



ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL BOTADERO DE BASURA DE LA MUNICIPALIDAD DE GOLFITO:

Ubicado en la Fila Manigordo en La Esperanza
de Río Claro, Golfito, Puntarenas.

Investigador Responsable:

Mario Enrique Arias Salguero

Mayo, 2016



ÍNDICE

1	INTRODUCCION	11
1.1	Aspectos generales de la zona	11
1.2	Justificación y objetivo	13
1.3	Actividades realizadas en esta investigación	13
1.4	Investigadores.....	15
2	RÉGIMEN HIDROLÓGICO	16
2.1	Meteorología	16
2.1.1	Precipitación	18
2.1.2	Temperatura	18
2.2	Hidrografía	19
2.2.1	Cuenca Ríos Claro-Caracol.....	22
2.2.2	Microcuenca Río Claro	22
2.2.3	Microcuenca Quebrada Manigordo	22
2.2.4	Microcuencas de la Quebrada Mina	23
2.2.5	Microcuenca del Río Caracol.....	23
3	GEOMORFOLOGÍA.....	24
3.1	Formas de Origen Denudacional	24
3.1.1	Laderas y Montañas de Fuerte Pendiente.....	24
3.2	Formas de Origen Fluvial.....	25
3.2.1	Llanura de Inundación de los Ríos Claro y Caracol.....	25
3.3	Formas de Origen Estructural	26
3.3.1	Fila de Cerros Aislados.....	26
3.3.2	Fallas y Alineamientos.....	26
4	CONTEXTO GEOLÓGICO	28
4.1	Aspectos Geológicos Regionales.....	28
4.1.1	Formación Calizas Golfito.....	28
4.1.2	Formación Quebrada Achiote.....	28
4.1.3	Formación Fila de Cal.....	29

4.1.4	Formación Térraba	29
4.1.5	Formación Charco Azul	30
4.1.6	Depósitos Cuaternarios	31
4.2	Aspectos Tectónicos y Estructurales	31
4.2.1	Fosa Mesoamericana y levantamiento del Coco	31
4.2.2	Falla Longitudinal de Costa Rica	31
4.3	Geología local	33
4.3.1	Unidad de Areniscas finas Quebrada Manigordo	35
4.3.2	Unidad de Conglomerados Quebrada Mina	36
4.3.3	Unidad de Calizas Quebrada Tigra	38
4.3.4	Unidad de Depósitos Recientes	39
5	PROSPECCIÓN GEOFÍSICA	41
5.1.1	Metodología y equipo utilizado	41
5.1.2	Dispositivos electrónicos Schlumberger	42
5.1.3	Realización de Sondeos Eléctricos Verticales	44
5.1.4	Resultados Sondeos Eléctricos Verticales	46
5.1.5	Descripción de perfiles geoelectricos	50
5.1.6	Correlación geológica	53
6	MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLOGICO	57
6.1	Introducción.....	57
6.2	Inventario Pozos	57
6.3	Concesiones Ubicadas dentro del área de estudio	60
6.4	Unidades hidrogeológicas locales.....	62
6.4.1	Unidad Hidrogeológica Río Claro	63
6.4.2	Unidad Hidrogeológica Manigordo	64
6.4.3	Unidad Hidrogeológica La Esperanza	67
	70
6.5	Determinación de redes de flujo.....	71
6.6	Campaña de excavaciones y medición de caudal de un pozo artesanal	77
6.7	Campaña de aforos.....	80
6.7.1	Aforos 1 Río Claro	81

6.7.2	Aforo 2 Río Claro	82
6.7.3	Aforo 1 Río Caracol	84
6.7.4	Aforo 2 Río Caracol	85
6.7.5	Aforo Quebrada Mina	88
7	DETERMINACIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL	89
7.1	Introducción.....	89
7.2	Precipitación zonal	89
7.3	Pendiente en porcentaje	91
7.4	Uso de suelo	93
7.5	Infiltración.....	97
7.6	Parámetros del suelo	103
7.7	Evapotranspiración	112
7.8	Zonas de balance hídrico del área	113
7.9	Resultados	116
8	PROTECCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO	120
8.1	Concepto de vulnerabilidad hidrogeológica	120
8.2	Metodología GOD	121
8.3	Determinación de la vulnerabilidad hidrogeológica para el área de estudio ..	122
8.3.1	Análisis de vulnerabilidad de la Unidad Hidrogeológica La Esperanza ...	122
8.3.2	Análisis de vulnerabilidad de la Unidad Hidrogeológica Manigordo	125
8.3.3	Análisis de vulnerabilidad de la Unidad Hidrogeológica Río Claro	128
8.4	Fuentes potenciales de contaminación detectados dentro del área de estudio.	130
8.4.1	Botadero	130
8.4.2	Manejo de aguas negras en el poblado de la Esperanza	130
8.4.3	Contaminación por actividad pecuaria.....	131
8.4.4	Contaminación asociada a la presencia de cultivos extensivos	131
8.5	Análisis del riesgo de contaminación	134
8.5.1	Determinación del riesgo a la contaminación hidrogeológica	135
9	Propuesta red de monitoreo.....	137
9.1	Red de monitoreo de agua subterránea.....	139

9.2	Red de monitoreo del agua superficial.....	143
10	CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES	145
10.1	Conclusiones	145
10.1.1	Contexto Regional.....	145
10.1.2	Contexto local.....	146
10.1.3	Modelo Hidrogeológico local	147
10.1.4	Recarga Potencial	148
10.1.5	Vulnerabilidad hidrogeológica	148
10.1.6	Situación del botadero de basura.....	149
10.2	Recomendaciones	155
11	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	158

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de Ubicación de la zona de estudio (delimitada por la línea de color rojo), se muestran de color negro las coordenadas en proyección Lambert Norte; de color azul se muestran las coordenadas en proyección CRTM05.....	12
Figura 2: Distribución de las estaciones meteorológicas utilizadas en el presente estudio.....	17
Figura 3: Gráfico donde se muestra la distribución de la precipitación promedio mensual cerca de la zona de estudio.....	18
Figura 4: Gráfico donde se muestra la distribución de la temperatura promedio mensual cerca de la zona de estudio.....	19
Figura 5: Modelo de elevación digital del terreno con los ríos principales y la delimitación de las sub-cuencas y microcuencas.....	21
Figura 6: Mapa Geomorfológico de la zona de estudio.....	27
Figura 7: Mapa Geológico Regional de la zona de estudio. Fuente: Denyer & Alvarado (2007).....	32
Figura 8: Mapa de afloramientos de roca observados.....	34
Figura 9: Areniscas finas grisáceas aflorando en el margen izquierdo del Río Claro (coordenadas 642702 E y 75828 N).....	36
Figura 10: Unidad de Conglomerados aflorando en las cercanías del poblado de Santiago de Caracol.....	37
Figura 11: Calizas aflorando sobre la margen derecha del Río Claro, en el extremo norte del área de estudio.....	38
Figura 12: Secuencia aluvional perteneciente a la unidad de depósitos recientes expuesta sobre el margen del Río Claro.....	39
Figura 13: Mapa geológico del área de estudio.....	40
Figura 14: Equipo utilizado para realizar los sondeos eléctricos verticales (SEV).....	41
Figura 15: Esquema simplificado de un Sondeo Eléctrico: A medida que se abre la distancia AB, aumenta la profundidad de investigación.	43
Figura 16: Esquema de una serie de SEV a lo largo de un área dada, esto permite la interpretación del contexto geológico. Tomado de Sánchez (2014).....	43

Figura 17: Mapa de ubicación de los sondeos eléctricos verticales (SEV) realizados en las cercanías del poblado de La Esperanza de Río Claro.....	45
Figura 18: Gráficos obtenidos de la inversión de datos para los SEVs del 1-6.....	48
Figura 19: Gráficos obtenidos de la inversión de datos para los SEV del 7-12.....	49
Figura 20: Gráfico de la inversión obtenido para el SEV 13.....	50
Figura 21: Perfil geoelectrico 1, orientación W – E.....	51
Figura 22: Perfil geoelectrico 2, orientación N-S.....	52
Figura 23: Perfil geológico 1, obtenido a partir de la interpretación de SEV4, SEV12 y SEV8 orientación E-W.....	54
Figura 24: Perfil geoelectrico 2, orientación N-S.....	56
Figura 25: Mapa de elementos hidrogeológicos: pozos.....	59
Figura 26: Mapa de ubicación de las concesiones de agua, presentes en la base de datos de la Dirección de Aguas.....	61
Figura 27: Perfil esquemático del modelo hidrogeológico para el área de la zona aluvial, basado en información de pozos.....	69
Figura 28: Perfil esquemático del modelo hidrogeológico conceptual	69
Figura 29: Mapa hidrogeológico general del área de estudio	69
Figura 30: Mapa donde se muestra la dirección de flujo del agua subterránea para la Unidad Hidrogeológica La Esperanza. Nótese que las líneas equipotenciales se extienden más allá del área de estudio.....	72
Figura 31: Mapa donde se muestra la dirección de flujo del agua subterránea para el nivel inferior de la Unidad Hidrogeológica Manigordo. Nótese que las líneas equipotenciales son influenciadas por la distribución de los pozos.....	74
Figura 32: Mapa donde se muestra la dirección de flujo del agua subterránea para la Unidad Hidrogeológica Río Claro. Nótese que las líneas equipotenciales son influenciadas por la distribución de los pozos.....	76
Figura 33: Hoyadora manual utilizada para la prospección del nivel de agua más somero	77
Figura 34: Ejecución de una perforación manual, nótese en la parte inferior la presencia de un nivel de agua a aproximadamente 1 m de profundidad.....	78
Figura 35: Medición de caudal en pozo artesanal.....	80
Figura 36: Perfil esquemático, aforo 1 y 2 Río Claro.....	83

Figura 37: Aforo realizado en una sección del Río Claro.....	84
Figura 38: Perfil esquemático, aforo 1 y 2 Río Caracol.....	86
Figura 39: Aforo realizado en una sección del Río Caracol.....	87
Figura 40: Distribución de la precipitación promedio anual, utilizado para la elaboración del balance hídrico de suelos.....	90
Figura 41: Mapa de pendientes de la zona de estudio, en los rangos requeridos por la metodología.....	92
Figura 42: Mapa de distribución del uso de suelo.....	94
Figura 43: Mapa de Kv para el área de estudio.....	96
Figura 44: Pruebas de infiltración de campo realizadas mediante la metodología del doble anillo.....	97
Figura 45: Mapa de ubicación de pruebas de infiltración realizadas y rangos de infiltración obtenidos.....	100
Figura 46: Mapa de distribución de la infiltración promedio en mm/día.....	102
Figura 47: Proceso de toma de muestras de suelo.....	103
Figura 48: Distribución de tipos de texturas de suelos y ubicación de los puntos de muestreo efectuados.....	105
Figura 49: Distribución espacial de porosidad de suelos.....	107
Figura 50: Distribución espacial de la capacidad de campo.....	109
Figura 51: Distribución espacial de la densidad aparente.....	110
Figura 52: Distribución espacial del punto de marchitez.....	111
Figura 53: Mapa de zonas de balance definidas para el área de estudio.....	114
Figura 54: Mapa de distribución de la recarga potencial.....	118
Figura 55: Mapa de distribución de la escorrentía anual.....	119
Figura 56: Diagrama esquemático de la metodología GOD, para la determinación de la vulnerabilidad hidrogeológica. Fuente: Foster, <i>et al.</i> 2002.....	122
Figura 57: Vulnerabilidad hidrogeológica para la unidad acuífera La Esperanza.....	124
Figura 58: Vulnerabilidad hidrogeológica para la Unidad hidrogeológica Manigordo...	127

Figura 59: Vulnerabilidad hidrogeológica para la Unidad hidrogeológica Río Claro...	129
Figura 60: Contaminación por descarga de aguas negras sobre la vía pública en el poblado de La Esperanza de Río Claro.....	131
Figura 61: Mapa de fuentes potenciales de contaminación detectadas en el área de estudio.....	133
Figura 62: Esquema conceptual para la evaluación del riego de los recursos hídricos subterráneos. (Tomado de Foster <i>et al.</i> , 2002).....	134
Figura 63: Mapa de riesgo de contaminación para el área de estudio.....	136
Figura 64: Distribución espacial de los piezómetros propuestos para la zona cercana al vertedero.....	142
Figura 65: Ubicación de sitios propuestos para el monitoreo de agua superficial.....	144
Figura 66: Presencia de cárcavas o sumideros en la zona del botadero.....	150
Figura 67: Rotulación existente en el botadero.....	151
Figura 68: Portón de acceso al botadero.....	152
Figura 69: Escases de material de cobertura sobre los desechos en el botadero.....	153
Figura 70: Impacto visual del botadero.....	154

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Listado de afloramientos de roca visitados, (coordenadas Lambert Norte)...33	33
Cuadro 2: Sondeos Eléctricos Verticales realizados.....44	44
Cuadro 3: Resumen del modelado planteado para cada uno de los SEV, realizado en el área de estudio.....46	46
Cuadro 4: Listado de pozos registrados en las bases de datos de SENARA.....58	58
Cuadro 5: Listado de las concesiones de agua presentes dentro del área de estudio. Fuente: Dirección de Aguas.....60	60
Cuadro 6: Modelo hidrogeológico general establecido para el área de estudio.....63	63
Cuadro 7: Resumen de los pozos en los que se definió la Unidad Hidrogeológica Río Claro.....63	63
Cuadro 8: Resumen de los pozos en los que se definió el nivel de agua inferior de la Unidad hidrogeológica Manigordo.....66	66
Cuadro 9: Pozos y perforación manual en los que se determinó el nivel de agua para la unidad hidrogeológica La Esperanza.....67	67
Cuadro 10: Ubicación de pozos y excavación utilizados para la definición de la red de flujo para la Unidad Hidrogeológica La Esperanza.....71	71
Cuadro 11: Ubicación de los pozos con los que se definió la red de flujo para el nivel de agua inferior de la Unidad Hidrogeológica Manigordo.....73	73
Cuadro 12: Ubicación de los pozos y SEV con los que se definió la red de flujo para la Unidad Hidrogeológica Río Claro.....75	75
Cuadro 13: Resumen de excavaciones con perforadora manual Stilh.....79	79
Cuadro 14: Medición de caudal y nivel de agua en un pozo excavado, ubicado en las cercanías del poblado de La Esperanza.....79	79
Cuadro 15: Resultados Aforo 1 Río Claro.....81	81
Cuadro 16: Resultados aforo 2 Río Claro.....82	82
Cuadro 17: Resultados Aforo 1, Río Caracol.....85	85
Cuadro 18: Resultados aforo 2, Río Caracol.....85	85

Cuadro 19: Precipitación promedio mensual en mm de las estaciones meteorológicas ubicadas en el área de estudio.....	91
Cuadro 20: Ubicación y resultados obtenidos para cada una de las pruebas de infiltración realizadas.....	98
Cuadro 21: Distribución y resultados de las pruebas de suelos ejecutadas.....	104
Cuadro 22: Resultados obtenidos de balance hídrico. Léase: CC: Capacidad de Campo, PM: Punto de Marchitez, DA: Densidad Aparente, Kv: Factor vegetación, Kp: Factor pendiente, Rp: Recarga potencial.....	115
Cuadro 23: Valoración del índice de vulnerabilidad hidrogeológica para la Unidad Hidrogeológica La Esperanza.....	123
Cuadro 24: Valoración del índice de vulnerabilidad hidrogeológica para el nivel superior de la Unidad Hidrogeológica Manigordo.....	125
Cuadro 25: Valoración del índice de vulnerabilidad hidrogeológica para el nivel inferior de la Unidad Hidrogeológica Manigordo.....	126
Cuadro 26: Valoración del índice de vulnerabilidad hidrogeológica para la Unidad Hidrogeológica Río Claro.....	128
Cuadro 27: Matriz para la determinación del riesgo a la contaminación hidrogeológica (Arias, 2011).....	135
Cuadro 28: Propuesta de ubicación de piezómetros.....	140
Cuadro 29: Propuesta de sitios para el monitoreo de la calidad de aguas subterráneas.....	143

1 INTRODUCCION

1.1 Aspectos generales de la zona

La zona de estudio comprende un área aproximada a los 49 km², se extiende entre el margen izquierda del río Claro y el margen derecho del río Caracol, hasta la intersección de los mismos en el río Coto Colorado; dentro del área se encuentran los poblados: La Esperanza, Santiago de Caracol y Cerro Café. El sector pertenece al distrito de Piedras Blancas, cantón de Golfito, Provincia de Puntarenas, además es importante mencionar que la carretera interamericana sur atraviesa el área de estudio y se encuentra a aproximadamente 1 km del vertedero de Golfito.

La figura 1, muestra el mapa de ubicación del área de estudio, su base topográfica comprende las hojas Piedras Blancas y Golfito, escala 1:50 000 pertenecientes al Instituto geográfico Nacional (IGN).

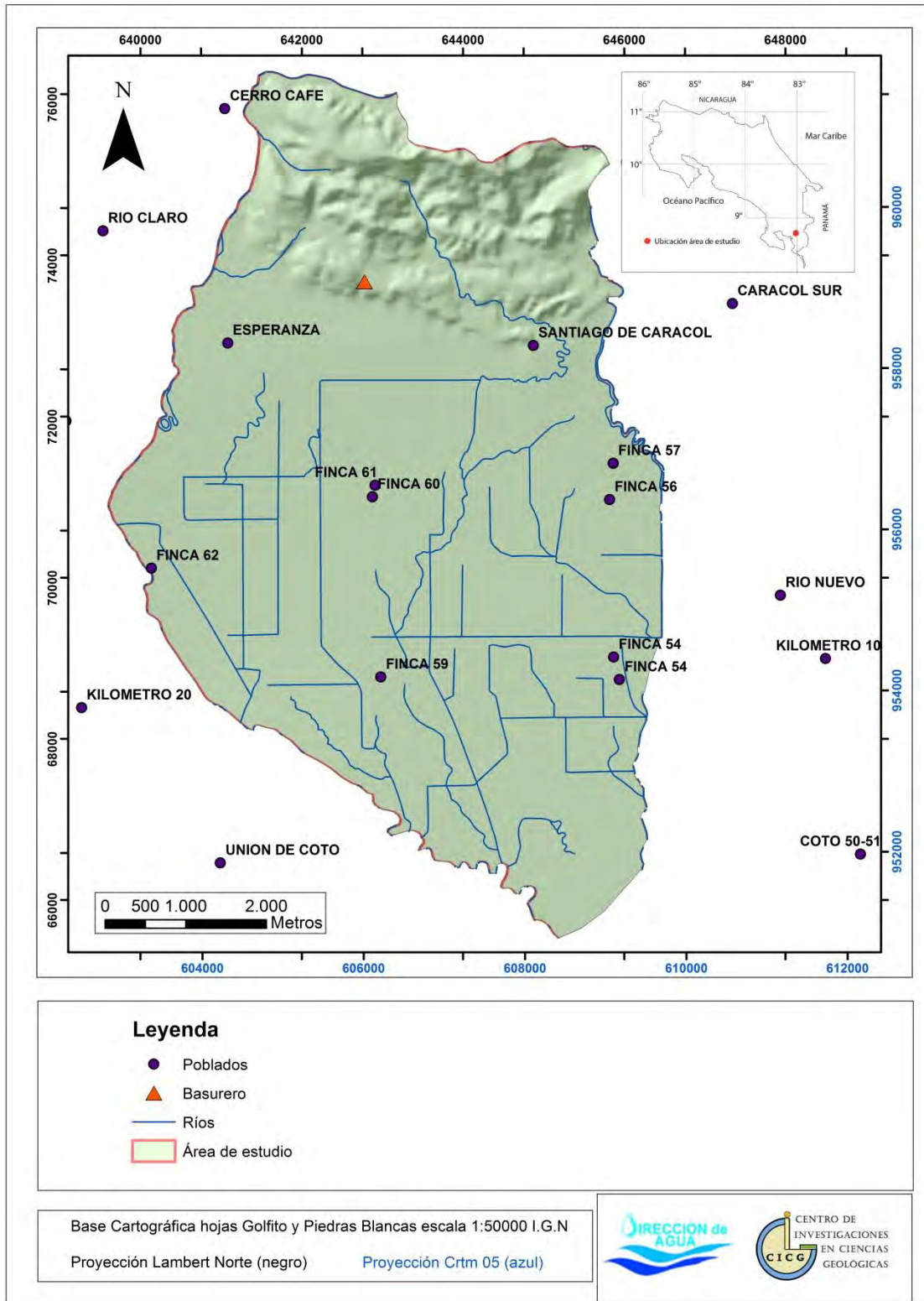


Figura 1: Mapa de Ubicación de la zona de estudio. Fuente elaboración propia.

1.2 Justificación y objetivo

El Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas(CICG) realizó el estudio Hidrogeológico del área de influencia indirecta del botadero de basura de la municipalidad de Golfito con el fin de contribuir al cumplimiento de la resolución ordenada por la Sala Constitucional No. 12-002448-0007-CO, en la cual se le indica al Director de Aguas del Ministerio de Ambiente y Energía, que se debe realizar un estudio que dé certeza sobre la existencia de mantos acuíferos que pudieran ser afectados por la operación del botadero así como del recurso hídrico superficial; y que con el cual se pueda asegurar acciones que no impacten las fuentes de agua ni calidad de las aguas subterráneas.

El objetivo de esta investigación es generar un estudio hidrogeológico del área de influencia directa del Botadero de Basura de la Municipalidad de Golfito, ubicado en la Fila Manigordo, La Esperanza de Río Claro, Golfito, Puntarenas que sirva como insumo técnico para la gestión del botadero y protección del recurso hídrico.

1.3 Actividades realizadas en esta investigación

- Definición del área de influencia del estudio.
- Valorar, para sus efectos, todos los estudios realizados hasta el momento en esta zona de estudio.
- Mapa de ubicación.
- Geología local: realizar un mapeo al mejor detalle de escala disponible que incluya una descripción de las unidades geológicas locales, mapa de afloramientos, mapa geológico local y los perfiles correspondientes.
- Realizar un mapa geomorfológico al mejor detalle de escala disponible.
- Para el área de influencia, se solicita un inventario de pozos y manantiales: recopilar la información existente de pozos, y manantiales en los registros de SENARA y la Dirección de Agua del MINAE y los posibles pozos ilegales identificados en comprobación de campo.
- Aportar ficha técnica para cada uno de los pozos registrados en la Dirección de Agua y los posibles pozos ilegales identificados, donde se debe incluir la siguiente información como mínimo: número de pozo o código de identificación, ubicación en coordenadas, elevación topográfica, profundidad del pozo, nivel de agua, caudal, uso (doméstico, industrial, turístico, comercial, agroindustrial y agropecuario), tipo (perforado, excavado), prueba de bombeo, perfil del armado, fotografía, litología y otros datos existentes.

- Aportar ficha técnica para cada uno de las nacientes identificadas, donde se debe aportar la siguiente información como mínimo: coordenadas, fotografía, código de identificación, referencia del nivel brote de agua, detalle descriptivo de la captación, uso. Con el fin de determinar un caudal medio de extracción.
- Presentar resumen del inventario a manera de tabla.
- Aportar mapa de ubicación de pozos, manantiales y captaciones superficiales.
- Datos climatológicos: Utilizar los datos de las estaciones meteorológicas cercanas o existentes en la zona para caracterizar la zona (precipitación, temperatura, evaporación, evapotranspiración y brillo solar).
- Muestreo y análisis de suelos. Determinar la capacidad de campo, textura, porosidad, densidad del suelo y punto de marchitez para las unidades hidrogeológicas identificadas del balance hídrico de suelos. La cantidad de pruebas dependerá de la distribución por área de las formaciones adyacentes. Presentar la ubicación de las pruebas geo-referenciadas con GPS y en un mapa.
- Realizar pruebas de infiltración de campo. La cantidad de pruebas, dependerá de la distribución por área de las formaciones adyacentes. Presentar la ubicación de las pruebas geo-referenciadas con GPS y en un mapa.
- Efectuar la menos una prueba de bombeo en uno de los pozos existentes, para determinar los parámetros hidráulicos (T,k,s) de las rocas acuíferas de la zona. En el caso que no existan condiciones técnicas para tal prueba, se utilizarán los datos que estén reportados en los informes de perforación existentes.
- Elaborar el respectivo mapa de curvas equipotenciales, con su debida georeferenciación.
- Proponer una red de monitoreo subterránea diseñada de tal forma que alerte ante eventuales cambios importantes en la calidad del agua por efectos del botadero. El diseño debe incluir al menos el diseño de tres piezómetros. Indicar los sitios de monitoreo y recomendación de parámetros y frecuencia de medición.
- Proponer una red de monitoreo de agua superficial diseñada de tal forma que alerte ante eventuales cambios importantes en la calidad del agua por efectos del botadero. La cual debe incluir los sitio de monitoreo y recomendación de parámetros y frecuencia de medición.
- Realizar una campaña de aforos en la época seca en las fuentes de agua dentro del área de influencia para determinar los sectores influentes y efluentes.
- Realizar un perfil geoelectrico en el área del botadero de basura, con el objetivo de conocer la distribución espacial de los desechos. Condicionado a la obtención por parte de la Dirección de Agua de la topografía a detalle de dicha línea perfil.

- Realizar el mapa de vulnerabilidad del área de influencia del relleno y el análisis del riesgo de contaminación de aguas subterráneas.
- Con la información recolectada, debe indicar si la actividad de depósito de basura está afectando los posibles mantos acuíferos y a las aguas superficiales que se ubican en el sitio.

1.4 Investigadores

En la ejecución del presente proyecto, han participado en diferentes etapas los siguientes profesionales:

Lic. José Daniel López y Lic. Mariel Gonzales Artavia, coordinación en la realización de trabajo de campo, supervisión en el levantamiento e interpretación de muestras de suelos.

Geól. Geiselle Barrantes Sandoval como compiladora de información y participación de algunas giras de campo.

Geól: David Araya Quirós, en la recolección de información bibliográfica, pruebas de infiltración y aforos, realización de SEV, procesamiento de datos de laboratorio, elaboración de figuras y redacción general.

M. Sc. Mario Arias Salguero, quien funge como responsable e investigador principal del proyecto, trabajando en la coordinación entre la Dirección de Aguas, Universidad de Costa Rica y FUNDEVI, responsable de la ejecución presupuestaria en FUNDEVI, supervisor de los avances de investigación, así mismo; en la edición de los informes de avance y final y proponente de varios apartados de este informe.

A nivel técnico participaron los señores Juan Vargas Zúñiga y Ricardo Pastrana Chacón.

2 RÉGIMEN HIDROLÓGICO

El régimen hidrológico regional del área de estudio se describe con base en dos componentes: meteorología, que incluye precipitación y temperatura e hidrografía, que describe los drenajes existentes y los patrones de drenaje. A continuación se detalla cada uno de estos aspectos.

2.1 Meteorología

Costa Rica se encuentra dividido topográficamente en valles y montañas, con un sistema montañoso que atraviesa el centro del país en dirección noroeste sureste, que incluye la Cordillera Volcánica de Guanacaste, la Cordillera Volcánica Central y la Cordillera de Talamanca; estas zonas montañosas junto a los valles que se extienden a su pie, dividen el país en tres grandes regiones fisiográficas, norte, central y sur. Esta disposición montañosa, junto a los vientos predominantes del noreste (alisios), han originado tres regiones climáticas diferentes: la Región Tropical Húmeda del Atlántico, a la cual pertenece la Región Norte y Atlántica, la Región Central Intermontana a la cual pertenece el Valle Intermontano Central y Montañosa Sur, y la Región Tropical del Pacífico, a la cual pertenecen la Regiones Pacífico Norte, Sur y Central, con dos estaciones bien definidas, la húmeda y seca.

La zona de estudio se ubica en la llamada región Pacífico Sur, la cual es una sección extensa que se ubica al sureste del Pacífico Central, se extiende desde Punta Uvita, San Isidro del General, estribaciones de la Cordillera de Talamanca del lado del Pacífico, Cerro Darí, hasta Cerro Echandi, límite fronterizo con Panamá, hasta Punta Burica. Comprende todo el Valle del General, la Península de Osa, Valle de Coto Colorado, Valle de Coto Brus, Golfito. Esta región se ubica en la parte más sureste del Pacífico de Costa Rica, los contrastes geográficos, entre ellos, los extensos valles, la barrera montañosa de la Cordillera de Talamanca al norte, como su influencia oceánica, generan en esta región un régimen de lluvias sumamente contrastado con relación al resto de las regiones de la vertiente, esta heterogeneidad se percibe en un clima en donde el período seco es muy favorable y corto y el lluvioso intenso, además, aparecen áreas pequeñas con clima tropical húmedo y lluvias todo el año (MEH, 1953 en Solano & Villalobos, 2012).

Para el área de estudio, se utilizaron datos provenientes de las estaciones Río Claro, Coto 50, Coto 52, Coto 54 y Coto 58 durante los periodos de 1950 al 2011, dichas estaciones pertenecen al Instituto Meteorológico Nacional (IMN), y se encuentra dentro del área de estudio a una distancia máxima de alrededor de 7 km del vertedero de Golfito (Coto 50). La figura 2, muestra la distribución de las estaciones meteorológicas en el área de estudio.

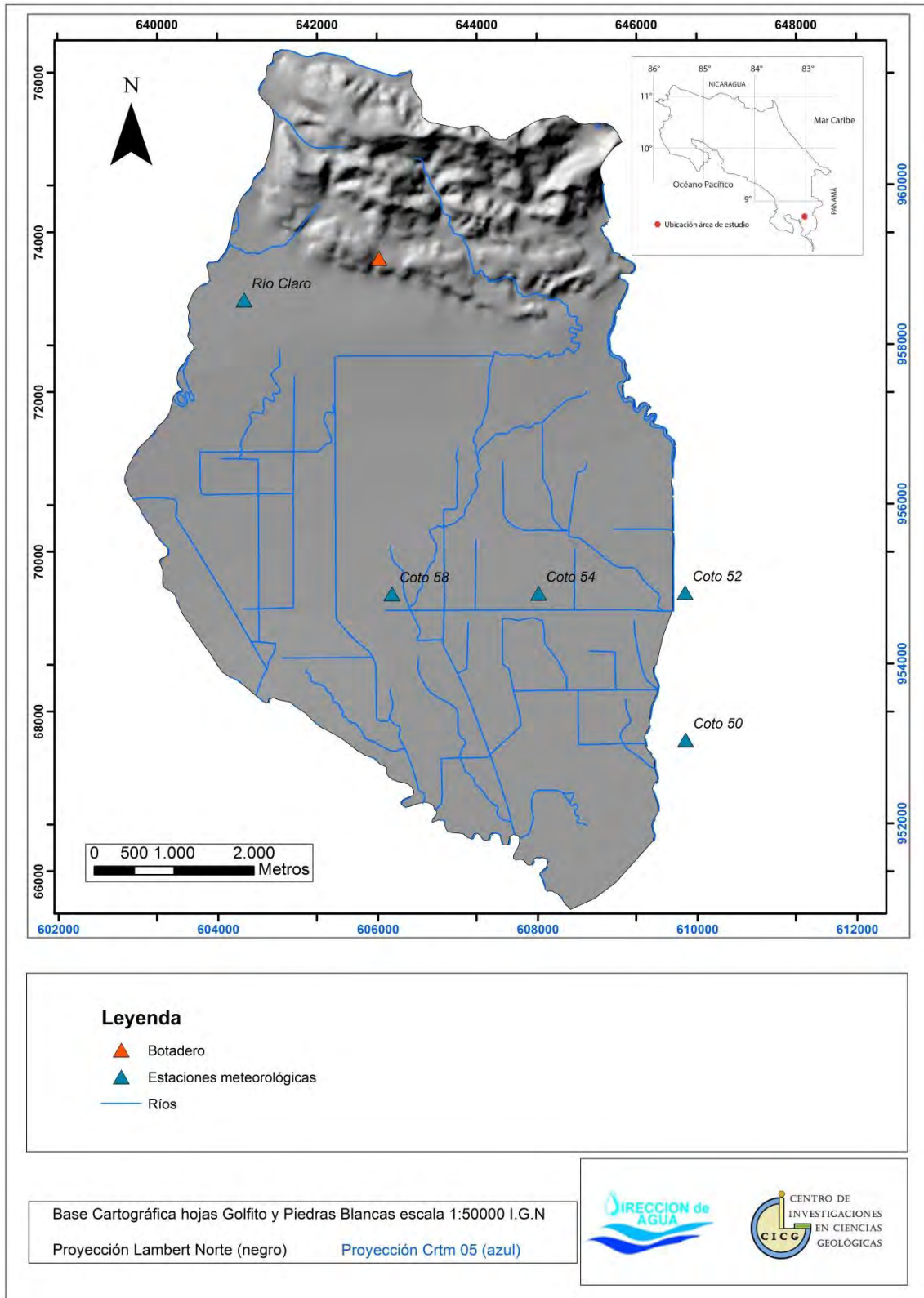


Figura 2: Distribución de las estaciones meteorológicas utilizadas en el presente estudio. Fuente elaboración propia con datos del IMN.

