra en contacto con la Unidad Hidrogeológica Río Claro.

Mientras que en el caso de la Unidad Hidrogeológica La Esperanza se encuentra constituida por una secuencia de arcillas, arenas y gravas, mismos que constituyen el depósito aluvial de los ríos Caracol y Río Claro, y que abarcan la parte Central y Sur del área de estudio y sobreyacen a la unidad hidrogeológica Manigordo.

En el Cuadro 15 se resumen las principales características asociadas a cada una de las unidades hidrogeológicas definidas.

**Cuadro 15: Resumen modelo hidrogeológico general definido para el área de estudio.**

Características	Unidad Hidrogeológica La Esperanza	Unidad Hidrogeológica Manigordo	Unidad Hidrogeológica Río Claro
Litología predominante	Arcillas e intercalaciones de arenas y gravas	Areniscas finas y lutitas	Lavas
Espesor promedio (m)	60	60	No determinado
Profundidad del agua (m.b.n.s)	0-10	1er nivel entre 5 y 10 m.b.n.s. (en la parte norte del área de estudio).  2do nivel a 80 m.b.n.s. (parte central y sur del área de estudio).	120 m.b.n.s.
Grado de confinamiento	Libre	Libre 1er nivel  Confinado 2do nivel	Confinado
Caudal promedio (L/s)	0,5375 l/s	1er nivel no reportado  2do nivel 17,5 l/s	12 l/s



Transmisividad (m <sup>2</sup> /d)	5 (m <sup>2</sup> /d)	No determinado	No determinado
Unidad estratigráfica	Unidad depósitos recientes	Formación Terraba	Complejo Ígneo de Osa.
Edad	Cuaternario	Oligoceno	Campaniano-Eoceno

A continuación se presenta una descripción más detallada de cada una de las unidades hidrogeológicas definidas en el presente modelo:

### ***Unidad hidrogeológica Río Claro***

Representa la unidad más profunda definida en el presente modelo, se ubica a alrededor de 120 m.b.n.s., la misma fue definida según la información reportada en los registros de los pozos GF-17, GF-18, GF-30, GF-31, GF-32 y GF-33, los cuales reportan un nivel de agua a dicha profundidad (**Cuadro 16**) y de la cual se están abasteciendo.

**Cuadro 16: Pozos bajo los cuales se definió la Unidad Hidrogeológica Río Claro.**

Pozo	Coord. Lambert Sur X	Coord., Lambert Sur Y	Profundidad del nivel acuífero (m.b.n.s.)	Caudal (L/seg)
GF-17	572302	286788	118	9,45
GF-18	572802	287189	117	12
GF-30	572242	287088	116	10
GF-31	572452	287559	123	15
GF-32	572452	287389	119	12
GF-33	572627	287138	123	12

Según las descripciones litológicas presentadas en los registros de los pozos mencionados anteriormente esta unidad se describe como un horizonte compuesto por fragmentos de roca con textura gruesa y masiva con presencia de arena, no obstante para efectos de la presente investigación se hizo una reinterpretación de la misma basándonos en el contexto geológico regional, con lo cual se considera que este horizonte corresponde posiblemente con una secuencia de lavas, las cuales a su vez

fueron asociadas al Complejo Ígneo de Osa, con lo cual representarían el basamento regional de la zona.

Debido a que la profundidad máxima de los pozos bajo los cuales se definió esta unidad no superaba los 127 m no fue posible definir con exactitud el espesor de esta unidad hidrogeológica. El caudal promedio reportado para esta unidad es de  $12 \pm 3,2$  L/s.

La información presentada en los registros de pozos es en general insuficiente para definir los parámetros hidráulicos de esta unidad hidrogeológica, como por ejemplo la transmisividad y el gradiente hidráulico. Se considera esta unidad hidrogeológica como un acuífero de tipo confinado, cuyo techo se localiza según la información de pozos (GF-30, GF-31 y GF-32) a una profundidad que varía entre los 116 y 123 m.b.n.s. (**Cuadro 16**), por su parte el nivel estático asociado a esta unidad acuífera de acuerdo con los reportes de dichos pozos es de tipo artesiano o surgente, situación que refleja condiciones de confinamiento.

#### ***Unidad hidrogeológica Manigordo***

Esta unidad hidrogeológica corresponde con la unidad intermedia del modelo desarrollado, se encuentra extendida a lo largo de toda el área de estudio.

Según el modelo estratigráfico desarrollado en el presente estudio, se considera que esta unidad se extiende desde la parte norte hasta la región central y sur del área de interés, en estos últimos dos sectores es en donde la misma se encuentra cubierta por un importante depósito aluvial generado por la acción de los ríos Claro y Caracol. De acuerdo con la información de pozos se considera que esta unidad se encuentra en la zona plana del área de estudio a una profundidad cercana a los 60 m, extendiéndose la misma hasta cerca de los 115 o 120 m, profundidad a la que entra en contacto con la unidad subyacente representada por la Unidad Hidrogeológica Río Claro.

En lo que respecta a la litología propia de esta unidad cabe mencionar que según las descripciones de pozos la misma se describe como una amplia sección de rocas altamente arcillitizadas, destacando además la presencia de manera puntual en algunas secciones de restos fósiles, especialmente conchas, siendo estas dos características las que permitieron asociar esta unidad con las secuencias de areniscas finas grisáceas que están aflorando hacia la parte norte del área de estudio, las cuales a su vez han sido relacionadas en la presente investigación con las rocas de la Formación Térraba.

Además con base en la información obtenida por medio de la campaña geofísica se determinó la existencia de una capa geoeléctrica con bajos valores de resistividad

aparente (entre 15 y 5 ohmm) a partir de una profundidad promedio de 60 m y extendiéndose hasta más de 100 m, los valores de resistividad obtenidos para esta capa se podrían relacionar precisamente con un material muy arcilloso y saturado, situación que concordaría con la interpretación hecha para esta unidad a partir de la información de pozos.

Para esta unidad hidrogeológica se determinó además la existencia de dos niveles de agua, los cuales se describen a continuación:

### **Nivel superior**

Este nivel de agua se considera que se encuentra de manera extendida hacia la parte norte del área de estudio, específicamente hacia la zona montañosa de la misma, sitio en donde se halla aflorando extensamente la Unidad de Areniscas finas Quebrada Manigordo, las cuales han sido asociadas a esta unidad hidrogeológica.

Se definió este nivel de agua con base a las observaciones de campo realizadas en la zona, donde se logró observar en ciertos puntos en las cercanías al botadero de basura algunos afloramientos del nivel freático o pequeños lloraderos de agua, lo cual evidencia la presencia de un nivel de agua poco profundo o relativamente superficial para la zona. Además con base en la información manifestada por personeros de la municipalidad durante la visita a la zona del botadero se mencionó la presencia de un nivel de agua a una profundidad cercana a los 5 m, el cual fue encontrado durante las labores de excavación o movimientos de tierra previos a la entrada en funcionamiento del botadero. Por otro lado en la información consultada mediante el plano constructivo y catastral del botadero (ver anexos) se menciona la presencia de un par de manantiales o nacientes de agua, los cuales se ubican hacia la parte norte del botadero, lo cual evidencia una vez más la presencia de un nivel acuífero somero en la zona.

En este caso al no existir pozos en la parte norte del área de estudio no se cuenta con la información necesaria para realizar una descripción más precisa de este nivel de agua, tanto desde el punto de vista geométrico como de los parámetros hidráulicos propios de esta secuencia acuífera. Se considera este nivel de agua como un acuífero de tipo no confinado, cubierto por una capa de conglomerados y suelos con una textura areno-arcillosa, se desconoce su potencial hidráulico.

## Nivel inferior

Este nivel de agua ha sido definido con base en la información de los registros de los pozos GF-20, GF-22, GF-34 y GF-19, los cuales reportan un nivel de agua a una profundidad promedio cercana a los 80 m.

En el Cuadro 17 se muestran la información pertinente respecto a los pozos bajo los cuales se definió esta unidad hidrogeológica

**Cuadro 17: Pozos bajo los cuales se definió el nivel inferior de agua para la Unidad hidrogeológica Manigordo**

Pozo	Coord. Lambert Sur X	Coord., Lambert Sur Y	Profundidad del nivel acuífero (m.b.n.s.)	Caudal (L/seg)
GF-20	569252	289089	80	15,78
GF-22	566603	288789	78	20
GF-34	569552	287189	88	10
GF-19	569302	286988	84	17

Según los registros de pozos este nivel de agua se describe litológicamente como una intercalación de una arena media a gruesa y con presencia de grava o clastos, la cual se encuentra inmersa en medio de una secuencia de roca con una alta proporción arcillosa. Este horizonte o intercalación se podría relacionar con una sección menos alterada de la arenisca fina grisácea a la cual se encuentra asociada esta unidad hidrogeológica, o bien pudiese corresponder con una capa de conglomerados similares a los que se observaron de manera intercalada en los afloramientos en superficie de esta unidad de areniscas en la parte norte del área de estudio.

De acuerdo con lo anterior se podría deducir que la presencia de este horizonte intercalado podría presentar condiciones más favorables para el almacenamiento de agua, ya que condiciones como las descritas, ya sea por ejemplo la granulometría más gruesa o bien un menor grado de alteración, el cual se ve traducido en la presencia de una roca con menos contenido arcilloso, son en general condiciones que incrementan el grado de permeabilidad y porosidad de la roca, y con ello aumentan el potencial acuífero de la misma.

Se estima un espesor máximo para esta unidad acuífera cercano a los 12 m según el registro del pozo GF-22, el caudal promedio estimado es de alrededor de  $17,6 \pm 3,1$

L/s, considerándose esta unidad como un acuífero de tipo confinado de moderado potencial, cuyo techo se localiza a una profundidad variable entre los 78 y 88 m.b.n.s, con un nivel estático surgente, esto según los reportes de los pozos GF-34 y GF-19.

La dirección de flujo determinada a partir de la elaboración de las líneas equipotenciales para esta unidad es predominantemente hacia el sur-sureste

Una vez más la información de pozos disponible resulta insuficiente para la definición de los parámetros hidráulicos de esta unidad acuífera.

### ***Unidad hidrogeológica La Esperanza***

Esta unidad se localiza en la parte central y sur del área de estudio, concentrándose en la zona del relleno aluvial de los ríos Claro y Caracol, abarcando un área en superficie de 39 km<sup>2</sup>. Su definición se ha basado tanto en la interpretación y correlación de registros de pozos así como también mediante el análisis de los datos obtenidos por medio de la ejecución de los sondeos eléctricos verticales.

La unidad hidrogeológica La Esperanza se caracteriza por presentar una litología típica de aluvión, en la cual se da el predominio de secuencia de arcillas con espesores máximos de hasta 60 m hacia la parte central y sur del área del relleno aluvial, las cuales suelen presentar algunas intercalaciones u horizontes en forma de lentes de arenas y gravas, mismas que se detectaron principalmente hacia los extremos E y W de la zona aluvial, coincidiendo su ubicación con las cercanías de los cauces de los ríos Claro y Caracol, por lo cual se interpreta que dichas intercalaciones pudiesen marcar cambios en la dinámica depositacional de ambos ríos.

Para esta unidad se logró determinar la existencia de un nivel de agua superficial, el cual oscila entre 1 y 10 m de profundidad (**Cuadro 18**). Para determinar la existencia de este nivel se utilizó la información de los pozos PI-5, PI3 y PI-4, los cuales fueron los únicos pozos en cuyo reporte se incluía información sobre niveles estáticos para esta unidad, por lo cual para tener una mayor certeza de la ubicación de este nivel se utilizó como complemento la medición del nivel del agua realizada en un pozo excavado ubicado en las coordenadas Lambert sur 567726 E y 290300 N, además de la realización de una campaña de excavación utilizando para ello una máquina ahoyadora o perforadora manual, coordenadas 567804 E y 289833 N.

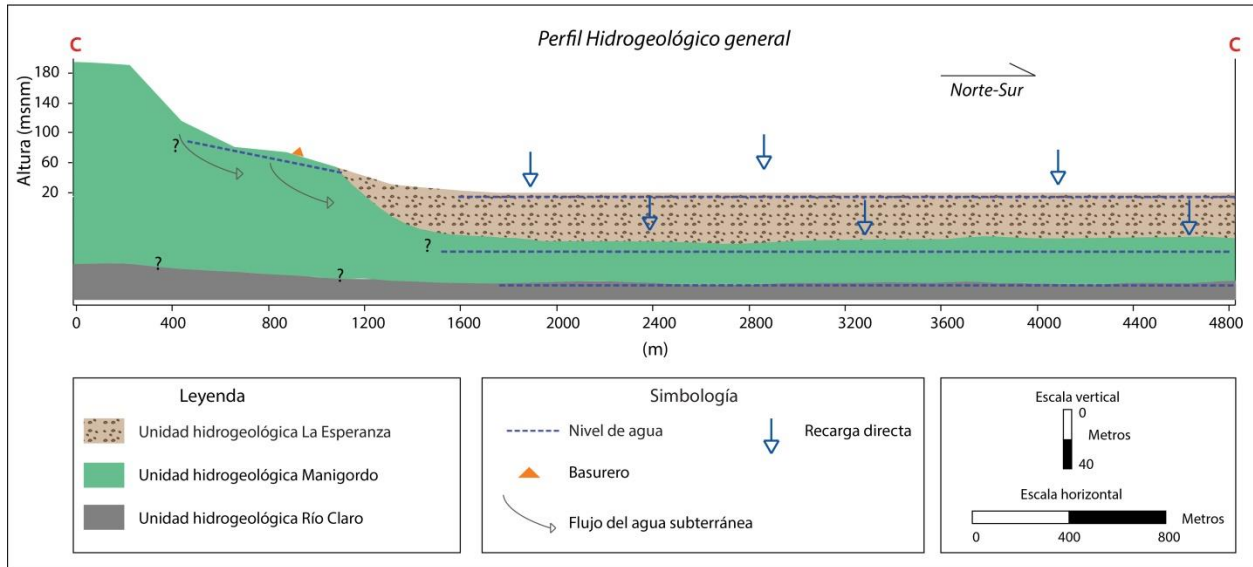
**Cuadro 18: Pozos bajo los cuales se definió el nivel de agua para la unidad hidrogeológica La Esperanza.**

Pozo	Coord. Lambert Sur X	Coord., Lambert Sur Y	Nivel del agua (m.b.n.s.)	Caudal (L/seg)
PI-5	565500	293500	5,64	0,5
GF-41	572802	283189	3,64	
Excavado	567726	290300	1,5	0,575
Perforación manual	567804	289833	1	

El espesor máximo estimado para esta unidad hidrogeológica es de alrededor de 60 m, esto según la información disponible en los registros de pozos y la interpretación realizada a partir de los sondeos eléctricos verticales, por medio de los cuales se ha estimado un espesor similar para el relleno aluvial de la zona del cual se considera parte de esta unidad hidrogeológica. El caudal promedio para esta unidad es de 0,5375 L/s., tomando como referencia el caudal reportado para el pozo PI-5 y el aforo realizado en el pozo excavado. La Dirección de flujo imperante para esta unidad es hacia el sur, siendo aproximadamente paralelo al cauce de los ríos Claro y Coto Colorado.

Se considera de acuerdo con lo anterior esta unidad como un acuífero no confinado cubierto, de bajo a moderado potencial, siendo principalmente los horizontes de granulometrías más gruesas ubicados en los sectores norte, este y oeste del relleno los que presentan las mejores condiciones acuíferas. Los pozos PI-3 y PI-5 ubican precisamente sus rejillas sobre este nivel acuífero aluvial.

En la **Figura 62** se muestra un perfil esquemático que muestra la distribución de las diferentes unidades hidrogeológicas definidas en el presente modelo. Mientras que en la **Figura 63** se presenta el mapa hidrogeológico para el área de estudio confeccionado de acuerdo con la información definida en el presente modelo.