2.1.1 Precipitación

La precipitación promedio anual de las estaciones influentes en el área de estudio es de 4306,87 mm, la cual es una precipitación muy alta en comparación con las del resto del país y en especial con el resto del Pacífico.

Las precipitaciones máximas en la zona se dan en los meses de setiembre y octubre alcanzando valores entre los 550 mm a 600 mm promedio, además en el mes de mayo se observa un incremento en las precipitaciones llegando a los 450 mm. 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 (figura 3).

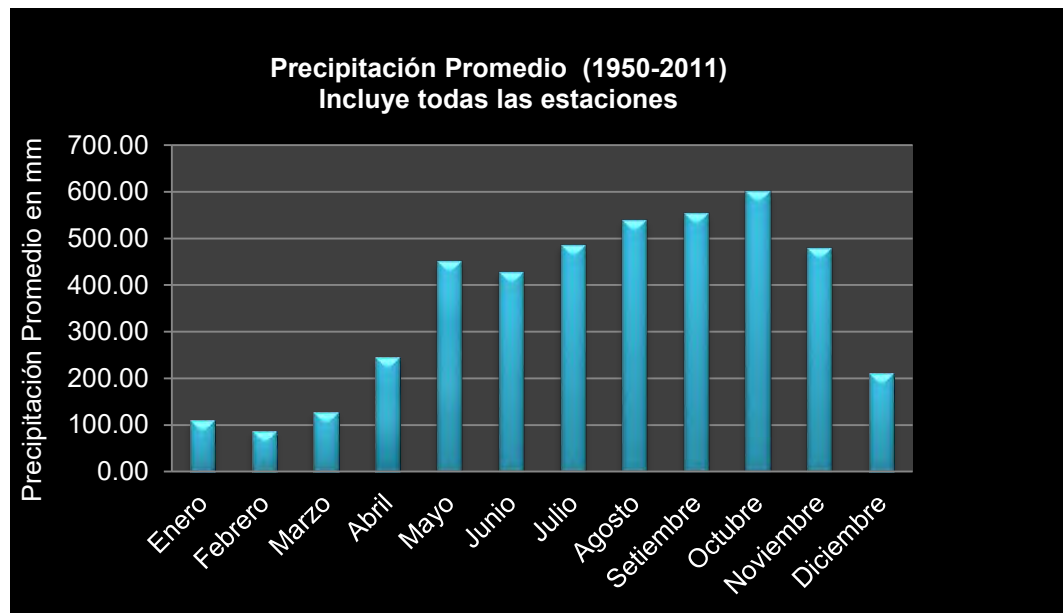


Figura 3: Gráfico donde se muestra la distribución de la precipitación promedio mensual cerca de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

2.1.2 Temperatura

Las temperaturas según el promedio realizado a partir de las estaciones de Río Claro y Corredores del Instituto Meteorológico Nacional, oscilan entre los 26,3°C y los 27,7°C. El gráfico (figura 4) muestra que las temperaturas máximas promedio se alcanzan en los meses de marzo y abril, llegando a un promedio de 27,8°C, mientras que las menores temperaturas promedio se presentan en el mes de noviembre en un valor aproximado a los 26,4°C. A lo largo del año las temperaturas se mantienen constantes, con excepción de marzo y abril, con un promedio de 26,95°C.

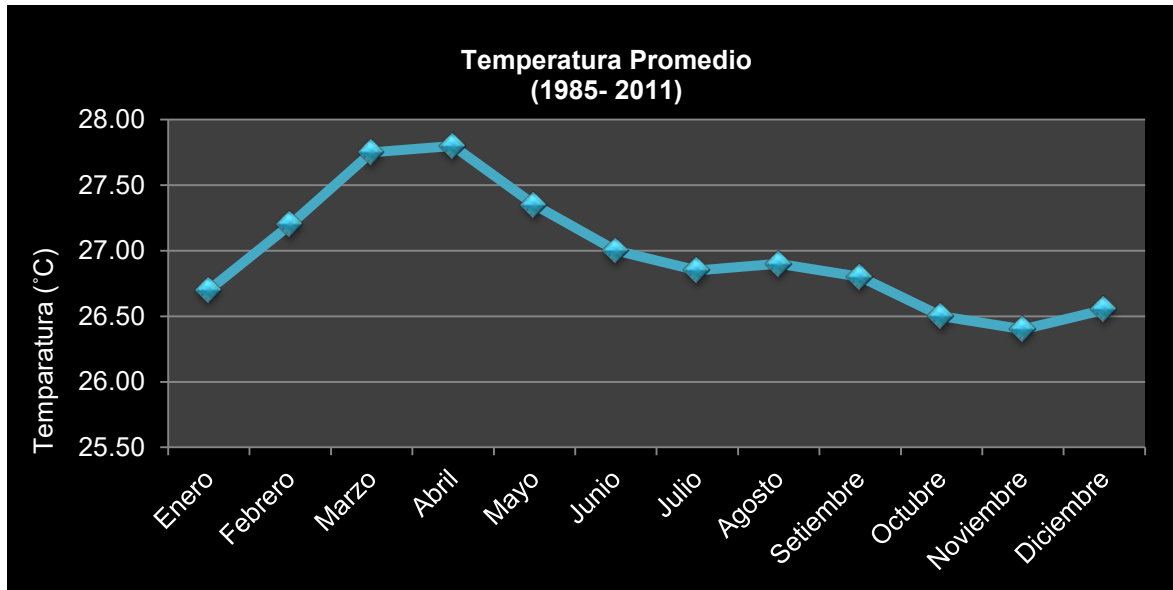


Figura 4: Gráfico donde se muestra la distribución de la temperatura promedio mensual cerca de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

2.2 Hidrografía

El área de estudio es limitada por el margen izquierdo del Río Claro y el derecho del Río Caracol, estos nacen en zonas montañosas se desplazan en una dirección hacia el sur y confluyen en el Río Coto Colorado, el cual es uno de los colectores principales de la región.

El área de influencia seleccionada se caracteriza por poseer dos topografías bien definidas, una montañosa y una plana. La montañosa se caracteriza por poseer pendientes entre los 16° y 35°, con patrones de drenaje de tipo dendrítico, paralelo, con fuerte presencia de patrones de tipo rectangular y angular los cuales podrían estar influenciados por efectos de la estratigrafía y las estructuras tectónicas locales. Los cauces profundos en forma de "V", con presencia de ríos y quebradas con desplazamiento de tipo sinestral.

Los ríos y quebradas que conforman la zona de estudio disminuyen su velocidad, al disminuir la topografía de la zona, al bajar la pendiente la velocidad del agua tiende a disminuir provocando una pérdida en la capacidad de transporte de sedimentos, los cuales tienen a depositarse formando una llanura de inundación de importancia en la zona.

Esta llanura aluvial ha desarrollado un sistema complejo de terrazas, cauces trenzados, anastomosados y meándricos, los cuales a su vez han sido modificados artificialmente conformando una serie de canales utilizados para el riego lo que provoca que en la parte plana, el régimen hídrico se encuentre modificado y sea difícil de definir.

El área de estudio se ha definido en una parte de la cuenca denominada Cuenca Ríos Claro-Caracol (figura 5), 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.

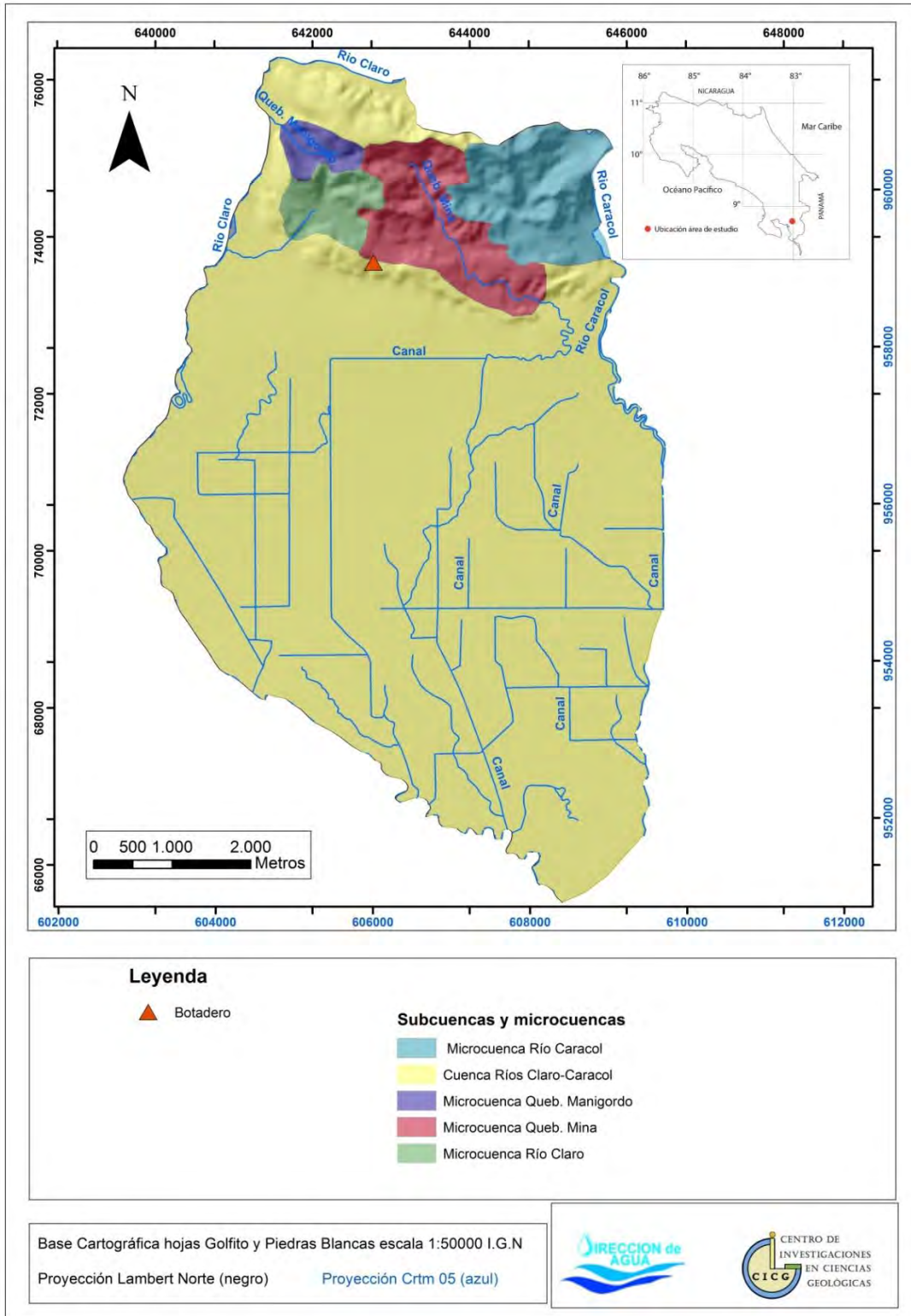


Figura 5: Modelo de elevación digital del terreno con los ríos principales y la delimitación de las sub-cuencas y microcuencas. Fuente: Elaboración Propia.

2.2.1 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 influencia indirecta, 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).

2.2.2 Microcuenca Río Claro

Conformada por una quebrada sin nombre que descarga directamente al Río Claro. Presenta una dirección de flujo hacia el suroeste la cual cambia redirigiendo al río hacia el oeste, dicho cambio de dirección puede deberse a un control estructural producido por la tectónica y la litología de la zona. Con una longitud de aproximadamente 1500 m, el río es alimentado por varias quebradas las cuales presentan en apariencia una mayor complejidad de drenajes. Se origina en el sector montañoso de la cuenca con drenajes tipo dendrítico y paralelo.

2.2.3 Microcuenca Quebrada Manigordo

La quebrada Manigordo nace en la parte noreste del área de influencia indirecta. La microcuenca posee un área de unos 0,5 km². 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.

2.2.4 Microcuencas de la Quebrada Mina.

La microcuenca de la Quebrada Mina, se encuentra localizada en la parte central del sector montañoso. Es posible que el área 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. El origen de este desplazamiento debe ser comprobado en el campo, ya que puede deberse a factores antropogénicos.

2.2.5 Microcuenca del Río Caracol

Presenta un área de aproximadamente 2,7 km². 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).

3 GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología de la zona de estudio, está dominada por la presencia de relieves de génesis sedimentaria. Las rocas de la zona se encuentran afectadas por esfuerzos tectónicos, así como dominados por la estratigrafía local y la pendiente topográfica, esto ha moldeado la topografía actual.

El área de interés presenta una forma general rectangular, conformada por una zona de cerros y montañas afectados tectónica y litológicamente, los cuales al erosionarse producto principalmente de la acción de los ríos y quebradas presentes, han transportado y depositado sedimentos en las zonas bajas, debido a la pérdida de energía producida por el fuerte cambio topográfico, esto ha generado una gran llanura de inundación de significativa importancia para la zona.

Para la caracterización geomorfológica, se elaboró un modelo de elevación digital (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 y de acuerdo a su origen, las geoformas dominantes se han agrupado en tres grupos: formas de origen denudacional, formas de origen fluvial y formas de origen estructural, las cuales se han representado en el mapa geomorfológico que se presenta al final de esta sección (figura 6) y serán descritas a detalle a continuación.

3.1 Formas de Origen Denudacional

3.1.1 Laderas y Montañas de 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 $5,7 \text{ km}^2$ cuya pendiente supera los 16° de inclinación con valores de hasta 65° .

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 a la dirección estratigráfica de la zona, así 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 aunado a que la dirección estratigráfica de las rocas aflorantes 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 rocas calizas.

3.2 Formas de Origen Fluvial

3.2.1 Llanura de Inundación de los Ríos Claro y Caracol

Esta unidad abarca una extensión de aproximadamente 41,7 Km², siendo la unidad geomorfológica de mayores dimensiones dentro del área de influencia establecida, presenta una pendiente plana entre los 0° y 8° y el poblado de la Esperanza y una serie de fincas Bananeras se asientan sobre esta unidad.

Sobre la llanura de inundación se ha 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 Formas de Origen Estructural

3.3.1 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 el flujo normal de los ríos obligándolos a desplazarse y transcurrir una mayor distancia para alcanzar la zona de topografía plana, además la fila presenta divisorias anchas, una de las cuales fue aprovechada para la ubicación del vertedero de basura, lo cual podría influir en que los contaminantes se dispersen a ambos lados de la Fila.

3.3.2 Fallas y Alineamientos

La zona de estudio presenta una serie de fallas y alineamientos los cuales presentan un rumbo noroeste. Además se observan fuertes indicios neotectónicos que podrían evidenciar la presencia de un sistema de falla de tipo sinistral, el cual podría estar asociado a una cuenca tipo pull-apart. 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.

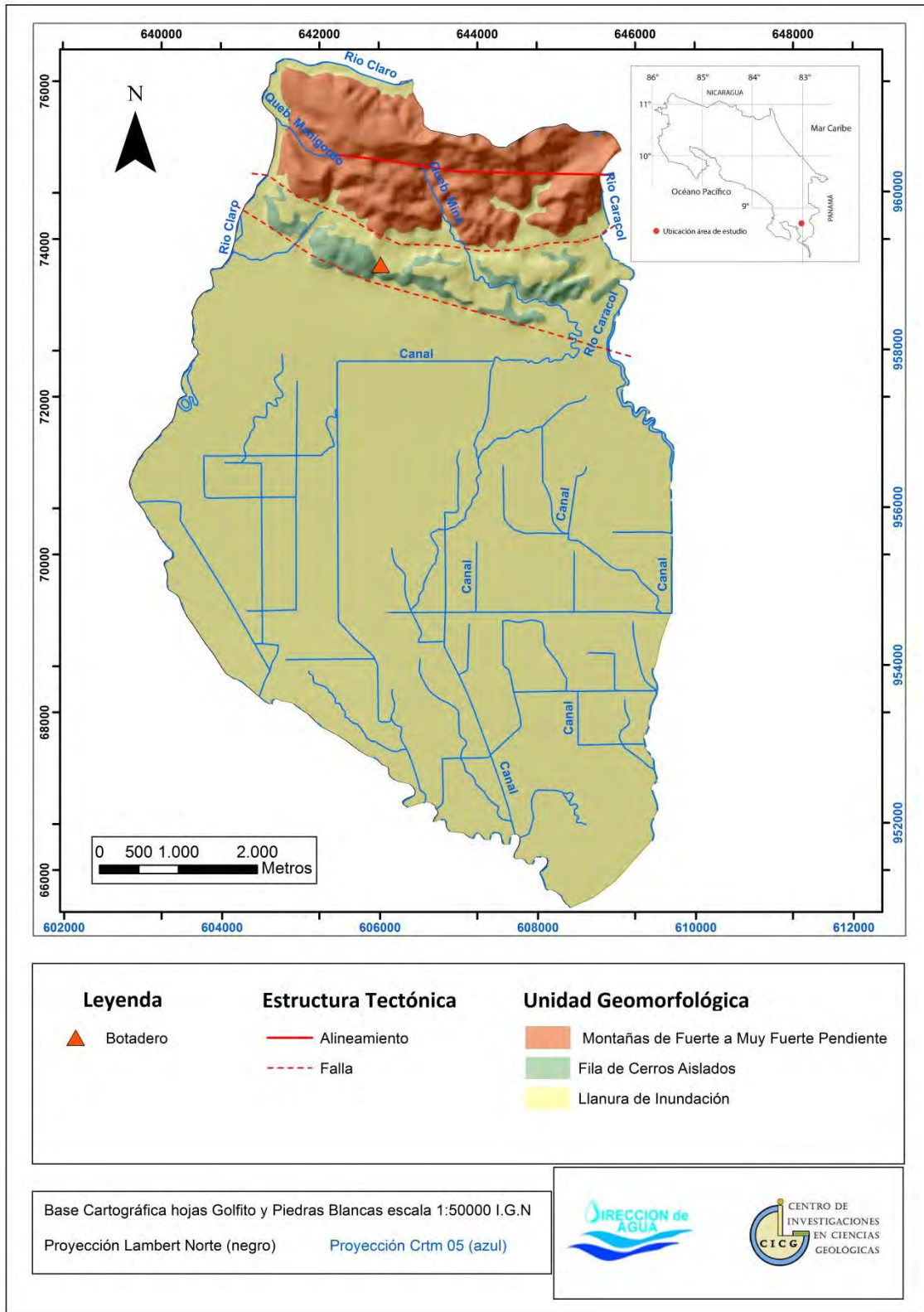


Figura 6: Mapa Geomorfológico de la zona de estudio. Fuente elaboración Propia.

4 CONTEXTO GEOLÓGICO

4.1 Aspectos Geológicos Regionales

En la zona de estudio no se encuentran referencias directas, sin embargo hay algunas estudios en sectores cercanos, entre ellos el de Arroyo (1997), en el cual expone un cuadro con la estratigrafía de la zona de Golfito. También se consultó el mapa geológico de Costa Rica 1:400000 (Denyer & Alvarado, 2007). El mapa compilatorio se aprecia en la figura 7.

4.1.1 Formación Calizas Golfito

Localizada entre el sur de Punta Gallardo y la Bahía de Golfito. Compuesta por capas delgadas de calizas duras, densas, silíceas, limosas de color gris-verdoso, y hay una capa conglomerádica en la base (Campos, L., et al. en: Sprechmann, P., 1984).

La sección superior está constituida por lutitas y limolitas, densas, duras, con capas erosionales de areniscas, estratificadas, sobreyacidas por calizas silíceas (Dengo, 1962).

Esta formación sobreyace al complejo de Nicoya y tiene un espesor aproximado entre 700 a 800 m.

4.1.2 Formación Quebrada Achioté

Di Marco (1994), define esta formación cuyo estratotipo se encuentra en la Quebrada del mismo nombre con una sección de 200m de espesor. Divide la Formación en el miembro de Bloques Quebrada Bolsa y el miembro Fila Gambas. Las rocas de esta formación se pueden agrupar en 5 facies:

1. Facies calcárea: constituye una minoría dentro de la formación, consiste de rocas calcáreas grises en estratificación decimétrica, clasificables como wackestone, micríticas y ligeramente silíceas.
2. Facies turbidíticas: arenitas volcanoclásticas de color gris estratificadas centimétricamente (10-30 cm) pertenecientes a los niveles a, b y c de la serie de Bouma, los clastos son ígneos.
3. Facies brechosa: compuesta por brechas basálticas y poligenéticas. Las primeras fueron generadas por la erosión y acumulación in situ de rocas basálticas; las segundas se derivan de rocas piroclásticas y tobáceas propias de un vulcanismo explosivo.
4. Facies de detritos finos: gran parte de las rocas detríticas de la formación son lutitas de finas a muy finas, ligeramente silíceas de color gris oscuro, verdoso o amarillento, masivas o pobremente estratificadas, parece tratarse de tobitas.

5. Facies piroclástica: ocasionalmente se encuentra material piroclástico en forma de bancos de 50 a 80 cm que a veces muestran una gradación inversa, con cristales de plagioclasa, piroxenos y clastos milimétricos de vidrio volcánico en una matriz de ceniza.

El miembro de Bloques Quebrada Bolsa es un nivel de bloques de dimensiones métricas de clastos calcáreos micríticos bioclásticos dentro de una matriz volcanoclástica de arenitas y brechas. Lateralmente se presentan bloques de lutita o de basalto. El espesor de este miembro es de unos 5 m y se encuentra intercalado en el miembro Fila Gamba.

El miembro Fila Gamba se compone de lutitas y tobetas masivas de color verde claro a amarillento con algunos niveles turbidíticos y de detritos piroclásticos primarios.

El espesor de la formación Quebrada Achiote se estima entre unos 400 a 500m. Su contacto inferior es concordante con la formación Golfito. Con base en el contenido fósil y sus relaciones estratigráficas la edad de la formación es Maastrichtiano medio-tardío a Paleoceno medio (o más joven.)

4.1.3 Formación Fila de Cal

Definida por Lundberg (1982), posteriormente por Calvo (1987), quien incluye en esta formación todos los sistemas carbonatados de plataforma y rampas carbonatadas con características similares del Eoceno medio y superior. El espesor máximo es de 200m y se encuentra en contacto superior transicional con la Formación Térraba. Dentro de esta formación se encuentran, según la Henningsen (1965):

1. Subunidad arrecifal: compuesta por boundstone de color amarillo claro de estratificación gruesa a masiva, con foraminíferos y otros fósiles.
2. 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.

4.1.4 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.

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

4.1.4.1 Unidad Zapote

Consiste en 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.

4.1.4.2 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 Térraba. 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.

4.1.5 Formación Charco Azul

La formación Charco Azul fue descrita en 1942 por Olsson, quien describe la litología en dos partes areniscas azules gruesas en la base y lutitas bituminosas hacia el techo.

Corrigan (1986), agrupa las rocas sedimentarias neógenas de la península de Burica dentro de la formación Charco Azul, y las separo en tres miembros, que anteriormente eran descritos como formaciones, del más antiguo al más joven:

1. Miembro Peñita: se encuentra en el sector norte de Burica con un espesor máximo de 330m, consiste en una unidad basal de 0-30 m de espesor compuesta por conglomerado volcanoclástico, clastos de origen ígneo máfico, areniscas guijarrosas y areniscas. Esta unidad basal es sobreyacida por limolitas verde azuladas oscuras, masivas, con un espesor probable máximo de 300 m, localmente se encuentran horizontes de concreciones calcáreas y más raramente de bivalvos, pelecípodos, gasterópodos y otros macrofósiles. Este miembro sobreyace disconformemente a unas calizas del Eoceno aún sin nombre e inconformemente al Complejo de Nicoya y su contacto superior es con el miembro Burica no observado. La edad indicada es Plioceno.
2. Miembro Burica: se encuentra expuesto a lo largo de los cursos de agua que corren hacia el este de la Península de Burica, tiene un espesor de aproximado de 2500 m. Está constituido por intercalaciones de conglomerados, areniscas y lutitas volcanoclásticos; estos sedimentos presentan gradación y una moderada selección, como es característico de depósitos turbidíticos. Dos litofacies predominantes caracterizan al miembro Burica: una inferior de conglomerados resedimentados (150-200m de potencia) y una litofacies superior de turbiditas volcanoclásticas de grano fino (alrededor de 200m de espesor). Esta secuencia sobreyace al miembro Peñitas y es transicional de manera gradacional al miembro Armuelles. Para este miembro la edad es Plio-Pleistoceno.

3. Miembro Armuelles: localizado en Puerto Armuelles, posee un espesor aproximado de 200m. Consiste de intercalaciones pobremente endurecidas de limolitas, areniscas y areniscas guijarrosas.

La parte basal posee un espesor de entre 10 y 50 cm, conformada por intercalaciones de areniscas guijarrosas y conglomerados con limolitas de estratificación delgada y areniscas finas pobremente seleccionadas. La sección superior consiste de areniscas pobremente endurecidas y lodolitas. La edad indicada para este miembro es del Pleistoceno.

El miembro Armuelles sobreyace concordante y gradacionalmente al miembro Burica.

4.1.6 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).

4.2 Aspectos Tectónicos y Estructurales

La zona de estudio se localiza en el sur de Costa Rica, una zona tectónica muy activa debido a la presencia de rasgos y estructuras como los que se describirán a continuación:

4.2.1 Fosa Mesoamericana y levantamiento del Coco

La Fosa Mesoamericana es el límite convergente entre las placas Coco y Caribe, en el cual la placa Coco se subduce bajo la Caribe, ocasionando un sistema de esfuerzos NE-SW. En el pacífico de Costa Rica se encuentra el levantamiento Coco, el cual es una traza fósil de punto caliente, dicho levantamiento se subduce debajo de la península de Osa y Burica. Esta irregularidad en la superficie de la placa Coco genera una zona de alta sismicidad (Montero, 1994).

4.2.2 Falla Longitudinal de Costa Rica

Según Montero (1994), consiste en un conjunto de fallas paralelas a la Fosa Mesoamericana, que se localiza a lo largo de la parte frontal de la Fila Costeña y desde el norte de Quepos hasta cerca del límite con Panamá, es de movimiento inverso, con desplazamientos dextrales menores en las cercanías de Palmar.

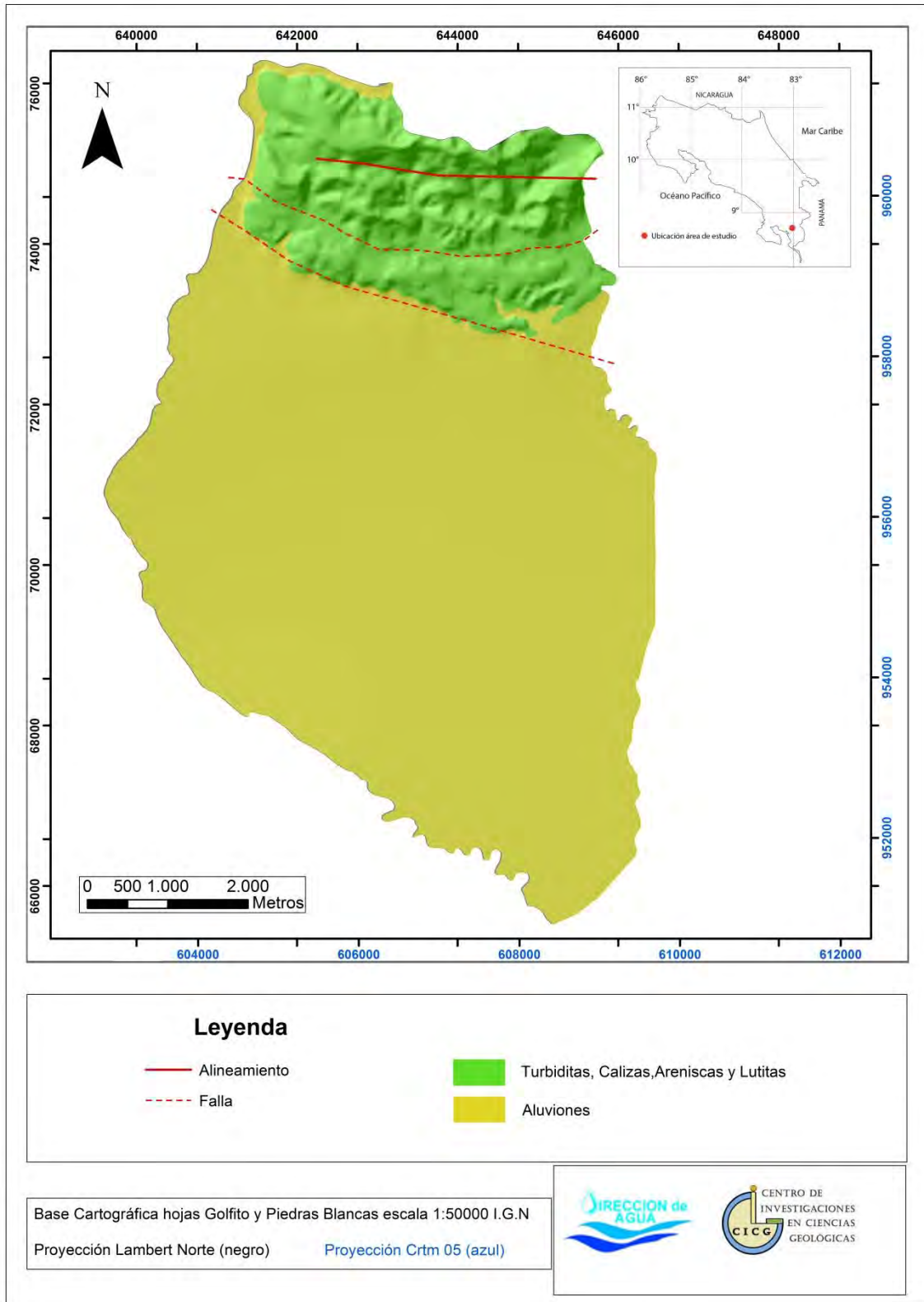


Figura 7: Mapa Geológico Regional de la zona de estudio. Fuente: Denyer & Alvarado (2007).

4.3 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 25 afloramientos de roca (cuadro 1), los cuales se hallan ubicados principalmente hacia la parte norte del área de estudio (figura 8), lográndose reconocer con ello la existencia de 4 diferentes unidades litológicas en la zona.

Cuadro 1: Listado de afloramientos de roca visitados, (coordenadas Lambert Norte).