**Figura 62: Perfil hidrogeológico general para el área de estudio.**

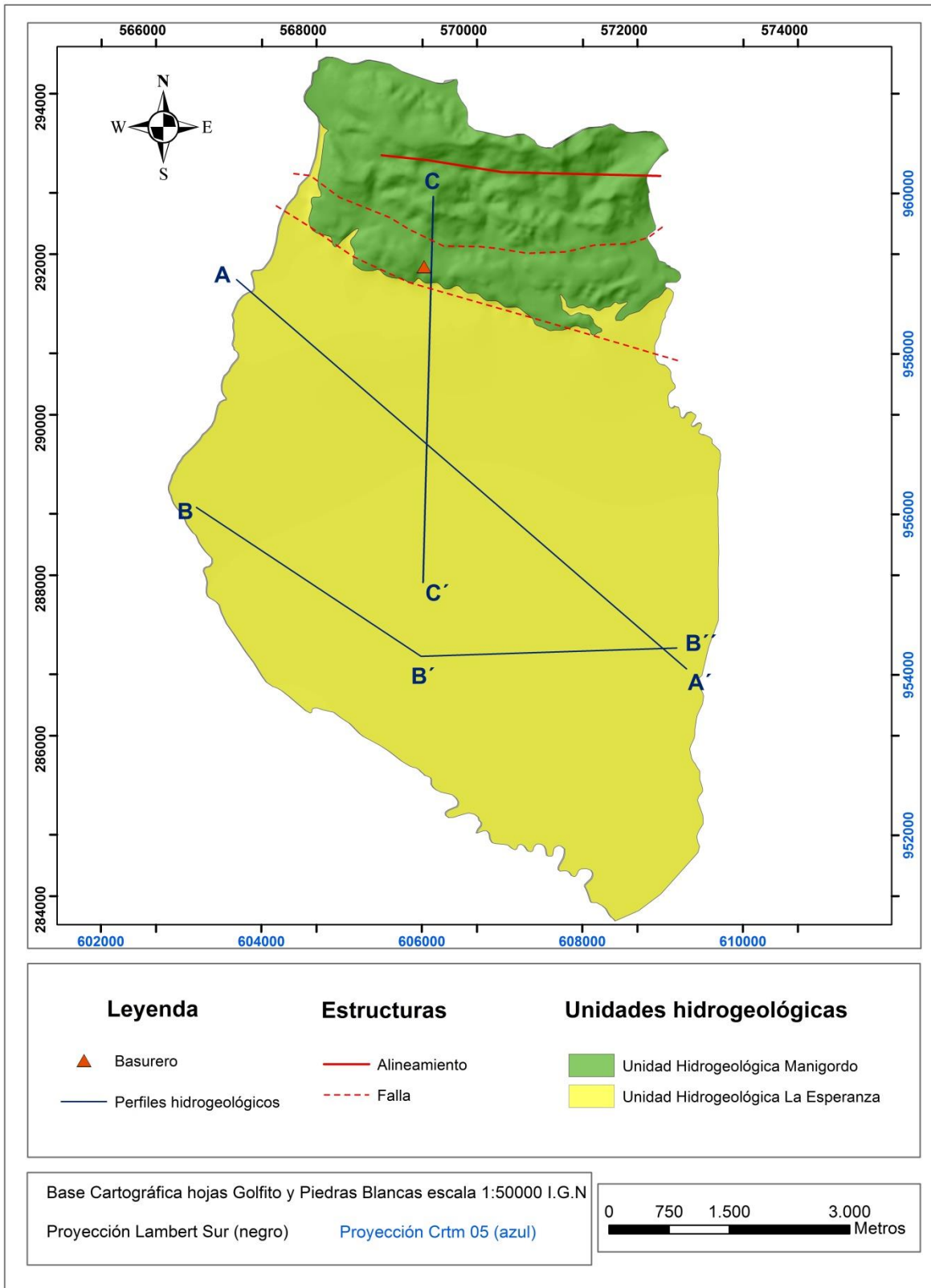


Figura 63: Mapa hidrogeológico del área de estudio.



### 7.3 Determinación de redes de flujo de agua subterránea

Una vez definido el modelo hidrogeológico para el área de estudio, se procedió a analizar la información disponible referente a los niveles de agua asociados a cada una de las unidades hidrogeológicas establecidas, esto con el fin de determinar la tendencia general del flujo del agua subterránea para cada unidad.

Para la construcción de las redes de flujo asociadas a cada nivel de agua determinado, fue necesario el análisis de la información disponible en los registros de pozos existentes en la zona, información que fue complementada además con los datos recolectados a partir de la realización de los sondeos eléctricos verticales y su respectiva interpretación.

Es importante mencionar que la información disponible en los registros de pozos referente a niveles de agua para la zona en general es escasa, razón por la cual fue necesaria la aplicación de otras metodologías como por ejemplo los ya mencionados SEVs así como también la ejecución de algunas excavaciones por medio de una máquina perforadora manual, esto con el fin de corroborar o intuir posibles niveles de agua subterránea dentro del área de estudio.

#### 7.3.1 Unidad hidrogeológica La Esperanza

Como ya se mencionó anteriormente esta unidad representa el nivel acuífero más superficial determinado para la zona plana del área de estudio, en su caso se determinó una dirección de flujo predominante hacia el sur, con una orientación aproximadamente paralela al cauce del Río Claro. Para la elaboración de esta red de flujo se consultó la información disponible en los registros de los pozos PI-5, PI-3 y PI-4, cuyos pozos según los reportes de perforación disponibles fueron los únicos en el área que se encuentran captando esta unidad acuífera, los cuales a su vez se localizan hacia la parte noroeste del área de estudio, específicamente en los alrededores de los poblados de Río Claro y La Esperanza.

En el **Cuadro 19** se detalla la ubicación de cada uno de estos pozos, así como también el nivel de agua reportado, mientras que en la **Figura 64** se muestra el detalle de la red de flujo diseñada para esta unidad.

**Cuadro 19: Ubicación de pozos utilizados para la definición de la red de flujo para la Unidad Hidrogeológica La Esperanza.**

Pozo	Coordenada Lambert Sur X	Coordenada Lambert Sur Y	Profundidad del nivel de agua (m)
PI-5	565500	293500	5,64
PI-3	567318	291470	11,44
PI-4	567600	291350	16

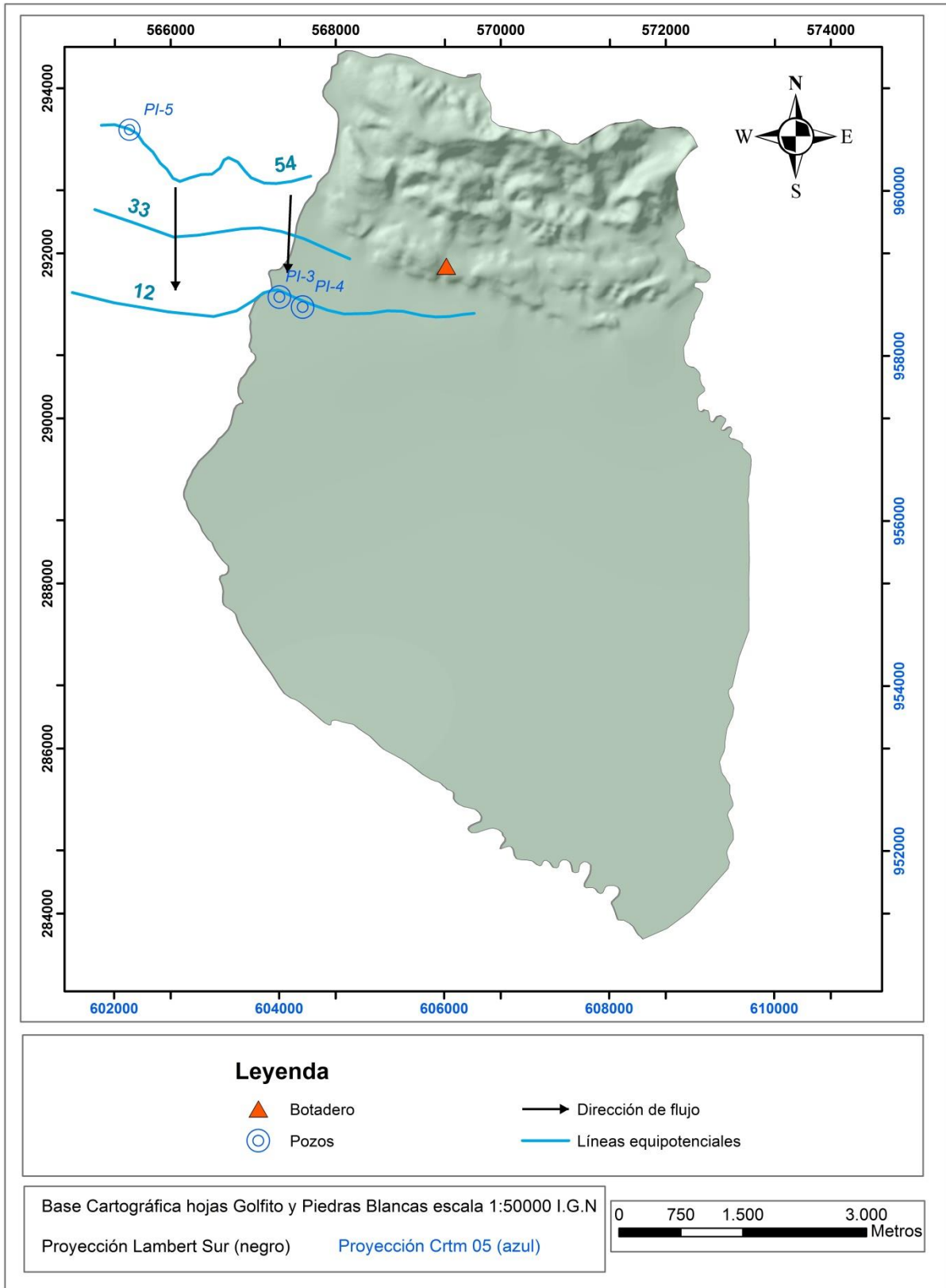


Figura 64: Mapa de líneas equipotenciales para la unidad hidrogeológica La Esperanza.

### 7.3.2 Unidad hidrogeológica Manigordo

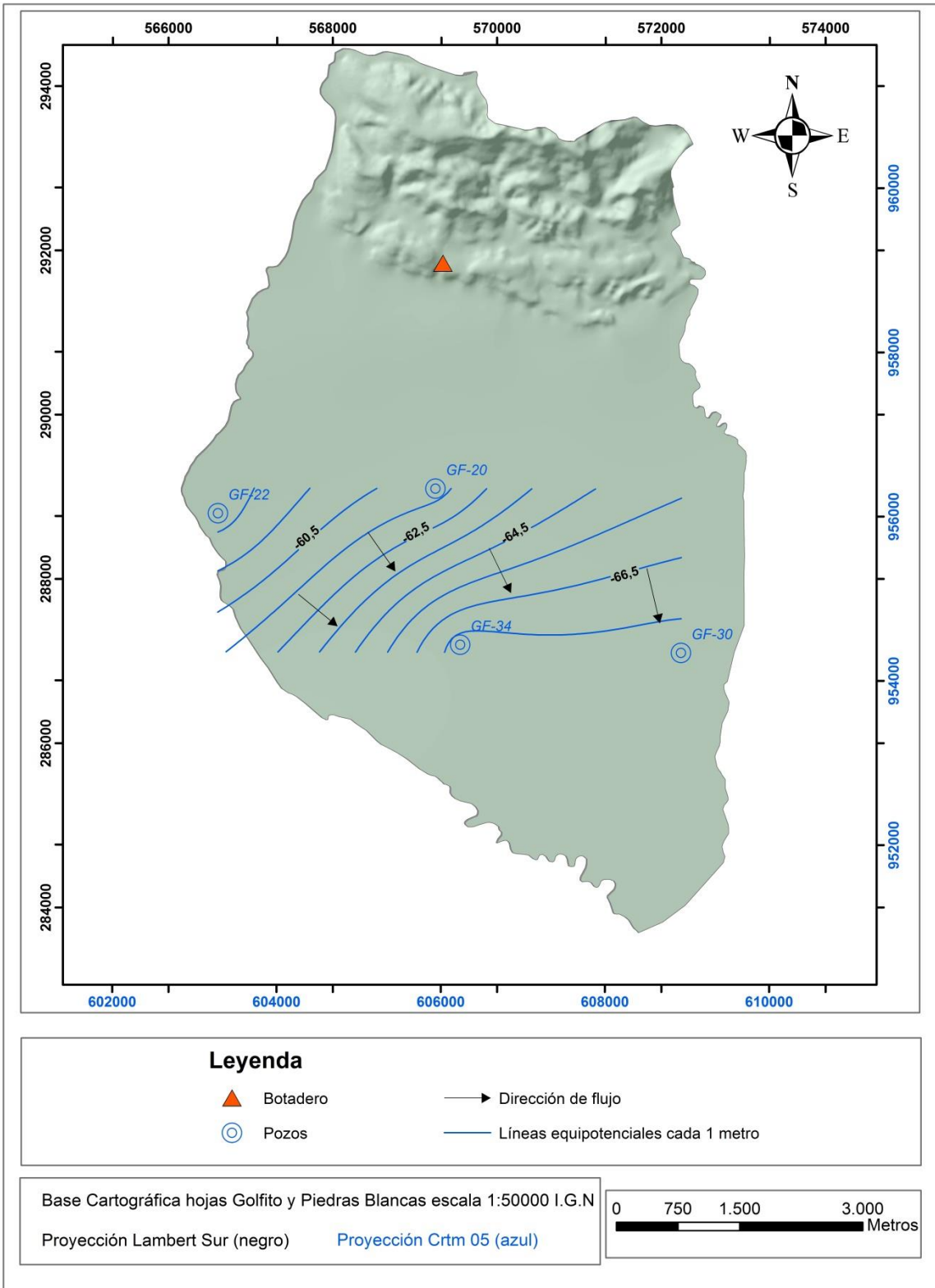
Como se mencionó anteriormente la Unidad Hidrogeológica Manigordo se compone de dos niveles de agua, un nivel superior ubicado hacia la parte norte del área de estudio, específicamente en la zona montañosa de la misma, y un nivel inferior que se determinó a partir de la información de pozos ubicados en la zona plana del área, a una profundidad promedio superior a los 80 m.

Para el caso del nivel superior no fue posible la construcción de una red de flujo, ya que no existe información suficiente referente a niveles de agua debido a la ausencia de pozos para esa zona. Por su parte en el caso del nivel inferior se determinó una red de flujo con base en la información disponible en los pozos GF-34, GF-22, GF-20, GF-30, tal y como se muestra en el **Cuadro 20**. Se determinó que la dirección del flujo de agua para este nivel inferior es predominantemente hacia el sur-sureste. Tomando en cuenta el modelo hidrogeológico establecido, en el cual esta unidad hidrogeológica se ha asociado con la Unidad de areniscas finas grisáceas aflorantes en superficie en el sector norte del área de estudio, y para las cuales se logró determinar una dirección de buzamiento predominantemente hacia el noreste, además de la presencia de fracturas con dirección norte-sur, se podría interpretar en este caso que el flujo del agua subterránea para este nivel inferior estaría influenciado por la presencia de permeabilidad secundaria inducida por la presencia de fracturas en la roca, provocando incluso que este flujo sea contrario al buzamiento de las areniscas.

**Cuadro 20: Ubicación de los pozos con los que se definió la red de flujo para el nivel de agua inferior de la Unidad Hidrogeológica Manigordo.**

Pozo	Coordenada Lambert Sur X	Coordenada Lambert Sur Y	Altura (msnm)	Profundidad nivel acuífero (m.b.n.s.)
GF-34	569552	287189	20	88
GF-22	566603	288789	20	78
GF-20	569252	289089	20	81
GF-30	572242	287088	20	88

En la **Figura 65** se muestra el detalle de la red de flujo establecida para el nivel de agua inferior de la Unidad Hidrogeológica Manigordo.



**Figura 65: Mapa de líneas equipotenciales para el nivel inferior de agua subterránea de la Unidad hidrogeológica Manigordo.**

## 8. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD HIDROGEOLÓGICA, FUENTES POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN Y RIESGO HIDROGEOLÓGICO

### 8.1 Valoración de Vulnerabilidad hidrogeológica

Con base en la caracterización hidrogeológica realizada para el área de estudio, y establecida a partir de la definición del modelo hidrogeológico conceptual descrito en el capítulo anterior, se procedió a realizar un análisis del índice de vulnerabilidad hidrogeológica para los niveles acuíferos más superficiales definidos para el área de estudio, específicamente se analizó la vulnerabilidad de la Unidad Hidrogeológica La Esperanza y el nivel acuífero superior de la Unidad Hidrogeológica Manigordo, pues en ambos casos al ser los niveles acuíferos más superficiales definidos presentan una mayor susceptibilidad a ser afectados por sustancias contaminantes.

La información obtenida a partir del análisis de vulnerabilidad hidrogeológica fue a su vez complementada con los datos obtenidos del análisis de uso de suelo característico de la zona, con el fin de cuantificar el grado de riesgo hidrogeológico concerniente al área de estudio. A continuación se presenta el análisis respectivo de ambas variables.

#### 8.1.1 Análisis de vulnerabilidad hidrogeológica asociada a la Unidad hidrogeológica La Esperanza.

Esta unidad se encuentra asociada con los depósitos aluviales ubicados hacia la parte plana del área de estudio. Se determinó en el modelo realizado que corresponde con un acuífero de tipo no confinado cubierto, con un nivel de agua poco profundo, mismo que según la información de pozos y la investigación de campo realizada (Sondeos eléctricos verticales, medición de niveles y excavaciones) se encuentra a una profundidad promedio inferior a los 5 m. Este nivel de agua se halla cubierto por una capa de suelo de composición arcillo-limosa, tal y como se determinó a partir de los resultados de los análisis de muestras de suelo recolectadas y las excavaciones ejecutadas. El detalle de la valoración de los parámetros de la metodología GOD para esta unidad se presenta en el Cuadro 21.

**Cuadro 21: Análisis de vulnerabilidad hidrogeológica según el método de GOD para la Unidad Hidrogeológica La Esperanza.**

Parámetro	Unidad Hidrogeológica La Esperanza
Grado de confinamiento Hidráulico	No confinado cubierto
Valoración	0,7
Ocurrencia del sustrato suprayacente	Arcillas y limos
Valoración	0,5

<b>Distancia al agua (m)</b>	<5
<b>Valoración</b>	0,9
<b>Índice de vulnerabilidad</b>	0,315
<b>Valoración</b>	Vulnerabilidad media

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología GOD para esta unidad hidrogeológica, se determinó que la misma presenta una vulnerabilidad media.

En la **Figura 66** se muestra el mapa de vulnerabilidad definido para esta Unidad Hidrogeológica.

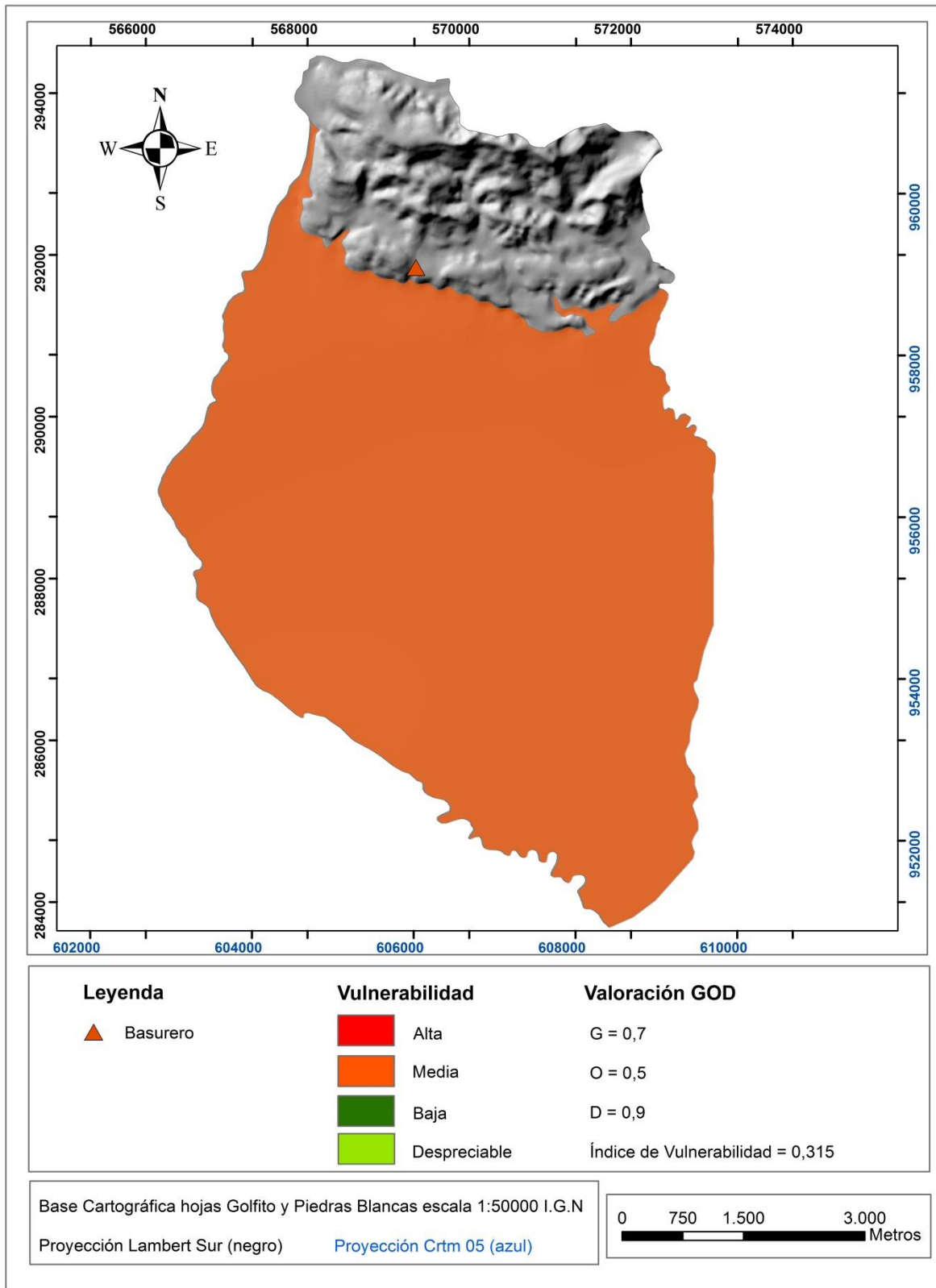


Figura 66: Vulnerabilidad para la Unidad hidrogeológica La Esperanza.



### **8.1.2 Análisis de vulnerabilidad hidrogeológica asociada a la Unidad hidrogeológica Manigordo.**

Para esta unidad hidrogeológica se debe tomar en cuenta la existencia de dos niveles de agua, el primero y más superficial de ellos se ubica hacia la parte norte del área de estudio, específicamente hacia la zona montañosa cercana al área del botadero, el cual se considera como un acuífero de tipo no confinado cubierto, cuyo nivel de agua se estima que se encuentra a una profundidad promedio de entre 5 y 10 m, aunque se considera que en algunos sitios pudiese ser inferior a los 5 m, esto según las observaciones de campo realizadas en la zona cercana al botadero de basura, en donde se observaron algunos afloramientos del nivel freático o lloraderos. Por su parte el segundo nivel acuífero definido para esta unidad se ubicó a una profundidad promedio de 80 m, esto según la información disponible para algunos pozos ubicados hacia la parte plana del área de estudio (zona de relleno aluvial), con lo cual se considera este nivel como un acuífero de tipo confinado, el cual se halla intercalado por una secuencia de rocas arcillitizadas que se asocian con la unidad de areniscas finas grisáceas definidas en la presente investigación, las cuales a su vez se encuentran subyacidas por el relleno aluvial de la zona, el cual se estima posee un espesor aproximado de 60 m.

Para efectos del análisis de vulnerabilidad para esta unidad hidrogeológica únicamente se realizó la estimación para el nivel acuífero superior ubicado en el sector norte del área de estudio, pues al tratarse de un nivel acuífero superficial o poco profundo presenta una mayor susceptibilidad a ser afectado por la introducción de sustancia contaminantes, en el caso del segundo nivel acuífero definido para esta unidad al tratarse de un nivel profundo se considera como de vulnerabilidad despreciable.

Este nivel superior se halla cubierto por una capa de suelo de textura arcillo-arenosa y por una secuencia de conglomerados, los cuales le brindan un cierto grado de protección a esta unidad acuífera ante la posible incursión de contaminantes desde la superficie, no obstante cabe mencionar que para el área específica del botadero se considera que el grado de vulnerabilidad pudiese ser significativamente mayor, esto debido a que como parte de las labores de construcción y operación del botadero se pudo haber provocado una alteración al entorno, asociada a la remoción parcial o total de la zona no saturada o de la cobertura de suelo que brinda protección al acuífero.

Es importante mencionar que la determinación de la vulnerabilidad asociada a esta unidad hidrogeológica ha sido definida con base a la información recabada en la zona específica del botadero de basura, debido a la ausencia de información de pozos para el sector norte del área de estudio no se logró precisar con exactitud la extensión de este nivel acuífero a lo largo de toda esta área, sin embargo para efectos de esta

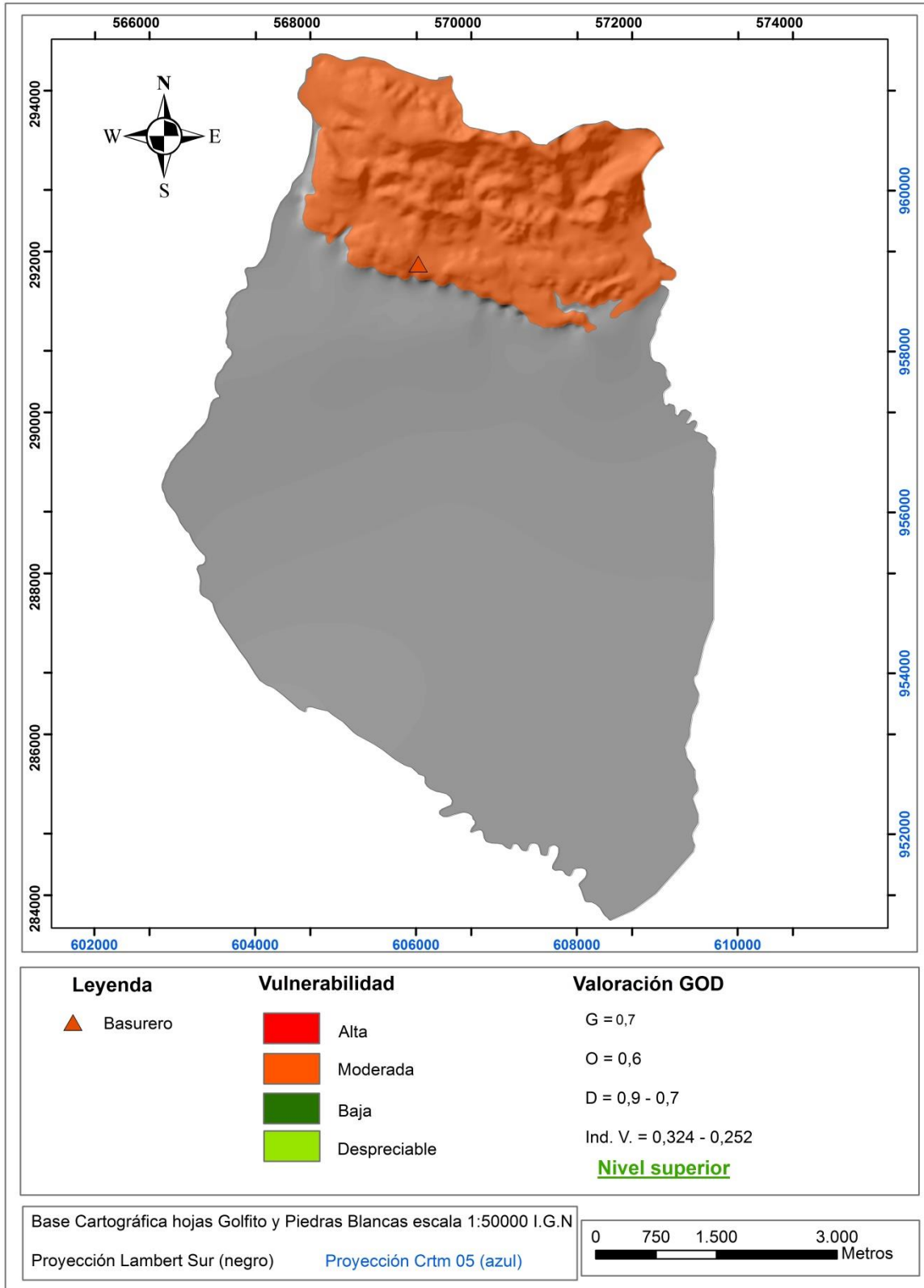
investigación se ha considerado con base en criterios litológicos que este nivel de agua pudiese extenderse en toda la zona montañosa ubicada al norte del área de estudio, perteneciendo a una misma unidad hidrogeológica, por lo que para la estimación del grado de vulnerabilidad de esta unidad se han considerado la existencia de condiciones similares a la observadas en la zona del botadero.

El **Cuadro 22** muestra la valoración correspondiente para este nivel acuífero superior de los diferentes parámetros utilizados en el desarrollo de la metodología GOD para la determinación de la vulnerabilidad hidrogeológica. Se obtuvo como resultado para este nivel superior una vulnerabilidad variable entre moderada a baja, siendo en el sector del botadero de basura en donde se pudiesen presentar las condiciones de mayor vulnerabilidad.

**Cuadro 22: Determinación del índice de vulnerabilidad para el nivel acuífero superior de la unidad hidrogeológica Manigordo.**

Parámetro	Unidad Hidrogeológica Manigordo (Nivel superior)
Grado de confinamiento Hidráulico	No confinado cubierto
Valoración	0,7
Ocurrencia del sustrato suprayacente	Suelo Arcillo-arenoso y Conglomerados
Valoración	0,6
Distancia al agua (m)	Entre <5 y >5
Valoración	0,9 – 0,7
Índice de vulnerabilidad	0,378 -0,294
Valoración	Vulnerabilidad moderada-baja

En la **Figura 67** se muestra el mapa de vulnerabilidad correspondiente para el nivel acuífero superior de la Unidad Hidrogeológica Manigordo localizado en el sector norte del área de estudio.



**Figura 67: Vulnerabilidad hidrogeológica para la unidad hidrogeológica Manigordo.**

## **8.2 Identificación de fuentes potenciales de contaminación**

Con base en las observaciones realizadas durante las diferentes giras de campo, se logró detectar dentro del área de interés para el presente estudio la existencia de algunas fuentes potenciales de contaminación, tanto para las aguas superficiales como para las subterráneas. Estas fuentes de contaminación en general se encuentran relacionadas con el tipo de uso de suelo que se da en la zona, así como también con la poca planificación, tanto desde el punto de vista urbano como hacia algunas actividades productivas que tienen lugar en la zona.

Entre los principales focos de contaminación detectados destacan los siguientes:

### **8.2.1 Botadero Municipal de Golfito**

El botadero municipal de Golfito fue abierto en el año 1995, manteniéndose en funcionamiento durante más de 20 años, siendo clausurado por el Ministerio de Salud en el mes de marzo del 2015.

Tal y como ya se ha mencionado la presencia del botadero representa una posible fuente de contaminación para las aguas subterráneas existentes en la zona, específicamente para el nivel acuífero superior de la Unidad Hidrogeológica Manigordo, el cual según lo mencionado en las secciones anteriores corresponde con un nivel acuífero poco profundo, el cual puede estar siendo afectado directamente por la presencia del botadero, debido principalmente a la introducción de lixiviados dentro de este nivel acuífero, los cuales son generados a partir de la acumulación o el depósito de residuos en dicho botadero, pudiendo causar una importante afectación en la calidad de sus aguas. Además es importante mencionar la posibilidad de que pueda existir una afectación por efecto del botadero hacia el acuífero aluvial ubicado en la zona plana del área de estudio, el cual ha sido nombrado en esta investigación como Unidad Hidrogeológica La Esperanza, esto debido a que no se descarta la posibilidad de que exista una conexión entre ambos niveles acuíferos.