Afloramiento	Longitud	Latitud	Litología observada
GF-1	642733	73841	Conglomerado
GF-2	642654	73852	Conglomerado
GF-3	642510	73778	Conglomerado
GF-4	642836	74423	Areniscas finas grises, presencia de fósiles de gasterópodos y bivalvos
GF-5	642123	74499	Arenisca fina grisácea
GF-6	642177	74579	Arenisca fina grisácea
GF-7	642515	73776	Conglomerado
GF-8	645494	75033	Calizas blancas masivas
GF-9	645676	75322	Arenisca fina café claro
GF-10	640902	75761	Arenisca fina café claro
GF-11	641824	76499	Caliza café claro, alterada
GF-12	641971	77101	Caliza color gris claro
GF-13	641771	76334	Arenisca fina
GF-14	641842	76242	Depósito aluvional
GF-15	643723	76638	Calizas
GF-16	642661	75855	Arenisca fina grisácea
GF-17	642702	75828	Arenisca fina grisácea
GF-18	642899	75757	Arenisca fina grisácea
GF-19	645699	75243	Arenisca fina grisácea
GF-20	641820	73639	Depósito aluvional
GF-21	645267	73331	Arenisca fina grisácea
GF-22	645120	73328	Conglomerado
GF-23	645351	73211	Conglomerado
GF-24	645389	73315	Conglomerado
GF-25	645483	73384	Conglomerado
GF-26	640511	73309	Depósito aluvional
GF-27	640654	73483	Depósito aluvional
GF-28	645779	73328	Depósito aluvional
GF-29	645744	73232	Depósito aluvional

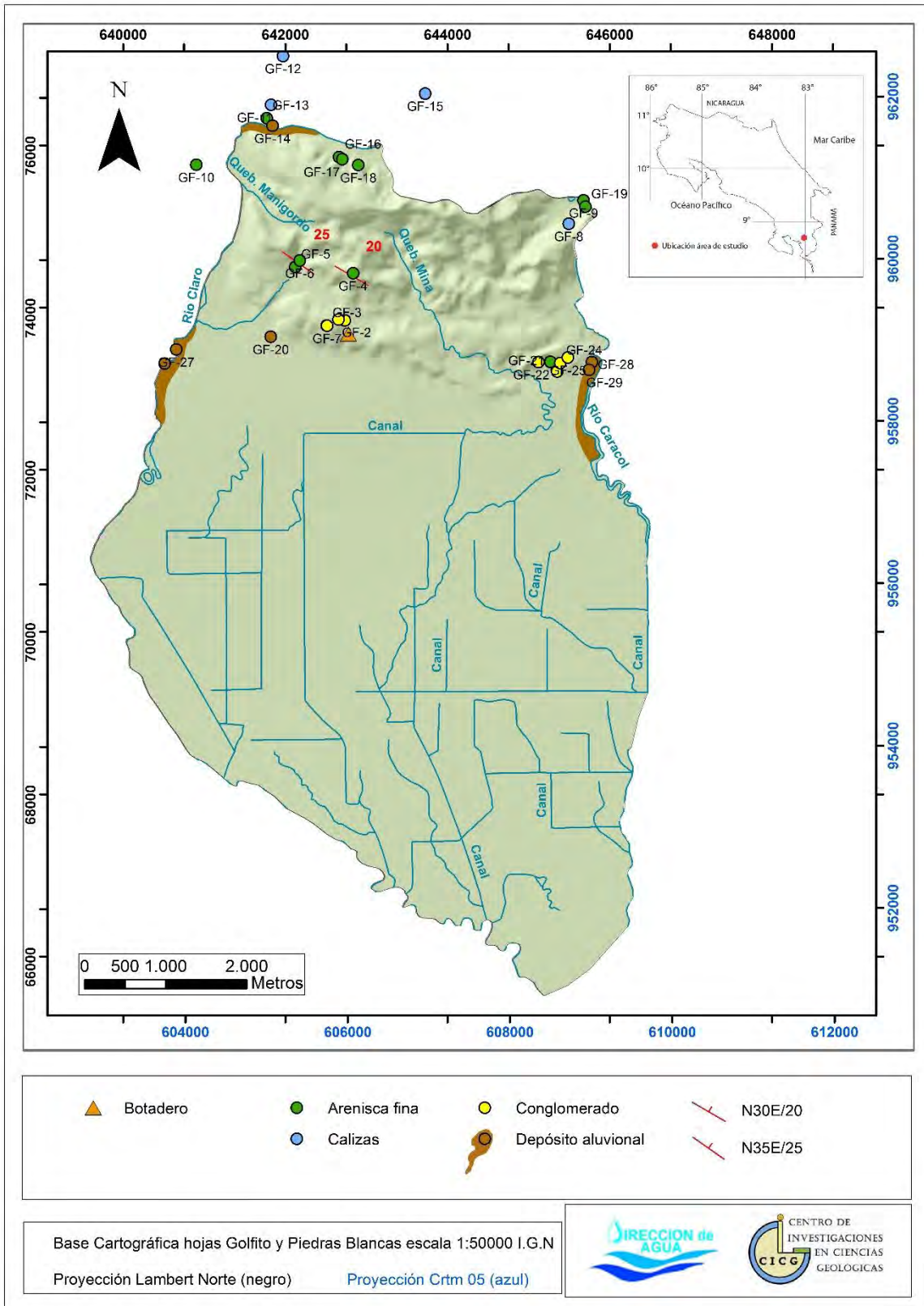


Figura 8: Mapa de afloramientos de roca observados. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta la descripción de las principales características observadas para cada una de las unidades de roca definidas en el presente estudio.

4.3.1 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 Km². Litológicamente se describe como una arenisca fina de color grisáceo en aquellos afloramientos en donde la roca se muestra más sana (figura 9), 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 conchoide 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 642836 E y 74423 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.



Figura 9: Areniscas finas grisáceas aflorando en el margen izquierdo del Río Claro (coordenadas 642702 E y 75828 N). Fuente: Elaboración propia.

4.3.2 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 de acceso a dicho lugar, lo mismo que en los alrededores del poblado de Santiago de Caracol (figura 10).

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 parecen estar más bien sobreyaciendolas, por lo que en este caso se prefiere considerarlos como una sección intercalada entre la Unidad de Areniscas Finas Quebrada Manigordo.



Figura 10: Unidad de Conglomerados aflorando en las cercanías del poblado de Santiago de Caracol. Fuente: Elaboración propia.

4.3.3 Unidad de Calizas Quebrada Tigra

Se encuentran aflorando sobre la margen derecha del río Claro, específicamente en el extremo norte del área de estudio y 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, 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 (figura 11). 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, 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.



Figura 11: Calizas aflorando sobre la margen derecha del Río Claro, en el extremo norte del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

4.3.4 Unidad de Depósitos Recientes

Esta unidad litológica es la de mayor extensión dentro del área de estudio, ocupando aproximadamente unos 39 Km², 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 la zona, 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 (figura 12).



Figura 12: Secuencia aluvional perteneciente a la unidad de depósitos recientes expuesta sobre el margen del Río Claro. Fuente: Elaboración propia.

La distribución de las unidades geológicas locales se aprecia en la figura 13.

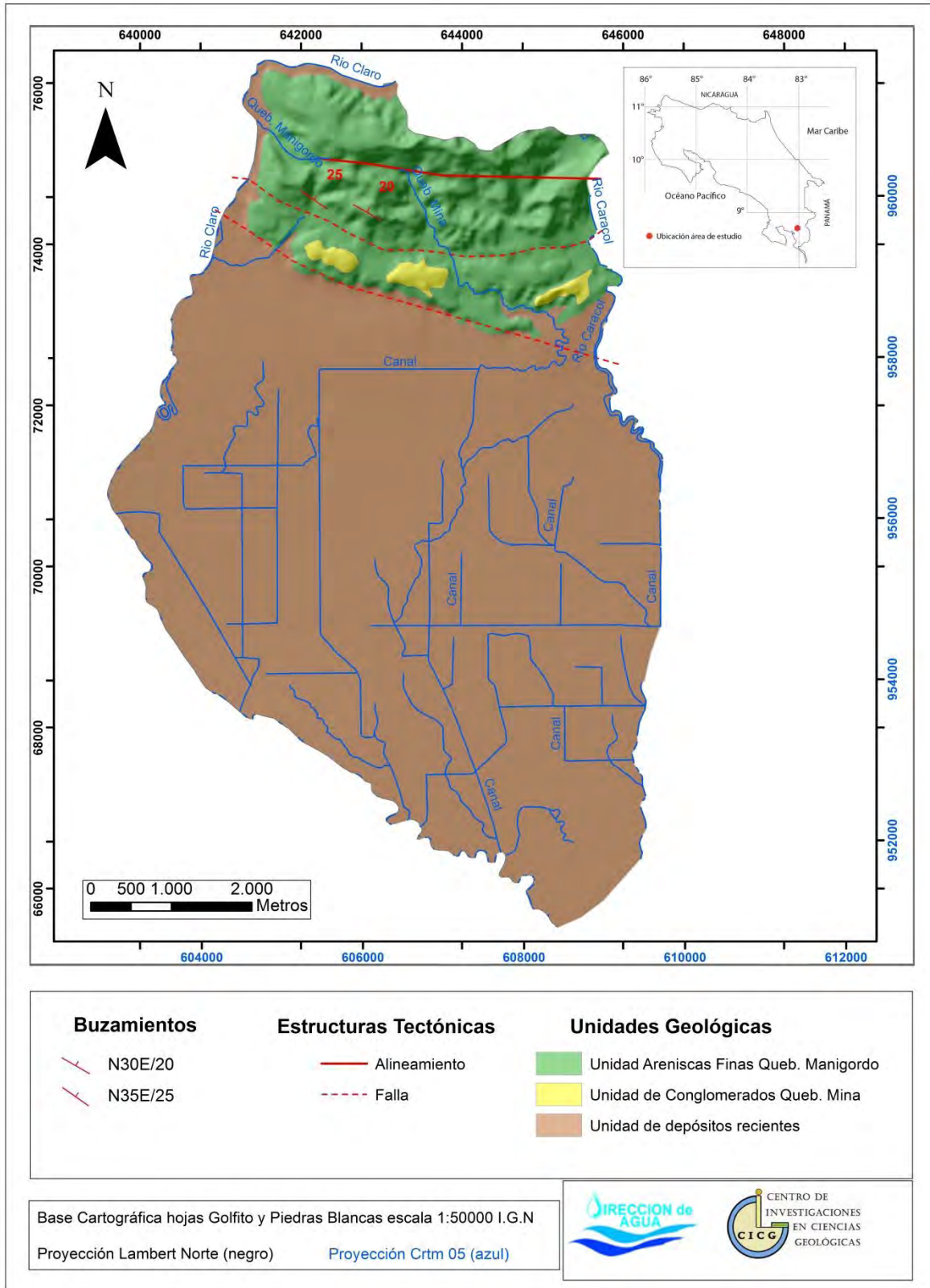


Figura 13: Mapa geológico del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

5 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Con el fin de tener una fuente adicional de información que permitiera obtener una mejor caracterización de la estratigrafía de la zona y con ello complementar la información recabada mediante los registros de pozos, se realizó una campaña geofísica basada en la ejecución de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) en diferentes puntos a lo largo de la zona plana del área de estudio. Esta campaña geofísica es un aporte del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas al proyecto, pues no estaba contemplada dentro de los términos de referencia pactados.

5.1.1 Metodología y equipo utilizado

En la realización de los SEV fue aplicado el arreglo electródico tipo Schlumberger, empleando diferentes aperturas, adaptadas a las condiciones encontradas en la zona de estudio, la abertura máxima de $AB/2$ fue de 300 m. El equipo usado fue el modelo SYSCAL_R1/PLUS de la IRIS Instruments® con cuatro electrodos (figura 14)

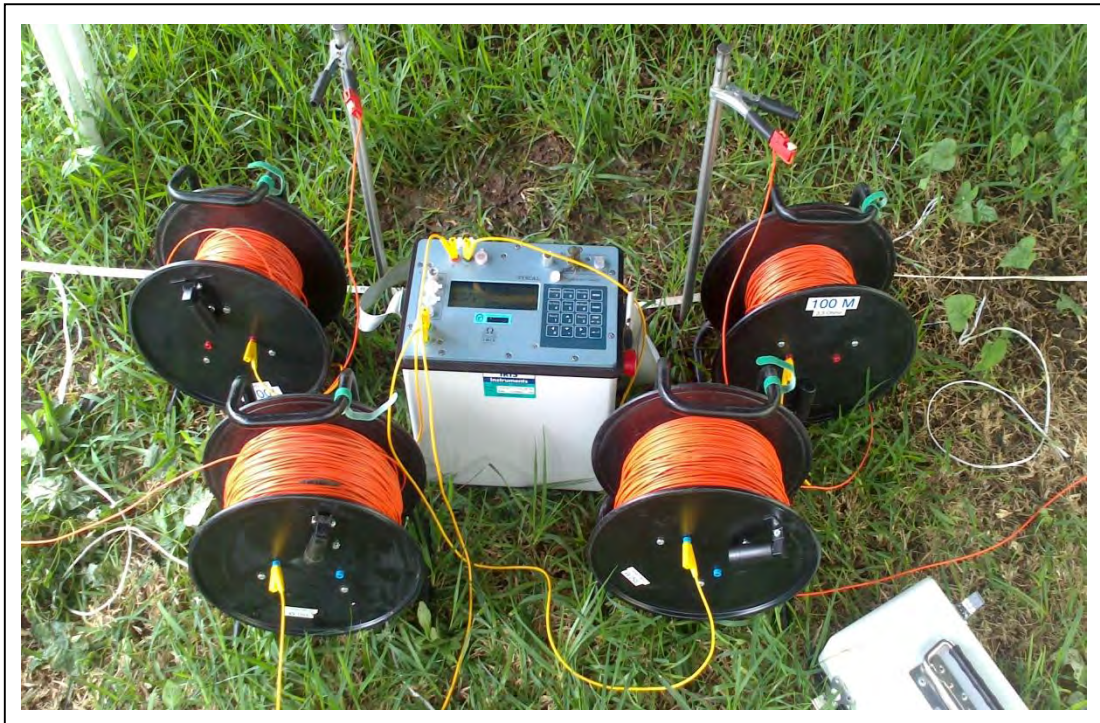


Figura 14: Equipo utilizado para realizar los sondeos eléctricos verticales (SEV). Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos fueron procesados mediante la utilización de los software libres IPI2WIN® y QWSELN® y correlacionados mediante la observación y descripción de geología de campo, así como la información de los pozos registrados ante SENARA.

El equipo utilizado realiza una estimación de la resistividad del subsuelo a partir de su resistividad aparente, la cual se utiliza como un instrumento para evaluar los espesores de capas geológicas, las profundidades de niveles freáticos, zonas de dispersión salina, entre otros (Murillo, 2008).

Arias (2002 a, b, c, 2007), indica que la geoelectrica es uno de los métodos geofísicos de prospección con mayor difusión y aplicación en las ciencias de la Tierra. Consiste en la inyección de corriente eléctrica (I) al subsuelo y a partir del potencial (ΔV) generado en el mismo se determina la resistencia del suelo (R).

Este valor de resistencia es transformado a un valor de resistividad aparente (ρ_a), a partir de una constante geométrica (K) cuya expresión se da en la siguiente ecuación.

$$\rho = \frac{K \, dV}{I} \quad \text{con} \quad K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}$$

El valor final de K para cada medición, dependerá del dispositivo empleado y de la separación de los electrodos, tanto de inyección de corriente (A, B) como de medición del potencial (M, N).

La disposición relativa de los electrodos es conocida también como arreglo geoelectrico y su escogencia depende de las características del objeto de estudio.

El método de resistividad eléctrica utiliza una fuente generadora de corriente (I), que es inyectada en el suelo a través de dos electrodos (A y B), la corriente produce una diferencia de potencia (V) que es medida en los electrodos de potencial (M y N). La disposición relativa de los electrodos es conocida también como arreglo geoelectrico y su escogencia depende de las características del objeto de estudio. En aplicaciones geológicas este método geofísico es utilizado en las técnicas de SEV, estos permiten medir la variación vertical de la resistividad aparente debajo de un punto único, y son usados para estimar la posición y espesor de capas litológicas horizontales en profundidad (Murillo, 2008).

5.1.2 Dispositivos electrónicos Schlumberger

En la figura 15 se muestra el ordenamiento inicial del dispositivo para el respectivo arreglo electrónico utilizado en el presente estudio.

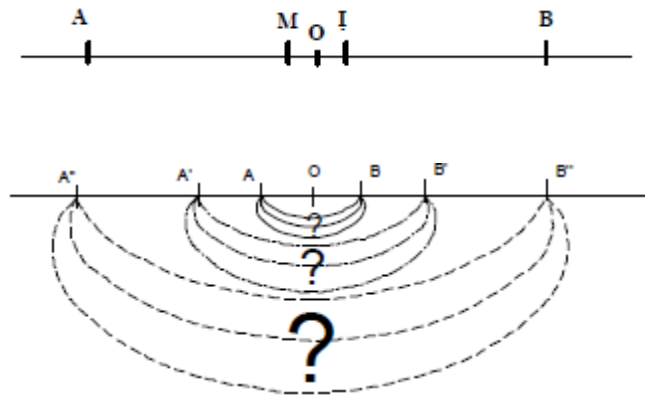


Figura 15: Esquema simplificado de un Sondeo Eléctrico: A medida que se abre la distancia AB, aumenta la profundidad de investigación. Tomado de Sánchez (2014)

Las mediciones se centrarán en el punto central (O) y conforme se van extendiendo los pines, la distancia AB variará, lo que provoca que la corriente eléctrica atravesará cada vez a mayor profundidad (SÁNCHEZ, 2014).

Los sucesivos valores de resistividad aparente que se van obteniendo corresponden a profundidades cada vez mayores.

Con la realización de una serie de SEV a lo largo de una determinada área se logra la interpretación del contexto geológico del subsuelo (figura 16).

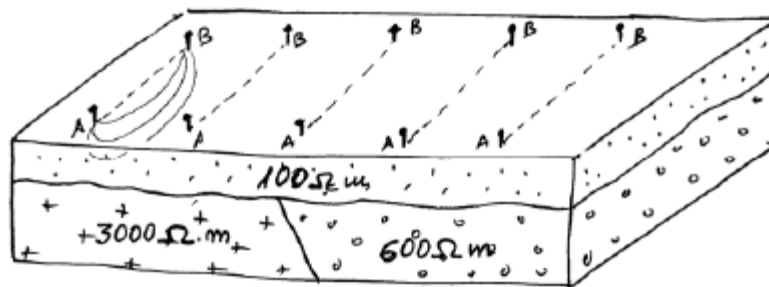


Figura 16: Esquema de una serie de SEV a lo largo de un área dada, esto permite la interpretación del contexto geológico. Tomado de Sánchez (2014).

En concordancia con los objetivos trazados para el presente estudio la información obtenida por medio de la realización de los SEV, serán utilizados para el desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual del área de estudio, el cual se presentará en las secciones posteriores del presente informe.

5.1.3 Realización de Sondeos Eléctricos Verticales

Se realizaron en total 13 SEV 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 dos perfiles geoeléctricos que muestren la estratigrafía general de la zona, además de la obtención de información importante como espesor del relleno aluvial y presencia de agua subterránea.

En el cuadro 2, se enlistan los diferentes SEV realizados y su distribución espacial se puede apreciar en la figura 17.

Cuadro 2: Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) realizados, coordenadas Lambert Norte.

Código	Longitud	Latitud
SEV1	641106	73954
SEV2	641709	68526
SEV3	641214	70080
SEV4	641213	70812
SEV5	641203	72171
SEV6	645721	68538
SEV7	645719	70034
SEV8	645710	70755
SEV9	645714	71530
SEV10	644214	68439
SEV11	644208	70120
SEV12	644205	70889
SEV13	644204	71541

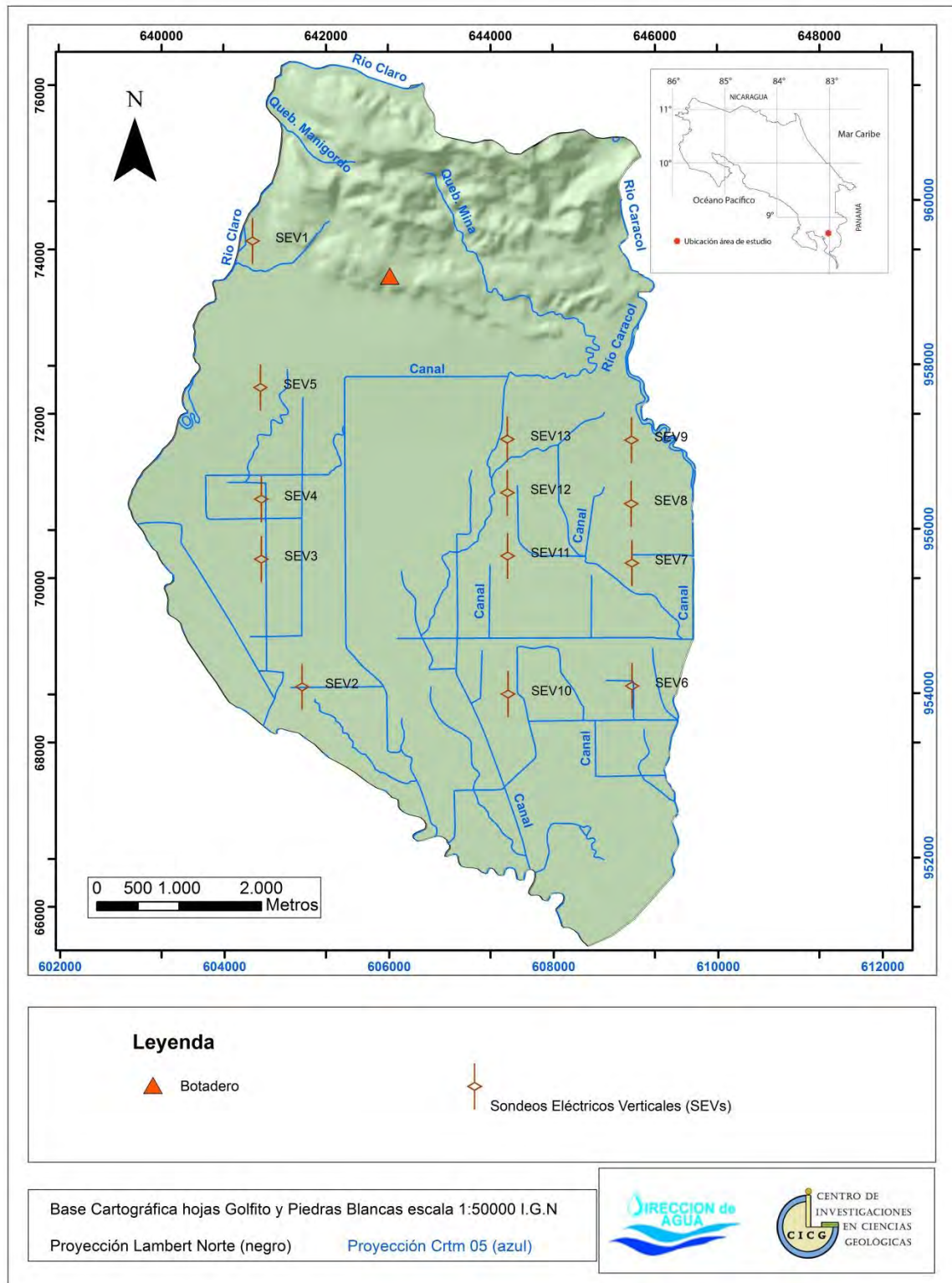


Figura 17: Mapa de ubicación de los sondeos eléctricos verticales (SEV) realizados en las cercanías del poblado de La Esperanza de Río Claro. Fuente: Elaboración propia.

5.1.4 Resultados Sondeos Eléctricos Verticales

Con base en los valores obtenidos de cada SEV se graficaron los datos, posteriormente se procedió a realizar la inversión de los mismos tratando de ajustar los valores al modelo numérico y geológico más aceptable.

El cuadro 3 muestra los datos obtenidos una vez realizada la inversión, se muestran las capas de resistividad encontradas en Ωm (*léase ohmm*), su espesor (en metros) y su profundidad (en metros).

Además se muestran los gráficos realizados y los modelos de mejor ajuste para cada SEV (figuras 18, 19 y 20).

Cuadro 3: Resumen del modelado planteado para cada uno de los SEV, realizado en el área de estudio.

SEV1		Error	6,04
Capas	Resistividad	Espesor	Profundidad
1	49,4	1	1
2	167	2	3
3	18,7	2	5
4	53,9	61	66
5	12,9		

SEV2		Error	19,10
Capas	Resistividad	Espesor	Profundidad
1	37,3	0,5	0,5
2	0,56	0,12	0,62
3	9	65	65,72
4	18,3		
5			

SEV3		Error	2,17
Capas	Resistividad	Espesor	Profundidad
1	17	2	2
2	8,88	2	4
3	54	9	13
4	5,84	6	19
5	21,7		

SEV4		Error	2,37
Capas	Resistividad	Espesor	Profundidad
1	17	4	4
2	9	19	23
3	4,5	40	63
4	13,4		

SEV5		Error	4,46
Capas	Resistividad	Espesor	Profundidad
1	23	0,5	0,5
2	4,21	0,4	0,9
3	13,3	2	2,9
4	7,51	24	26,9
5	15,3	18	44,9
6	9	55	99,9

SEV6		Error	0,809
Capas	Resistividad	Espesor	Profundidad
1	20	0,5	0,5
2	2,6	0,15	0,65
3	7	3	3,65
4	4,7	22	25,65
5	23	30	55,65
6	2,6	67	122,65
7	191,9		

SEV7		Error	2,94
Capas	Resistividad	Espesor	Profundidad
1	10,5	0,5	0,5
2	3,16	0,24	0,74
3	9,5	7	7,74
4	6	21	28,74
5	36,3	32	60,74
6	2,44	55	115,74
7	227		

SEV8		Error	2,98
Capas	Resistividad	Espesor	Profundidad
1	10,5	0,5	0,5
2	3,27	0,26	0,76
3	9,6	6	6,76
4	6	22	28,76
5	36,3	32	60,76
6	2,65	58	118,2
7	200		

SEV9		Error	2,87
Capas	Resistividad	Espesor	Profundidad
1	24,2	0,5	0,5
2	9	6	6,5
3	3,37	7	13,5
4	9,9	25	38,5
5	7,15	40	78,5
6	9,75		

SEV10		Error	28,1
Capas	Resistividad	Espesor	Profundidad
1	9	2	2
2	24,7	1,5	3,5
3	5,85	2	5,5
4	14,1	8	13,5
5	0,68	17	30,5
6	517		

SEV11		Error	28,1
Capas	Resistividad	Espesor	Profundidad
1	9	2	2
2	24	2	4
3	5,7	2	6
4	14,2	8	14
5	0,7	17	31
6	548		

SEV12		Error	24,8
Capas	Resistividad	Espesor	Profundidad
1	49,6	0,5	0,5
2	0,7	0,06	0,56
3	8	58	58,6
4	17,4		

SEV13		Error	1,56
Capas	Resistividad	Espesor	Profundidad
1	17	0,5	0,5
2	9	1	1,5
3	28	2	3,5
4	6	25	28,5
5	17	37	65,5
6	4		

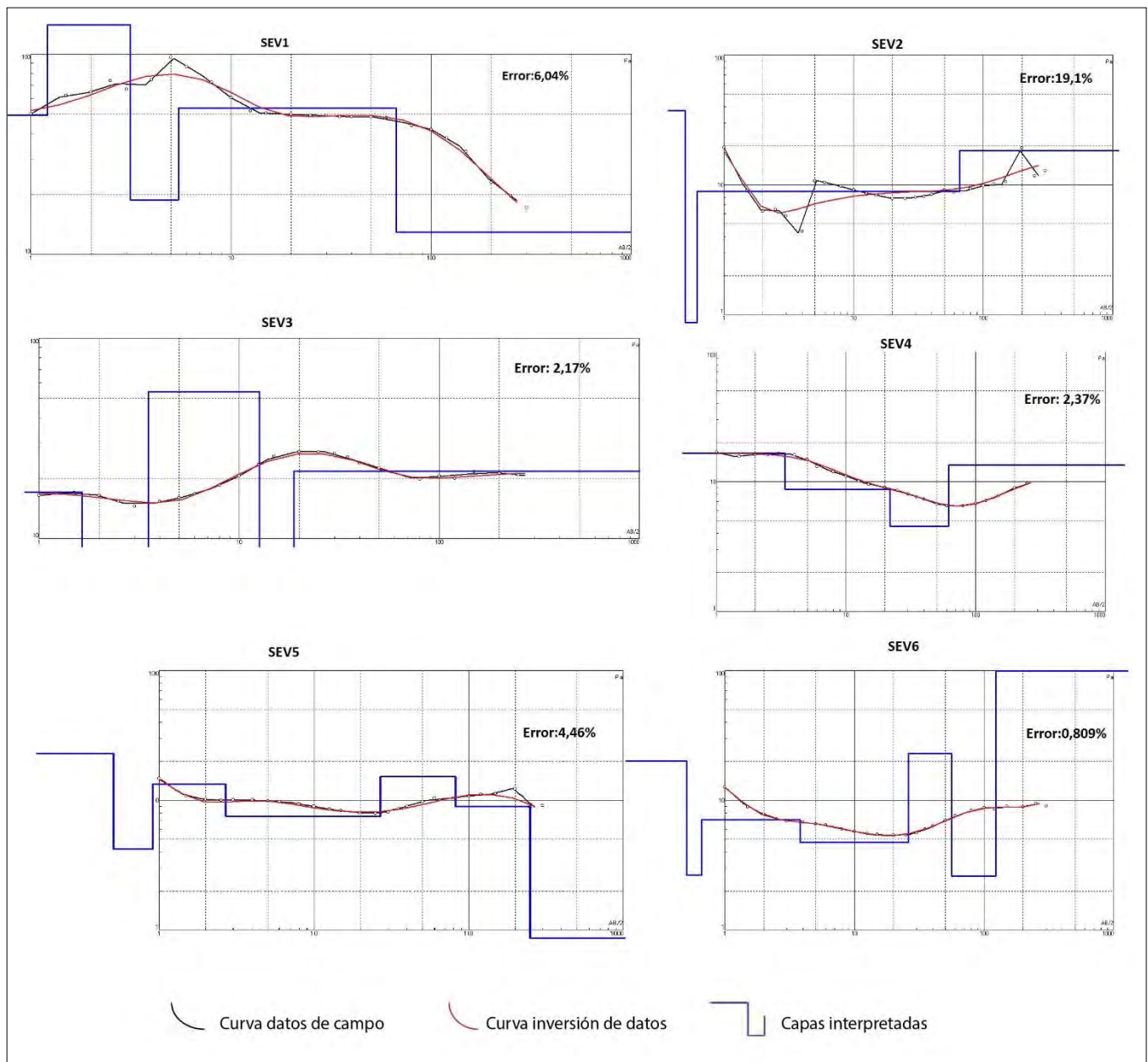


Figura 18: Gráficos obtenidos de la inversión de datos para los SEVs del 1-6. Fuente: Elaboración propia.

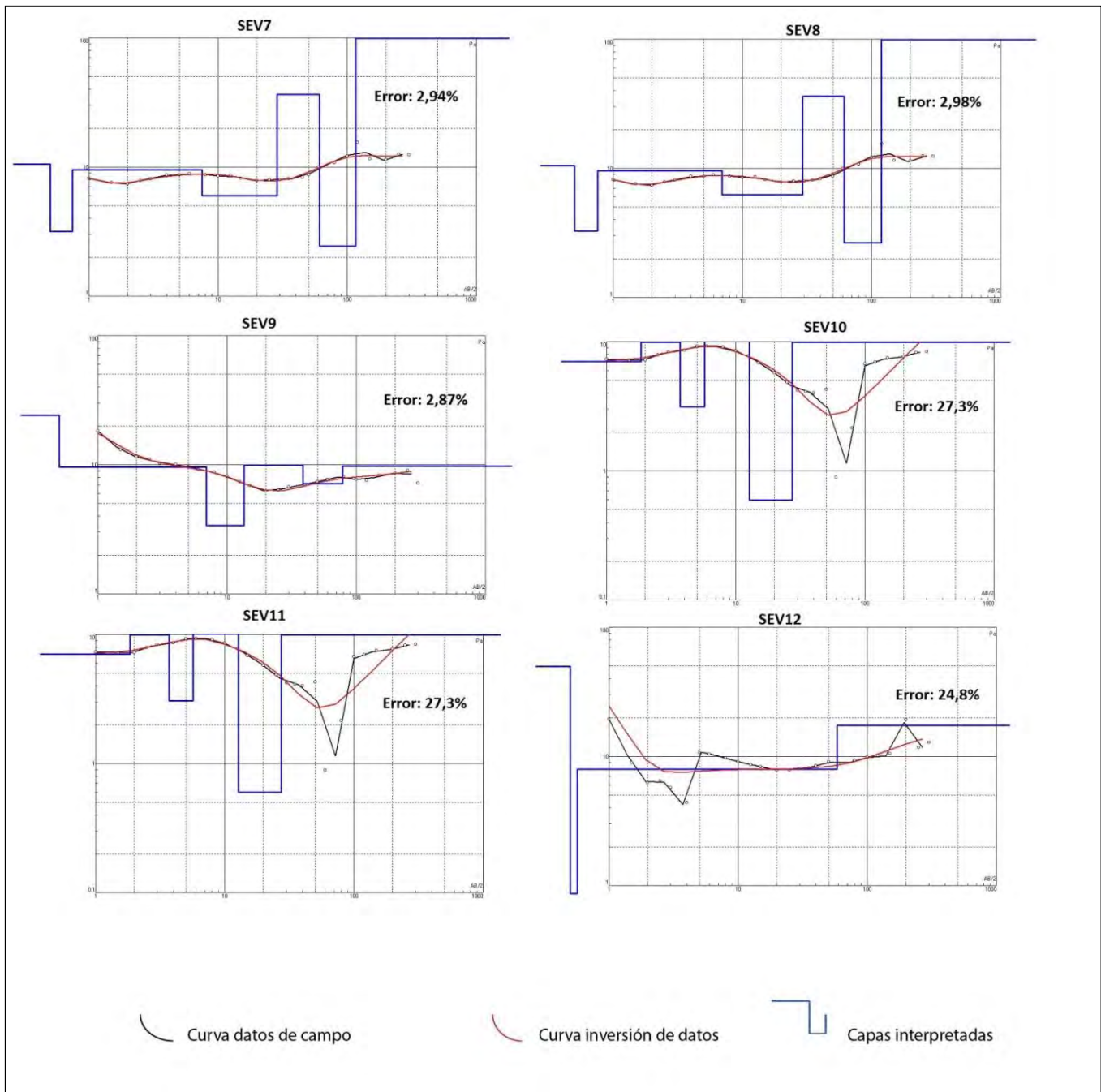


Figura 19: Gráficos obtenidos de la inversión de datos para los SEV del 7-12. Fuente: Elaboración propia.