### **8.2.2 Manejo de aguas negras en el poblado de la Esperanza**

Según lo visualizado durante las giras de campo, en el poblado de la Esperanza de Río Claro existe una problemática en cuanto al manejo y la disposición de las aguas residuales (**Fotografía 8**), ya que las mismas son descargadas de manera directa sobre la red de alcantarillado pluvial sin ningún tipo de tratamiento previo, lo cual representa un importante foco de contaminación para el recurso hídrico de la zona tanto a nivel superficial como potencialmente el subterráneo, pudiéndose generar la infiltración de

dichos contaminantes hacia el acuífero aluvial existente en la zona, sin olvidar también la amenaza a la salud pública que esta situación representa, pudiendo ser el medio para la propagación de enfermedades y virus que pueden llegar a afectar a los habitantes de dicho poblado.



**Fotografía 8: Contaminación por descarga de aguas negras sobre la vía pública en el poblado de La Esperanza de Río Claro.**

### **8.2.3 Contaminación por actividad pecuaria**

En este caso se destaca la presencia de una porqueriza justo al margen de la Quebrada Mina, la cual sin duda puede representar un importante foco de contaminación que afecte la calidad de las aguas de dicha quebrada, pudiéndose generar la descarga de manera directa de una alta proporción de contaminantes en caso de que no se tenga un adecuado control sanitario sobre dicha actividad.

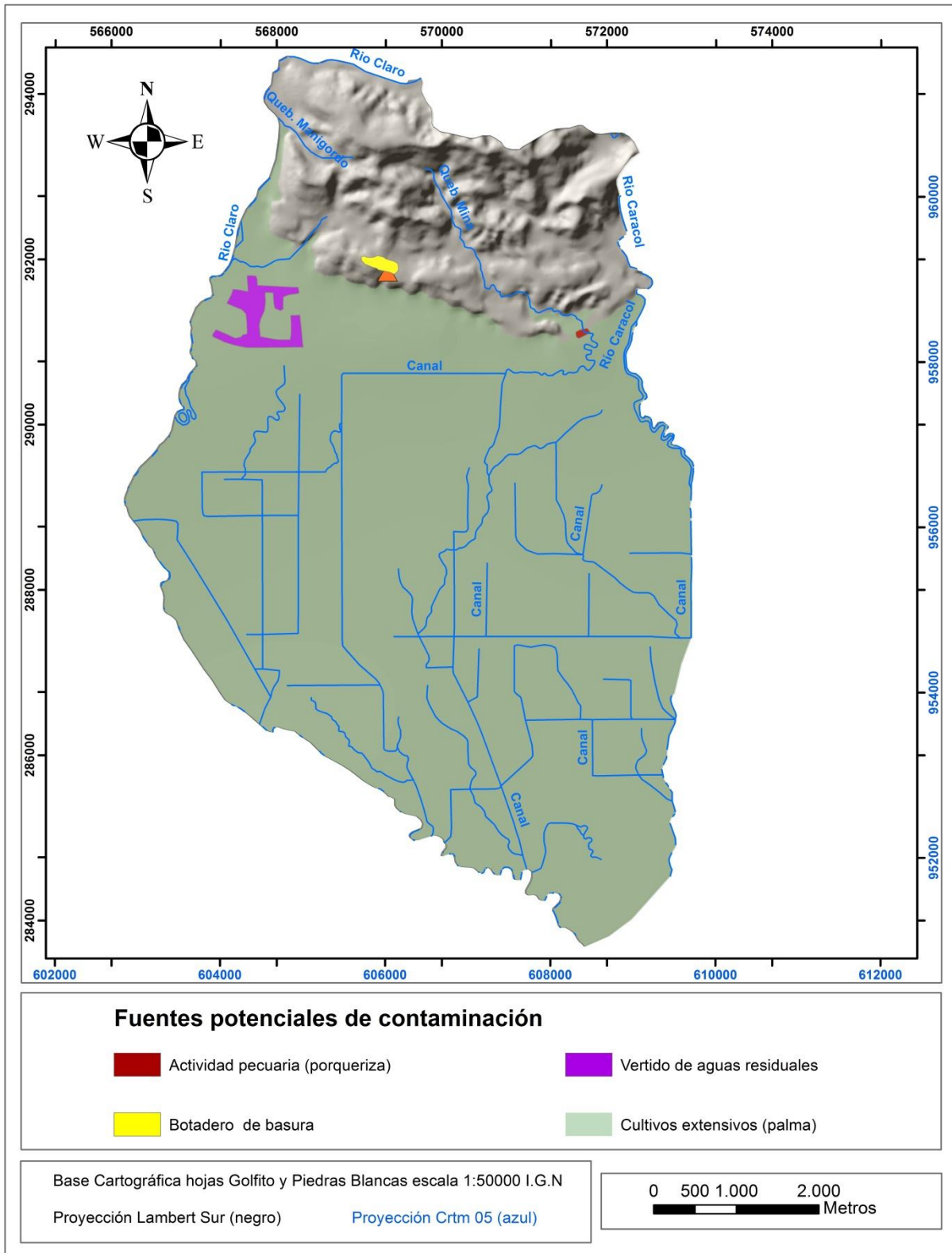
### **8.2.4 Contaminación asociada a la presencia de cultivos extensivos**

Estos se ubican de manera extendida a lo largo de la parte plana del área de estudio, siendo a su vez el uso de suelo más desarrollado en la zona, correspondiendo principalmente con plantaciones de palma, en este caso las fuentes potenciales de contaminación están asociadas a la utilización de fertilizantes y pesticidas implementados como parte de las labores propias de los cultivos, los cuales pudieran llegar a infiltrarse en el subsuelo en conjunto con el agua de lluvia y potencialmente alcanzar el nivel acuífero de la zona, afectando la calidad de las aguas subterráneas,

sin dejar de lado la posible afectación sobre los cursos de aguas superficiales por la descarga de efluentes, así como la intensificación de los procesos erosivos inducidos por la presencia de estos cultivos y la aceleración de procesos de sedimentación que pudieran presentarse en ríos y quebradas cercanas a los sitios de cultivos.

Otras fuentes potenciales de contaminación que pudieran presentarse en esta área asociadas con las labores propias de los cultivos lo son por ejemplo el derrame de sustancias químicas o hidrocarburos utilizados ya sea como parte del procesamiento de los cultivos, así como también por la movilización constante de maquinaria y vehículos pesados que se encargan del transporte de los cultivos hacia las zonas destinadas para el procesamiento o almacén de los mismos. Por otro lado cabe mencionar que según lo observado pareciera ser una práctica común el depósito de aguas negras o residuales y desechos sólidos en los distintos canales o caños ubicados dentro de las plantaciones de palma, lo cual sin duda representa un importante foco de contaminación para el recurso hídrico de la zona.

En la **Figura 68** se presenta el mapa de ubicación de cada una de las potenciales fuentes de contaminación descritas anteriormente.



**Figura 68: Fuentes potenciales de contaminación identificadas para el área de estudio.**

### 8.3 Análisis del riesgo a la contaminación

Para la valoración del riesgo a la contaminación hidrogeológica se tomó como base la relación entre el grado de vulnerabilidad hidrogeológica propio de cada unidad hidrogeológica y la proporción o carga de contaminante que pudiese ser aportado al acuífero desde la superficie por las diferentes actividades productivas que en ella se desarrollan.

En términos prácticos, la evaluación del riesgo involucra la consideración de la interacción entre ambos factores mediante la superposición de los resultados del inventario de cargas contaminantes del subsuelo con el mapa de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos. El **Cuadro 23** muestra la matriz utilizada para la definición del grado de riesgo a la contaminación para el área de estudio.

**Cuadro 23: Matriz para la determinación del riesgo a la contaminación hidrogeológica (Tomado y modificado de Arias, 2011)**

Valor			Zonas de Vulnerabilidad				
			Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
			1	2	3	4	5
Carga de contaminación	Reducida	1	1	2	3	4	5
	Moderada	2	2	4	6	8	10
	Elevada	3	3	6	9	12	15
Riesgo de contaminación			Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
			1-2	3-5	6-8	9-11	12-15

En la **Figura 69** se muestra el mapa de riesgo a la contaminación hidrogeológica establecido a partir de la aplicación de la matriz anterior, o lo que es lo mismo, de la sobreposición de los respectivos mapas de vulnerabilidad hidrogeológica con el mapa de fuentes potenciales de contaminación, definidos ambos en las secciones anteriores del presente estudio.

Con base en el análisis de riesgo hidrogeológico obtenido se ha determinado que para el caso del sector en donde se ubica el botadero de basura de Golfito es en donde se presentan las condiciones más críticas en lo que respecta a la valoración del riesgo,



obteniéndose un alto riesgo de afectación a los acuíferos de la zona, esto justificado por la elevada carga de contaminantes que en dicho sitio se encuentran como resultado de las actividades propias del botadero, el cual si bien es cierto actualmente ya se encuentra fuera de operación la carga de desechos allí depositados durante el periodo de funcionamiento del botadero fue muy significativa, situación que aunado a la existencia factores como la presencia de un nivel freático somero elevan considerablemente el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

Por su parte la valoración del riesgo hidrogeológico para el resto del área analizada varía entre baja a moderada, siendo en la región norte del área de estudio en donde se obtuvo el menor riesgo de contaminación, esto debido a la ausencia de actividades productivas para este sector en específico debido al uso de suelo imperante, el cual es fundamentalmente ocupado por una densa zona montañosa. Para el caso de la región central y sur del área de estudio se deduce un bajo riesgo a la contaminación, sin embargo se debe tomar en cuenta que en dicha zona es donde se localizan las principales actividades productivas del área como por ejemplo la presencia de cultivos principalmente de Palma, por lo cual se debe tomar en cuenta que potencialmente pudiera existir algún aporte de contaminantes en la zona asociado a agroquímicas u otras sustancia que podrían generar alguna afectación sobre las aguas subterráneas.

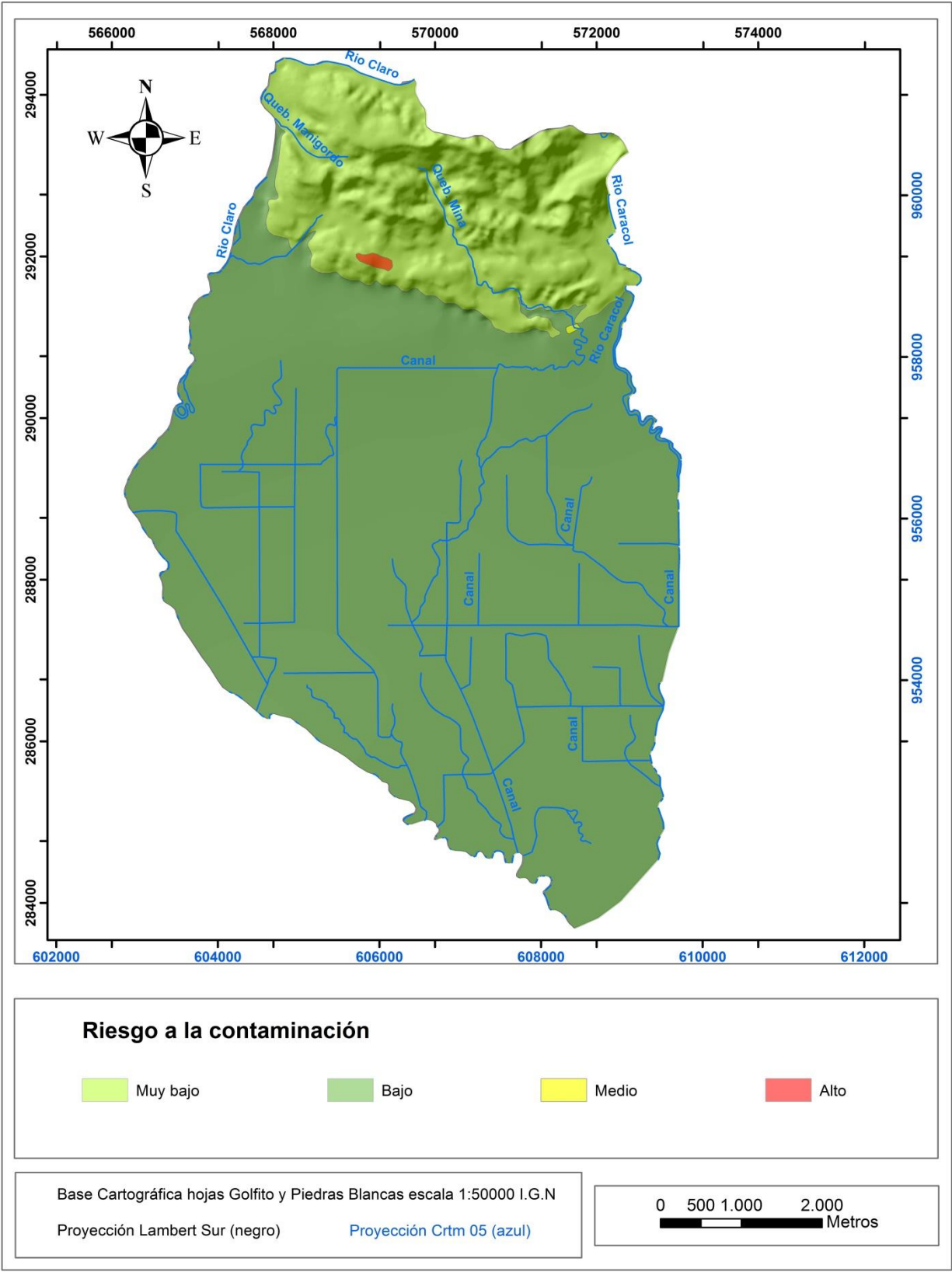


Figura 69: Mapa de riesgo de contaminación para el área de estudio.

## 9. CONCLUSIONES

### 9.1 Generalidades del área de estudio

Hidrográficamente el área de estudio se encuentra enmarcada dentro de la cuenca llamada Cuenca Río Claro- Caracol, la cual está delimitada en sus extremos occidental y oriental por dichos ríos respectivamente, e incluye como parte de la misma a todos los ríos y quebradas ubicados en el sector plano y montañoso del área de estudio, la dirección de flujo predominante es hacia el sur-sureste y el drenaje es de tipo meándrico y anastomosado.

Como parte de esta cuenca se han identificado a su vez la existencia de 4 microcuencas, las cuales se ubican en el sector norte de la misma, correspondiendo con las regiones montañosas del área, estas microcuencas han sido nombradas en esta investigación como: Microcuenca Quebrada Mina, Microcuenca Quebrada Manigordo, Microcuenca Río Claro y Microcuenca Río Caracol, estas dos últimas están representadas por dos quebradas sin nombre que descargan sus aguas de manera directa en los ríos Claro y Caracol respectivamente.

Estas microcuencas se encuentran delimitadas entre sí, por una evidente influencia tectónica-litológica, la cual se manifiesta en la zona por la presencia de rasgos significativos como lo es la existencia de patrones de drenaje rectilíneos o rectangulares y desplazamientos de cauces, especialmente al aproximarse los mismos a la parte plana del área de estudio.

La geomorfología del área de estudio se caracteriza por el predominio de relieves de génesis sedimentaria. La topografía actual del área ha estado bajo la influencia de los esfuerzos tectónicos imperantes, además de la estratigrafía local, destacando en ella la existencia de un marcado contraste topográfico, ubicándose zonas con una topografía abrupta o de fuerte pendiente correspondientes a las zonas montañosas y cerros del área de interés, los cuales al erosionarse han generado un importante aporte de sedimentos que han sido transportados por la acción de los ríos y quebradas y depositados en las zonas de topografías más bajas, generando con ello la formación de una densa llanura de inundación que cubre gran parte del área de estudio.

Es así como la geomorfología del área de estudio ha sido clasificada en esta investigación en tres grupos, con base en su origen, los cuales son: formas de origen denudacional, formas de origen aluvial y formas de origen estructural

Las formas de origen denudacional están representadas principalmente por la presencia de Laderas denudacionales de moderada a fuerte pendiente, las cuales

predominan a lo largo de todo el sector norte del área de estudio, laderas que se caracterizan por presentar una pendiente promedio superior a los 16 ° y cuyo origen pudiese estar relacionado con el levantamiento tectónico del área, asociado a la falla Longitudinal.