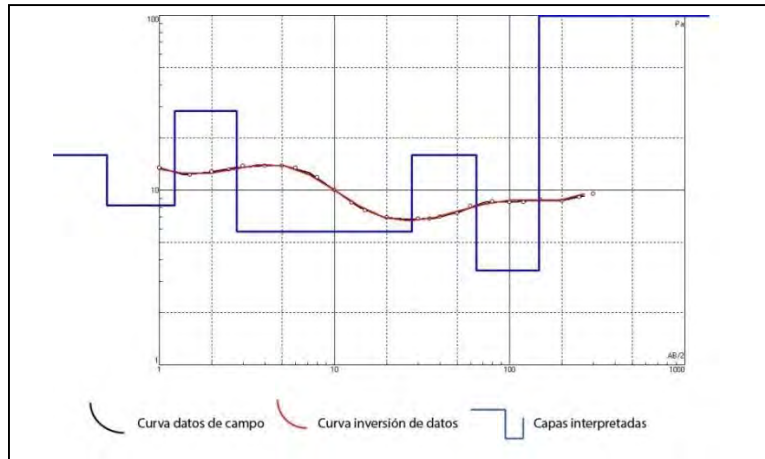


Figura 20: Gráfico de la inversión obtenido para el SEV 13. Fuente: Elaboración propia.

5.1.5 Descripción de perfiles geoelectricos

Tomando como referencia la información obtenida de los diferentes sondeos eléctricos realizados se elaboraron dos perfiles geoelectricos que ilustran los contrastes de resistividad de los diferentes materiales que componen el relleno aluvial. En específico se desarrolló un perfil geoelectrico con una orientación W-E y otro más con una orientación N-S, ambos perfiles se muestran en las figuras 21 y 22.

El perfil geoelectrico 1 fue realizado en el sector central del relleno aluvial con una orientación W-E, tomando en cuenta la información recabada a partir de 3 SEV, en específico el SEV4, SEV12 y SEV8, lográndose determinar la predominancia en el medio de capas con valores bajos de resistividad, principalmente entre 5 y 9 Ωm , estas capas fueron detectadas a diferentes profundidades oscilando entre los 0 y 100m.

De igual manera por medio de esta correlación se logró definir un segundo patrón de capas con mayores valores de resistividad variando desde los 15 hasta los 36 Ωm , las cuales fueron ubicadas a diferentes profundidades, ya sea como secciones intercaladas entre las capas de baja resistividad como es el caso del SEV8 en donde se encontraron entre los 22 y 58 m, o bien como capas más superficiales para el caso del SEV 4 ubicado en el extremo W del perfil, de igual manera que a profundidades mayores a los 60 m como por ejemplo en el caso del SEV12.

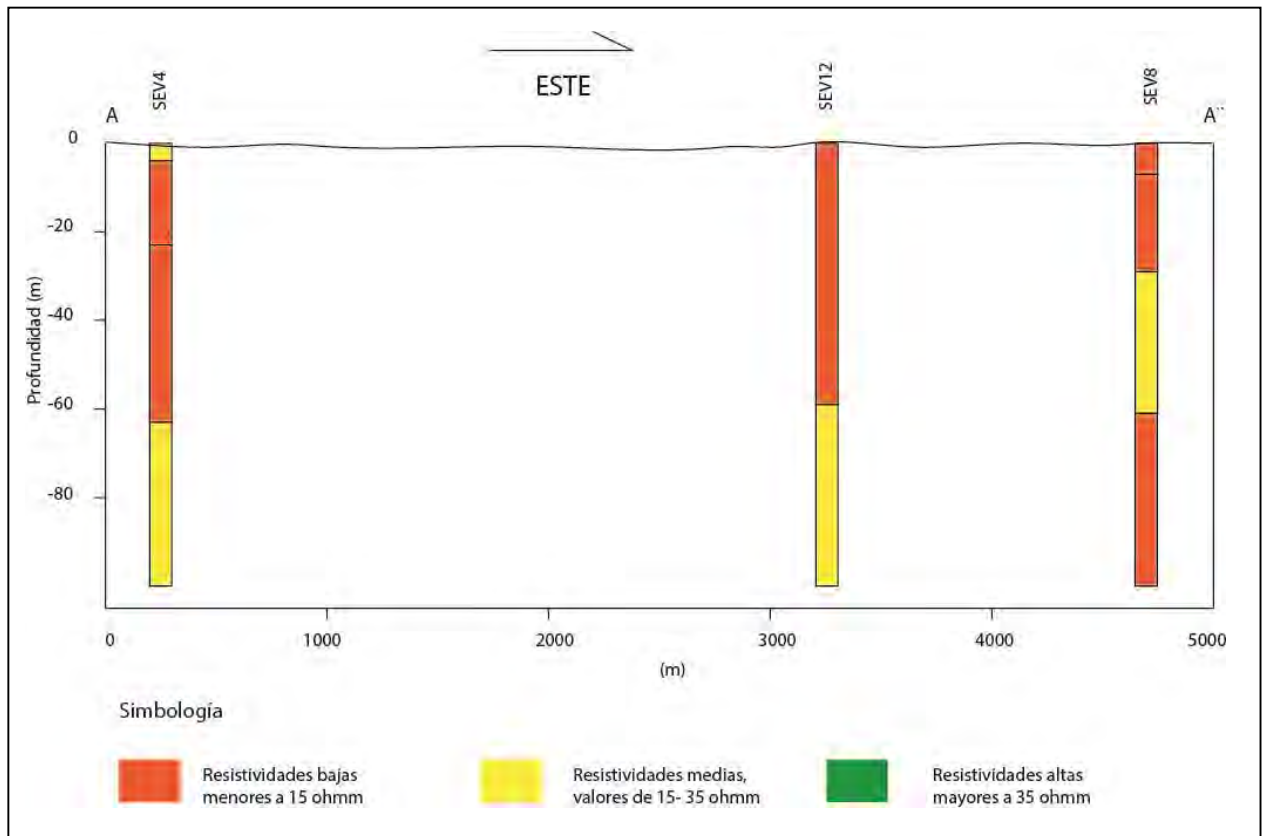


Figura 21: Perfil geoelectrico 1, orientación W – E. Fuente: Elaboración propia.

En el caso del perfil geoelectrico 2 fue realizado en el extremo E del área de estudio, con una orientación de N-S, incluye la información obtenida mediante 4 sondeos eléctricos, los cuales fueron el SEV9, SEV8, SEV7 y SEV6. De acuerdo con la correlación de resistividades llevada a cabo se logró evidenciar la existencia una vez más de dos secuencias de diferente resistividad.

En primer lugar se destaca la presencia de capas con una resistividad menor a los $15 \Omega m$ en la región más superficial del perfil, estas se extienden hasta una profundidad de alrededor de 26 m en la parte central y sur del área analizada, profundidad a la cual aparece una segunda capa con una resistividad variable de entre 23 - 36 Ωm , la cual presenta un espesor promedio de 32 m. A una profundidad aproximada de 60 m aparece nuevamente una capa de baja resistividad con valores inferiores a los $5 \Omega m$, misma que se extiende hasta la parte final del perfil.

Como se puede observar en la figura 22, las resistividades obtenidas para los sondeos SEV8, SEV7 y SEV6 son bastante consistentes en cuanto a espesor y profundidad a la que se hallan cada una de las capas, apareciendo la misma sucesión de capas

conductoras y resistivas, situación que no se presenta para el caso del SEV9, en donde no se detectó la presencia de la capa de resistividad media, por el contrario todos los valores de resistividad obtenidos para este sondeo fueron inferiores a los 15 Ω m.

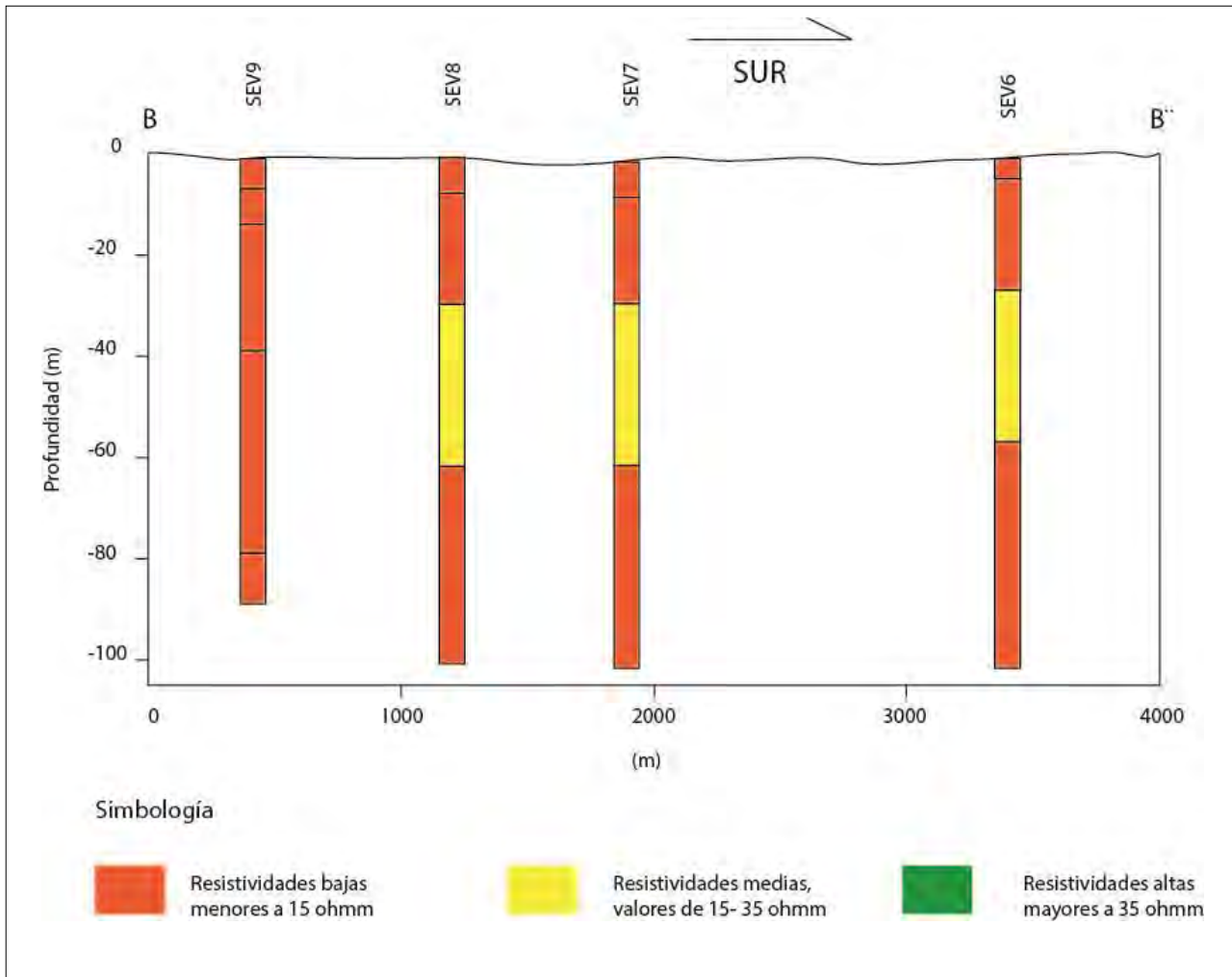


Figura 22: Perfil geoelectrico 2, orientación N-S. Fuente: Elaboración propia.

5.1.6 Correlación geológica

Una vez obtenido el modelo geoelectrico se ha procedido a correlacionar con la geología observada en el sitio, con base en la información obtenida los perfiles geoelectricos pasan a ser perfiles geológicos donde se muestran las diferentes capas de rocas encontradas.

En la figura 23 se aprecia la interpretación geológica realizada a partir del análisis y correlación de los diferentes valores de resistividad obtenidos para el SEV4, SEV12 y SEV8, la orientación del perfil geológico obtenido en este caso es de W-E.

Se determinó que la parte superior del perfil representa una gruesa secuencia de depósitos de origen aluvial, los cuales según el modelo determinado llegan a alcanzar un espesor máximo en la zona cercano a los 60 m. Las resistividades aparentes obtenidas para esta sección variaron desde valores bajos, en general inferiores a los 10 Ωm , hasta resistividades medias, cuyos valores máximos fueron de 36 Ωm . De acuerdo con lo anterior y en concordancia con la interpretación realizada a partir de la información de pozos, se deduce que dicho depósito aluvial está compuesto principalmente por potentes secuencias de composición arcillosa, las cuales se asociaron con los bajos valores de resistividad obtenidos, mismos que según la interpretación realizada se determinó que se hacen más dominantes o recurrentes hacia la parte central del perfil.

Por otro lado se contempló como parte de este depósito aluvial algunas capas de resistividad intermedia, las cuales fueron asociadas con horizontes de composición más arenosa o grava, mismas que fueron detectadas tanto en el caso SEV 4 y SEV8, y cuyos valores de resistividad aparente oscilaron entre los 23 y 36 Ωm . Estas capas por lo general como se puede observar en la figura se localizaron hacia los extremos del área analizada en el perfil, a profundidades variables desde los 0 a los 4 m, como fue el caso del SEV 4 realizado en la parte oeste del perfil, o bien entre los 30 y 60 m tal y como se detectó en el SEV 8, ubicado en el extremo este del área.

A profundidades mayores a los 60 m se determinó la presencia de una sección de baja resistividad aparente, con valores promedio de entre 15 y 5 Ωm , la cual fue asociada a una secuencia de roca arcillitizada, misma que podría estar relacionada con la Unidad de Areniscas Finas Quebrada Manigordo definidas en el presente estudio y que se encuentran aflorando de manera extendida hacia la parte norte del área de estudio, esta relación fue hecha también con base en las descripciones de pozos, en los que se mencionaba la presencia de capas arcillosas de importante espesor a profundidades de entre los 60 y los 115 m, y en las cuales sobresalía en algunos tramos la presencia de conchas o bivalvos que a su vez podrían asociarse con los observados en algunos afloramientos en superficie de esta arenisca. Se determinó que esta capa de roca arcillitizada tiene un espesor mínimo de 40 m, pudiendo extenderse incluso hasta los 60 m, de acuerdo con la interpretación realizada a partir de las descripciones de pozos. Se

detectó además hacia el extremo este de la sección analizada una baja en los valores de resistividad aparente obtenidos para esta capa ($3 \Omega\text{m}$ en SEV8), este descenso en la resistividad se podría deber a un mayor grado de humedad de la roca para esta área en específico, o bien un incremento en el contenido de arcilla de la misma.

Por último cabe mencionar además que se logró visualizar tanto en el caso del SEV8 como en el SEV4 un cambio en los valores de resistividad aparente en las capas más superficiales definidas en el modelo geoelectrico (variación entre 9 y $5 \Omega\text{m}$), específicamente a una profundidad de entre los 6 y 4 m respectivamente, este descenso en las resistividades obtenidas se ha relacionado con la presencia de un nivel de agua superficial en la zona, mismo que concuerda con la interpretación obtenida a partir del análisis de pozos.

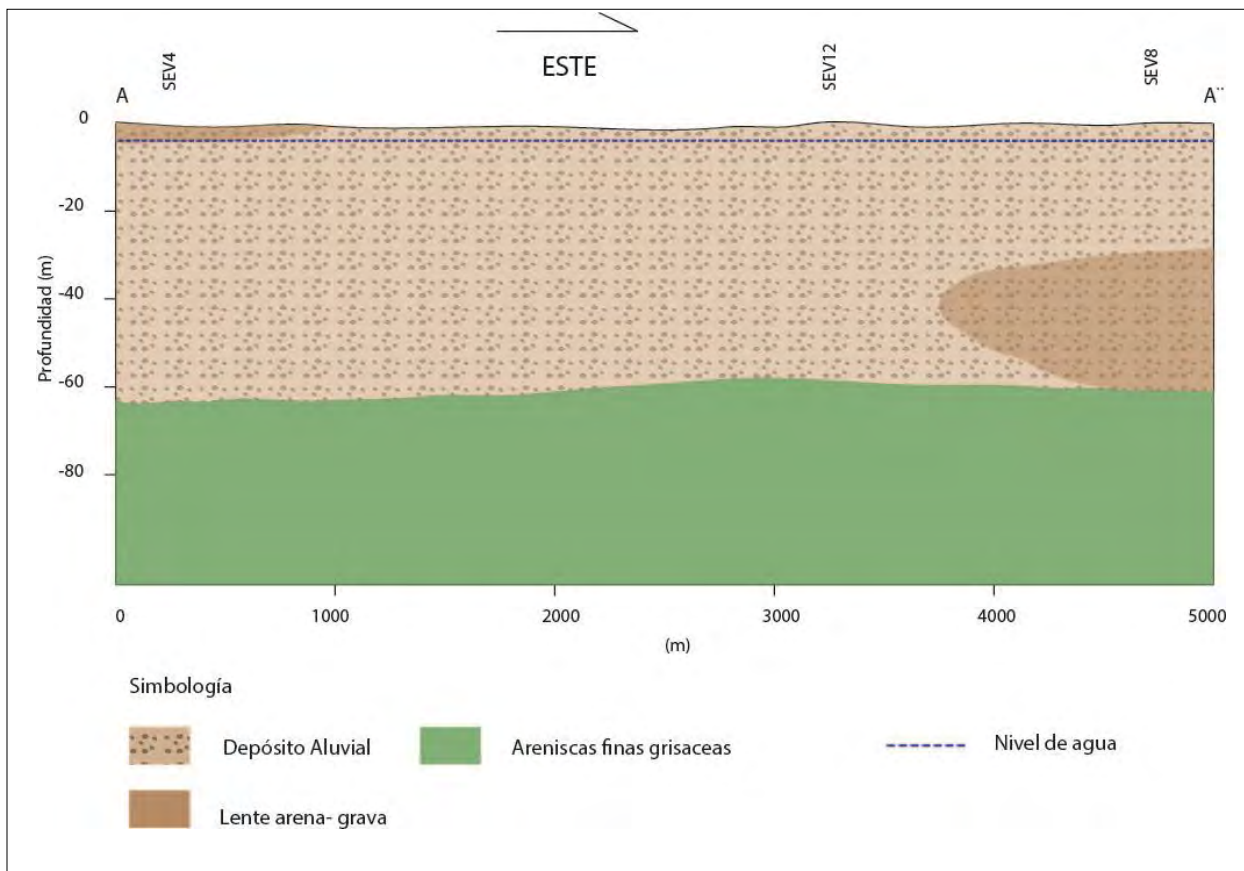


Figura 23: Perfil geológico 1, obtenido a partir de la interpretación de SEV4, SEV12 y SEV8 orientación E-W. Fuente: Elaboración propia.

Por su parte en la figura 24, se muestra el perfil geológico obtenido a partir de la interpretación y correlación realizada de los sondeos SEV6, SEV7, SEV8 y SEV9, este perfil cabe mencionar que fue realizado con una orientación N-S hacia la parte E del área del relleno aluvial.

Como se puede observar en la figura la secuencia estratigráfica definida en general es la misma que la descrita para el caso del perfil anterior, con una sección de poco más de 60 m de espesor hacia la parte superior que corresponde con el relleno aluvial de la zona, un nivel de agua superficial detectado a una profundidad de entre los 4 y 8 m, manifestado por una disminución en los valores de resistividad aparente obtenidos para las capas más superficiales del modelo, de la misma forma hacia la parte inferior de este se da la presencia de una gruesa sección de baja resistividad aparente, la cual se relaciona una vez más con una secuencia de rocas arcillitizadas correlacionada con la Unidad de Areniscas Finas Quebrada Manigordo, el espesor observado en este caso para es muy similar al definido para el perfil anterior, cercano a los 40 m.

En este perfil además se logra visualizar de manera más clara el horizonte de composición arenosa o gravosa que representa la base del depósito aluvial, el cual es el mismo observado en el perfil W-E hacia el extremo E del mismo, pero en este caso visto de manera transversal. Se logra apreciar un espesor uniforme para esta sección de alrededor de 35 m.

Cabe mencionar el hecho de que para profundidades superiores a los 100 m algunos de los sondeos realizados detectaron la presencia de capas con resistividades aparentes considerablemente altas, superiores a los 150 Ω m, las cuales han sido relacionadas con algún tipo de roca dura o masiva, la cual se deduce podría tratarse de una secuencia de lavas perteneciente al Complejo Ígneo de Osa, misma que representaría el basamento de la zona analizada.

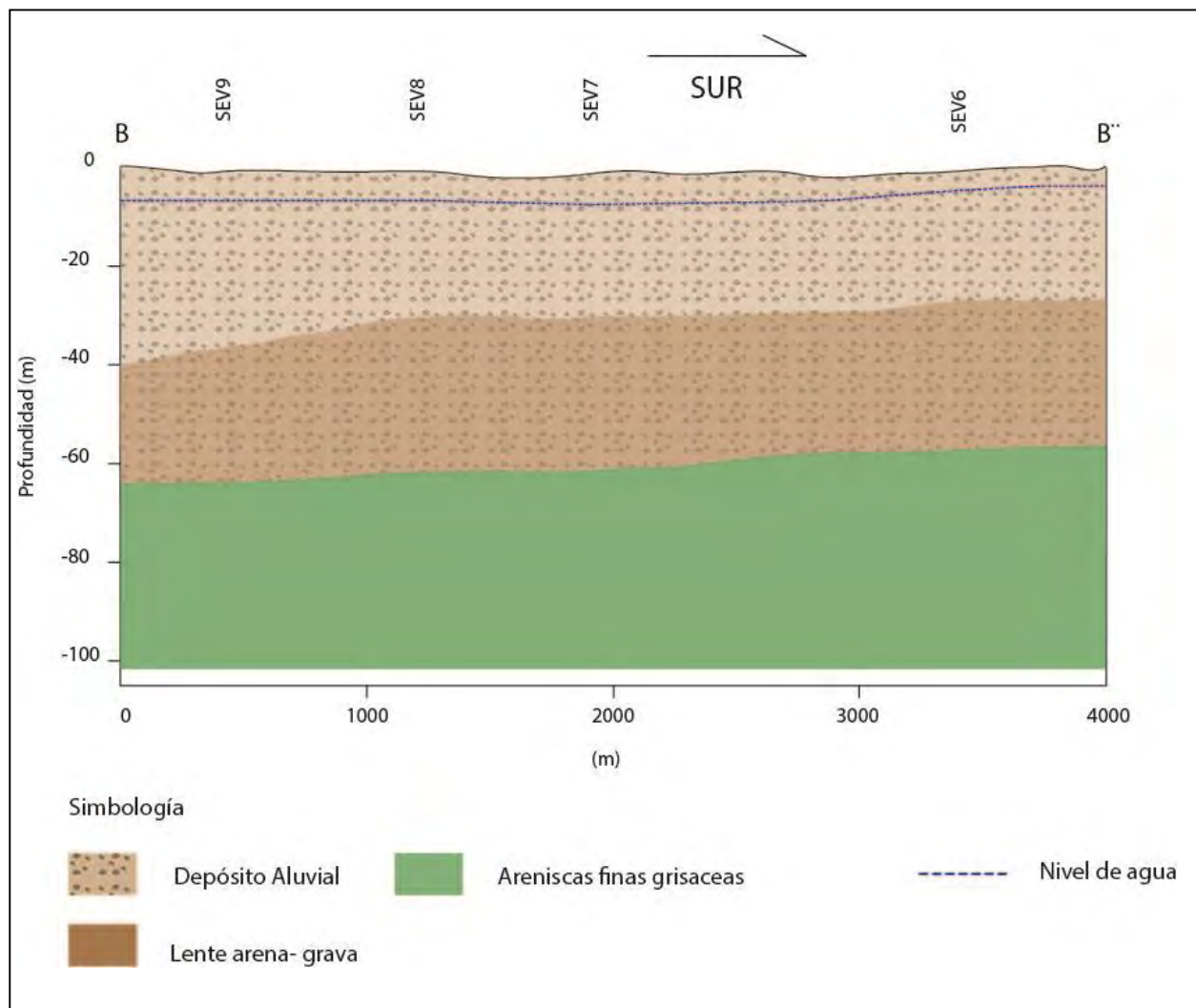


Figura 24: Perfil geoelectrico 2, orientación N-S. Fuente: Elaboración propia.

6 MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO

6.1 Introducción

En la zona no existen mapas hidrogeológicos o publicaciones que detallen la hidrogeología del área de estudio. La única información asociada consiste en los registros de pozos y nacientes del SENARA y de la Dirección de Aguas del MINAE, información que sirvió de fundamento para plantear la interpretación hidrogeológica mostrada en los siguientes apartados, en síntesis dentro del área de estudio hay registrados un total de 16 pozos, mismos que se enlistan en el cuadro 4.

6.2 Inventario Pozos

Se realizó un inventario de los pozos que están dentro o en las cercanías del área de estudio. La información con la ubicación de los pozos se tomó de la Base de datos del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA).

Con la información del cuadro se confeccionó el mapa con la localización de los 16 pozos presentes en el área de estudio (figura 25).

Cuadro 4: Listado de pozos registrados en las bases de datos de SENARA

Latitud Lambert N	Longitud Lambert N	Código	Nivel estático (m)	Nivel dinámico (m)	Litología reportada	Caudal l/s
69405	645897	GF-31	-	-	Intercalación de arcillas azules-grises a los 123m roca con agua	9,470
65034	646258	GF-41	3,64	29,80	nivel a los 20m en arenas	0,410
69235	645898	GF-32	-	-	intercalación de arcillas azules-grises a los 123m roca con agua	6,940
71035	645743	GF-21	-	-	0	12,62
68634	645749	GF-17	-	-	arcillas gris-azules de 37 a 56 m calizas?, luego arcillas y 120 roca y agua	9,470
68827	642747	GF-19	-	5,80	Intercalación arcillas, a 87,5 balastre	17,32
69028	642997	GF-34	-	14,64	Intercalación arcillas y a los 88 m roca y agua	14,64
70928	642692	GF-20	-	4,27	Balastre Blanco con agua a los 80m	15,75
69036	646248	GF-18	-	-	Intercalación de arcillas,fósiles de 59 a 68 m, continúan arcillas, 105 m lava con agua?	18,93
70622	640042	GF-22	-	5,49	Intercalación de arcillas a los 78 m arenas y rocas con agua	20,82
68985	646073	GF-33	-	-	Intercalación de arcillas azules, a los 123m balastre	10,41
71920	639138	GF-14	-	3,97	15 a 7 m arena de 7 a 11,29 m Balastre blanco con agua	18,93
68934	645688	GF-30	-	2,14	Arcillas. 61 a 70 barro con conchas, 79 a 88 m igual al anterior , 118m arena gruesa y agua	13,88
72720	639036	GF-15	-	-	4,5 a 10 m balastre blanco	0,000
73295	640754	PI-3	11,44	11,47	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.	6,000
73175	641036	PI-4	16,00	-	0 a 10m Aluvión grueso, 10 a 15 Arcilla con arena marrón de baja permeabilidad, 15 a 38m arenas con arcilla gruesa permeabilidad aparente alta.	9,500

Debido a lo extenso de la información, otros datos como elevación, profundidad, caudal requerido y caudal explotado, tipo de pozo, uso y perfil de armado, se encuentra en un cuadro de los anexos digitales, así mismo podrá encontrar el registro de los pozos utilizados y obtenidos de la base de datos del SENARA.

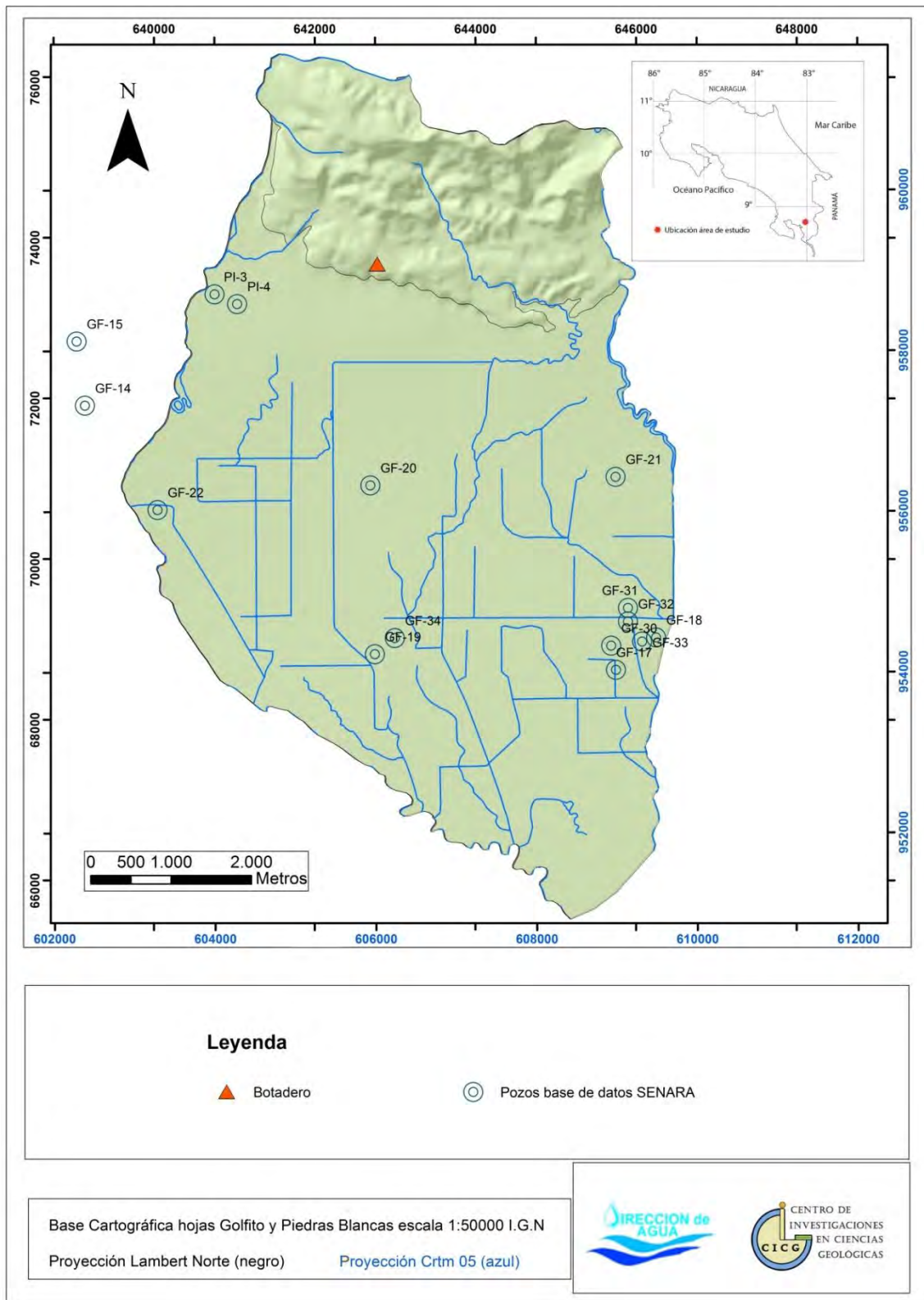


Figura 25: Mapa de elementos hidrogeológicos: pozos. Fuente: Elaboración Propia.

6.3 Concesiones Ubicadas dentro del área de estudio

Según la información disponible en la base de datos de la Dirección de Aguas, se localizaron 9 concesiones de agua dentro del área de estudio.

El cuadro 5, muestra la información más destacada de cada una de estas concesiones. Es importante mencionar que no existe mucha información hidrogeológica acerca de ellas, únicamente se conoce su ubicación y que todas corresponden con pozos pertenecientes a la compañía Palma Tica S.A.

Cuadro 5: Listado de las concesiones de agua presentes dentro del área de estudio. Fuente: Dirección de Aguas.

Expediente	Longitud Lambert N.	Latitud Lambert N	Código de concesión	Propietario
6257P1	646030	69482	Pozo 15	Palma Tica S.A.
6257P2	645830	69381	Pozo 16	Palma Tica S.A.
6257P3	645429	69780	Pozo 17	Palma Tica S.A.
6257P4	645430	69280	Pozo 18	Palma Tica S.A.
6257P5	645230	69179	Pozo 19	Palma Tica S.A.
6257P6	645325	71381	Pozo 20	Palma Tica S.A.
6257P7	643028	69474	Pozo 21	Palma Tica S.A.
6257P8	642929	69074	Pozo 22	Palma Tica S.A.
6257P9	642423	71674	Pozo 23	Palma Tica S.A.

La ubicación espacial de las concesiones encontradas se puede apreciar en el mapa de la figura 26.