Por su parte las formas de origen aluvial están representadas por la presencia en el área de estudio de una densa llanura de inundación que comprende aproximadamente 41,7 km<sup>2</sup>, siendo la geoforma de mayor extensión dentro del área de interés. Se caracteriza por presentar una pendiente plana, cuya inclinación oscila entre los 0 y 8°.

Las formas de origen estructural están representadas por la presencia de una fila de cerros aislados que se extienden con una dirección SE-NW y se localizan hacia el sur de la Fila Manigordo, de la cual se encuentran separados por una serie de zonas planas formadas por la erosión de ríos desplazados. Esta fila de cerros aislados representa una barrera que corta con la fluidez normal de los ríos y quebradas que desciende de la fila Manigordo, obligándolos a desplazarse y fluir una mayor distancia para alcanzar la zona plana del área de estudio representada por la llanura de inundación. Además para la zona de estudio se ha identificado una serie de fallas y alineamientos con rumbo hacia el noroeste, los cuales se han asociado como parte de la deformación causada por el sistema de falla Longitudinal de Costa Rica

## **9.2 Contexto Geológico del área de estudio**

De acuerdo con el reconocimiento geológico de campo realizado para el área de estudio y sus alrededores se determinó la existencia de cuatro diferentes litologías, las cuales han sido definidas en la presente investigación como unidades informales de la siguiente manera:

- Unidad de Areniscas Finas Quebrada Manigordo, la cual se encuentra aflorando a lo largo de la parte norte del área de estudio, específicamente hacia la zona montañosa de la misma, abarcando un área de aproximadamente 9 Km<sup>2</sup>, litológicamente se describe como una secuencia de areniscas finas color grisáceo con presencia de manera puntual de fósiles de bivalvos y conchas y de estructuras sedimentarias como laminación paralela y cruzada.
- Unidad de Conglomerados Quebrada Mina, la cual se halla aflorando en la parte central-norte del área, específicamente en las cercanías del botadero de basura, se ha interpretado esta unidad como una sección intercalada dentro de la Unidad de Areniscas Finas Quebrada Manigordo. Compuesta por clastos de diversa composición, los cuales se hallan inmersos en una matriz arcillosa color café-naranja.

- Unidad de Calizas Quebrada Tigra, estas se encuentran aflorando hacia la margen norte del Río Claro, en el extremo norte del área de estudio, fuera de la misma. Se describen como una secuencia de calizas de color gris oscuro a gris azulado, con una textura masiva y alta dureza.
- Unidad de depósitos recientes corresponde con la unidad litológica de mayor extensión dentro del área de estudio, abarcando aproximadamente 39 Km<sup>2</sup>. Se trata de depósitos de origen aluvial compuestos principalmente por capas arenas, arcillas y gravas originadas por la dinámica depositacional propia de los cuerpos fluviales de la zona.

### **9.3 Aplicación de balance hídrico de suelos**

El balance hídrico de suelos realizado para la zona de estudio contempló la realización de 32 balances, uno para cada una de las zonas definidas, de acuerdo con el análisis de criterios como: precipitación, pendiente del terreno, uso de suelo y capacidad de infiltración de los suelos.

A partir de ello se obtuvo como resultado un rango de recarga potencial para el área de estudio que varía entre un valor mínimo de 1593 y un máximo 2532 mm, siendo predominantes los valores de recarga potencial de entre 1725 y 2147 mm, los cuales fueron determinados principalmente para la zona plana del área de estudio, principalmente la localizada en el sector central y sur de la misma, así como también gran parte del sector montañoso ubicado en la parte norte del área. Los valores máximos de recarga potencial se ubicaron de manera puntual en algunos sectores como por ejemplo en las cercanías del poblado de La Esperanza, la zona aledaña al botadero de basura y algunos sectores ubicados tanto hacia el norte como al este del área de estudio, sitios con un uso de suelo caracterizado por la presencia de pastos destinados a actividades ganaderas. Factores tales como la topografía relativamente plana presente en la mayor parte del área de estudio, así como también la presencia de una cobertura vegetal limitada, cuya profundidad de raíces es en general escasa o bien la presencia de suelos con texturas más arenosas favorables para que se lleve a cabo el proceso de infiltración, terminaron siendo factores determinantes para que los valores de recarga potencial estimados acabaran siendo considerablemente más altos para estas zonas específicas.

En general la recarga potencial anual obtenida para el área de estudio se considera como alta, justificada principalmente por los altos índices de precipitación características del área de estudio y por la presencia en gran parte de la misma de una

topografía plana que es favorable al desarrollo del proceso de infiltración en los suelos y consecuentemente a que se genere una mayor recarga acuífera.

#### **9.4 Prospección geofísica**

Por medio de la elaboración de sondeos eléctricos verticales (SEVs) en la zona de relleno aluvial del área de estudio, se logró determinar la heterogeneidad de dicho depósito aluvial, la cual se manifiesta por la obtención de valores de resistividad intermedia hacia la parte norte de dicho depósito en la región colindante con la zona montañosa del área, estos valores de resistividad intermedia se relacionan con la presencia de sedimentos gruesos principalmente gravas y arenas que llegan a alcanzar un espesor máximo cercano a los 50 m, por su parte en los SEVs realizados hacia la parte central y sur de dicho relleno se determinaron valores de resistividad gradualmente más bajos predominantemente inferiores a los 15 ohmm, los cuales se asocian con una mayor proporción de sedimentos de tipo arcilloso hacia la parte sur del relleno aluvial.

Como parte de la investigación realizada además se llevó a cabo una campaña de prospección geofísica en el sector del botadero municipal de Golfito, la cual tuvo como objetivo brindar información adicional sobre la geometría de dicho botadero, así como también sobre la estratigrafía y ubicación de posibles niveles de agua subterránea en dicha zona.

En específico se aplicaron dos métodos geofísicos en dicha prospección, los cuales corresponden con el método de georadar (GPR) y el dispositivo Ohmmapper, de acuerdo con los resultados obtenidos el primero de estos métodos representado por el GPR fue el que arrojó los resultados más satisfactorios desde el punto de vista de profundidad de investigación y con ello información más acorde al cumplimiento de los objetivos trazados con el desarrollo de esta campaña geofísica.

Por medio de la interpretación de los distintos radargramas obtenidos para las diferentes líneas de perfil trazadas en los tres puntos de prospección indagados dentro del botadero se logró delimitar la extensión en profundidad de las distintas celdas de acumulación de basura, es así como en términos generales se determinó que la delimitación entre la capa de basura y el sustrato rocoso de la zona se localiza a una profundidad variable entre los 8 y 10 m, profundidad a la cual los distintos radargramas obtenidos muestran un cambio significativo en la traza de la señal reflejada, el cual se justifica por la presencia de una superficie de heterogeneidad en las condiciones del medio prospectado.

Por otro lado a partir de la interpretación planteada de los distintos radargramas no se logró discernir con claridad la presencia de algún nivel de agua en la zona, sin embargo cabe mencionar que en algunos radargramas se pudo detectar una mayor atenuación de la señal reflejada a partir de los 5 m de profundidad, la cual podría corresponder con un incremento en las condiciones de humedad del medio.

En el caso de la prospección mediante la aplicación del dispositivo Ohmmapper por las condiciones propias del área del botadero no se tuvo la disponibilidad de espacio debido a las condiciones de vegetación en la zona, lo cual impidió aplicar una mayor apertura entre el electrodo transmisor y el receptor, situación que impidió obtener una mayor profundidad de prospección aspecto que a su vez limitó la aplicabilidad del método en la zona, por lo cual la interpretación planteada a través de la realización de esta campaña geofísica se basó en los resultados obtenidos por medio de la aplicación del georadar.

## **9.5 Contexto hidrogeológico del área de estudio**

El contexto hidrogeológico definido en la presente investigación contempla la existencia de tres unidades hidrogeológicas en el área de estudio, mismas que fueron nombradas como Unidad hidrogeológica La Esperanza, Unidad Hidrogeológica Manigordo y Unidad Hidrogeológica Río Claro.

La Unidad hidrogeológica La Esperanza corresponde con la unidad más superficial definida en el modelo, se encuentra asociada al depósito aluvial existente en la parte central del área, por lo cual se ha asociado litológicamente con importantes secuencias de composición arcillosa y arenosa originados por la dinámica depositacional de los ríos en la zona, se ha estimado un espesor total para esta unidad hidrogeológica de alrededor de 60 m. Para esta unidad se logró definir la existencia de un nivel de agua a una profundidad variable entre 1 y 5 m, para el cual se estimó un caudal promedio de 0,5375 L/s, con una dirección de flujo hacia el sureste según el modelo de equipotenciales diseñado, correspondería este nivel de agua con un acuífero de tipo no confinado de bajo potencial. No fue posible definir los parámetros hidráulicos de este nivel acuífero debido a la escasa información reportada en los registros de pozos.

La Unidad Hidrogeológica Manigordo se encuentra extendida a lo largo del área de estudio, estando expuesta en superficie hacia la parte norte de esta y profundizándose hacia la región central y sur de la misma, sitios en donde es cubierta por el relleno aluvial de la zona. Litológicamente esta unidad hidrogeológica se ha asociado con la Unidad de Areniscas Finas Manigordo definida en el presente estudio. Se definieron dos niveles de agua para esta unidad hidrogeológica, el nivel superior está ubicado

hacia la parte norte del área, y un nivel inferior localizado hacia la región central y sur de la misma a una profundidad promedio de 80 m, el caudal promedio estimado para este nivel inferior es de 13 L/s, su dirección de flujo hacia el Norte- Noreste, se considera este nivel como un acuífero de tipo confinado de moderado potencial.

La Unidad Hidrogeológica Río Claro, corresponde con la unidad más profunda definida en el modelo hidrogeológico, litológicamente se ha asociado esta unidad hidrogeológica con una secuencia de lavas perteneciente al Complejo Ígneo de Osa, se considera esta unidad como un acuífero de tipo confinado de moderado potencial, con un caudal promedio de 14 L/s y una dirección de flujo hacia el SE, según el modelo de equipotenciales diseñado.

## **9.6 Vulnerabilidad hidrogeológica, fuentes potenciales de contaminación y riesgo hidrogeológico**

A partir de la aplicación de la metodología GOD se determinó el índice de vulnerabilidad para las unidades hidrogeológicas más superficiales del área de estudio. Es así como para el caso de la Unidad Hidrogeológica La Esperanza se obtuvo un grado de vulnerabilidad medio, con un índice de vulnerabilidad igual a 0,315, en el caso de la Unidad Hidrogeológica Manigordo el índice de vulnerabilidad hidrogeológica obtenido para su nivel acuífero superior es considerado como moderado, con un valor obtenido entre 0,294 y 0,378.

Para el área de estudio se han identificado algunas fuentes potenciales de contaminación que pudieran estar generando algún grado de afectación sobre la calidad de las aguas tanto superficiales como subterráneas, entre las principales fuentes de contaminación identificadas destacan la presencia de botadero municipal de Golfito, el cual si bien es cierto actualmente ya se encuentra fuera de operación representa una fuente potencial de contaminación asociada a la presencia de una alta cantidad de desechos acumulados en la zona durante su fase operativa y que pudieran generar algún tipo de sustancia o lixiviado que potencialmente podría afectar la calidad de las aguas subterráneas en la zona. Otras posibles fuentes de contaminación identificadas corresponden con la disposición de aguas residuales o jabonosas sobre la red de alcantarillado pluvial, esta situación se detectó principalmente en el poblado de la Esperanza y en algunos sectores de las fincas ocupadas por cultivos de palma en donde clandestinamente es común la disposición de aguas residuales.

Según el análisis efectuado el riesgo a la contaminación hidrogeológica en el área de estudio es predominantemente variable entre bajo a muy bajo, con algunos sectores en



donde puntualmente se podría presentar un riesgo mayor entre moderado a alto, tal es el caso por ejemplo de los sectores cercanos al botadero de basura de Golfito.

## RECOMENDACIONES

Con base a los resultados finales obtenidos en esta investigación se establecen las siguientes recomendaciones a seguir en futuros estudios a realizar en el área de estudio.

Se sugiere establecer una red de monitoreo de pozos en la zona, con el objetivo de tener información más completa referente a niveles de agua subterránea, y con ello obtener una mejor comprensión acerca de la dinámica y dirección de flujo de los acuíferos que componen el área.

Como parte de la red de monitoreo de pozos se recomienda la instalación de pozos de monitoreo, para lo cual se sugiere la construcción de al menos 5 piezómetros en los alrededores del botadero, los cuales permitirían obtener información más precisa referente a la influencia directa que tiene dicho botadero sobre los acuíferos de la zona.

En el **Cuadro 24** se presenta una propuesta para la ubicación de cada uno de los piezómetros recomendados a construir en las cercanías del botadero. Se recomienda que estos tengan una profundidad promedio de entre 20 a 30 m, de acuerdo con las condiciones propias del lugar referentes a profundidad de niveles estáticos.

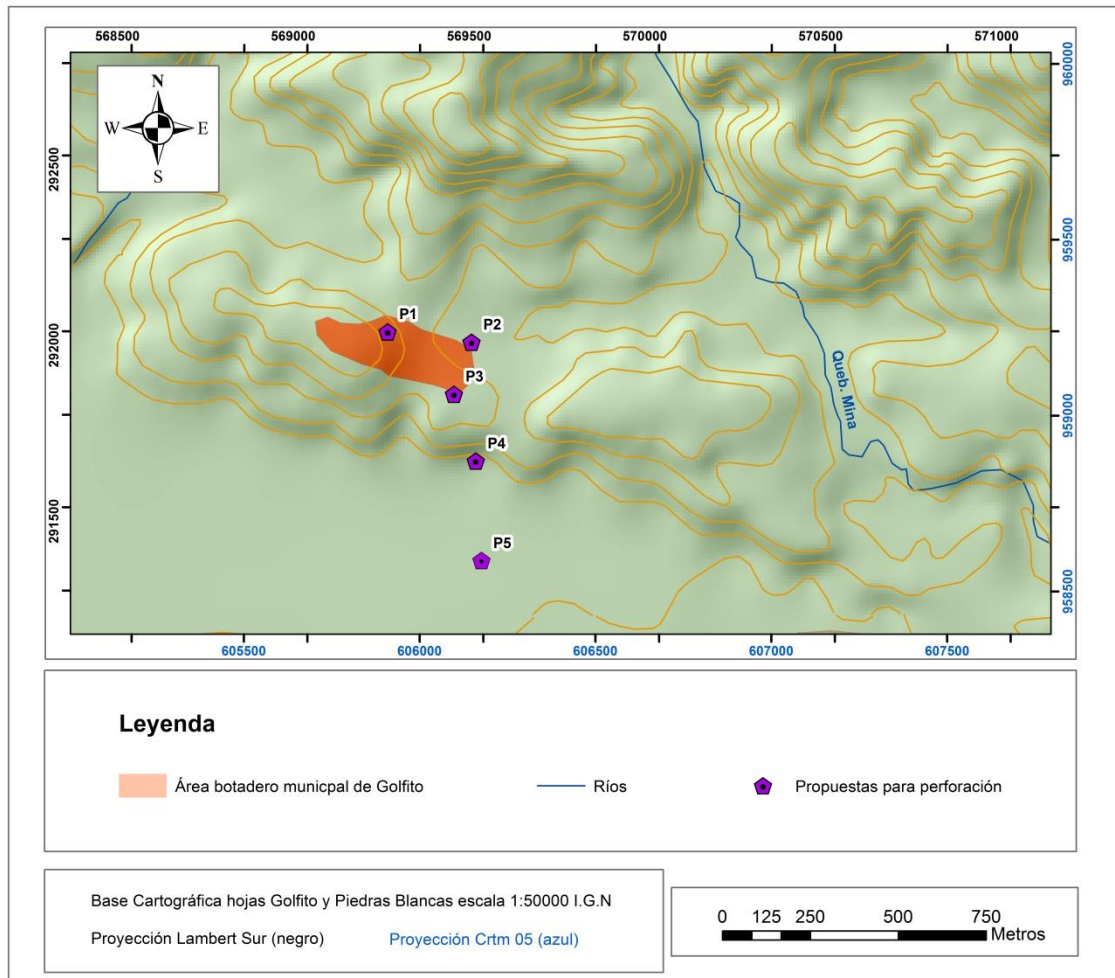
**Cuadro 24: Sitios propuestos para la ubicación de perforaciones**

Piezómetro	Coordenadas Lambert Sur X	Coordenadas Lambert Sur Y
1	569228	291999
2	569467	291969
3	569416	291821
4	569479	291631
5	569495	291348

Es recomendable el monitoreo de algunos parámetros de calidad del agua de carácter fisicoquímico, tomando en consideración aspectos como la dureza total, el pH, la turbidez, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, sólidos suspendidos, sólidos totales, carbono orgánico disuelto (DOC), cloruros, fluoruros, sulfatos, nitratos, mercurio, plomo, hierro entre otros, además de parámetros biológicos que sirvan de indicadores ante un inminente proceso de contaminación por efecto de la generación de lixiviados, generados por la acumulación de los desechos en las diferentes celdas de depósito del basurero, los cuales pudieran ser transportados a

través de la zona no saturada del suelo por medio del agua de lluvia infiltrada hasta alcanzar el nivel acuífero de la zona. Se recomienda una frecuencia de medición semestral en este caso, esto para evaluar posibles modificaciones en la calidad del agua, influenciados por los cambios estacionales, los cuales pueden provocar ya sea el ascenso o descenso del nivel freático, haciendo más o menos factible la afectación por el aporte de lixiviados al acuífero según sea el caso.