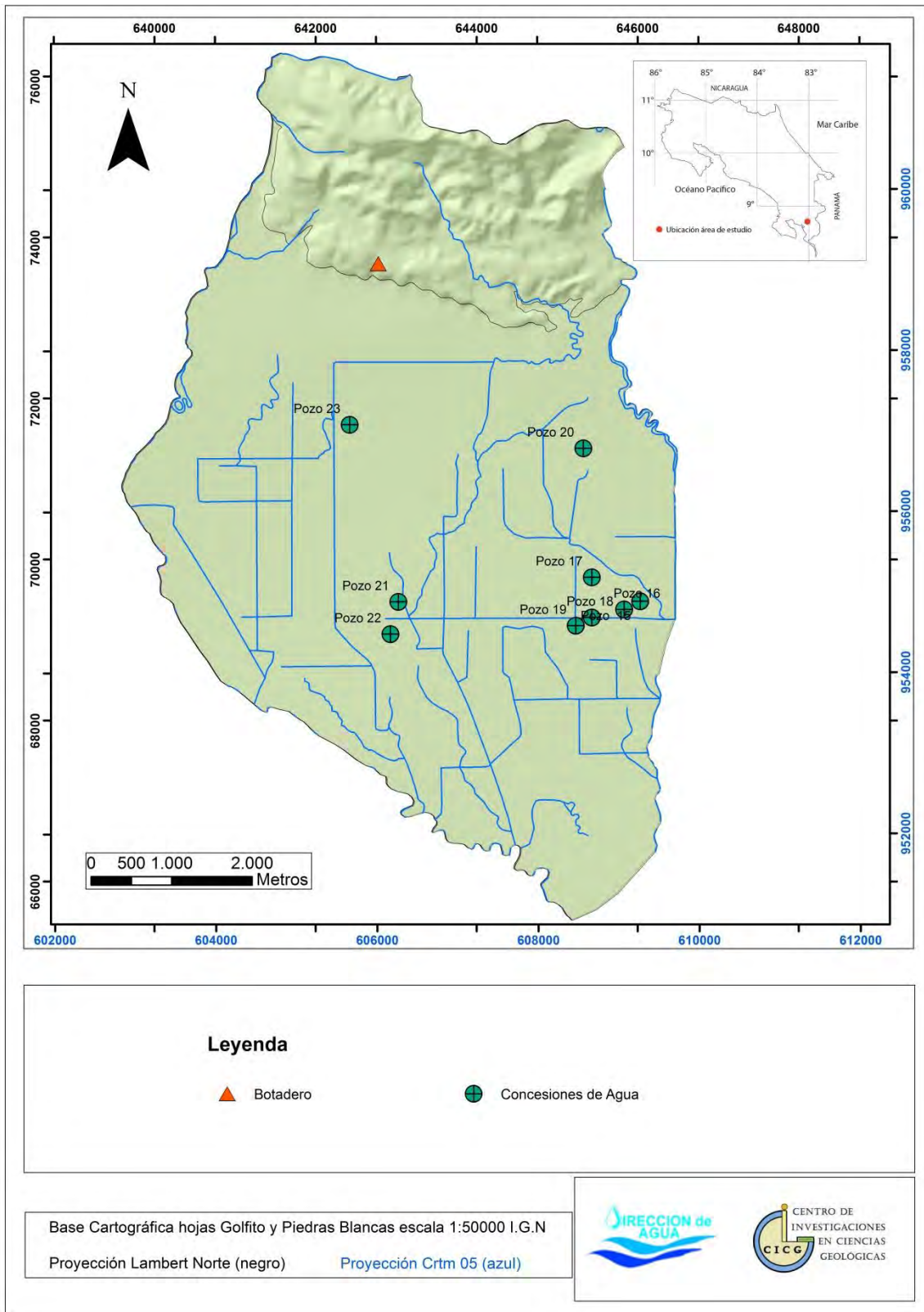


Figura 26: Mapa de ubicación de las concesiones de agua, presentes en la base de datos de la Dirección de Aguas. Fuente: Elaboración propia.

6.4 Unidades hidrogeológicas locales

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 mapeo geológico realizado en la zona, se procedió a establecer una correlación de la totalidad de la información recabada, con el objetivo de establecer un modelo hidrogeológico regional para el área de estudio, el cual se desarrollará en el presente apartado.

Para el área de estudio, utilizando los criterios de la ASTM (2004), se determinó la presencia de un sistema acuífero, el cual se compone de tres unidades hidrogeológicas principales denominadas: Unidad Hidrogeológica Río Claro, Unidad Hidrogeológica Manigordo y Unidad Hidrogeológica La Esperanza.

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

La Unidad Hidrogeológica Manigordo está representada por una serie de rocas arcillitizadas correlacionada con 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 de estudio, mientras que hacia la parte central y sur se determinó que esta misma secuencia de areniscas se halla a una profundidad aproximada de 60 m, subyaciendo al relleno aluvial de la zona y extendiéndose hasta una profundidad superior a los 100 m, en donde se considera está 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, abarcando la parte central y Sur del área de estudio e incluso extendiéndose fuera de ella.

En el cuadro 6, se resumen las principales características asociadas a cada de los unidades hidrogeológicas que conforman el modelo establecido.

Cuadro 6: Modelo hidrogeológico general establecido 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 (mbns)	0-3	1er nivel entre 5 y 10 mbns. 2do nivel a 80 mbns	120 mbns
Grado de confinamiento	No confinado	No confinado 1er nivel Confinado 2do nivel	Confinado
Caudal promedio	0,5375 l/s	1er nivel no reportado 2do nivel 13 l/s	14 l/s
Transmisibilidad (m ² /d)	No determinado	No determinado	No determinado
Unidad estratigráfica	Unidad depósitos recientes	Formación Térraba	Complejo Ígneo de Osa.
Edad	Cuaternario	Oligoceno	Campaniano-Eoceno

6.4.1 Unidad Hidrogeológica Río Claro

Representa la unidad más profunda definida en el presente modelo, ubicándose a alrededor de 120 mbns, la misma fue definida según la información obtenida 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 y de la cual se están abasteciendo (cuadro 7).

Cuadro 7: Resumen de los pozos en los que se definió la Unidad Hidrogeológica Río Claro.

Pozo	Longitud Lambert N	Latitud Lambert N	Nivel del agua (mbns)	Caudal (l/s)
GF-17	645749	68634	118	9,47
GF-18	646248	69036	117	18,9
GF-30	645688	68934	119	14
GF-31	645897	69405	123	15
GF-32	645898	69235	119	12
GF-33	646073	68985	123	12

Según las descripciones litológicas presentadas en los registros de pozos, 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. Esta interpretación fue

respaldada además por los resultados obtenidos en algunos de los sondeos eléctricos especialmente en los que se realizaron en la parte E del área de estudio, en los cuales a profundidades cercanas o incluso superiores a los 100 m se detectó la presencia de capas muy resistivas con valores superiores a los 150 Ω m, los cuales se asocian a una secuencia de rocas masivas que pueden relacionar con lavas.

Debido a que la profundidad máxima de los pozos con los cuales se definió esta unidad no superaba los 130 m, no fue posible definir con exactitud el espesor de esta unidad hidrogeológica. El caudal promedio reportado para esta unidad es de 14 l/s y la dirección del flujo de agua es predominantemente hacia el sureste.

La información presentada en los registros de pozos es insuficiente para definir los parámetros hidráulicos de esta unidad hidrogeológica como por ejemplo la transmisibilidad y el gradiente hidráulico. Por último se considera esta unidad hidrogeológica como un acuífero de tipo confinado.

6.4.2 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, estando incluso expuesta ampliamente en superficie hacia la parte norte de la misma, específicamente en las regiones montañosas del área.

Se considera que esta unidad se extiende desde la parte norte hasta la región central y sur del área de interés, sitios 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 estima 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 de esta unidad las descripciones de pozos la describen 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 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 geoelectrica con bajos valores de resistividad eléctrica (entre 15 y 5 Ω m) a partir de una profundidad promedio de 60 m y extendiéndose hasta más de 100 m, correlacionados con material muy arcilloso y saturado, situación que es concordante 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:

6.4.2.1 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 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 apreciar en ciertos puntos de las cercanías al botadero de basura algunos afloramientos del nivel de agua o pequeños lloraderos, lo cual evidencia la presencia de un nivel de agua poco profundo o 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 1 y 2) 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 en la zona. Es importante aclarar que estas nacientes no fueron observadas en el campo.

Por ende, de acuerdo a lo anterior, este nivel acuífero podría estar siendo impactado por la lixiviación de contaminantes muy variados procedentes de los residuos existentes en el área del botadero.

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 arenarcillosa, se desconoce su potencial hidráulico, aunque de acuerdo con su posible extensión se considera que podría ser de bajo a moderado.

6.4.2.2 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 (cuadro 8).

Cuadro 8: Resumen de los pozos en los que se definió el nivel de agua inferior de la Unidad hidrogeológica Manigordo.

Pozo	Longitud Lambert N.	Latitud Lambert N.	Nivel del agua (mbns)	Caudal (l/s)
GF-20	642692	70928	80	15,78
GF-22	640042	70622	78	20
GF-34	642997	69028	88	5,68
GF-19	642747	68827	84	14

Según las descripciones de pozos la litología corresponde con una intercalación de arena media a gruesa 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, esto porque existan una granulometría más gruesa o bien un menor grado de alteración, el cual se ve traducido en la presencia de una roca menos arcillitizada son 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 10 m, según el registro del pozo GF-22, el caudal promedio estimado es de alrededor de 13 l/s, considerándose esta unidad como un acuífero de tipo confinado de moderado potencial. La dirección de flujo determinada a partir de la elaboración de las líneas equipotenciales para esta unidad es predominantemente hacia el norte-noreste, coincidiendo con las mediciones de buzamientos y fracturas realizados en los afloramientos en superficie de la Unidad de Areniscas Finas Quebrada Manigordo, con lo cual se considera que en este caso el flujo del agua pudiese estar influenciado por la tectónica imperante en la zona.

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

6.4.3 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 km². 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 del área del relleno aluvial, las cuales suelen presentar intercalaciones 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 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 muy superficial, el cual oscila entre los 5 y 1 m de profundidad. Para determinar la existencia de este nivel se utilizó la información de los pozos GF-41 y PI-5 (cuadro 9), 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 norte 641165 E y 72125 N, además de la realización de una campaña de excavación utilizando para ello una máquina ahoyadora o perforadora manual.

Cuadro 9: Pozos y perforación manual en los que se determinó el nivel de agua para la unidad hidrogeológica La Esperanza.

Pozo	Longitud Lambert N.	Latitud Lambert N.	Nivel del agua (mbns)	Caudal (l/s)
PI-5	638930	75321	5,64	0,5
GF-41	646258	65034	3,64	
Excavado	641165	72125	1,5	0,575
Perforación manual	641244	71658	1	

La información disponible de pozos resulta en general insuficiente para poder determinar de manera precisa un espesor para esta unidad hidrogeológica, sin embargo si tomamos en cuenta el espesor que se estima pudiese tener el relleno aluvial en la zona tenemos que esta unidad podría alcanzar un espesor máximo de 60 m. 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 sureste, 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, el cual según lo observado en la información es poco utilizado, salvo en el caso de los pozos PI-3 y PI-5 que ubican sus rejillas sobre este acuífero aluvial, además del caso del pozo excavado el cual se utiliza exclusivamente para labores de riego.

Por último, en lo que respecta a los resultados obtenidos a partir de los sondeos eléctricos para esta unidad cabe mencionar que se detectó un mayor contraste en los valores de resistividad obtenidos, los cuales alcanzaron un máximo de hasta 54 Ωm asociado a las secuencias de composición más arenosa o grava componentes del relleno aluvial y valores mínimos inferiores a los 10 Ωm , los cuales fueron los que se obtuvieron con mayor recurrencia, mismos que se relación a capas de arcilla de importante espesor.

Las Figuras 27 y 28 muestran los perfiles hidrogeológicos elaborados tanto para la zona del relleno aluvial como para la totalidad del área de estudio. En la figura 29, muestra el mapa hidrogeológico para el área de estudio confeccionado de acuerdo con la información definida en el presente modelo.

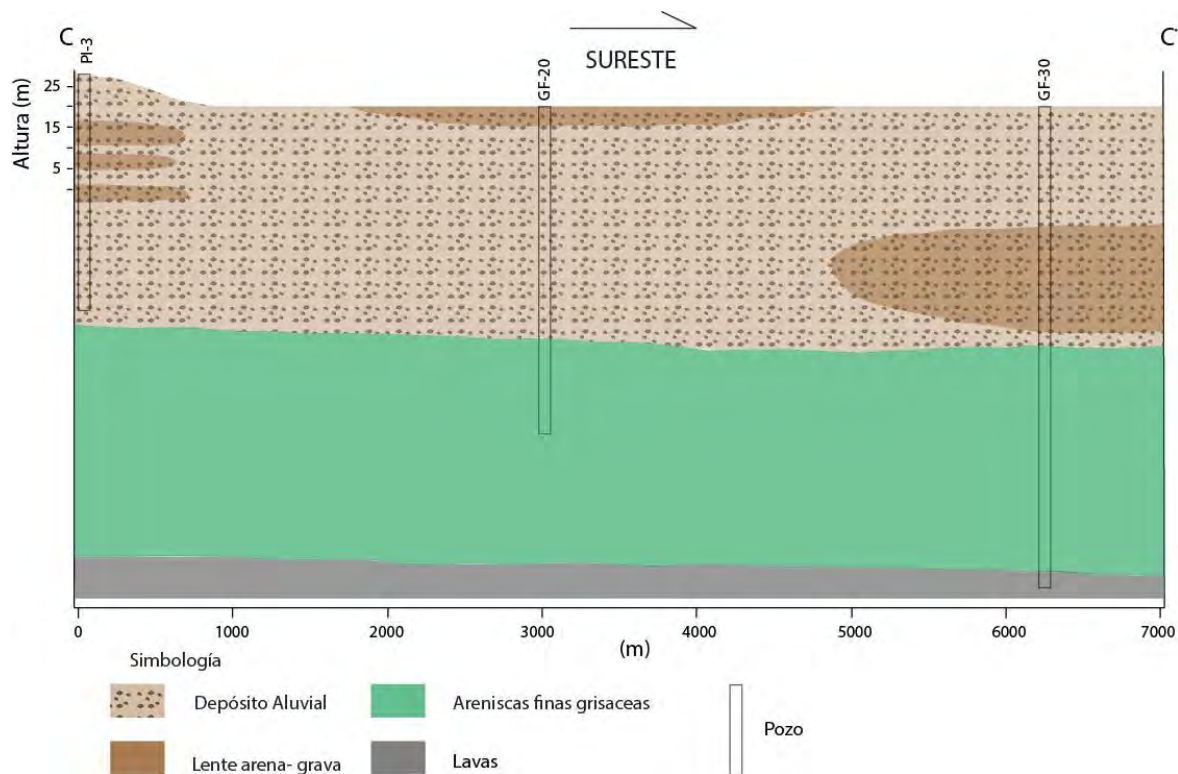


Figura 27: Perfil esquemático del modelo hidrogeológico para el área de la zona aluvial, basado en información de pozos. Fuente: Elaboración propia.

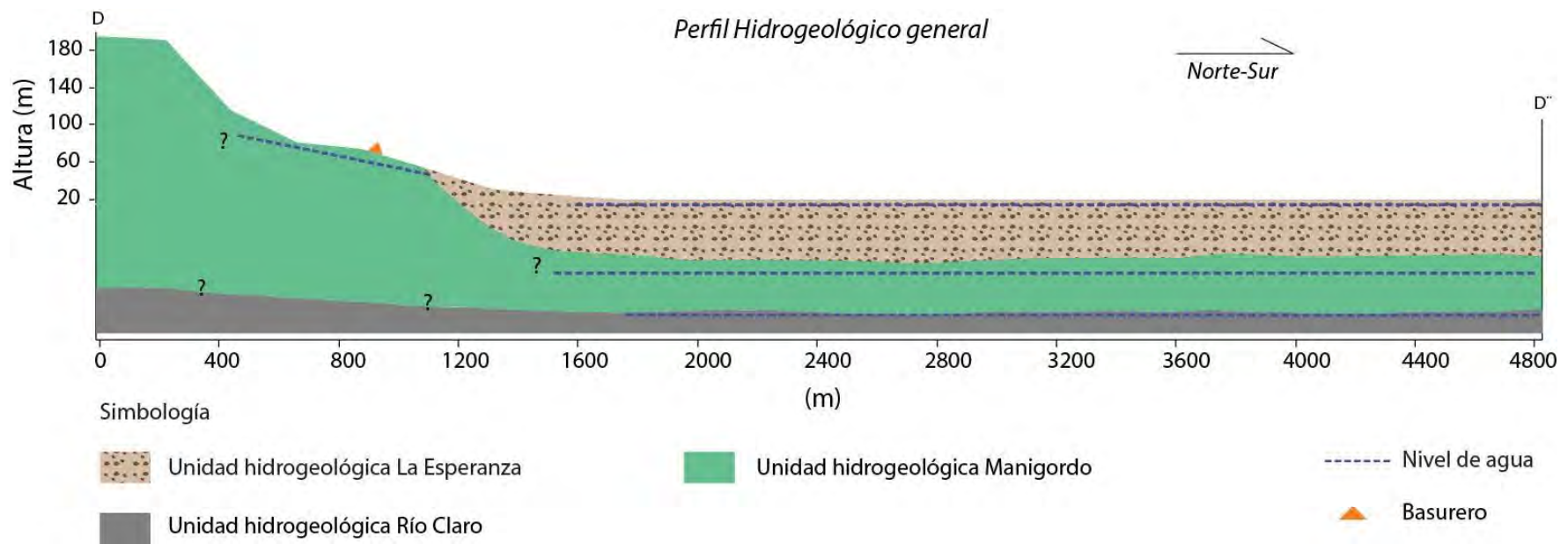


Figura 28: Perfil esquemático del modelo hidrogeológico conceptual. Fuente: Elaboración propia.

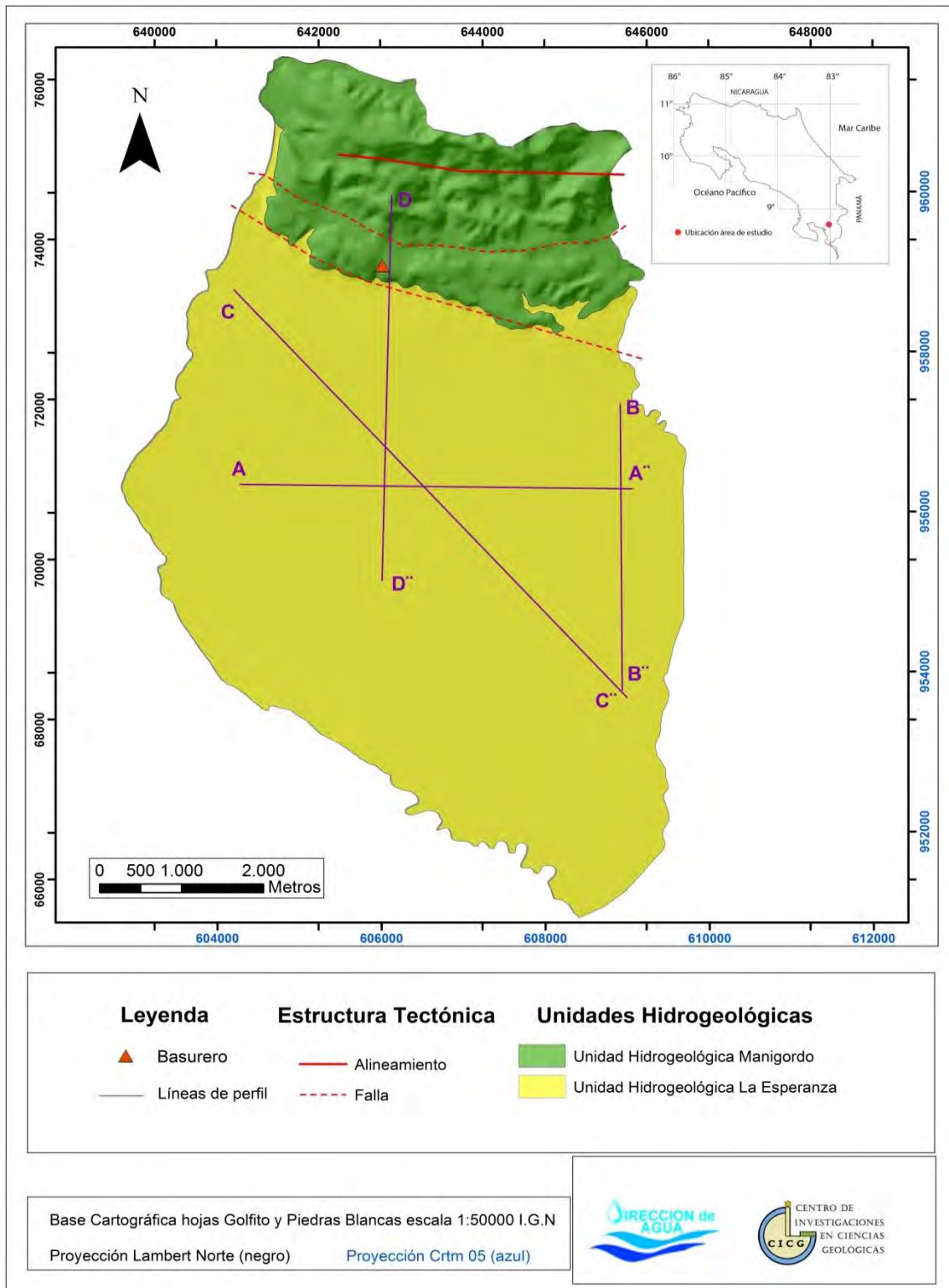


Figura 29: Mapa hidrogeológico general del área de estudio. Fuente: Elaboración propia

6.5 Determinación de redes de flujo

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 definida.

Para la construcción de las redes de flujo asociadas a cada nivel de agua determinado, fue necesario el análisis minucioso 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 SEV 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 tanto superficiales como profundos dentro del área de estudio.

En el caso de la Unidad Hidrogeológica La Esperanza, la cual corresponde con el nivel acuífero más superficial determinado para la zona plana del área de estudio, se determinó en términos generales una dirección de flujo predominante hacia el sureste, en una dirección aproximadamente paralela al Río Claro y hacia la confluencia de este con el río Coto Colorado. Para la elaboración de esta red de flujo se consultó la información disponible en los registros de los pozos PI-5 y GF-41, además de la información recabada a partir de la medición de nivel de agua en un pozo artesanal ubicado en las cercanías del poblado de La Esperanza y la realización de una excavación por medio de una perforadora manual en las inmediaciones de dicho poblado. En el cuadro 10 se detalla la ubicación de cada uno de estos pozos y la excavación realizada así como también el nivel de agua reportado, en figura 30 se muestra el detalle de la red de flujo diseñada para esta unidad.

Cuadro 10: Ubicación de pozos y excavación utilizados para la definición de la red de flujo para la Unidad Hidrogeológica La Esperanza.

Pozo	Longitud Lambert N	Latitud Lambert N	Profundidad del nivel de agua (m)
GF-41	65034	646258	3,64
PI-5	75321	638930	5,64
Pozo artesanal	72125	641165	1,5
Excavación	71658	641244	1

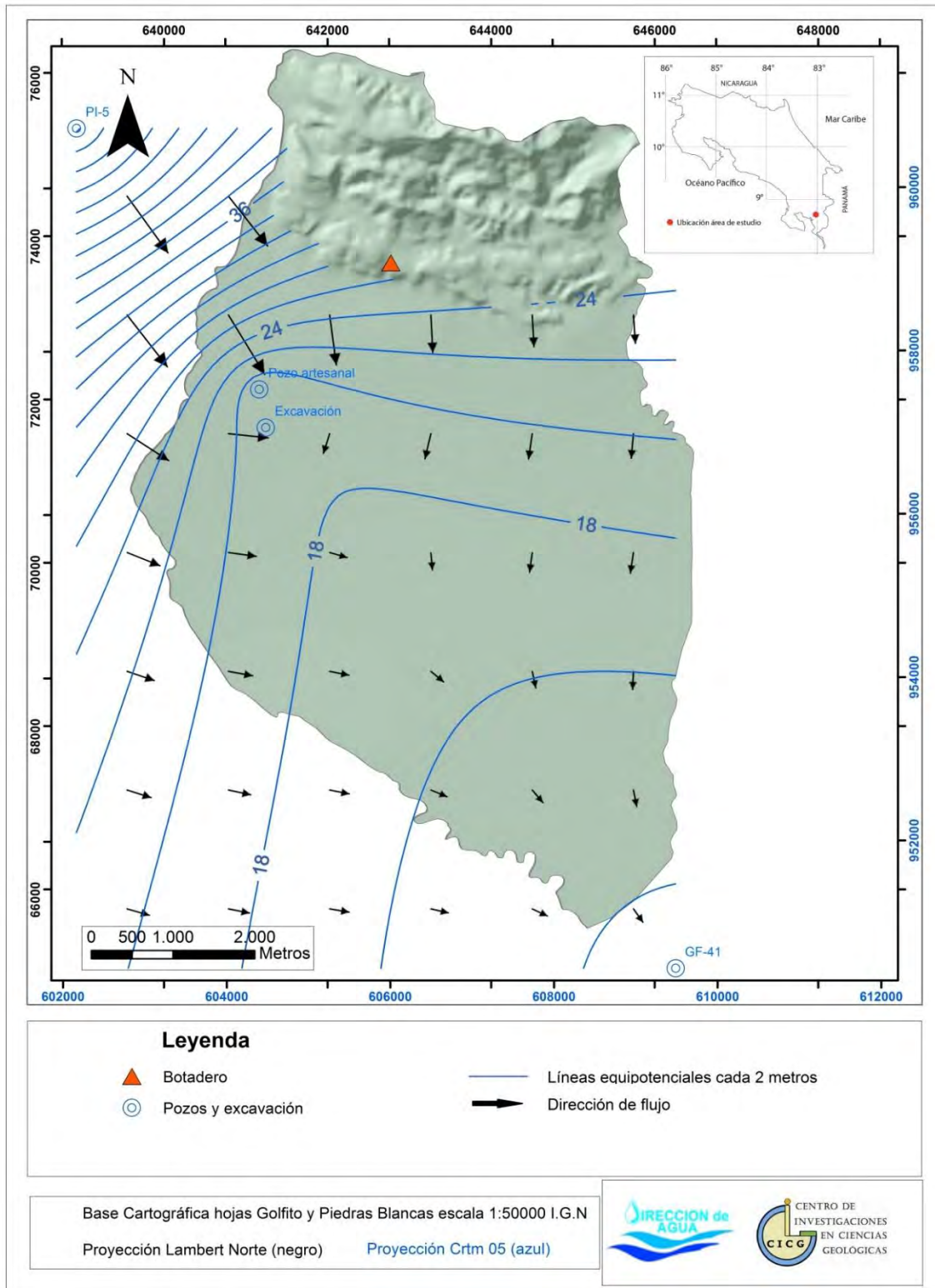


Figura 30: Mapa donde se muestra la dirección de flujo del agua subterránea para la Unidad Hidrogeológica La Esperanza. Nótese que las líneas equipotenciales se extienden más allá del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

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, el cual podría ser impactado por el vertedero de basura, no fue posible la construcción de una red de flujo ya que no existe información suficiente referente a niveles de agua debido a la escasez 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-19, GF-30, tal y como se muestra en el cuadro 11. Se determinó que la dirección del flujo de agua para este nivel inferior es predominantemente norte-noreste, esta dirección concuerda con los buzamientos y fracturas medidos en la parte norte del área de estudio, sitio en donde se halla aflorando la Unidad de Areniscas Finas Quebrada Manigordo, las cuales han sido asociadas a esta unidad hidrogeológica, por lo que se puede deducir que en este caso la dirección del agua está siendo influenciada por la tectónica regional de la zona, manifestada por los buzamientos medidos para estas areniscas con dirección noreste y por la presencia de fracturas con rumbo norte-sur en esa secuencia de areniscas.

En la figura 31 se muestra el detalle de la red de flujo establecida para el nivel de agua inferior de la Unidad Hidrogeológica Manigordo.

Cuadro 11: 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	Longitud Lambert N	Latitud Lambert N	Profundidad del nivel de agua (m)
GF-34	642997	69028	88
GF-22	640042	70622	87
GF-19	642747	68827	84
GF-30	645688	68934	88

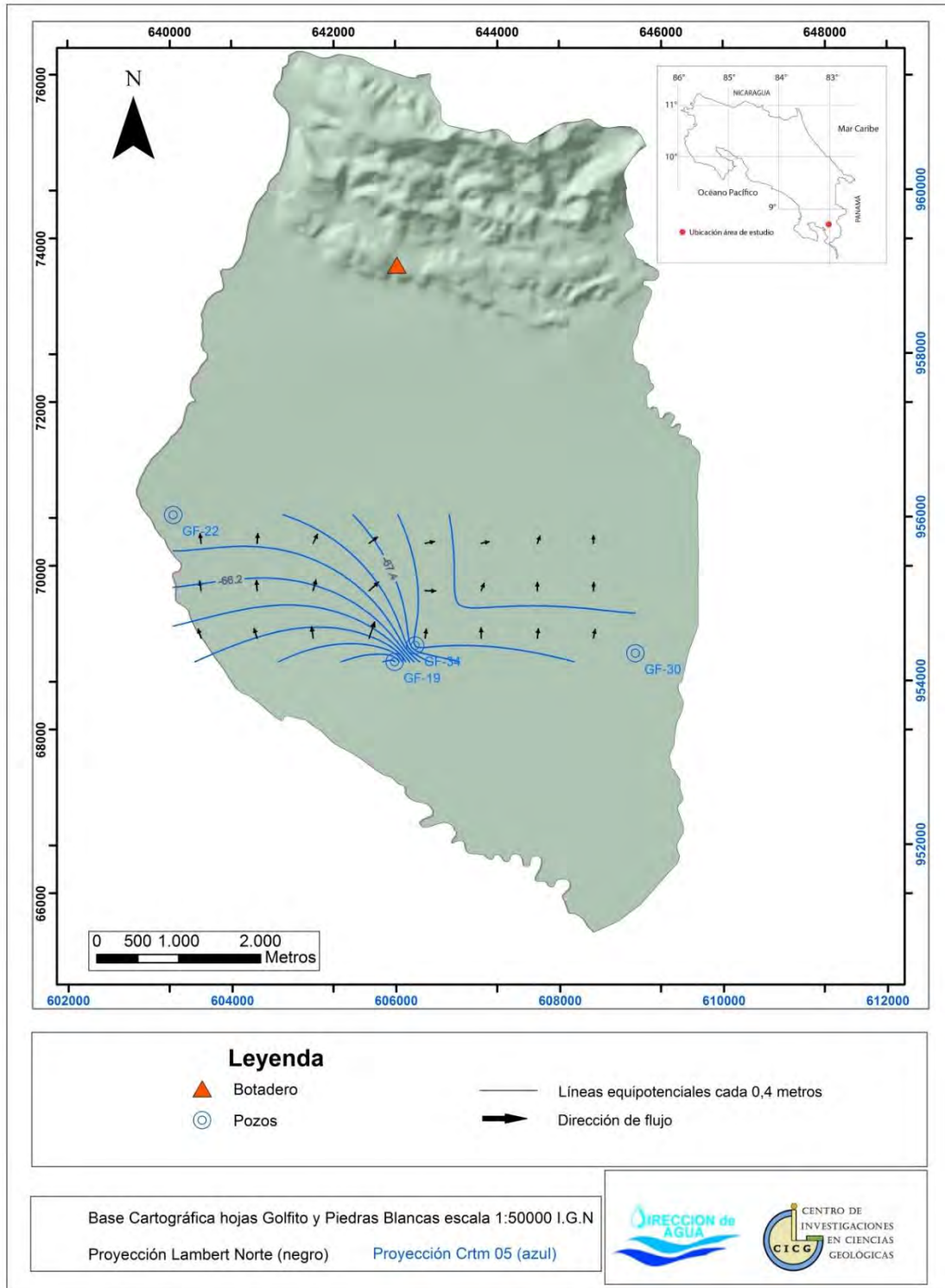


Figura 31: Mapa donde se muestra la dirección de flujo del agua subterránea para el nivel inferior de la Unidad Hidrogeológica Manigordo. Nótese que las líneas equipotenciales son influenciadas por la distribución de los pozos. Fuente: Elaboración propia.

El nivel de agua más profundo determinado en el presente estudio está definido por la Unidad hidrogeológica Río Claro, la cual según la información de pozos ubicados en la parte plana del área de estudio se halla a una profundidad aproximada a los 120 m.

La dirección de flujo asociada a esta unidad hidrogeológica fue definida con base en la información de los pozos GF-32, GF-30 y GF-18, además de la interpretación obtenida a partir de algunos sondeos eléctricos verticales realizados en la zona, específicamente el SEV-6 y SEV-8, a partir de lo cual se determinó una dirección predominante para este nivel acuífero hacia el sur-sureste.

En el cuadro 12 se muestra la ubicación y el nivel de agua reportado para los pozos en los que definió la red de flujo para esta unidad, mientras que en figura 32 se presenta el detalle de dicha red de flujo

Cuadro 12: Ubicación de los pozos y SEV con los que se definió la red de flujo para la Unidad Hidrogeológica Río Claro.

Pozos y SEV	Longitud Lambert N	Latitud Lambert N	Profundidad Nivel de agua (m)
GF-32	645898	69235	119
GF-30	645688	68934	119
SEV-6	645720	68530	123
SEV-8	645710	70755	118
GF-18	646248	69036	120

Cabe mencionar que este nivel de agua fue detectado únicamente en los pozos ubicados hacia el extremo este del área de estudio, los cuales corresponden con los pozos más profundos existentes en la zona, e igualmente solo los SEV realizados en esta misma área detectaron capas con resistividades que pudiesen asociarse con este nivel de agua, razón por la cual la red de flujo diseñada toma en cuenta únicamente esta área para la cual si se contó con información de este nivel de agua.

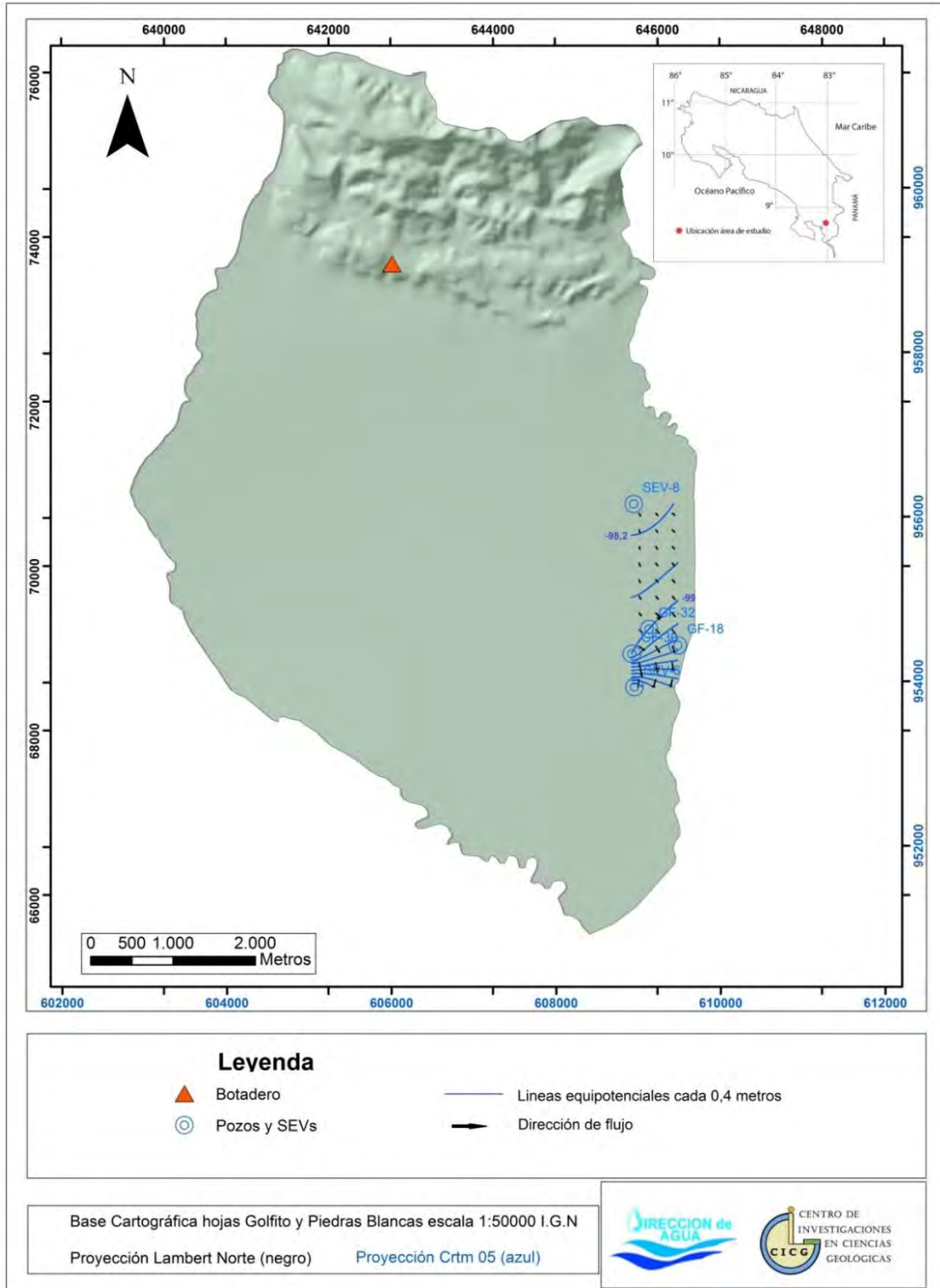


Figura 32: Mapa donde se muestra la dirección de flujo del agua subterránea para la Unidad Hidrogeológica Río Claro. Nótese que las líneas equipotenciales son influenciadas por la distribución de los pozos. Fuente: Elaboración propia.

6.6 Campaña de excavaciones y medición de caudal de un pozo artesanal

Una de las limitantes que se tuvo en el desarrollo del estudio lo fue sin duda la escasa información referente a la determinación de niveles de agua en la zona, especialmente para el caso de la unidad hidrogeológica La Esperanza, misma que representa el nivel acuífero más superficial del área, para solventar esta situación se llevó a cabo una campaña de excavación que tuvo como objetivo primordial la determinación de niveles de agua superficiales en la zona del relleno aluvial.

En total se realizaron 6 excavaciones distribuidas en diferentes puntos a lo largo de dicho relleno, utilizando para ello una perforadora manual marca Stihl BT-360 con una capacidad máxima de perforación de dos metros (figura 33).



Figura 33: Hoyadora manual utilizada para la prospección del nivel de agua superficial. Fuente: Elaboración propia.

De las 6 perforaciones realizadas únicamente fue posible detectar un nivel de agua subterránea en la perforación 3, en la cual dicho nivel apareció a una profundidad de 1 m (figura 34).



Figura 34: Ejecución de una perforación manual, nótese en la parte inferior la presencia de un nivel de agua a aproximadamente 1 m de profundidad. Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro 13 se presenta un listado con la ubicación de las diferentes excavaciones realizadas, así como algunas observaciones realizadas principalmente referentes al tipo de suelo encontrado en cada excavación.

Cuadro 13: Resumen de excavaciones realizado mediante perforadora manual Stihl.

Excavación	Longitud Lambert N	Latitud Lambert N	Profundidad máx. alcanzada (m)	Observaciones
Exc-1	645755	68460	1,30	Suelo arcilloso color café-naranja de alta plasticidad
Exc-2	641228	69275	1,55	Suelo arcillo-arenoso café oscuro
Exc-3	641244	71658	1,32	Presencia de nivel de agua a 1m de profundidad
Exc-4	645488	72324	1,60	Suelo con textura areno-arcillosa color café- naranja
Exc-5	643723	70441	1,52	Mismo suelo que Exc-4
Exc-6	641039	73844	0,50	Presencia de grandes bloques impidió el proceso de perforación. Suelo de textura arenosa

De igual manera otra de las actividades realizadas fue la medición de caudales en pozos, en este caso se realizó una única medición a un pozo excavado ubicado en las cercanías del poblado de la Esperanza (Lambert Norte 641165 E y 72125 N), en el cual se determinó un caudal promedio 0,575 l/s. Además se realizó la medición del nivel estático del agua, el cual se ubicó a una profundidad de 1,5 mbns.

En el cuadro 14 se resumen algunas de las observaciones realizadas en dicho pozo el cual se representa en la figura 35.

Cuadro 14: Medición de caudal y nivel de agua en un pozo excavado, ubicado en las cercanías del poblado de La Esperanza.

N.	Longitud Lambert N	Latitud Lambert N	Elevación (m)	Nivel Estático (mbns)	Uso de agua	Estado	Aforo	Otras características
2	641165	72125	35	1,5	Riego	Bien protegido	0,575 l/s	Tubo 16 pulgadas, media tubería de la bomba, bomba de superficie de un caballo



Figura 35: Medición de caudal en pozo artesanal. Fuente: Elaboración propia.

6.7 Campaña de aforos

Como parte del trabajo de investigación requerido en el presente estudio se procedió a realizar una campaña de aforos, en el mes de febrero del año 2016, en los principales ríos que drenan a través del área de estudio, esto con el fin de estimar el caudal promedio de cada uno de estos y poder a su vez detectar algún cambio en dicho caudal que pudiera inducir la existencia de alguna conexión con algún sistema acuífero de la zona, ya sea de carácter influente o efluente.

En específico los ríos que fueron objeto de análisis para obtener una estimación de su caudal fueron los ríos Claro y Caracol, mismos que a su vez representan los dos principales cuerpos fluviales del área de estudio, se intentó realizar igualmente algunas mediciones de caudal sobre algunos ríos o quebradas de menor rango sin embargo al momento de la realización de la campaña estos presentaron un caudal sumamente bajo o nulo, situación que dificultó la medición mediante el método del caudalímetro, por lo que se recurrió a la estimación de caudal mediante métodos empíricos como lo es el método del flotador.

En total se realizaron cuatro aforos, de los cuales dos se llevaron a cabo en el río Claro y los restantes dos se realizaron en el río Caracol.

El procedimiento seguido para la toma de mediciones fue la subdivisión de cada cauce en diferentes secciones de 1 m de longitud, en las cuales con la ayuda de un caudalímetro digital se procedió a medir la velocidad del flujo de agua a diferentes profundidades con el fin de obtener un valor promedio de la velocidad para cada sección, de igual manera se realizaron mediciones de profundidad del cauce tanto al inicio como al final de cada una de las secciones en las que este fue subdividido esto con el fin de estimar la geometría de cada sección y del cauce en general. Finalmente una vez obtenidos los datos de velocidad y área de las diferentes secciones, por medio del producto de ambos parámetros se obtuvo el caudal representativo para cada sección y con la suma de cada uno de estos se calculó el caudal el total del cauce.

A continuación se presenta el detalle de cada uno de los aforos realizados:

6.7.1 Aforos 1 Río Claro

Esta medición fue realizada en las coordenadas Lambert Norte 640511 E y 73309 N, la longitud total de la sección medida fue de 15 m, por lo que el cauce en este caso fue subdividido en 15 secciones de 1 m cada una.

En el cuadro 15 se muestran cada de las mediciones realizadas y sus respectivos resultados.

Cuadro 15: Resultados Aforo 1 Río Claro.

Sección	V promedio (m/s)	Área (m ²)	Caudal (m ³ /s)
1	0,2	0,26	0,052
2	0,433	0,6	0,26
3	0,47	0,68	0,317
4	0,47	0,62	0,289
5	0,45	0,56	0,252
6	0,42	0,52	0,217
7	0,37	0,4	0,147
8	0,35	0,4	0,14
9	0,35	0,38	0,133
10	0,27	0,36	0,096
11	0,18	0,36	0,066
12	0,2	0,28	0,056
13	0,18	0,32	0,059
14	0,1	0,28	0,028
15	0,03	0,12	0,004
Caudal total			2,116

La figura 36 muestra de manera esquemática el procedimiento seguido para la realización del aforo y la obtención de los respectivos caudales para cada una de las secciones en que fue dividido el cauce para su medición. Se determinó un caudal total para el río Claro en esta sección medida igual 2,116 m³/s.

6.7.2 Aforo 2 Río Claro

En este caso la medición se hizo en las coordenadas Lambert Norte 640654 E y 73483 N, la longitud total de la sección medida fue de 14,20 m. El cuadro 16 muestra los resultados obtenidos para este aforo.

Cuadro 16: Resultados aforo 2 Río Claro.

Sección	V promedio (m/s)	Área (m ²)	Caudal (m ³ /s)
1	0,133	0,2	0,027
2	0,35	0,36	0,126
3	0,533	0,46	0,245
4	0,583	0,5	0,292
5	0,55	0,48	0,264
6	0,567	0,44	0,249
7	0,5	0,41	0,205
8	0,417	0,38	0,158
9	0,383	0,38	0,146
10	0,317	0,4	0,127
11	0,25	0,36	0,09
12	0,3	0,36	0,108
13	0,233	0,32	0,075
14	0,05	0,14	0,007
15	0	0,02	0
Caudal total		2,118	

La figura 36 muestra de manera esquemática el procedimiento de medición utilizado, así como también los resultados obtenidos referentes a caudales de cada sección, lo mismo que para el caudal total obtenido. Por su parte la figura 37, muestra una fotografía del aforo realizado en una sección del río Claro.

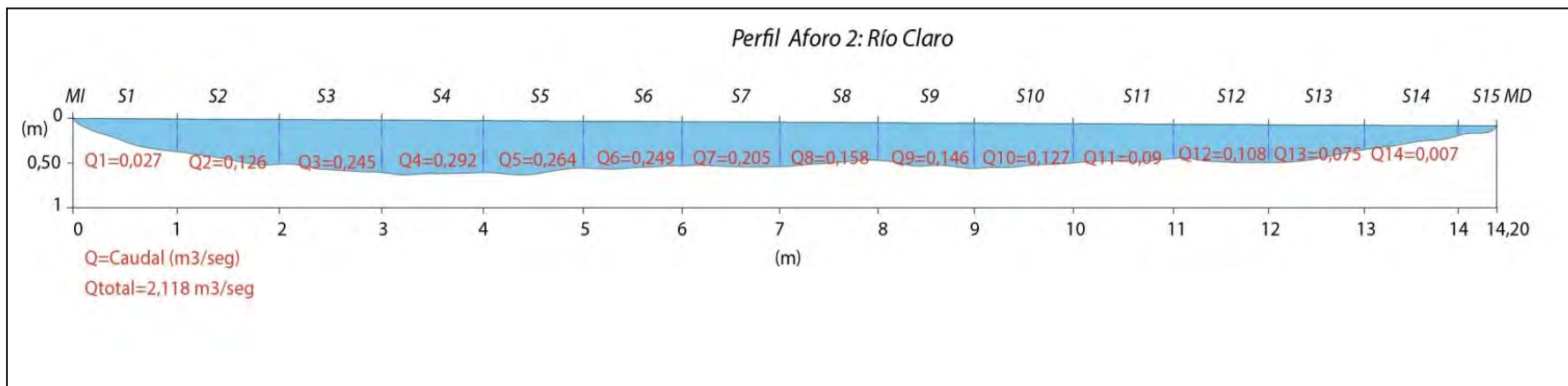
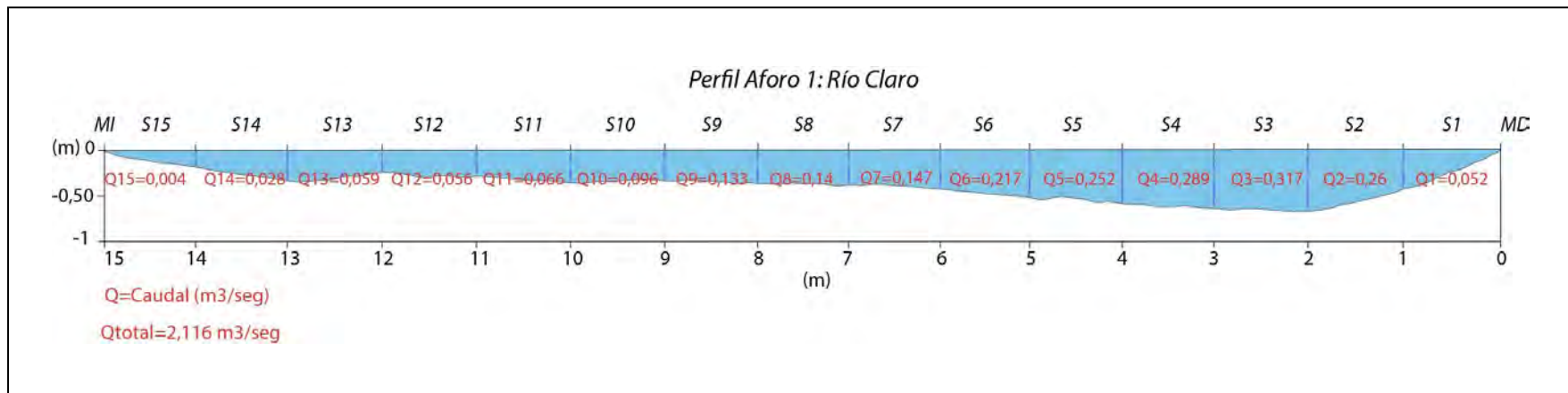


Figura 36: Perfil esquemático, aforo 1 y 2 Río Claro. Fuente: Elaboración propia.



Figura 37: Aforo realizado en una sección del Río Claro. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos tanto para el aforo 1 como para el aforo 2 se logró de determinar que los caudales totales medidos en ambos casos tienen muy poca variación entre sí (2,116 y 2,118 m³/s respectivamente), por lo cual se deduce que el caudal a través de ambas secciones medidas se podría considerar como constante, con un muy ligera faltante de caudal de apenas 0,002 m³/s, tomando en consideración el hecho de que el aforo 2 fue realizado aguas arriba con respecto al aforo 1, por lo que se podría considerar que a través de esta sección existe algún tramo en el cual se favorece el aporte de agua del río hacia algún cuerpo acuífero superficial. Lógicamente, no se descarta que la variación tan pequeña del caudal (equivalente a 2 l/s) esté dentro del margen de error de las mismas mediciones.

6.7.3 Aforo 1 Río Caracol

Este aforo fue realizado en las coordenadas Lambert Norte 645779 E y 73328 N, la longitud de la sección medida del cauce fue de 8,5 m. En cuadro 17 se presentan los resultados obtenidos para este aforo. En la Figura 38 se observa el perfil obtenido para la sección aforada del río, así como los correspondientes caudales para cada una de las secciones y el caudal total obtenido.

Cuadro 17: Resultados Aforo 1, Río Caracol.

Sección	Velocidad promedio (m/s)	Área (m ²)	Caudal (m ³ /s)
1	0,075	0,050	0,004
2	0,16	0,130	0,021
3	0,27	0,180	0,048
4	0,35	0,245	0,086
5	0,45	0,340	0,153
6	0,63	0,400	0,253
7	0,55	0,370	0,204
8	0,25	0,230	0,058
9	0,05	0,045	0,002
Caudal total			0,828

6.7.4 Aforo 2 Río Caracol

En este caso la ubicación en que se realizó este aforo fue en las coordenadas Lambert Norte 645744 E y 73232 N, la longitud de la sección del cauce medida fue de 8,7 m, en el cuadro 18 se muestran los resultados obtenidos de caudales para cada sección de cauce analizada, así como el caudal total obtenido para este aforo. Además en la figura 38 se muestra de manera esquemática el perfil del cauce analizado, así como también los resultados obtenidos. Por su parte la figura 39, muestra una fotografía del aforo realizado en una sección del río Caracol.

Cuadro 18: Resultados aforo 2, Río Caracol.

Sección	Velocidad promedio (m/s)	Área (m ²)	Caudal (m ³ /s)
1	0,05	0,06	0,003
2	0,12	0,14	0,016
3	0,15	0,215	0,032
4	0,22	0,34	0,074
5	0,28	0,49	0,139
6	0,31	0,54	0,167
7	0,31	0,445	0,137
8	0,25	0,27	0,068
9	0,1	0,065	0,007
Caudal total			0,642

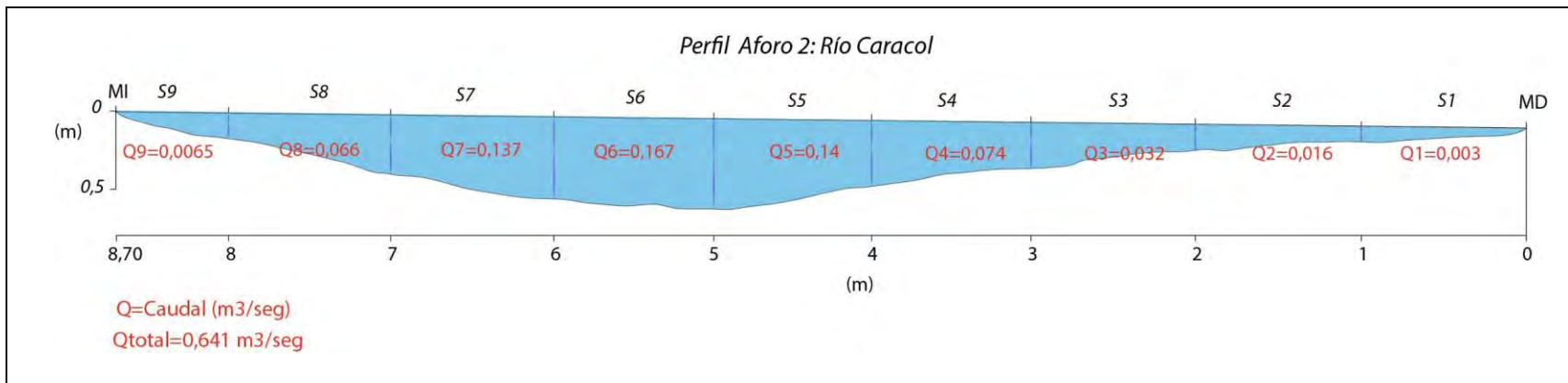
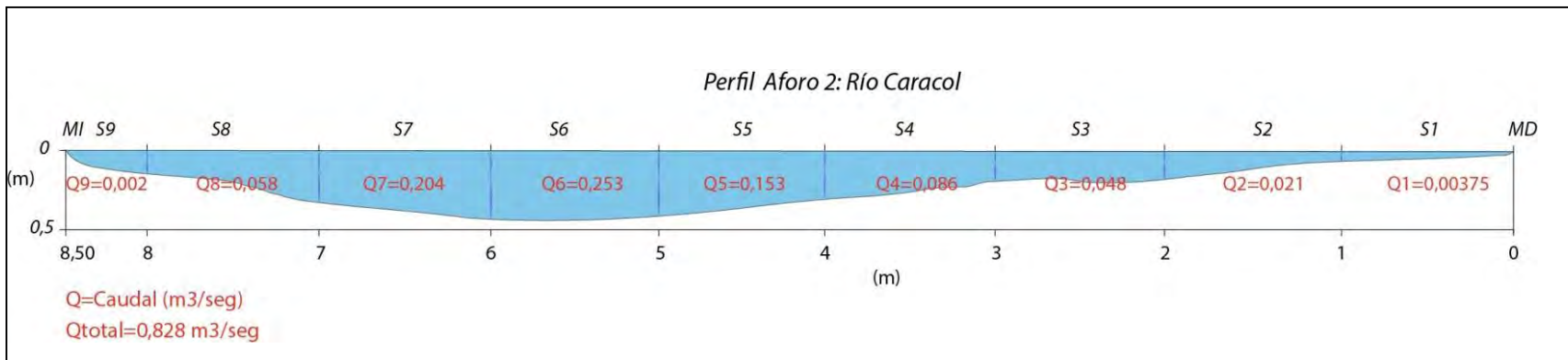


Figura 38: Perfil esquemático, aforo 1 y 2 Río Caracol. Fuente: Elaboración propia.



Figura 39: Aforo realizado en una sección del Río Caracol. Fuente: Elaboración propia.

A partir de los cálculos de los aforos realizados en el cauce del río Caracol se determinó un descenso significativo en el caudal medido entre el aforo 1 y el aforo 2 ($0,828 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0,641 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente), este descenso en el caudal medido pudiera estar relacionado a la presencia de sobre el cauce de alguna secuencia litológica cuyas propiedades tiendan a favorecer el aporte de agua hacia un acuífero superficial, siendo en este caso el río un influente para tal acuífero, cabe mencionar además que en la zona cercana al punto en donde se llevó a cabo el aforo 2 se observó sobre el margen del cauce la presencia de una secuencia de roca asociada a la unidad de areniscas finas grisáceas descritas en la presente investigación, en este caso dicha arenisca se observa con un importante grado de alteración, tomando una coloración café claro en su superficie alterada, este mayor grado de alteración pudiera a su vez favorecer el proceso de infiltración del agua a través de esta, lo cual justificaría dicho faltante en el caudal medido para el caso del aforo 2. Paralelo a ello en esa misma zona se observó según las mediciones realizadas una reducción significativa en la velocidad del flujo de agua en el río, situación que también pudiera tener cierta influencia en la obtención de un caudal total menor para el aforo 2.

6.7.5 Aforo Quebrada Mina

Por último cabe mencionar que se realizó una medición de caudal en la quebrada Mina ubicada en las coordenadas Lambert Norte 645050 E y 72892 N, en este caso fue necesario para realizar dicha medición aplicar el método del flotador, debido al bajo caudal presentado por dicha quebrada, misma que presentaba un flujo considerado como laminar, situación que impidió la medición por el método ejecutado en las pruebas anteriores. La velocidad promedio estimada para el flujo de agua en este caso fue de 0,2 m/s, la longitud del cauce en fue de 2 m y el espesor del espejo de agua no superó los 15 cm. De acuerdo con los datos anteriores se estimó un caudal promedio igual a 0,06 m³/s para esta quebrada.

7 DETERMINACIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL

7.1 Introducción

Para la elaboración de este balance hídrico se tomó en cuenta el área limitada entre el margen izquierdo del río Claro y el margen derecho del río Caracol, ambos pertenecientes a la cuenca del río Coto Colorado, el cual corresponde con el principal colector de la zona.

Para realizar el balance del suelo, se requiere en primer lugar la infiltración mensual al suelo generada por la lluvia. Posteriormente, es necesario conocer las propiedades del suelo (zona no saturada) como lo son la capacidad de campo, el punto de marchitez y la densidad aparente. Estos valores se obtienen directamente del laboratorio a partir del muestreo de suelos en campo. Otro elemento que es importante conocer es la profundidad aproximada de las raíces extractoras de agua, en la zona donde se va a realizar el balance del suelo, esta profundidad se obtiene de observaciones en el campo.

Una vez determinadas las propiedades hidrológicas de los suelos, las características hidrometeorológicas y las propiedades del terreno, así como el uso de la tierra, se construyeron zonas de propiedades específicas en las cuales hay atributos característicos y únicos, que facilitan la aplicación del balance hídrico computacional, según la metodología Schosinsky (2006). Estas zonas se construyeron con los siguientes atributos.

7.2 Precipitación zonal

Para la definición de este parámetro se tomó en consideración la información disponible para el área referente a meteorología, en este caso se consideraron las estaciones meteorológicas ubicadas dentro o en las cercanías del área de estudio para obtener información tanto de precipitación como de temperatura. En total se utilizaron los datos de 5 estaciones meteorológicas con lo cual fue posible subdividir el área de estudio en 3 zonas tomando como base la metodología de polígonos de Thyssen y definiendo con ello el área de influencia para cada una de estas estaciones (figura 40). En síntesis para la región norte se tomó como referencia la información meteorológica registrada por la estación Río Claro, para la parte central se tomaron en cuenta los datos suministrados por las estaciones Coto 58, Coto 54 y Coto 52 procediendo a obtener un valor promedio representativo de precipitación para esta área, mientras que finalmente para la región sur se tomó como base la información registrada por la estación Coto 50.

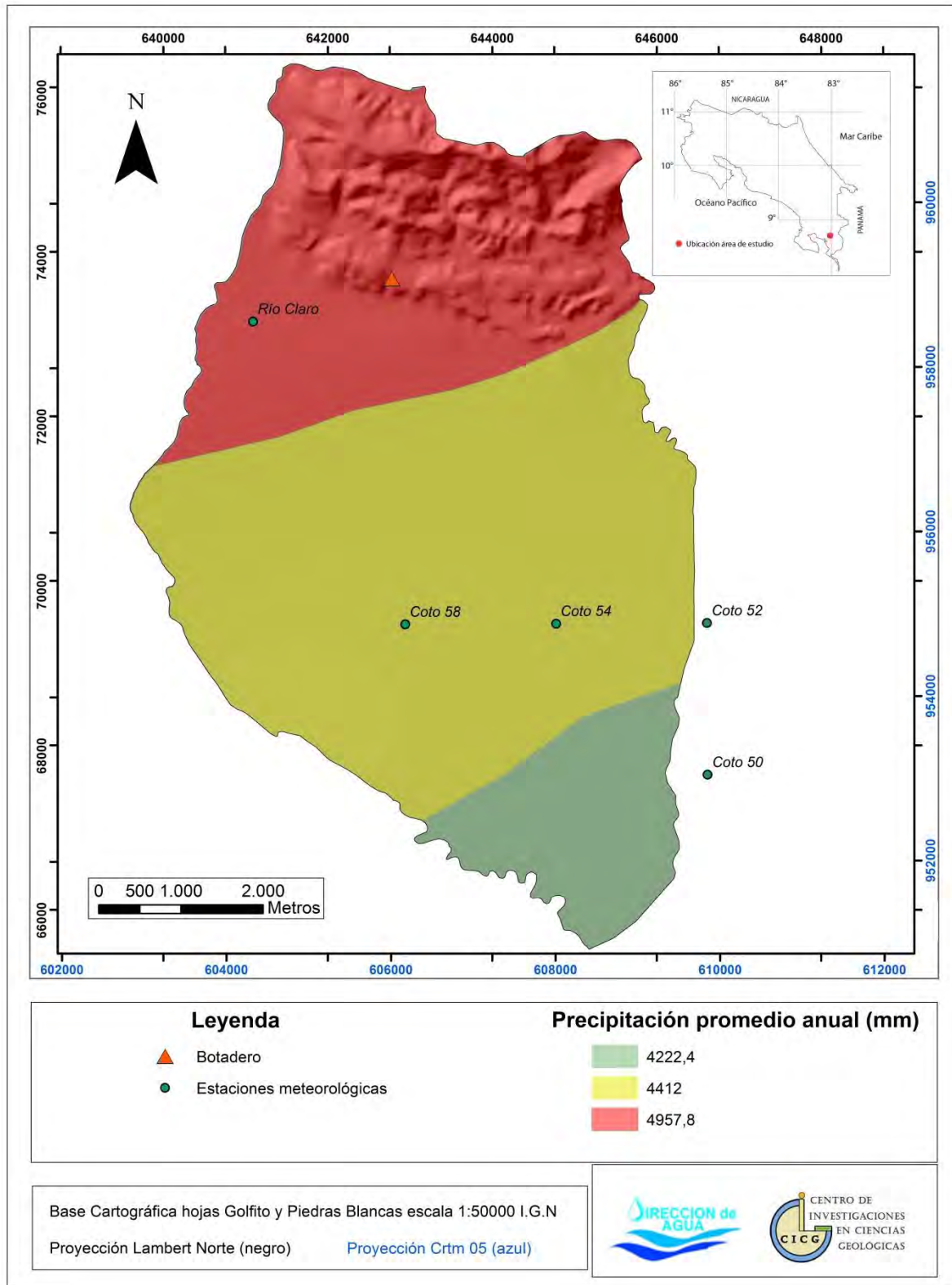


Figura 40: Distribución de la precipitación promedio anual, utilizado para la elaboración del balance hídrico de suelos. Fuente: Elaboración propia.

En el cuadro 19 se presenta el valor promedio mensual de precipitación en mm para cada una de las estaciones utilizadas.

Cuadro 19: Precipitación promedio mensual en mm de las estaciones meteorológicas ubicadas en el área de estudio.

Estación	Periodo	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Río Claro	1985-2011	133,3	108,5	177,2	281,5	504,8	485,6	546,3	589,8	625,8	690,1	554,2	280,7	4957,8
Coto 54	1950-2010	110,4	98,1	124,3	245,3	448,9	438,7	486,3	528,6	549	57,5	456,8	205,3	4271,2
Coto 52	1960-2010	110,5	98	134,4	249,1	504,9	477,7	527,3	606,1	575,8	634,2	517,6	203,1	4638,7
Coto 58	1964-2010	111,4	92,9	117,4	276,2	448,1	453,1	478,7	531,7	521,5	617,3	463,3	214,6	4326,2
Coto 50	1954-2010	88,1	57,4	113,1	230,6	450,6	435,2	482,3	565,4	547,9	615,9	457,8	178,1	4222,4

7.3 Pendiente en porcentaje

De acuerdo con las curvas topográficas y mediante la utilización de un sistema de información geográfica, se calculó la pendiente del terreno. La pendiente fue calculada en unidades porcentuales según lo establece la metodología propuesta por Schosinsky (2006), con el fin de obtener el factor de pendiente (Kp), su representación se aprecia en la figura 41.