En la **Figura 70** se muestra la distribución de cada uno de los sitios propuestos para perforación.



**Figura 70: Sitios propuestos para la ubicación de perforaciones**

Además de lo anterior es recomendable la realización de pruebas de bombeo con una duración de al menos 48 horas, esto con el fin de poder evaluar las condiciones hidráulicas de los acuíferos que componen el área de estudio, obteniendo con ello parámetros hidráulicos como la transmisividad, permeabilidad y conductividad necesarios para la caracterización de dichos acuíferos.

## LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Durante el desarrollo de esta investigación se presentaron algunas dificultades o limitaciones, las cuales tuvieron algún grado de influencia en la obtención de los resultados finales de la investigación, a continuación se describen las principales limitantes determinadas para el estudio:

- En primer lugar cabe mencionar que para el área de estudio la información bibliográfica disponible tanto de carácter geológico como hidrogeológico es muy escasa, prácticamente nula, siendo esta una dificultad pues no se contó con información previa para el desarrollo del estudio, convirtiendo esta investigación en pionera en su tipo para dicha área.
- De igual manera como se ha mencionado anteriormente, la información obtenida a partir de la base de datos del SENARA referente a pozos ubicados en el área de estudio, y sobre la cual se fundamentó en gran medida el modelo hidrogeológico definido, se puede considerar en cierta forma como incompleta o insuficiente para efectos de realizar una descripción más detallada y precisa para cada una de las diferentes Unidades Hidrogeológicas establecidas en esta investigación, para las cuales no se contó con información básica necesaria para definir los parámetros hidráulicos (transmisividad, permeabilidad etc.) de cada una de estas unidades, impidiendo con ello obtener una mejor caracterización sobre el contexto hidrogeológico propio del área de estudio. De igual forma la información disponible en las bases de datos de pozos referente a niveles de agua en general es escasa, situación dificultó la definición del modelo de líneas equipotenciales o dirección de flujo de las distintas unidades acuíferas.
- En lo que respecta al levantamiento de muestras de suelo y pruebas de infiltración realizadas se tuvo como limitante el acceso en algunos sectores del área de estudio, principalmente hacia la parte norte de la misma, sector en el cual la densidad de muestreo pareciera ser baja, esta situación se debió fundamentalmente a la existencia de una densa cobertura boscosa que impidió la obtención de más muestras así como la realización de pruebas de infiltración en dicha área.
- En el caso específico de la utilización del dispositivo Ohmmapper, no se lograron obtener los resultados inicialmente esperados debido a que las condiciones de vegetación existentes en el sitio del botadero de basura al momento de aplicación del método impidieron la aplicación de distintas separaciones entre el

dispositivo transmisor y receptor, limitando con ello la profundidad de investigación obtenida.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARADO, G., 2005: La Falla Longitudinal de Costa Rica: Un insumo neotectónico hacia la Amenaza Sísmica del P.H. Boruca-Veraguas.-21 págs.
- ALVARADO, G. & GANS, P., 2012: Síntesis Geocronológica del Magmatismo, Metamorfismo y Metalogenia de Costa Rica, América Central.- Rev. Geológica de América Central (46): 7-122.
- ARIAS, M. E., 2002: Aplicaciones geofísicas a la hidrogeología en Costa Rica. – Rev. Geológica de América Central (27): 11-20.
- ARIAS, M. E., 2007: Modelización directa y comparación de los principales dispositivos geoelectricos. – Rev. Ciencia y Tecnología 25 (1-2): 7-23.
- ARIAS, M., 2011: Estudio Hidrogeológico Regional de la Cuenca del Río Frio. 134 pág. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica. [Informe Interno].
- ARROYO, I., 1997: Estudio geológico-ambiental del sector Pueblo Civil y alrededores, Golfito, Pacífico Sur de Costa Rica.-135 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- BERRANGÉ, J.P. & THORPE, R.S., 1988: The geology, geochemistry and emplacement of the Cretaceous-Tertiary ophiolitic Nicoya Complex of the Osa Peninsula, southern Costa Rica.- Tectonophysics, 147:193-220.
- BERRANGÉ J.P., BRADLEY, D.R. & SNELLING, N.J., 1989: K/Ar age dating of the ophiolitic Nicoya Complex of the Osa Peninsula , southern Costa Rica.- J. South Amer. Earth Sci., 2(1):49-59.
- BISKUP, K., LORENZO, H. & ARIAS, P., 2005: Aplicabilidad del radar del subsuelo para el estudio de la zona no saturada del suelo: Ejemplo en ambientes arenosos costeros.- Estudios de la zona no saturada del suelo, Vol. VII: 197-204.

- BONOMO, N. & De la Vega, M., 2006: El método de Georadar.- En: OSELLA, A. & LANATA, J.L., 2006: Arqueogeofísica. Una metodología interdisciplinaria para explorar el pasado.- Fundación de Historia Natural Félix de Azara e Instituto Superior de Investigaciones, Universidad de Maimónides, págs. 73-103.
- BUCHS, D., BAUMGARTNER, P., BAUMGARTNER-MORA, C., BANDINI, A., JACKETT, S. J., DISERENS, M. O. & STUCKI, J., 2009: Late Cretaceous to Miocene seamount accretion and mélangé formation in the Osa and Burica Peninsulas (Southern Costa Rica): episodic growth of a convergent margin.- Geol. Soc. London. Spec. Paper, 328: 411-456.
- BUCHS, D., BAUMGARTNER, P., BAUMGARTNER-MORA, ULIANOV, A., 2010: Late Cretaceous arc development on the SW margin of the Caribbean Plate: Insights from the Golfo, Costa Rica, and Azurero, Panamá, complexes.- Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 7 (11): 1-35.
- BUTLER, S., 1957: Engineering Hydrology. - 356 págs. Prentice Hall Inc. EE.UU.
- CALVO, C., 1987: Las calizas neríticas de la vertiente Pacífica del norte de Costa Rica y sur de Nicaragua: Épocas y sistemas de sedimentación asociadas con la apertura y evolución del margen convergente de la América Central Meridional.- 164 págs. Univ. de Costa Rica, San José, Costa Rica (Tesis Lic.)
- COMISIÓN DOCENTE CURSO INTERNACIONAL DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA: Hidrogeología.- Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (2009).
- CORRIGAN, J., MANN, P. & INGLE, J., 1990: Forearc response to subduction of the Cocos Ridge, Panamá-Costa Rica.- Geol. Soc. Amer. 102: 628-652.
- CUSTODIO, G. 1998: Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evolución y la incertidumbre. Boletín Geológico y Minero 109-4: 13-29.
- CUSTODIO, E., & LLAMAS, M., 2001: Hidrogeología Subterránea Vol.1 [2ª ed.]. – 1157 págs. Omega ediciones, Barcelona, España.

- DANIELS, D.J., 2004: Ground Penetrating Radar.- 734 págs. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom.
- DENGO, G., 1962: Estudio geológico de la región de Guanacaste, Costa Rica. -Informe Semestral, Instituto Geográfico de Costa Rica, 1962: 1-112 págs.
- DENYER, P., MONTERO, W. & ALVARADO, G., 2003: Atlas Tectónico de Costa Rica.- 79 págs., Ed. Universidad de Costa Rica, San José.
- DENYER, P. & ALVARADO, G.E., 2007: Mapa Geológico de Costa Rica.- Escala 1:400000, Librería Francesa, San José, Costa Rica.
- DI MARCO, G., 1994: Les terrains acrésés du sud du Costa Rica.- 185 págs. Univ. de Lausanne, Lausanne, Switzerland. [Tesis Doc.]
- GRASSI, C., 1976: Resumen de propiedades físicas del suelo, métodos de riego.- 256 págs. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- GUTIERREZ, J.M., 2004: Análisis del subsuelo utilizando técnicas geofísicas. Sistema Georadar RAMAC/GPR.- VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía, Madrid, págs.1-17.
- FETTER, C., 2001: Applied Hydrogeology [4<sup>a</sup> ed]. – 598 págs. + CD. Prentice Hall, New jersey, USA.
- FLORES, L. & ALCALÁ, J.R., 2010: Manual de procedimientos analíticos, laboratorio de física de suelos.- 56 págs. Instituto de Geología UNAM.
- FOSTER, S., 1987: Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution, risk and protection strategy.-Proceedings and Information of International Conference: Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants, 38: 69-86.
- FOSTER, S. & HIRATA, R., 1991: Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas.- 81 págs. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú.

- FOSTER, S., HIRATA, R., GOMES, D., D'ELIA, M. & PARIS, M., 2002: Protección de la Calidad del Agua Subterránea: Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. – 115 págs. Banco Mundial, Washington, D.C., USA.
- HENNINGSEN, D., 1965: La Fila Costeña del Pacífico de Costa Rica y su posición dentro del sistema montañoso Centroamericano meridional. –Edic. especial, Dir. Gener. Geología, Minas y Petróleo, Min. de Industria y Comercio, Costa Rica. 90 págs.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA DE ESPAÑA/UNESCO, 1981: Métodos de Cálculo del Balance Hídrico. Guía Internacional de Investigación y Métodos.- 183 págs.
- KEAREY, P., BROOKS, M. & HILL, I., 2002: An Introduction to Geophysical Exploration [3ª ed.]- 262 págs. Blackwell Science, Oxford, Inglaterra.
- LINKIMER, L & AGUILAR, T., 2000: Estratigrafía de Costa Rica.- En: DENYER, P. & KUSSMAUL, S.: Geología de Costa Rica.- Cartago. Ed. Tecnológica, 63-86.
- LORENZO, E. & HERNÁNDEZ, M.C., 1995: Prospección geofísica en yacimientos arqueológicos con geo-radar en España. Dos casos: Numancia y El Paular.- Física de la Tierra, 7: 193-205.
- LUNDBERG, N., 1982: Evolution of the slope landward of the Middle America Trench Nicoya Peninsula, Costa Rica. en- Leggett, J. K, (ed): Trench-Forearc Geology: Sedimentation and Tectonics on Modern and Ancient Plate Margins: 131-147pp, London.
- MARTINEZ, P.E., MARTINEZ, P. & CASTAÑO, S., 2006: Fundamentos de Hidrogeología.- 284 págs. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España.
- MONTERO, W., DENYER, P., BARQUERO, R., ALVARADO, G., COWAN, H., MACHETTE, M., HALLERM K & DART, R., 1998: Map an database of Quaternary faults and folds in Costa Rica and its offshore regions. – Reporte preliminar de USGS.



- MORA, S.1979: Estudio geológico de una parte de la región sureste del Valle del General, provincia de Puntarenas, Costa Escuela Centroamericana de Geología. UCR [Tesis Lic.]-3 Volúmenes.
- MURILLO, D., 2008: Aplicación ambiental del método de resistividad eléctrica en el modelado del acuífero costero en playa Panamá, Guanacaste, Costa Rica. – Rev. Geológica de América Central (38): 21-31.
- ONU, 1972: Manual de instrucciones, estudios hidrológicos.- 540 págs. ONU publicación N° 70, San José, Costa Rica.
- PNUMA, 2010: Manejo Integrado de Aguas y Áreas Costeras.- Curso Subregional, 22-24 de junio 2010.
- PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN EN DESARROLLO URBANO SOSTENIBLE (PRODUS-UCR), 2009: Mapa 1. Zonificación de uso del suelo para Golfito, Sector Guaycará, Golfito y Pavón Norte.- Escala 1:50000
- PROYECTO DE LEY 17742: Ley para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico.- Diario oficial La Gaceta N° 68, San José, Costa Rica, 7 de abril 2014.
- SCHOSINSKY, G. & LOSILLA, M., 2000: Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual.- Rev. Geológica de América Central (23): 43-55. San José, Costa Rica.
- SCHOSINSKY, G., 2006: Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. – Rev. Geológica de América Central (34-35): 13-30. San José, Costa Rica.
- SELKER, J., KELLER, C. & MCCORD, J., 1999: Vadose zone Processes.- 339 págs. Lewis Publishers, Florida, USA.
- TARBUCK, E. & LUTGENS, F., 2005: Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física [8ª ed.]- 686 págs. Pearson Education, Madrid, España.
- TOURNON, J. & ALVARADO, G.,1997: Mapa Geológico de Costa Rica, Folleto explicativo, escala 1:500 000. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 60-61 págs.