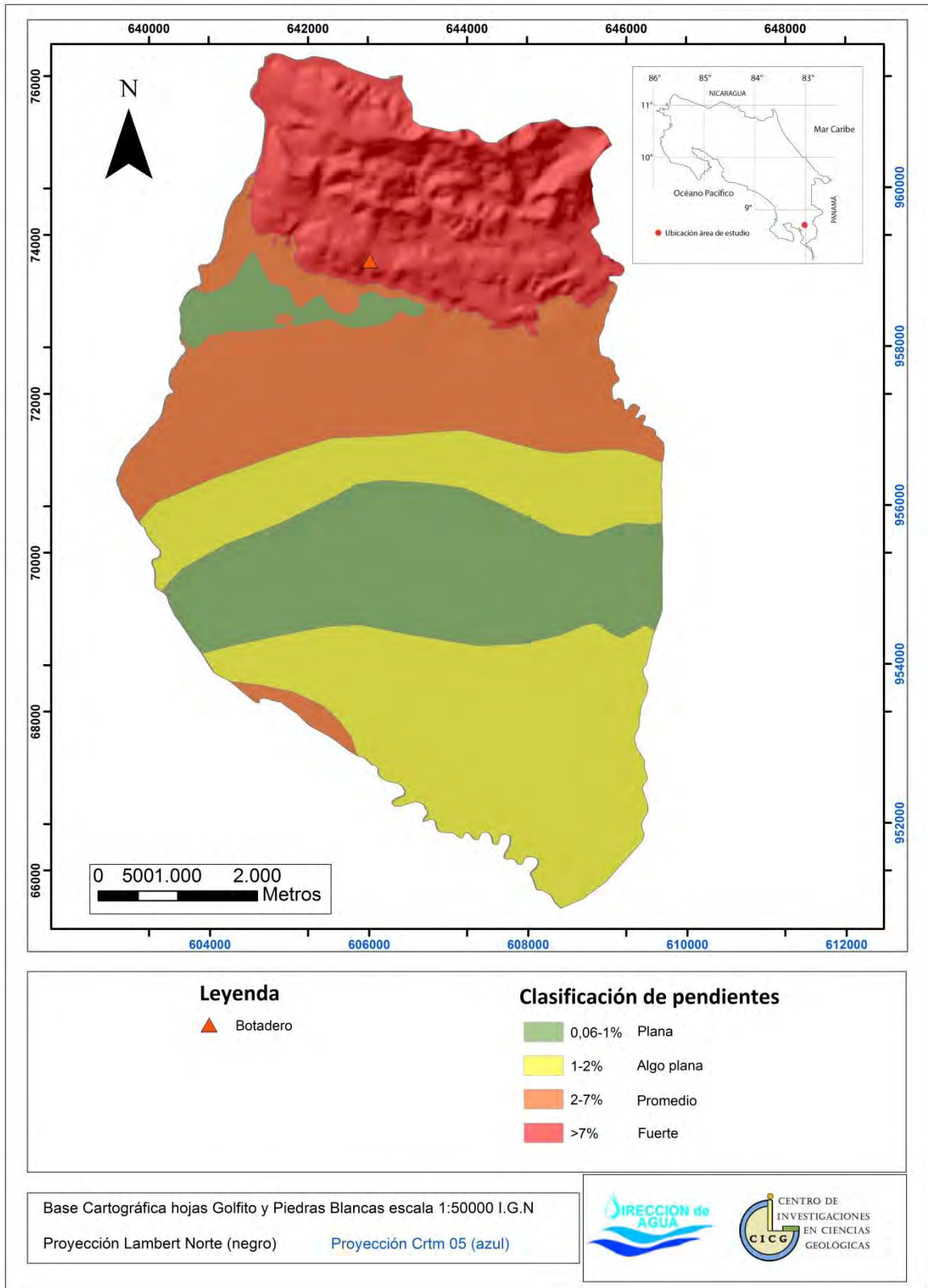


Figura 41: Mapa de pendientes de la zona de estudio, en los rangos requeridos por la metodología. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la figura anterior la zona de estudio se clasifica mediante 4 diferentes sectores con base al porcentaje de pendientes, la región norte se caracteriza por presentar pendientes fuertes con un porcentaje de inclinación mayor al 7 %, mientras que los sectores central y sur se caracterizan por presentar categorías de pendientes que varían entre promedio (2-7%), algo plana (1-2%) y plana (0,06-1%), siendo la parte central del área de estudio la que presenta el menor porcentaje de inclinación.

7.4 Uso de suelo

El mapa de uso de suelo fue diseñado con base al análisis de fotografías aéreas pertenecientes al proyecto Terra 1997, complementado con el análisis de mapas de zonificación de uso de suelo elaborados por el Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (PRODUS) de la Universidad de Costa Rica del año 2009, permitiendo clasificar el uso de la tierra dentro del área de estudio en 6 diferentes clases: bosque, cultivos, pastos, zona agropecuaria, zona urbana no consolidada y suelos descubiertos.

Se determinó que el uso de suelo más desarrollado en la zona corresponde con las zonas 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.

En la figura 42 se muestra la distribución de los diferentes usos de suelo antes mencionados:

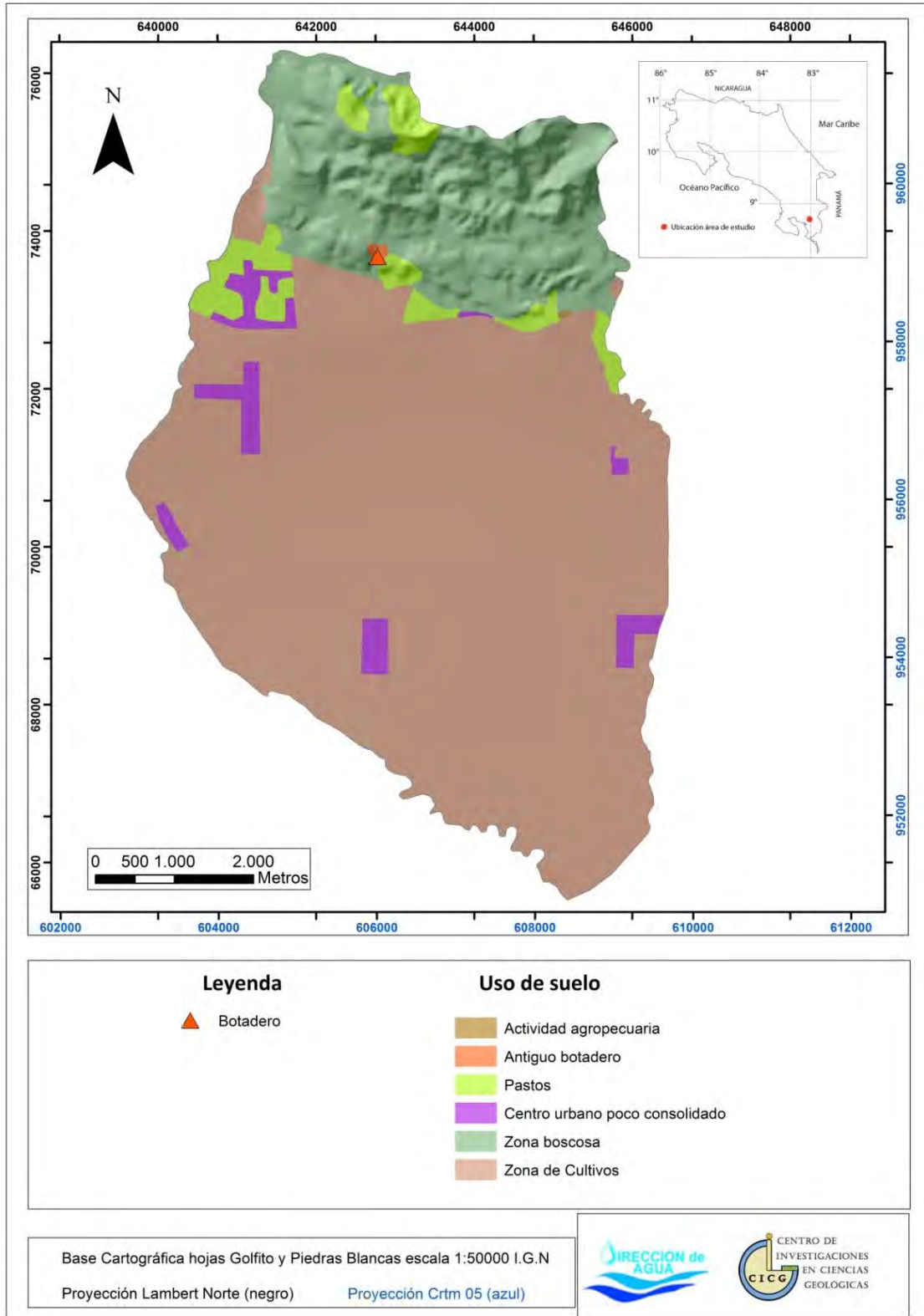


Figura 42: Mapa de distribución del uso de suelo. Fuente: Elaboración propia.

El mapa de uso de suelo se reclasificó en función de la metodología Shosinsky (2006), agrupando las zonas en dependencia del uso de suelo que domina, con el fin de obtener el factor de vegetación (Kv), el cual se detalla en la figura 43. Como resultado se obtuvo un valor de Kv igual a 0 para los sectores dominados por infraestructura urbana o suburbana; un Kv de 0,1 para sectores dominados por actividades agrícolas o ganaderas; un Kv de 0,18 para sectores dominados por pastizales y un valor de 0,2 para sectores en donde predominen los bosques tanto secundarios como primarios.

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 extendido, 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 más predominante en el área. Finalmente se localizan los restantes valores de Kv, asociados a usos de suelos más puntuales o de menor rango dentro del área de estudio.

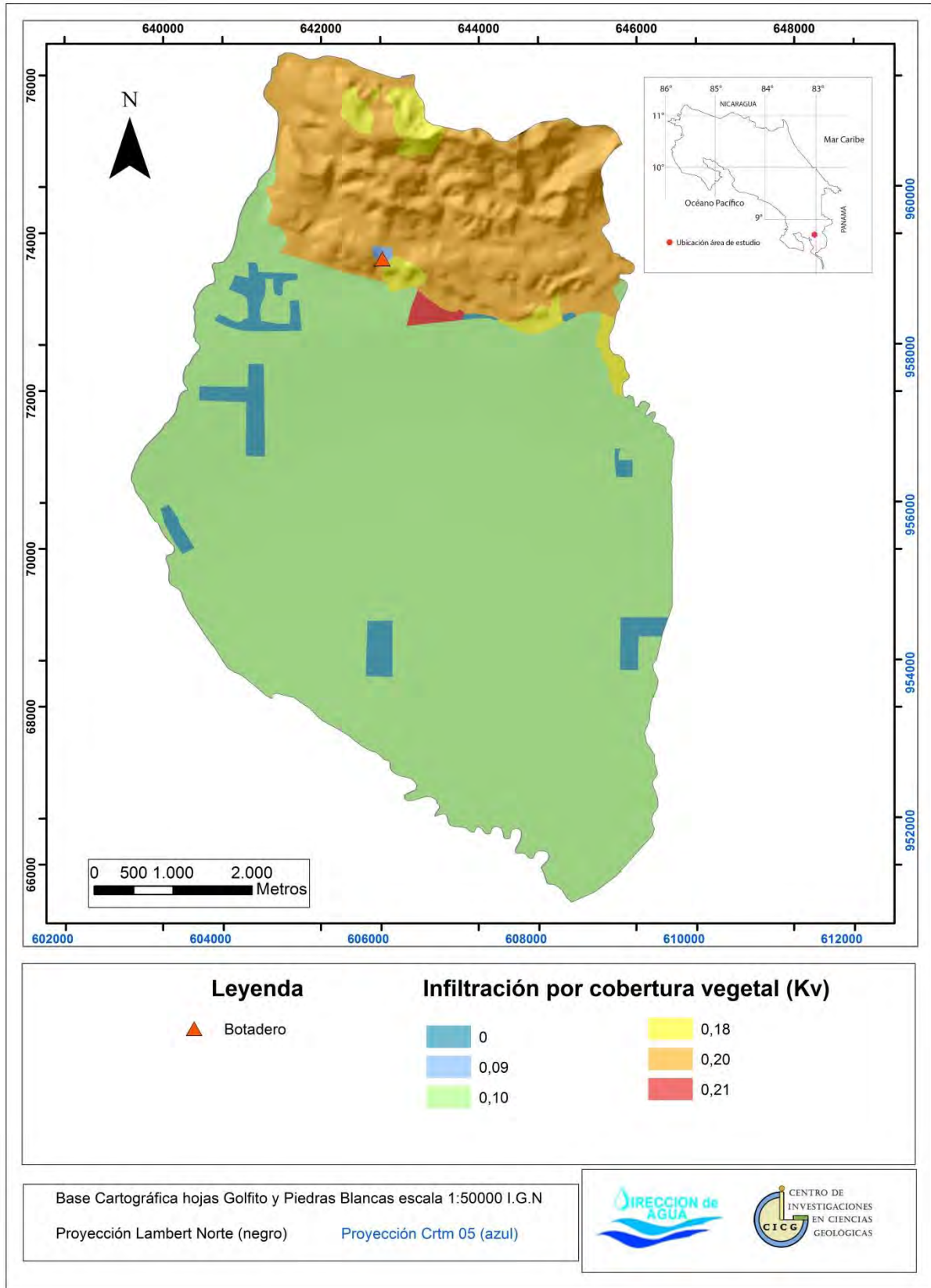


Figura 43: Mapa de Kv para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

7.5 Infiltración

El movimiento de agua a través del suelo saturado y en general en toda la subsuperficie, es controlado por la ley de Darcy (Marsily, 1986). Para el caso del flujo no saturado, conforme se inicia el escurrimiento, y se van llenando los poros del espacio del suelo (es decir, el suelo llega al estado de retención de agua denominado capacidad de campo), el suelo puede alcanzar su tasa de infiltración o coeficiente de infiltración.

La tasa de infiltración de suelo se determina mediante la aplicación de un ensayo de campo y que generalmente se logra mediante la prueba de anillos. Es importante mencionar que al realizar el balance hídrico de las diversas zonas, se utilizaron los valores promedio de infiltración de las zonas aledañas, con el fin de unificar los datos de infiltración.

Con el fin de determinar la capacidad de infiltración de los suelos se realizaron un total de 16 pruebas de infiltración utilizando la metodología del doble anillo (figura 44).



**Figura 44: Pruebas de infiltración de campo realizadas mediante la metodología del doble anillo.
Fuente: Elaboración propia.**

Los resultados obtenidos a partir de la realización de las pruebas de infiltración se resumen en el cuadro 20:

Cuadro 20: Ubicación y resultados obtenidos para cada una de las pruebas de infiltración realizadas.

Código de muestra	Longitud	Latitud	Ubicación	Infiltración (cm/min)	Infiltración (mm/d)
GF-1	641292	72199	Palmatica	0,008	115,2
GF-2	642847	69512	Palmatica	0,3	4320
GF-3	642682	75838	Margen izquierda Río Claro	0,01	144
GF-4	645699	75243	Cerca de Quebrada Tigra	0,355	5112
GF-5	645777	67661	Palmatica	0,033	475,2
GF-6	645692	70335	Palmatica	0	0
GF-7	645362	73090	Santiago de Caracol	0,002	28,8
GF-8	642884	73708	Botadero Golfito	0,024	345,6
GF-9	642625	73764	Botadero Golfito	0,01	144
GF-10	642528	73787	Botadero Golfito	0,01	144
GF-11	642826	73771	Botadero Golfito	0,011	158,4
GF-12	641311	74354	Tajo Río Claro	0,01	144
GF-13	642706	68267	Palmatica	0,46	6624
GF-14	642733	70123	Palmatica	0,04	576
GF-15	643688	69456	Palmatica	0,027	388,8
GF-16	641945	69188	Palmatica	0,033	475,2

De acuerdo con los resultados obtenidos se logra apreciar una tendencia en la velocidad de infiltración que oscila entre moderada a baja, siendo en la mayoría de las pruebas realizadas inferior a los 500 mm/día, con la única excepción el caso de las pruebas GF-2, GF-4 y GF-13 en donde se obtuvieron las mayores tasas de infiltración, alcanzando como valor máximo los 6624 mm/día.

La ubicación geográfica de cada una de las 16 pruebas de infiltración realizadas se muestra en la figura 45, así como también los diferentes rangos de infiltración obtenidos para cada una de ellas, se presenta además una estimación estadística de la posible área de influencia aplicable para cada prueba por medio de la confección de los respectivos polígonos de Thiessen.

Tal y como se aprecia en la figura 46, la tasa de infiltración en el área varía desde los 0 hasta los 6624 mm/día, presentándose una mayor ocurrencia de valores de infiltración inferiores a los 580 mm/día en la mayoría de las pruebas realizadas, estos bajos valores de infiltración pudiesen estar relacionados con la presencia de suelos con texturas mayoritariamente arcillosas, los cuales son predominantes dentro del área de estudio.

En lo que respecta a los valores máximos de infiltración obtenidos, en el caso de la prueba GF- 4 ubicada en el extremo NE del área de estudio, la alta tasa de infiltración resultante (5112 mm/día) podría ser causada por la existencia de suelos con una textura más arenosa, los cuales a su vez pudiesen ser generados como consecuencia directa de los procesos de meteorización de la Unidad de Areniscas finas Quebrada Manigordo, la cual se observó aflorando en la zona con un significativo grado de alteración y fracturamiento, factores que sin duda contribuyen a la mayor capacidad de infiltración de los suelos registrada en dicha área.

Mientras que en el caso específico de las pruebas GF-2 y GF-13, ubicadas ambas en la parte central del área de estudio, las altas velocidades de infiltración obtenidas (4320 y 6624 mm/ día respectivamente) se podrían explicar, según las observaciones de campo realizadas, como originadas posiblemente por efecto de un mayor grado de alteración en los suelos, como consecuencia de las actividades relacionadas a los cultivos de Palma imperantes en la zona, ya que en ambos casos las pruebas se llevaron a cabo en sitios en donde recientemente se ha iniciado el proceso de cultivo y con lo cual los suelos en dichas áreas pudiesen haber sido expuestos a una mayor alteración con respecto al resto del área en donde se obtuvieron velocidades de infiltración menores y en donde los cultivos de Palma se encuentran más desarrollados o en una etapa de mayor madurez. Por otro lado, se evidenció un ligero contraste en las características de los suelos en los sitios en donde se realizaron las pruebas GF-2 y GF-13 identificándose una textura más limosa o limo-arcillosa y sin ningún rasgo de humedad en ambos casos, situación que contrasta con lo observado en el resto de las pruebas ejecutadas en la parte central del área de estudio, donde se evidenció un suelo de composición más arcillosa y con una mayor humedad aparente, situaciones que bien pudieron influir en el contraste de infiltración resultante para esta área en específico.

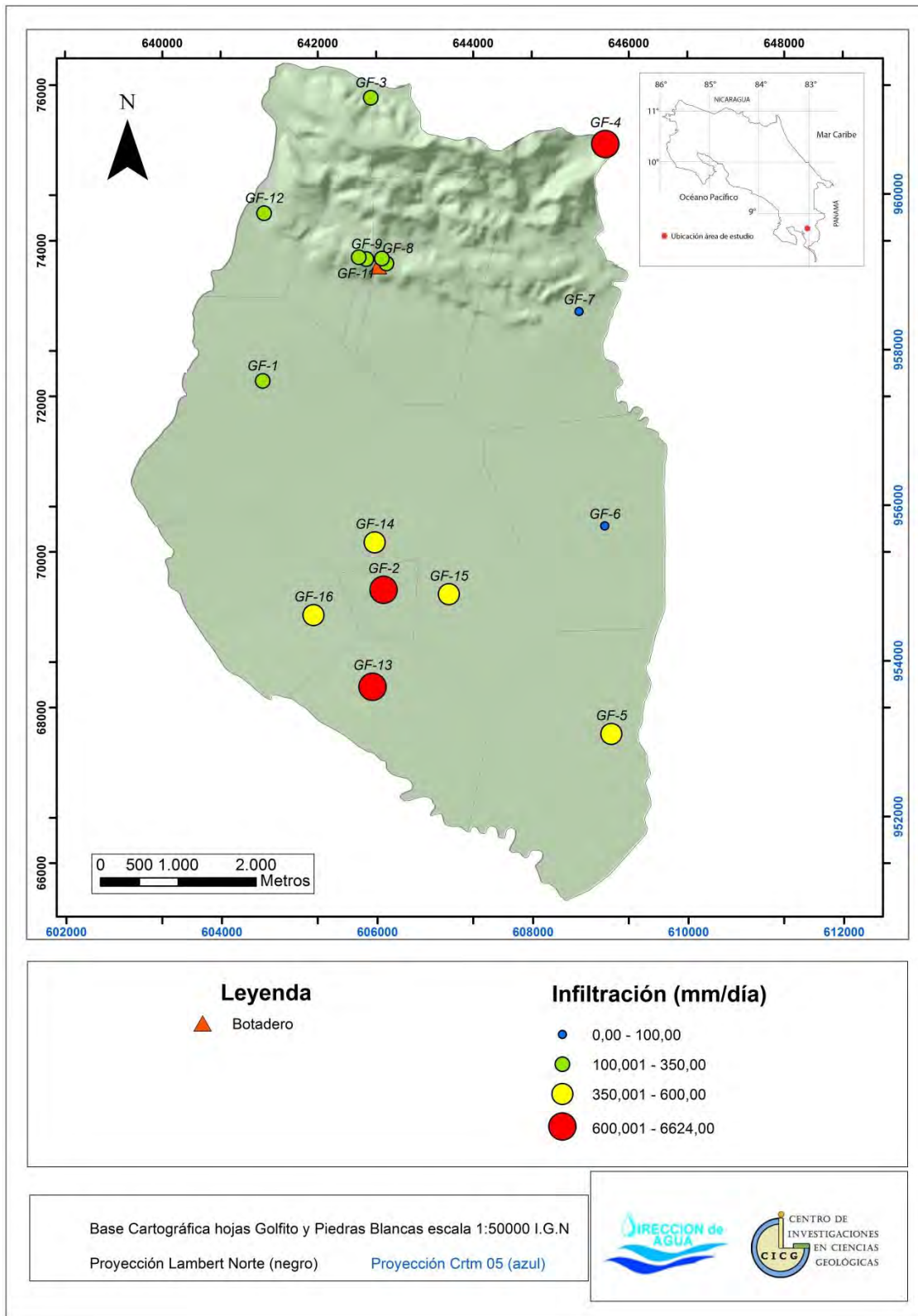


Figura 45: Mapa de ubicación de pruebas de infiltración realizadas y rangos de infiltración obtenidos. Fuente: Elaboración propia.

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, la cual se traduce en 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 GF-2 y GF-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.

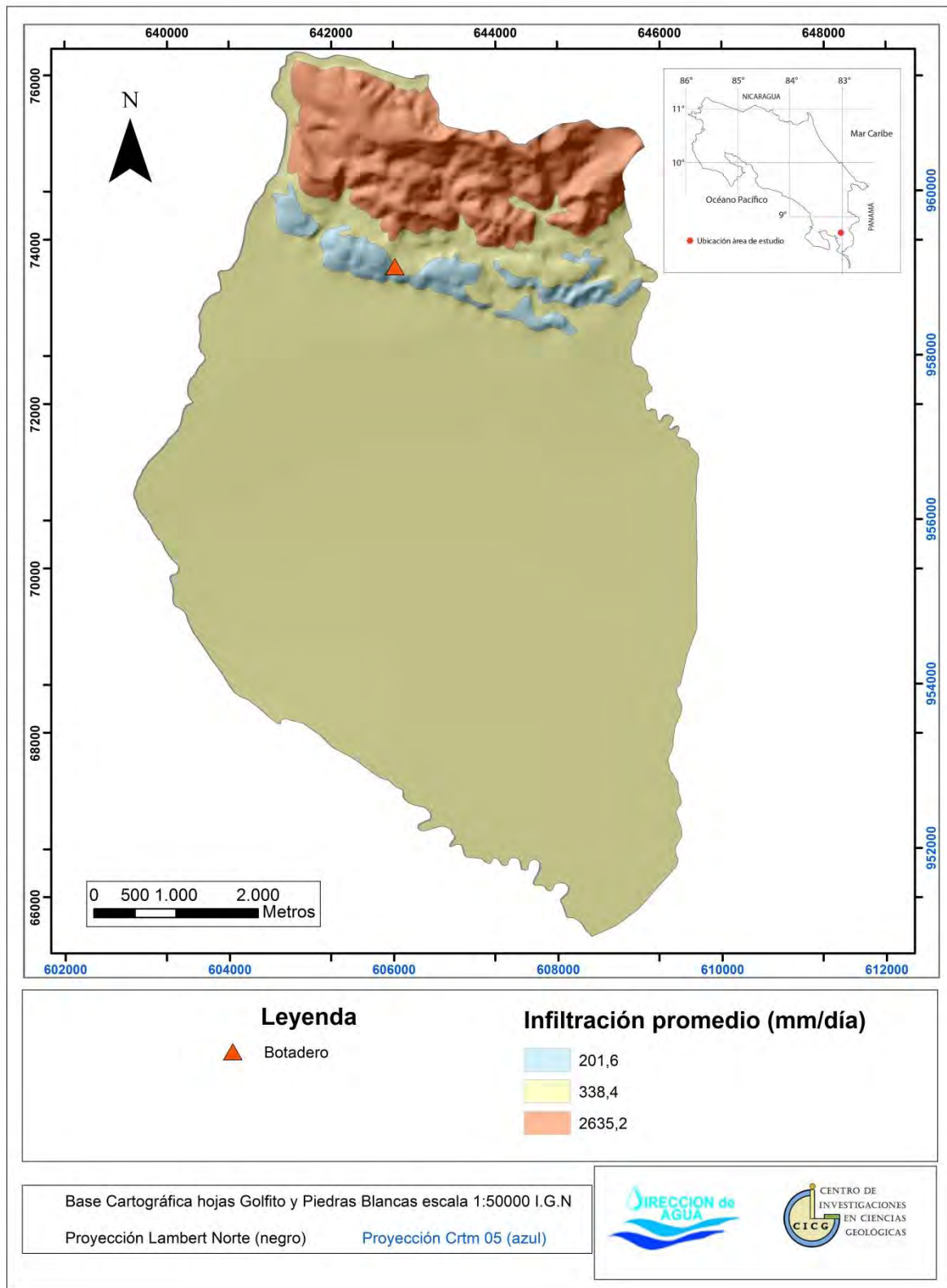


Figura 46: Mapa de distribución de la infiltración promedio en mm/día. Fuente: Elaboración propia.

7.6 Parámetros del suelo

Con el fin de conocer algunas propiedades importantes a tomar en cuenta en la caracterización de suelos, tales como textura, densidad aparente, conductividad hidráulica, punto de marchitez y capacidad de campo, se procedió a la toma de muestras de suelo (figura 47) para su posterior análisis y procesamiento en los laboratorios del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA).



Figura 47: Proceso de toma de muestras de suelo. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de los análisis de laboratorio realizados a las muestras de suelo se resumen en el cuadro 21:

En la Figura 48 se muestra la distribución de los tipos de suelo obtenidos para el área de estudio, mediante el análisis y la correlación de los resultados de laboratorio para cada muestra.

Cuadro 21: Distribución y resultados de las pruebas de suelos ejecutadas.

Código muestra	Latitud	Longitud	Arena	Arcilla	Limo	Textura	Materia orgánica	Densidad aparente	Densidad real	C. C.	P. M.	Humedad disponible %	Conduc. Hidráulica (C/hora)	Rango C. Hidraulica
GF-1	641292	72199	26,0	22,00	52,00	FL	3,15	1,05	2,07	34,9	21,08	13,81	5,1	moderada
GF-2	642847	69512	30,0	20,00	50,00	FL	2,05	1,01	2,03	35,9	20,97	14,89	4,9	moderada
GF-3	642682	75838	50,0	30,00	20,0	FAa	1,05	1,11	2,15	37,28	21,44	15,84	3,8	moderada
GF-4	645699	75243	64,0	18,00	18,0	Fa	0,51	1,18	2,23	24,2	16,87	7,28	7,2	moderada
GF-5	645777	67661	18,0	32,00	50,0	FAL	0,71	1,08	2,07	38	21,78	16,20	4,3	moderada
GF-6	645692	70335	18,0	30,00	52,0	FAL	1,05	1,11	2,13	38,1	22,01	16,08	4,6	moderada
GF-7	645362	73090	62,0	16,00	22,0	Fa	2,71	1,17	2,22	23,6	15,93	7,68	7,8	mod.rapida
GF-8	642884	73708	34,0	16,00	50,0	Fa	0,91	1,15	2,24	24,2	16,47	7,79	8,1	mod.rapida
GF-9	642625	73764	50,0	38,00	12,0	Aa	0,31	1,14	2,19	34,7	20,84	13,09	5,3	moderada
GF-10	642528	73787	60,0	18,0	22,0	Fa	0,41	1,19	2,26	24,4	16,18	8,24	7,9	mod.rapida
GF-11	642826	73771	46,0	22,0	32,0	F	2,35	1,04	2,01	30,5	19,37	11,16	5,2	moderada
GF-12	641311	74354	18,0	26,00	56,0	F.L/FAL	1,15	1,09	2,12	37,3	20,72	16,56	4,6	moderada

Donde FL: Franco-limoso, FA: Franco-arcilloso, Fa: Franco-arenoso, FAa: Franco-arcilloarenoso, F: Franco y Aa: Arcillo-arenoso. C.C: Capacidad de campo, P.M: Punto de Marchitez.

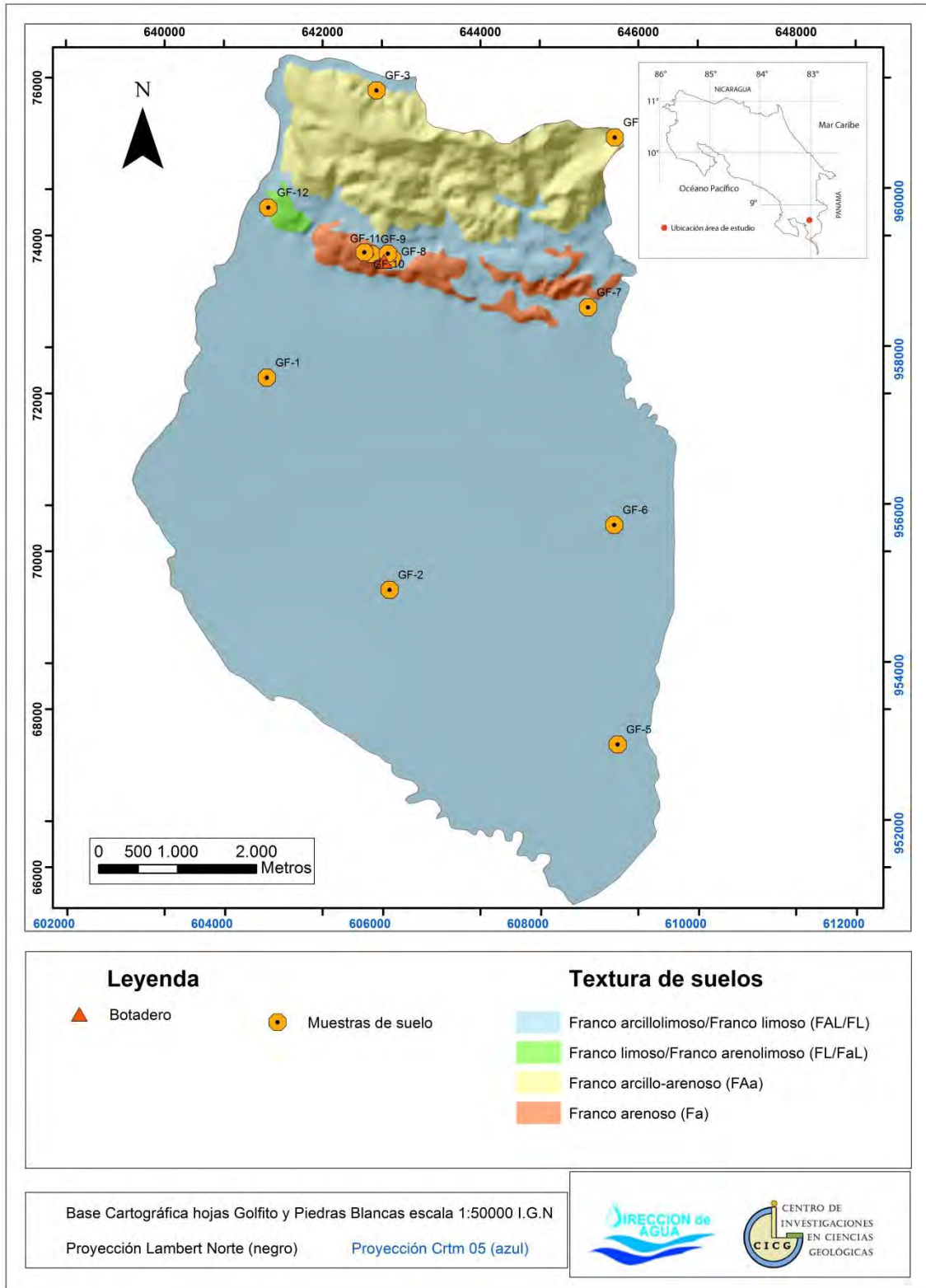


Figura 48: Distribución de tipos de texturas de suelos y ubicación de los puntos de muestreo efectuados. Fuente: Elaboración propia.