VAN ZUIDAM, R. A., 1986: Aerial photointerpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping.- 442 págs. Smits Publishers, The Hague

## **ANEXOS**

SECCION DE MICROFILM

ROLLO	IMAGEN
209	300
FECHA	FIRMA
4 NOV 1991	<i>[Signature]</i>

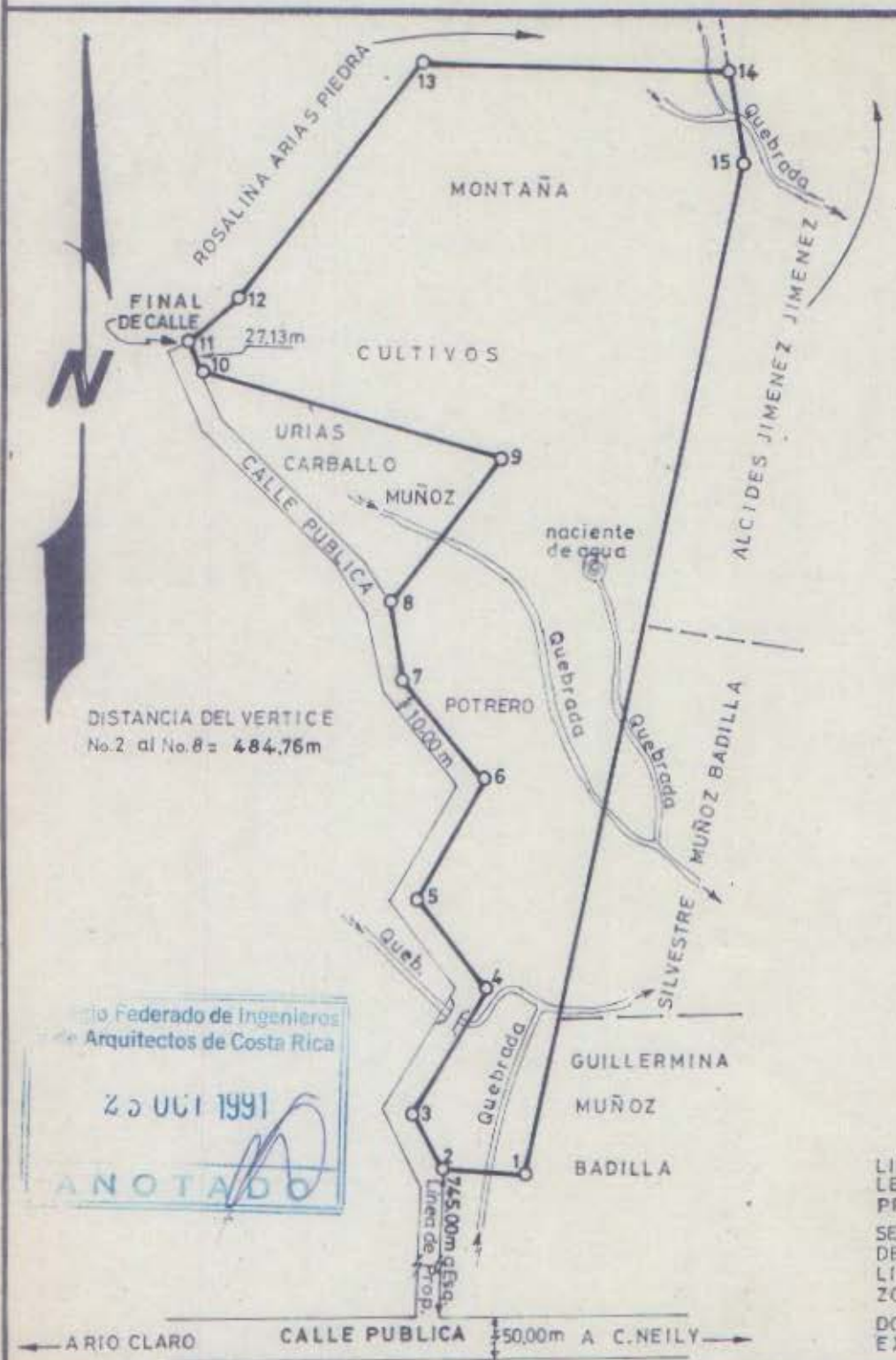
**REGISTRO NACIONAL CATASTRO NACIONAL**

El presente plano ha cumplido con los requisitos exigidos por la ley, por lo que ha sido registrado bajo el siguiente número:

*F-12711-91*

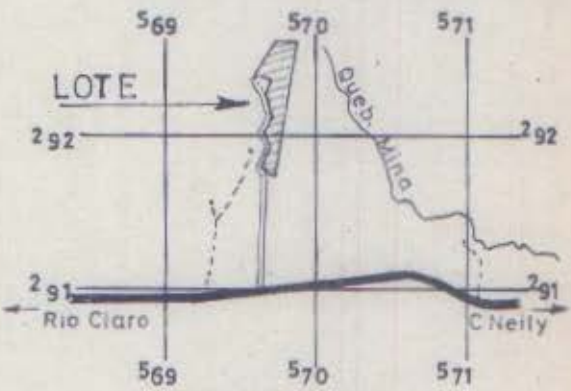
31 OCT 1991 *[Signature]*

Fecha Firma Autorizada



**DERROTERO**

LINEA	RUMBO		DISTANCIA	
	g	'	m	cm
1-2	N	80 17 W	62.03	
2-3	N	28 51 W	43.68	
3-4	N	31 25 E	105.14	
4-5	N	36 43 W	82.50	
5-6	N	28 24 E	99.53	
6-7	N	39 53 W	92.07	
7-8	N	11 31 W	61.84	
8-9	N	39 22 E	132.70	
9-10	N	75 20 W	232.50	
10-11	N	31 06 W	27.13	
11-12	N	45 44 E	53.02	
12-13	N	37 50 E	216.11	
13-14	S	88 20 E	231.36	
14-15	S	10 09 E	68.00	
15-1	S	12 02 W	758.80	



**UBICACION**  
Hojas. PIEDRAS BLANCAS Y GOLFITO. Esc. 1:50,000

LINDEROS SON EXISTENTES  
LEVANTAMIENTO POLAR POLIGONAL CERRADA  
PRECISION ANGULAR 00° 02' PRECISION LINEAL 0.10m  
SE INSCRIBE ESTE PLANO SIN PERJUICIO DE LOS DERECHOS DEL ESTADO PARA TODOS LOS EFECTOS DE LAS LIMITACIONES QUE LAS LEYES DE AGUAS Y CAMINOS Y ZONA MARITIMO-TERRESTRE ESTABLECEN.  
DOY FE QUE LA CALLE QUE INDICO COMO ACCESO, EXISTE EN LA REALIDAD.

**PLANO DEL TERRENO** CEDULA DE RESIDENCIA  
PROPIEDAD DE: SANTIAGO LOPEZ LOPEZ 115-28330-11238

VENDE A: FRANCISCO ULLOA CISNEROS  
CEQUILA No. 1-305-078

SITUADO EN: RIO CLARO  
DISTRITO: 3 GUAYCARA  
CANTON: 7 GOLFITO  
PROVINCIA: 6 PUNTARENAS

**INFORMACION REGISTRO PUBLICO**  
ES PARTE  
TOMO: 2800  
FOLIO: 303  
NUMERO: 35569  
ASIENTO: 1  
AREA: 31 ha 9375.00 m<sup>2</sup>

AREA  
14ha9043.31m<sup>2</sup>

ESCALA  
1:5000

FECHA  
SEPTIEMBRE 1991

PROTOCOLO  
TOMO: 5060  
FOLIO: 160

*[Signature]*  
EDGAR CASTRO BARRAZA  
Ingeniero Topografo Profesional. I.T.P. 1086



BOSQUE

NACIENTE 1

BOSQUE HUMEDAL  
NACIENTE 2

QUEBRADA BOSQUE

**PLANTA TOPOGRAFICA**  
SIN ESCALA

PROPIETARIO:

**INDICE**

**1** PLANTA DE CURVAS DE N  
DETALLE DE CALLE INTE

**Resumen información de pozos SENARA**

Pozo	Latitud Lambert Sur	Longitud Lambert Sur	Profundidad (m.b.n.s.)	Nivel estático (m)	Tipo de pozo	Uso	Litología resumida	Caudal (L/s)	Diametro perf. (pulg.)	Diámetro de armado (pulg.)	Rejilla (m.b.n.s)
GF-31	287559	572452	125	Artesiano	Perforado	Industrial	0-59,48 Intercalaciones de arcillas y arenas finas; 59,48-99 arcilla gris con piedras; 99-123,8 arcilla, 123,8- 125,2 piedra y agua en cantidad	15	12	10	121,92-125,2
GF-41	283189	572802	35	3,64	Perforado	Abastecimiento público	0-9 suelo arcilloso plástico; 9-15 arcilla, 15-32 arenas finas y medias	0,5	12	8	20-26
GF-32	287389	572452	123.83	Artesiano	Perforado	Industrial	0-76,2 Intercalaciones de Arcillas; 76,2-82 arena y piedras; 82-119 arcillas gris; 119- 124 piedras grandes y agua	12	12	10	118,9-124
GF-21	289188	572302		s.d.	Perforado	Industrial	s.d	12,6	s.d	s.d	s.d
GF-17	286788	572302	118,95	s.d.	Perforado	Industrial	0-38 Intercalaciones de arcillas y arenas finas; 38-56 Sedimento blanco y piedra de cal; 56-119 Intercalaciones de arcillas y balastre fino; 119-122 balastre y arena	9,45	12	s.d	s.d
GF-19	286988	569302	88	Artesiano	Perforado	Industrial	0- 84,49 Intercalaciones de arcillas; 84,49-87,5 Balastre	17,32	12	10	s.d
GF-34	287189	569552	94,83	Artesiano	Perforado	Industrial	0-61 Arcilla gris arenosa; 61-76 arena y piedra; 76-88 arcilla; arena y piedras	10	12	10	88-39-94,8
GF-20	289089	569252	82,35	s.d.	Perforado	Industrial	0-80,3 Intercalaciones de arcillas; 80,3-82,35 Balastre blanco	15,75	12	10	s.d

Pozo	Latitud Lambert Sur	Longitud Lambert Sur	Profundidad (m.b.n.s.)	Nivel estático (m)	Tipo de pozo	Uso	Litología resumida	Caudal (L/s)	Diametro perf. (pulg.)	Diámetro de armado (pulg.)	Rejilla (m.b.n.s)
GF-18	287189	572802	127,49	Artesiano	Perforado	Industrial	0-17 Arcillas; 17-36 Cenizas volcánicas blancas; 36-58 arenas finas; 58- 127 Intercalaciones de arcillas arenas finas y balastre fino;	18,93	12	10	s.d
GF-22	288789	566603	89,79	s.d	Perforado	Industrial	0-78 Intercalaciones de arcillas; 78-87 arena y piedra suelta con agua; 87- 89,67 piedra grandes y agua	20,79	12	10	s.d
GF-33	287138	572627	126,17	s.d.	Perforado	Industrial	0-57,9 Interclaciones de arcillas y arenas finas; 57,9-119 arcilla azul con piedras; 119-126 balastre	12	10	8	119-126,17
GF-14	290089	565702	11,29	s.d	Perforado	Industrial	0-5,49 tierra amarilla; 5,49-7 Arena; 7-11,29 Balastre blanco agua	18,93	16	14	5,27-11,29
GF-30	287088	572242	122,61	Artesiano	Perforado	Industrial	0-61 Intercalaciones de arcillas y arenas finas; 61-88 Arcilla gris con conchas y piedras; 88- 91,5 arena gruesa con piedras; 91,5-118,95 arcilla gris con piedras; 118,95-120,5 arena gruesa y piedras	10	12	10	118-120
GF-15	290888	565602	10	s.d	Perforado	Industrial	0- 4,58 tierra amarilla; 4,58-10 balastre blanco	s.d.	16	14	5,6-10

Pozo	Latitud Lambert Sur	Longitud Lambert Sur	Profundidad (m.b.n.s.)	Nivel estático (m)	Tipo de pozo	Uso	Litología resumida	Caudal (L/s)	Diametro perf. (pulg.)	Diámetro de armado (pulg.)	Rejilla (m.b.n.s)
PI-3	291470	567318	60	11,44	Perforado	s.d	0 a 12m arcilla impermeable, 12 a 18m arena gruesa, grava, guijarros y cantos de caliza, 18 a 20 m arcilla, 20 a 24 grava subredondeada y arena gruesa, 24 a 26 arena muy fina, 26 a 28 arcilla, 28 a 32 grava, 32 a 60 arena muy fina, limo y arcilla.	6	12	8	14-18; 18-20 y 24-28
PI-4	291350	567600	40	16	Perforado	Abastecimiento público	0 a 10m Aluvión grueso, 10 a 15 Arcilla con arena marron de baja permeabilidad, 15 a 38m arenas con arcilla gruesa permeabilidad aparente alta.	9,5	10	6	19-38
PI-5	293500	565500	33	5,64	Perforado	Doméstico	0-23 aluvión; 23-33 Lutita	0,5	10	6	8,0-22

\*s.d= sin datos





**RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS**  
**Laboratorio de Suelos**  
 Tel-Fax: 2279-7052; e-mail: [labsuelos@inta.go.cr](mailto:labsuelos@inta.go.cr)



LDS F 17

**NOMBRE:** JEAN POL SMITH

**FECHA:**

CICG-

30/07/2015

**UBICACIÓN:** FECHA RECOLECCION.7 AL 9 DEL 2015

**FAX:**

**INFORME #:**

IDENT.		Textura							DESCRIPCIÓN
# LAB.	CAMPO	arena	Arcilla	Limo	Text	M.o	D.a	D.Real	
3365	GF-1	26,0	22,00	52,00	FL	3,15	1,05	2,07	60047491/957466
3366	GF-2	30,0	20,00	50,00	FL	2,05	1,01	2,03	642897/69512
3367	GF-3	50,0	30,00	20,0	FA a	1,05	1,11	2,15	642682/75838
3368	GF-4	64,0	18,00	18,0	F a	0,51	1,18	2,23	645699/75243
3369	GF-5	18,0	32,00	50,0	FAL	0,71	1,08	2,07	645737/67554
3370	GF-6	18,0	30,00	52,0	FAL	1,05	1,11	2,13	645695/700337
3371	GF-7	62,0	16,00	22,0	F a	2,71	1,17	2,22	608818/958350
3372	GF-8	34,0	<b>16,00</b>	50,0	F a	0,91	1,15	2,24	642884/73708
3373	GF-9	50,0	38,00	12,0	A a	0,31	1,14	2,19	692625/73764
3374	GF-10	60,0	18,0	22,0	F a	0,41	1,19	2,26	642528/73788
3375	GF-11	46,0	22,0	32,0	F	2,35	1,04	2,01	6062851/959034
3376	GF-12	18,0	26,00	56,0	FL/FAL	1,15	1,09	2,12	641311/74354



### Datos de campo Sondeos eléctricos verticales (SEVs)

#### SEV-1

Coordenadas 292128 N 567672 E

Elevación 47 m

AB/2	MN/2	I (mA)	V (mV)	Resistividad aparente (ohmm)
1	0,25	1,85	29,11	92,45
1,5	0,25	1,38	11,56	114,96
2	0,25	1,45	7	119,28
2,5	0,25	1,36	4,74	135,88
3	0,25	3,41	7,48	123,29
4	0,25	6,12	8,4	137,4
5	0,25	7,88	8,92	177,33
5	1	3,66	10,04	103,3
6	1	7,15	12,14	93,35
8	1	16,87	13,27	77,87
10	1	33,41	14	65,17
10	2	15,06	13,2	66,1
12,5	2	28,19	13,38	56,77
15	2	41,92	13,34	55,24
20	2	80,63	14,15	54,59
25	2	136,95	15,13	53,9
25	5	50,79	14,22	52,76
30	5	76,05	14,57	52,68
35	5	112,7	15,45	51,69
40	5	143,3	15,06	52
50	5	232,66	15,45	51,62
50	10	104,55	15,12	54,53
60	10	158,09	15,56	54,12
80	10	311,65	15,6	49,54
100	10	504,8	15,39	47,4
100	20	256,74	15,68	46,05
120	20	398,29	15,11	41,71
150	20	344,98	7,1	35,71
200	20	567,71	4,56	24,96
250	20	713,38	3,13	21,37
250	50	716,38	7,43	19,55
300	50	474,31	2,94	17,03

**SEV-2****Coordenadas** 286701 N 568262 E**Elevación** 14 m

<b>AB/2</b>	<b>MN/2</b>	<b>I (mA)</b>	<b>V (mV)</b>	<b>Resistividad aparente (ohmm)</b>
1	0,25	1,87	8,39	26,5
1,5	0,25	15,58	13,83	12,2
2	0,25	41,69	14,3	8,49
2,5	0,25	67,57	15,35	8,83
3	0,25	105,62	14,69	7,81
4	0,25	223,26	13,34	5,98
5	0,25	368,75	34,4	14,61
5	1	64,57	15,28	8,92
6	1	96,05	15,18	8,69
8	1	188,16	15,48	8,14
10	1	326,44	16	7,62
10	2	135,82	15,5	8,6
12,5	2	229,89	15,57	8,1
15	2	343,7	15,42	7,79
20	2	513,01	12,15	7,37
25	2	476,63	7,18	7,34
25	5	444,51	17,19	7,29
30	5	413,7	11,26	7,48
35	5	501,32	10,09	7,59
40	5	466,32	7,45	7,91
50	5	371,81	4,07	8,51
50	10	1,95	0	0,62
60	10	2,75	0,01	1,9
80	10	477,8	4,58	9,48
100	10	479,54	3,08	9,98
100	20	481,53	6,32	9,9
120	20	481,14	4,49	10,26
150	20	484,31	2,97	10,65
200	20	39,31	0,24	19,37
250	20	422,01	1,02	11,83
250	50	428	2,66	11,73
300	50	354,4	1,66	12,87

**SEV-3****Coordenadas** 288256 N 567771 E**Elevación** 21 m

<b>AB/2</b>	<b>MN/2</b>	<b>I (mA)</b>	<b>V (mV)</b>	<b>Resistividad aparente (ohmm)</b>
1	0,25	5,52	11,74	12,53
1,5	0,25	16,45	13,9	11,61
2	0,25	29,65	14,42	12,03
2,5	0,25	49,54	15,35	12,04
3	0,25	66,77	14,69	12,35
4	0,25	134,44	15,99	11,91
5	0,25	227,96	16,01	11,01
5	1	39,03	14,7	14,2
6	1	67,04	15,36	12,59
8	1	132,48	15,36	11,47
10	1	229,78	15,63	10,58
10	2	111,33	15,54	10,53
12,5	2	194,96	15,73	9,65
15	2	302,32	15,84	9,09
20	2	514,99	14,32	8,65
25	2	571,6	9,54	8,14
25	5	341,52	15,19	8,38
30	5	536,44	15,47	7,93
35	5	444,99	8,88	7,52
40	5	526,32	7,65	7,19
50	5	747,44	6,38	6,64
50	10	738,54	13,3	6,79
60	10	634,66	7,58	6,57
80	10	479,58	3,18	6,55
100	10	542,64	2,38	6,82
100	20	541,69	4,84	6,74
120	20	7,09	4,59	7,12
150	20	519,2	2,31	7,72
200	20	505,59	1,45	8,92
250	20	548,02	1,08	9,59
250	50	538,8	2,76	9,65
300	50	547,73	2,11	10,6

**SEV-4****Coordenadas** 288988 N 567771 E**Elevación** 24 m

<b>AB/2</b>	<b>MN/2</b>	<b>I (mA)</b>	<b>V (mV)</b>	<b>Resistividad aparente (ohmm)</b>
1	0,25	5,17	10,68	12,18
1,5	0,25	12,9	11,14	11,86
2	0,25	26,56	13,03	12,14
2,5	0,25	39,05	12,34	12,28
3	0,25	60,82	13,12	12,11
4	0,25	121,73	14,4	11,85
5	0,25	205,25	15,15	11,57
5	1	35,42	13,06	13,91
6	1	54,64	13,69	13,78
8	1	99,63	14,2	14,1
10	1	160,16	15,19	14,75
10	2	68,96	13,78	15,07
12,5	2	115,66	14,47	14,96
15	2	186,29	15,32	14,27
20	2	374,94	15,27	12,66
25	2	602,74	14,84	12
25	5	228,47	14,93	12,32
30	5	370,91	15,47	11,47
35	5	522,08	15,48	11,18
40	5	704,94	15,53	10,9
50	5	690,23	9,38	10,56
50	10	511,54	14,21	10,47
60	10	338,1	6,51	10,59
80	10	512,77	5,47	10,55
100	10	343,34	2,46	11,16
100	20	350,6	5,51	11,85
120	20	540,36	5,56	11,31
150	20	540,52	4,61	14,79
200	20	600,6	2,12	10,97
250	20	469,87	0,68	7,06
250	50	413,97	2,51	11,42
300	50	726,12	3,08	11,65

**SEV-5****Coordenadas** 290346 N 567765 E**Elevación** 33 m

<b>AB/2</b>	<b>MN/2</b>	<b>I (mA)</b>	<b>V (mV)</b>	<b>Resistividad aparente (ohmm)</b>
1	0,25	5,52	12,96	13,84
1,5	0,25	13,87	14,37	14,25
2	0,25	27,16	15,18	13,82
2,5	0,25	45,36	15,12	12,96
3	0,25	66,73	14,52	12,22
4	0,25	119,55	15,37	12,87
5	0,25	180,07	15,48	13,47
5	1	36,84	14,49	14,82
6	1	54,24	15,23	15,43
8	1	86,77	15,03	17,14
10	1	123,51	15,07	18,98
10	2	56,79	14,17	18,81
12,5	2	77,77	13,96	21,47
15	2	109,71	14,93	23,63
20	2	193,27	15,45	24,86
25	2	308,22	15,74	24,91
25	5	113,91	14,79	24,48
30	5	173,64	15,18	24,02
35	5	243,05	14,8	22,96
40	5	255,64	11,08	21,45
50	5	573,08	14,93	20,26
50	10	284,5	15,51	20,55
60	10	420,06	14,98	19,6
80	10	265,22	4,84	18,07
100	10	440,32	5,33	18,82
100	20	452,51	11,48	19,14
120	20	90,99	1,54	18,63
150	20	714,48	8,25	20,04
200	20	313,22	1,98	19,67
250	20	297,71	1,18	19,32
250	50	283,01	3,12	20,75
300	50	404,75	2,79	18,98

**SEV-6**

Coordenadas 286704 N 572272 E

Elevación 20 m.

AB/2	MN/2	I (mA)	V (mV)	Resistividad aparente (ohmm)
1	0,25	5,6	11,69	12,28
1,5	0,25	21,72	14,23	9
2	0,25	43,77	15	8,48
2,5	0,25	69,81	15,01	8,36
3	0,25	102,17	15,4	8,46
4	0,25	176,35	14,86	8,44
5	0,25	332,39	17,44	8,22
5	1	73,38	15,49	7,96
6	1	107,86	15,47	7,89
8	1	217,84	16,74	7,61
10	1	351,79	16,41	7,26
10	2	165,17	15,85	7,24
12,5	2	334,28	19,25	6,89
15	2	359,13	13,94	6,74
20	2	648,82	13,47	6,46
25	2	566,13	7,42	6,4
25	5	523,31	17,53	6,31
30	5	565,43	13,32	6,47
35	5	513,75	9,37	6,87
40	5	490,93	7,14	7,2
50	5	506,6	5,06	7,76
50	10	515,92	10,36	7,57
60	10	475,47	6,96	8,05
80	10	636	5,17	8,04
100	10	509,96	2,76	8,42
100	20	517,4	5,8	8,45
120	20	718,17	5,65	8,65
150	20	564,18	2,85	8,76
200	20	398,93	1,23	9,57
250	20	495,37	0,7	6,92
250	50	501,66	2,36	8,87
300	50	509,96	1,7	9,15



**SEV-7**

Coordenadas 288199 N 572273 E

Elevación 25 m.

AB/2	MN/2	I (mA)	V (mV)	Resistividad aparente (ohmm)
1	0,25	4,78	11,17	13,76
1,5	0,25	19,07	13,47	9,71
2	0,25	42,11	14,51	8,53
2,5	0,25	71,83	14,51	7,86
3	0,25	112,51	15,01	7,49
4	0,25	205,41	15,18	7,4
5	0,25	337,83	15,41	7,15
5	1	79,21	15,05	7,16
6	1	117,69	15,03	7,02
8	1	239,3	15,79	6,53
10	1	387,38	15,59	6,26
10	2	186,81	14,9	6,01
12,5	2	318,38	15,43	5,8
15	2	481,27	15,8	5,7
20	2	513,86	9,25	5,6
25	2	637,06	7,41	5,67
25	5	502,26	16,69	6,26
30	5	516,85	12,2	6,49
35	5	613,89	11,26	6,91
40	5	730,24	10,7	7,25
50	5	650,93	6,74	8,05
50	10	657,52	12,74	7,31
60	10	599,33	8,65	7,93
80	10	616,77	5,42	8,7
100	10	861,86	5,09	9,18
100	20	859,97	10,48	9,19
120	20	784,69	6,4	8,97
150	20	660,85	3,37	9,45
200	20	651,96	1,95	9,3
250	20	687,15	1,41	10,02
250	50	696,67	3,52	9,54
300	50	822,36	2,71	9,07

**SEV-8**

Coordenadas 288920 N 572266 E

Elevación 30 m.

AB/2	MN/2	I (mA)	V (mV)	Resistividad aparente (ohmm)
1	0,25	4,55	12,55	16,27
1,5	0,25	17,1	14,64	11,77
2	0,25	36,21	15,2	10,39
2,5	0,25	59,94	15,3	9,92
3	0,25	92,61	15,53	9,42
4	0,25	167,23	14,33	8,58
5	0,25	178,41	9,47	8,32
5	1	65,53	15,67	9,01
6	1	96,95	15,57	8,83
8	1	183,26	15,97	8,62
10	1	299,87	15,88	8,24
10	2	130,53	14,57	8,41
12,5	2	225,98	15,22	8,06
15	2	232,58	10,26	7,66
20	2	179,5	4,19	7,27
25	2	166,11	2,4	7,06
25	5	169,5	6,47	7,2
30	5	361,66	9,38	7,13
35	5	218,52	4,33	7,47
40	5	321,09	4,91	7,57
50	5	40,33	0,52	9,99
50	10	479,31	10,53	8,28
60	10	321,36	5,22	8,93
80	10	295,78	3	10,05
100	10	469,48	2,72	9
100	20	457,35	6,01	9,91
120	20	389,05	3,61	10,19
150	20	440,82	2,56	10,7
200	20	525,39	1,7	10,5
250	20	254,5	0,39	7,56
250	50	265,81	1,42	10,1
300	50	386,8	1,32	9,35

**SEV-9**

Coordenadas 289694 N 572272 E

Elevación 24 m.

AB/2	MN/2	I (mA)	V (mV)	Resistividad aparente (ohmm)
1	0,25	10,39	12,06	6,84
1,5	0,25	29,25	13,41	6,3
2	0,25	55,86	13,97	6,19
2,5	0,25	85,08	14,31	6,54
3	0,25	124,44	14,99	6,77
4	0,25	210,1	15,13	7,21
5	0,25	331,55	15,32	7,24
5	1	64,29	13,86	8,13
6	1	97,71	14,77	8,31
8	1	182,65	15,02	8,14
10	1	294,71	15,16	8
10	2	131,6	14,56	8,34
12,5	2	208,33	15,2	8,72
15	2	293,7	13,57	8,02
20	2	609,57	15,03	7,67
25	2	821,11	13,14	7,81
25	5	373,47	15,25	7,7
30	5	582,64	16,33	7,7
35	5	600,96	12,47	7,82
45	5	612,9	7,8	8
50	5	740,91	7,96	8,35
50	10	727,58	16,24	8,41
60	10	595,88	10,55	9,74
80	10	453,29	4,79	10,46
100	10	669,24	5,06	11,77
100	20	593,52	10,64	13,51
120	20	600,65	9,42	17,25
150	20	648,07	4,79	12,82
200	20	327,86	1,34	12,7
250	20	756,1	2,17	13,99
250	50	758,08	5,05	12,56
300	50	621,07	2,81	12,45

**SEV-10**  
**Coordenadas** 286609 N 570765 E  
**Elevación** 14 m.

AB/2	MN/2	I (mA)	V (mV)	Resistividad aparente (ohmm)
1	0,25	5,34	11,89	13,11
1,5	0,25	20,08	13,67	9,36
2	0,25	42,91	14,32	8,26
2,5	0,25	75,43	15,37	7,92
3	0,25	115,73	15,12	7,34
4	0,25	218,42	15,73	7,21
5	0,25	392,31	17,37	6,94
5	1	66,96	15,05	8,47
6	1	102,28	15	8,06
8	1	199,04	15,36	7,64
10	1	345,69	15,79	7,1
10	2	159,45	15,29	7,23
12,5	2	277,44	15,25	6,57
15	2	443,75	15,7	6,14
20	2	593,51	10,67	5,59
25	2	424,61	4,94	5,68
25	5	434,06	13,3	5,78
30	5	477,5	10,6	6,1
35	5	x	x	x
40	5	541,24	7	6,4
50	5	578,67	5,01	6,73
50	10	477,75	8,31	6,56
60	10	595,54	7,39	6,82
80	10	639,24	4,62	7,15
100	10	405,94	1,77	6,8
100	20	418,83	4,04	7,28
120	20	390,44	2,56	7,2
150	20	469,1	2,1	7,78
200	20	571,92	1,5	8,14
250	20	526,1	0,93	8,58
250	50	523,36	2,51	9,06
300	50	431,88	1,13	7,2

**SEV-11**  
**Coordenadas** 288289 N 570763 E  
**Elevación** 25 m.

AB/2	MN/2	I (mA)	V (mV)	Resistividad aparente (ohmm)
1	0,25	6,55	11,29	10,16
1,5	0,25	18,1	13,13	9,97
2	0,25	32,23	13	9,98
2,5	0,25	47,2	13,29	10,95
3	0,25	66,78	13,72	11,54
4	0,25	127,02	15,11	11,91
5	0,25	187,96	15,38	12,82
5	1	43,11	14,28	12,49
6	1	62,16	14,18	12,54
8	1	118,55	14,73	12,3
10	1	208,99	15,45	11,5
10	2	91,95	14,46	11,85
12,5	2	168,25	15,18	10,79
15	2	283,31	15,54	9,52
20	2	600,43	15,42	7,99
25	2	687,16	9,5	6,74
25	5	442,25	16,37	6,98
30	5	567,62	12,51	6,06
35	5	575,91	9,02	5,9
40	5	513,01	5,98	5,77
50	5	577,04	4,57	6,16
50	10	583,92	7,03	4,54
60	10	710,83	1,22	0,94
80	10	709,57	1,63	2,27
100	10	617,93	2,84	7,15
100	20	619,4	5,65	6,88
120	20	725	4,7	7,12
150	20	587,75	2,6	7,67
200	20	548,84	1,38	7,84
250	20	659,97	1,14	8,41
250	50	656,36	2,87	8,25
300	50	434,64	1,33	8,39

**SEV-12**  
**Coordenadas** 289057 N 570762 E  
**Elevación** 26 m.

AB/2	MN/2	I (mA)	V (mV)	Resistividad aparente (ohmm)
1	0,25	3,79	9,05	14,05
1,5	0,25	14,07	12,16	11,88
2	0,25	29,3	14,28	12,06
2,5	0,25	44,58	14,01	12,21
3	0,25	64,72	14,3	12,41
4	0,25	123,46	16,11	13,06
5	0,25	177,67	15,84	13,97
5	1	43,24	14,32	12,49
6	1	59,92	14,42	13,23
8	1	103,95	15,29	14,56
10	1	165,59	15,55	14,6
10	2	61,11	11,31	13,96
12,5	2	132,75	17,56	15,82
15	2	239,34	16,53	11,99
20	2	568,91	15,45	8,45
25	2	675,39	9,99	7,22
25	5	406,1	16	7,42
30	5	674,49	18,65	7,6
35	5	655,28	11,25	6,47
40	5	557,29	2,49	2,21
50	5	532,66	4,87	7,11
50	10	534,67	7,36	5,19
60	10	569,96	7,67	7,39
80	10	515,09	4,07	7,82
100	10	773,19	4,06	8,17
100	20	772,03	8,5	8,3
120	20	517,01	4,06	8,64
150	20	530,41	2,66	8,72
200	20	717,32	2,1	9,11
250	20	602,29	1,07	8,68
250	50	604,98	2,68	8,34
300	50	613,12	2,04	9,17

**SEV-13**

**Coordenadas** 289709 N 570763 E  
**Elevación** 27 m.

<b>AB/2</b>	<b>MN/2</b>	<b>I (mA)</b>	<b>V (mV)</b>	<b>Resistividad aparente (ohmm)</b>
1	0,25	5,4	11,87	12,95
1,5	0,25	15,8	13,58	11,81
2	0,25	27,62	13,84	12,39
2,5	0,25	43,95	14,38	12,72
3	0,25	65,41	13,46	13,28
4	0,25	120,51	16,08	13,36
5	0,25	215,65	18,34	13,32
5	1	38,68	14,18	13,83
6	1	67,15	16,53	13,53
8	1	131,95	15,9	11,92
10	1	246,04	15,85	10,02
10	2	111,61	14,84	10,02
12,5	2	215,83	15,47	8,53
15	2	371,35	16,4	7,67
20	2	551,74	12,36	6,95
25	2	x	x	x
30	5	587,18	5,73	6,87
30	5	588,04	14,71	6,88
35	5	584,97	10,72	6,91
40	5	646,13	9,21	7,05
50	5	661,5	6,34	7,45
50	10	659,81	12,99	7,42
60	10	580,49	8,61	8,25
80	10	512,37	4,46	8,61
100	10	453,8	2,5	8,56
100	20	457,76	5,24	8,63
120	20	733,2	5,75	8,64
150	20	464,78	2,38	8,88
200	20	543,63	1,54	8,79
250	20	689,29	1,3	9,22
250	50	689,75	3,34	9,12
300	50	409,08	1,42	9,53