Según lo observado en la figura anterior 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 se da el predominio de suelos con una granulometría o textura más gruesa de tipo arenosa o arcillo arenosa derivados de los procesos de meteorización de las rocas que componen dicha región, las cuales son fundamentalmente areniscas, mientras que en 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 depositación de materiales provenientes de las regiones montañosas ubicadas al norte y que son transportadas por acción de los ríos. La reducción en el tamaño de 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.

El predominio de suelos con texturas finas podría explicar los bajos valores de infiltración obtenidos para la mayor parte de las pruebas de infiltración realizadas en la zona, conllevando a su vez a la generación de suelos poco permeables que resultan desfavorables para el proceso de infiltración del agua en el subsuelo.

En lo que respecta a la porosidad de los suelos analizados se obtuvo como resultado valores muy uniformes con una variación entre el 47 y 49%, presentándose el rango mínimo de porosidad hacia la parte norte del área de estudio, donde se determinó la existencia de suelos de composición arcillo-arenosa, mientras los valores más altos de porosidad se obtuvieron para aquellas zonas en donde el tipo de suelo es fundamentalmente de tipo arcillo-limoso a limoso, mismos que se encuentran principalmente en la parte central y sur del área de interés. La distribución de los valores de porosidad obtenidos se muestra en la figura 49.

Se puede observar como particularmente las zonas con porosidades más altas coinciden con aquellas regiones en donde se obtuvieron las granulometrías más finas (arcillas) y las velocidades de infiltración más bajas, de ahí que se interpreta que esta porosidad es poco efectiva, esto quiere decir que no existe una eficaz conexión entre los diferentes poros que componen los suelos, disminuyendo así la capacidad de infiltración de estos.

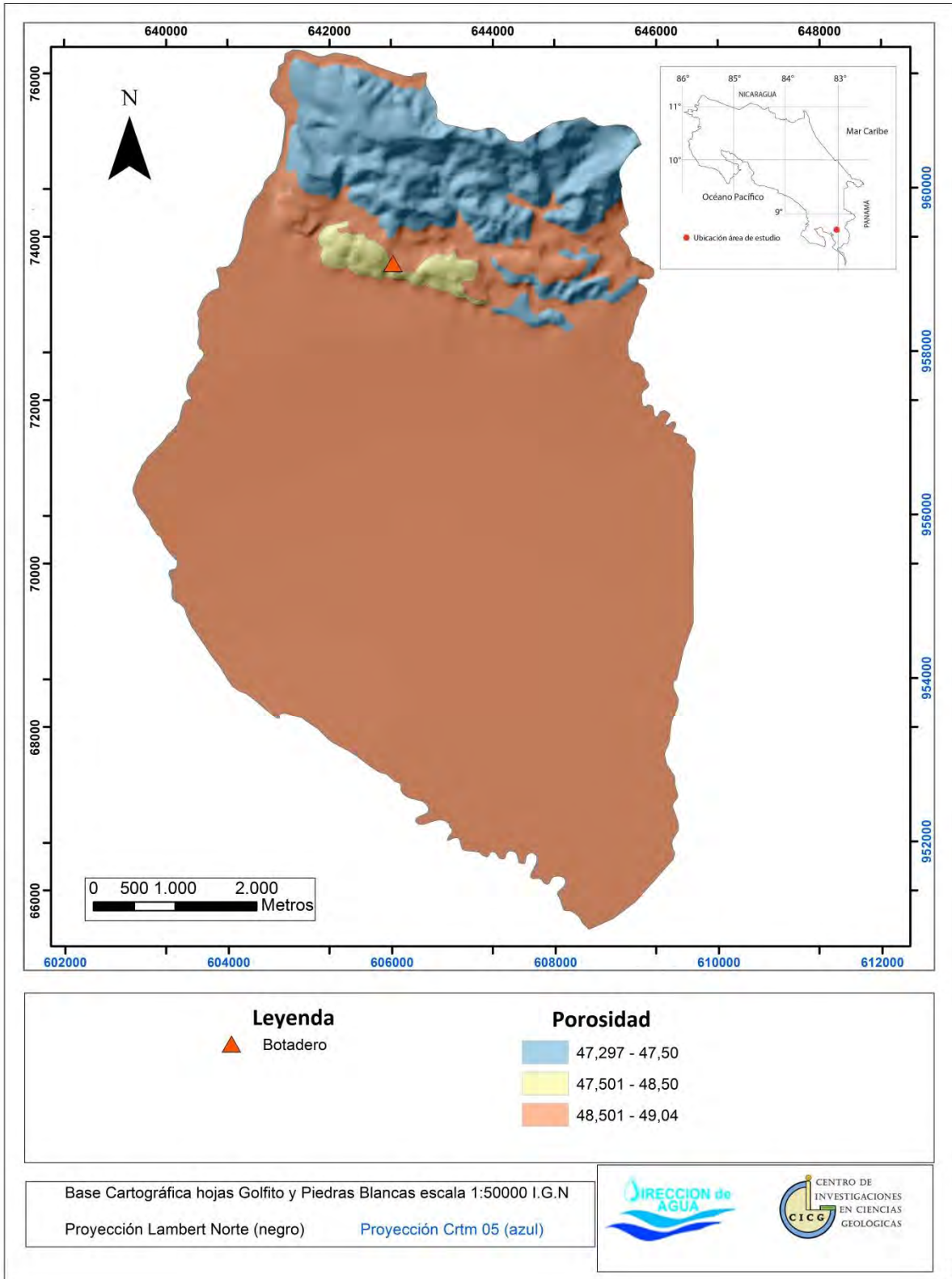


Figura 49: Distribución espacial de porosidad de suelos. Fuente: Elaboración propia.

Cuando ocurre la precipitación, el agua que se infiltra se acumula en los poros del suelo, para llevarlo a capacidad de campo, que es la máxima acumulación de agua que puede tener un suelo. Una vez terminado el aguacero, se lleva a cabo el proceso de evapotranspiración, tomando las raíces el agua que se encuentra en los poros del suelo. Si la cantidad de infiltración de la lluvia es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y llenar la necesidad de evapotranspiración, el sobrante de agua que infiltra, percola para recargar al acuífero (Schosinsky, 2006). Sea el coeficiente Ch, el coeficiente de humedad, obtenido de la siguiente ecuación:

$$Ch = (HS - PM - CC) / (CC - PM)$$

Ch = coeficiente de humedad
HS = humedad del suelo
CC = capacidad de campo
PM = punto de marchitez

Las figuras 50, 51 y 52 muestran la variación espacial calculada de la capacidad de campo, de la densidad aparente y del punto de marchitez, para el área de estudio, obtenidas mediante muestreos y ensayos de laboratorio.

Los valores de capacidad de campo más elevados se detectaron para las regiones central y sur del área de estudio, coincidiendo con las zonas topográficamente planas, mientras que los valores más bajos se ubicaron hacia la parte central-norte de dicha área en las cercanías de la zona del vertedero municipal de Golfito.

Por su parte, en lo que respecta a la densidad aparente cabe destacar que los mayores valores (1,17-1,15) se ubicaron en la región norte del área de estudio, coincidiendo con la zona montañosa de la misma, mientras que los más bajos (1,06) se localizaron hacia la parte central de la misma.

Finalmente, el mapa de distribución de punto de marchitez muestra como hacia la parte sur y central se localizan los mayores rangos para esta categoría (21,46), mientras que hacia la parte norte se ubicaron valores intermedios de marchitez, y los valores más bajos (18,22-15,93) se localizaron en la región central-norte.

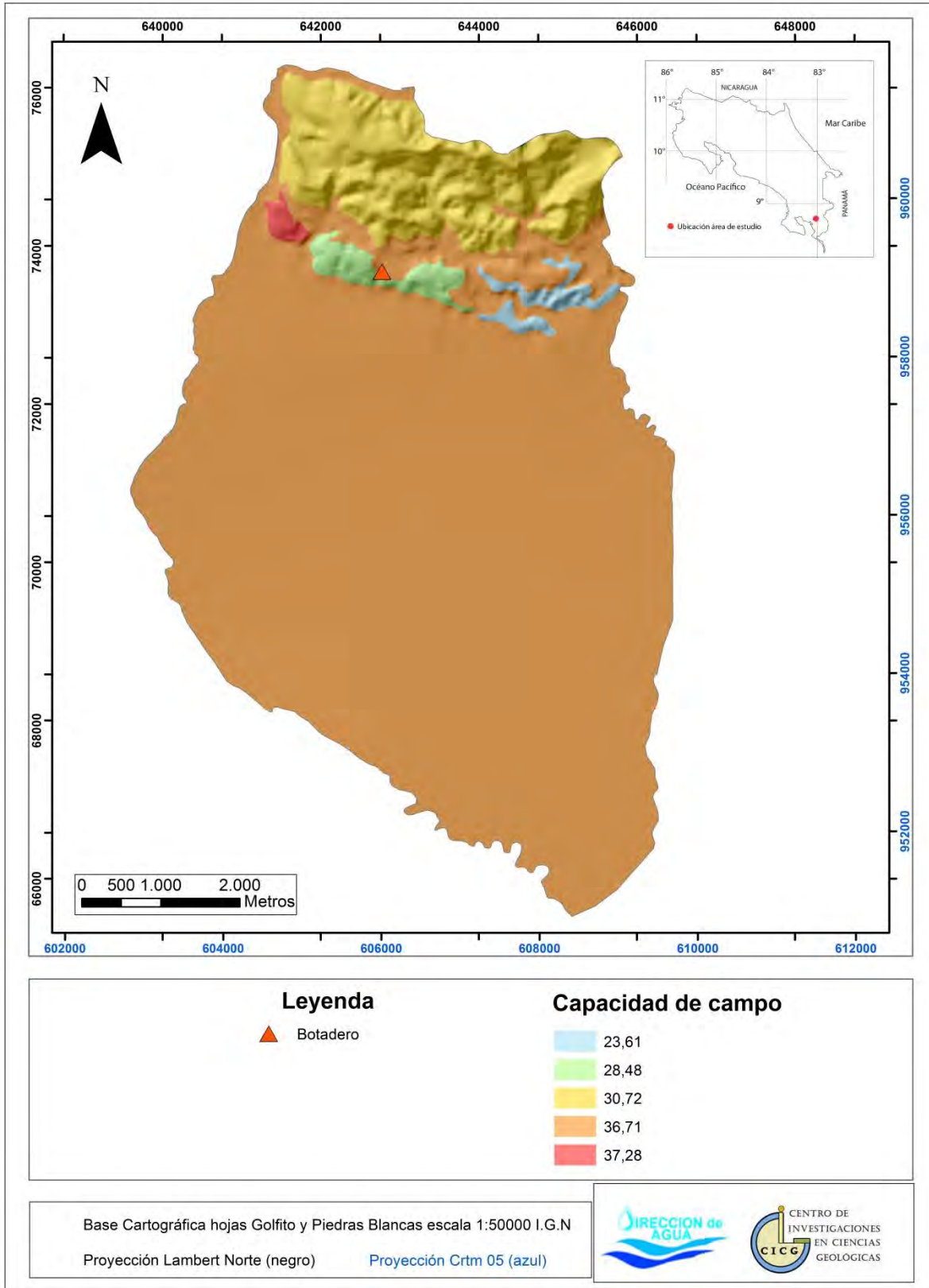


Figura 50: Distribución espacial de la capacidad de campo. Fuente: Elaboración propia.

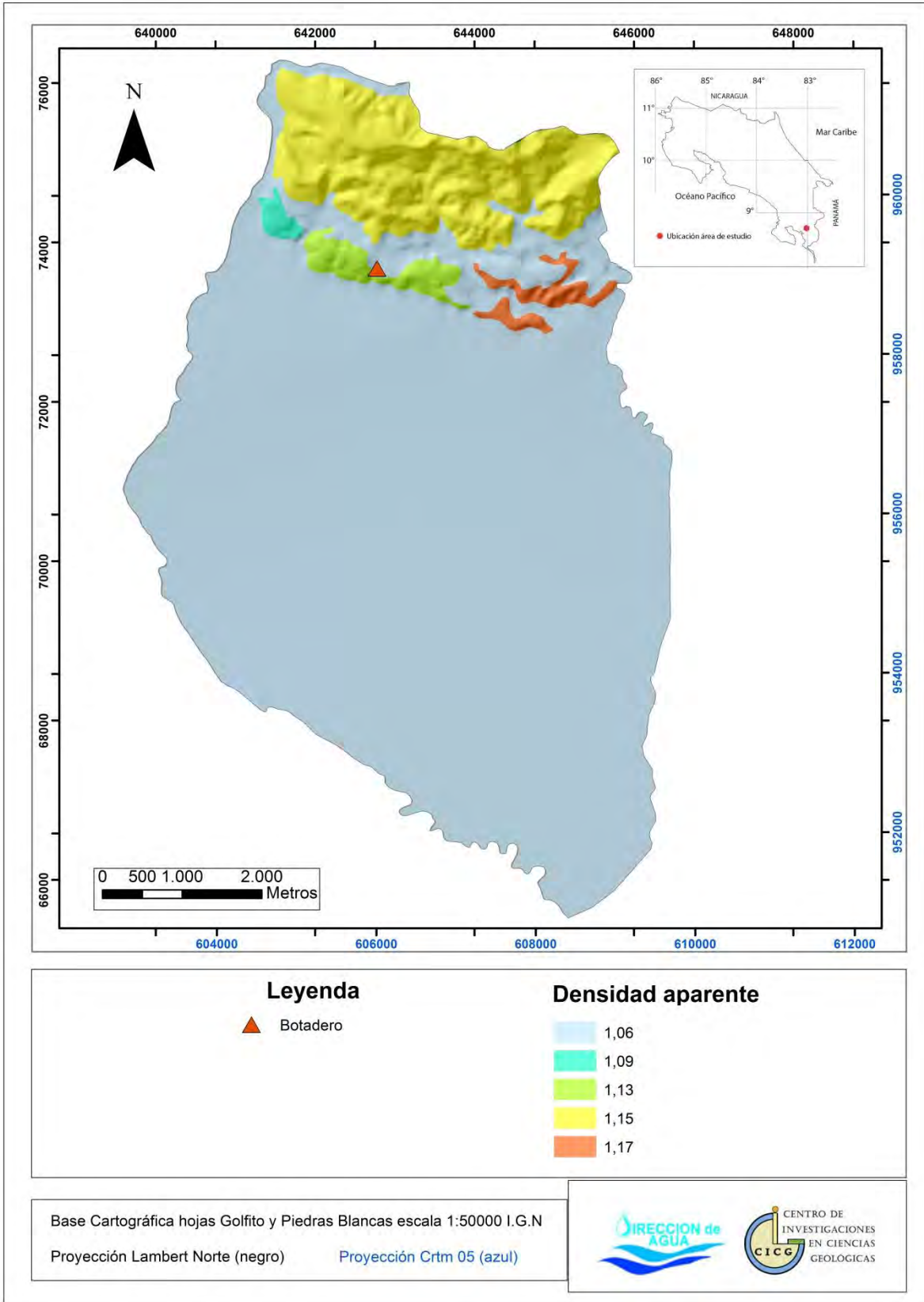


Figura 51: Distribución espacial de la densidad aparente. Fuente: elaboración propia.

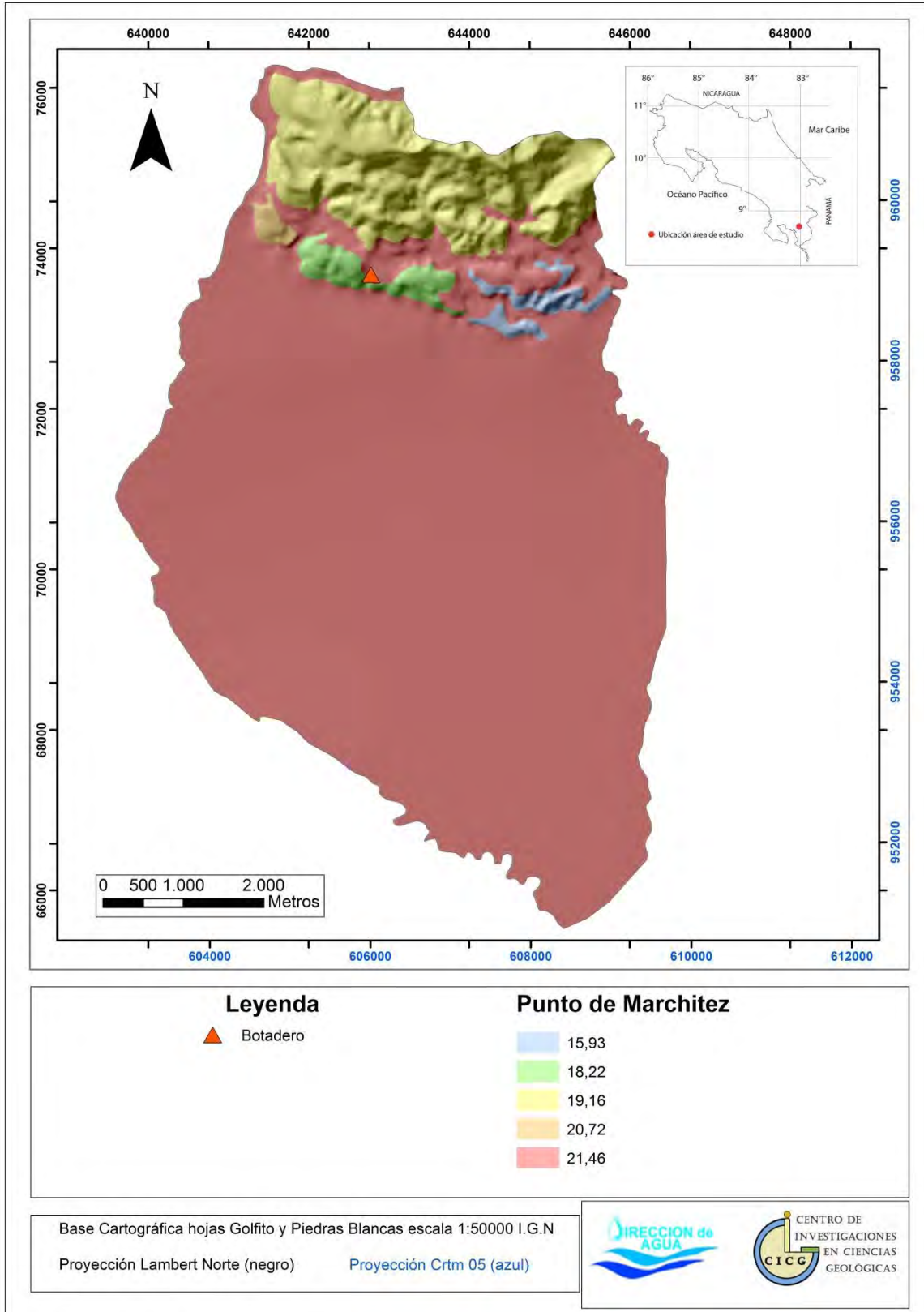


Figura 52: Distribución espacial del punto de marchitez. Fuente: Elaboración propia.

7.7 Evapotranspiración

La evapotranspiración de una zona de cultivo se define como la traspiración de la planta cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo, más la evaporación del suelo. La mayor capacidad de evapotranspiración de un cultivo es cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo. Sin embargo; cuando la humedad de suelo es menor que la capacidad de campo, las hojas de las plantas van cerrando las estomas, con el propósito de transpirar menos y así economizar el agua.

Cuando la humedad del suelo llega al punto de marchitez permanente, la planta no transpira y muere. Para el balance hídrico de suelos se asume que la evapotranspiración potencial real va a ser proporcional a la humedad del suelo, comparada con la diferencia de humedad entre la capacidad de campo y el punto de marchitez. Para el cálculo de la evapotranspiración potencial real (ETPR) de la planta se utiliza la siguiente ecuación

$$ETPR = (HS - PM) \cdot (ET) / (CC - PM)$$

ETPR = evapotranspiración potencial (mm/mes)

HS = humedad del suelo (%)

ET = evapotranspiración de la planta a capacidad de campo (mm/día)

CC = capacidad de campo (%)

PM = punto de marchitez (%)

Cada planta tiene una evapotranspiración diferente y va a depender de: la temperatura del ambiente, humedad relativa, radiación solar, velocidad de viento y el grado de desarrollo de la planta. En una cuenca o en una zona cualquiera, es muy difícil determinar la evapotranspiración de la vegetación, debido a la gran cantidad de vegetación y el grado de desarrollo de las plantas existentes en una cuenca o en una zona de la misma (Schosinsky, 2006). Por esta razón, es conveniente asumir una evapotranspiración que sea promedio para toda la zona de estudio. Esta evapotranspiración promedio de la zona de estudio o cuenca se asumirá que es igual a la evapotranspiración potencial (ETP).

Para obtener la ETP, se ha utilizado la siguiente ecuación basada en Blaney & Criddle (ONU, 1972).

$$ETP \text{ (mm/mes)} = (8,10 + 0,46T) Ps$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial en [mm/mes]

T = Temperatura media mensual en [grados centígrados]

Ps = Porcentaje de horas de luz solar mensual, con respecto al año [%]

Para la obtención de Ps se utilizó la clasificación usada por (Schosinsky, 2006). Para el cálculo de la evapotranspiración se utilizaron los valores de temperatura de las diversas estaciones meteorológicas que se mencionan en el apartado de meteorología. Para

zonas que no poseían estaciones con valores de temperatura se realizó un promedio con los valores más cercanos.

7.8 Zonas de balance hídrico del área

Para aplicar un balance hídrico de suelos es necesario que se den una serie de condiciones específicas de una cuenca, sin embargo la aplicación de un balance implica definir zonas o áreas específicas que a la vez sean únicas en toda la cuenca, lo cual deriva no en un balance regional sino en varios balances, conforme más diferenciada este la cuenca en función a sus características hidrológicas. En este caso, se tomaron en cuenta cuatro factores: la precipitación, la pendiente del terreno, el uso de suelo y la capacidad de infiltración de los suelos. Con lo cual se obtuvo un total de 33 zonas de balance, las cuales se muestran en el siguiente mapa (figura 53).

Una vez analizados cada uno de los componentes del balance mediante su procesamiento en sistemas de información geográfica, se determinan las distintas zonas del balance, las cuales presentan características específicas, tal y como se expone en el mapa de la figura 53.

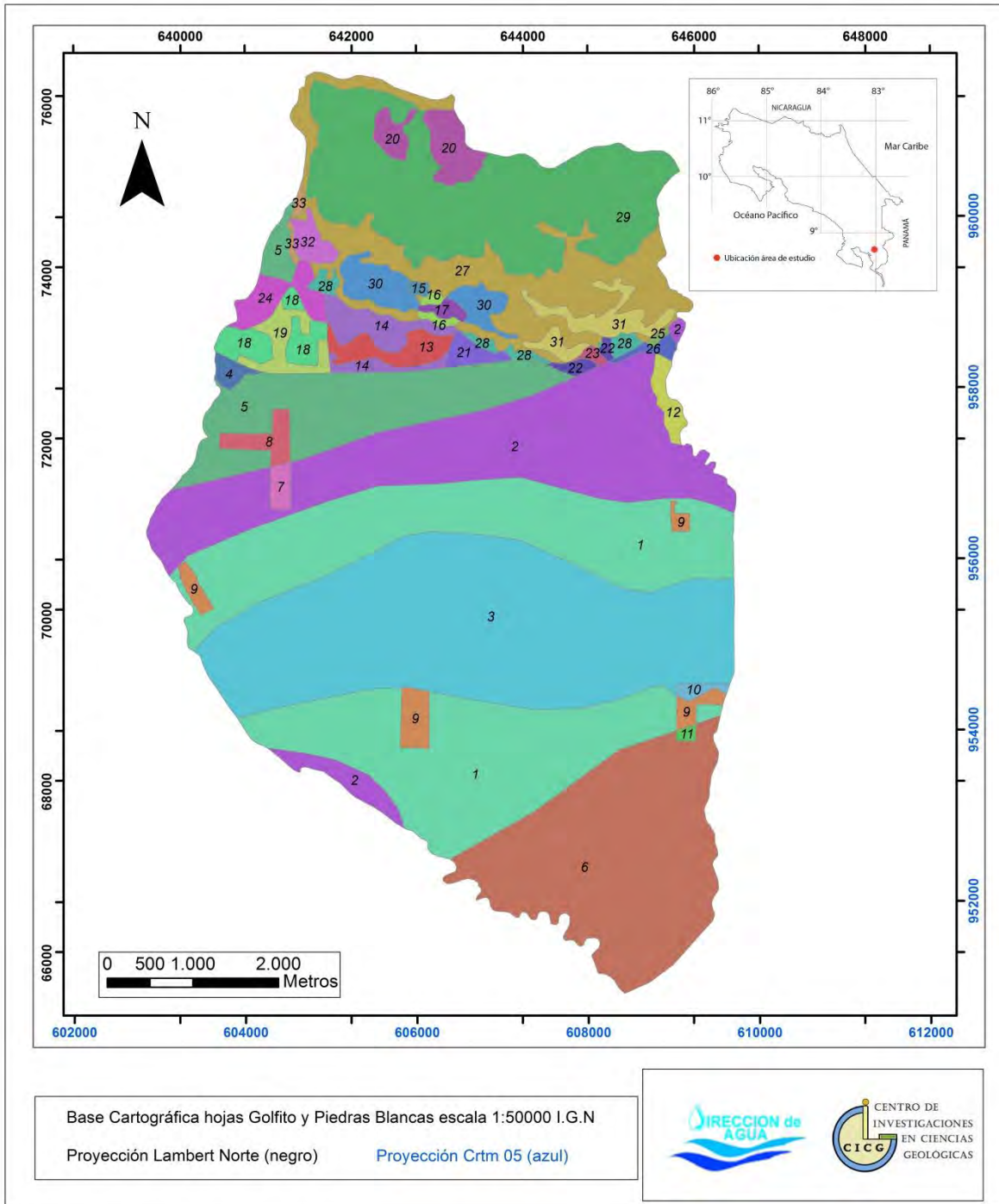


Figura 53: Mapa de zonas de balance definidas para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 22: Resultados obtenidos de balance hídrico. Léase: CC: Capacidad de Campo, PM: Punto de Marchitez, DA: Densidad Aparente, Kv: Factor vegetación, Kp: Factor pendiente, Rp: Recarga potencial.

Zona	Uso de suelo	Kv	Profundidad raíces (mm)	Precipitación anual (mm)	Kp	CC	PM	DA	Infiltración (mm/d)	Rp	% Rp
1	Zona de Cultivos	0,10	2000	4412	0,15	36,71	21,46	1,06	338,4	1620,3	37
2	Zona de Cultivos	0,10	2000	4412	0,10	36,71	21,46	1,06	338,4	1559,0	35
3	Zona de Cultivos	0,10	2000	4412	0,20	36,71	21,46	1,06	338,4	1620,3	37
4	Zona de Cultivos	0,10	2000	4957,8	0,20	36,71	21,46	1,06	338,4	1945,0	39
5	Zona de Cultivos	0,10	2000	4957,8	0,10	36,71	21,46	1,06	338,4	1876,4	38
6	Zona de Cultivos	0,10	2000	4222,4	0,15	36,71	21,46	1,06	338,4	1548,2	37
7	Centro poblacional	0	0	4412	0,10	36,71	21,46	1,06	338,4	1641,5	37
8	Centro poblacional	0	0	4957,8	0,10	36,71	21,46	1,06	338,4	2061,9	42
9	Centro poblacional	0	0	4412	0,15	36,71	21,46	1,06	338,4	1818,0	41
10	Centro poblacional	0	0	4412	0,20	36,71	21,46	1,06	338,4	2012,1	46
11	Centro poblacional	0	0	4222,4	0,15	36,71	21,46	1,06	338,4	1769,7	42
12	Pastos	0,18	500	4412	0,10	36,71	21,46	1,06	338,4	1897,6	43
13	Zona de Cultivos	0,10	1000	4957,8	0,20	36,71	21,46	1,06	338,4	2096,9	42
14	Zona de Cultivos	0,10	1000	4957,8	0,10	36,71	21,46	1,06	338,4	2019,2	41
15	Antiguo botadero	0,09	500	4957,8	0,06	36,71	21,46	1,06	338,4	2034,9	41
16	Pastos	0,18	500	4957,8	0,06	36,71	21,46	1,06	338,4	2314,7	47
17	Pastos	0,18	500	4957,8	0,06	28,48	18,22	1,13	201,6	2005,3	40
18	Pastos	0,10	500	4957,8	0,20	36,71	21,46	1,06	338,4	2314,7	47
19	Centro poblacional	0	0	4957,8	0,20	36,71	21,46	1,06	338,4	2500,0	50
20	Pastos	0,18	500	4957,8	0,06	30,72	19,16	1,15	2635,2	2357,3	48
21	Pastos	0,21	500	4957,8	0,10	36,71	21,46	1,06	338,4	2314,7	47
22	Pastos	0,18	500	4957,8	0,10	36,71	21,46	1,06	338,4	2314,7	47
23	Pastos	0,18	500	4957,8	0,06	23,61	15,93	1,17	28,8	265,8	5
24	Pastos	0,10	500	4957,8	0,10	36,71	21,46	1,06	338,4	2234,6	45
25	Zona boscosa	0,20	2000	4412	0,06	36,71	21,46	1,06	338,4	1343,9	30
26	Zona boscosa	0,20	2000	4412	0,10	36,71	21,46	1,06	338,4	1343,9	30
27	Zona boscosa	0,20	2000	4957,8	0,06	36,71	21,46	1,06	338,4	1636,1	33
28	Zona boscosa	0,20	2000	4957,8	0,10	36,71	21,46	1,06	338,4	1636,1	33
29	Zona boscosa	0,20	2000	4957,8	0,06	30,72	19,16	1,15	2635,2	1663,3	34
30	Zona boscosa	0,20	2000	4957,8	0,06	28,48	18,22	1,13	201,6	1663,3	34
31	Zona boscosa	0,20	2000	4957,8	0,06	23,61	15,93	1,17	28,8	129,2	3
32	Zona boscosa	0,20	2000	4957,8	0,06	37,28	20,72	1,09	144,0	1130,3	23
33	Zona de Cultivos	0,10	2000	4957,8	0,06	36,71	21,46	1,06	338,4	1740,6	35

Es importante señalar que los valores de CC, PM y Da, fueron promediados en dependencia de la cantidad de pruebas de suelo realizadas dentro de cada zona de balance, esto también se aplicó para los valores de infiltración.

7.9 Resultados

A partir de la información generada, se construyen las zonas de recarga potencial, las cuales se caracterizan por presentar rangos de recarga potencial variable, lo cual está condicionado por las características hidrológicas de los suelos de la cuenca, el uso actual de la tierra y las características del terreno.

Según los resultados obtenidos a partir de la aplicación del balance hídrico, se determinó una recarga potencial anual variable entre los 129 y 2500 mm, predominando para el área de estudio valores de recarga potencial entre los 1343 y 1663 mm anuales, los cuales se determinaron principalmente para la zona central y sur del área de interés y la parte montañosa ubicada al norte de la misma, tal y como se observa en la figura 54.

De manera específica los máximos valores de recarga potencial fueron ubicados muy puntualmente en algunos sectores cuyas características meteorológicas, de uso y propiedades del suelo tienden a favorecer en mayor medida el proceso de recarga potencial. Estos sitios se localizaron principalmente hacia la parte central norte del área de estudio, en tres diferentes sectores, los cuales se citan a continuación:

En las cercanías del poblado de la Esperanza, los altos valores de recarga potencial anual obtenidos se justifican por varios factores, el primero es que en este sector se registran los mayores rangos de precipitación promedio anual de la zona, lo cual induce a un mayor aporte de agua por precipitación en comparación a la región central y sur del área de estudio, en segundo lugar está el hecho de tratarse de un centro poblacional, lo cual implica que la cobertura vegetal en dicha área sea más escasa y con una menor profundidad de raíces, situación que trae como consecuencia la disminución en el rango de retención del agua por efecto del follaje o la vegetación, lo cual a su vez conlleva a una mayor tasa de infiltración del agua en los suelos. No obstante es importante mencionar que esta alta recarga potencial estimada para esta zona debe ser interpretada con cautela, pues también se debe tomar en cuenta como contraparte el hecho de que al tratarse de una zona parcialmente urbanizada, el grado de impermeabilización de los suelos suele ser mayor por el desarrollo habitacional, situación que podría mermar esta recarga potencial obtenida para esta área en específico. También y como último factor a tomar en cuenta está el hecho de que esta zona, de acuerdo con la clasificación por pendientes realizada, se localiza sobre un área plana con porcentajes de inclinación del terreno menores al 1%, lo cual tiende a favorecer la tasa de infiltración y con ello la recarga potencial.

El segundo sector en donde se reportaron altos valores de recarga potencial es en la parte central-norte, específicamente en las zonas aledañas al botadero municipal de Golfito, aquí la recarga potencial se ve favorecida por la alta precipitación reportada, además por el uso de suelo presentado en la zona, en donde predomina el cultivos o pastos cuya profundidad de raíces suele ser poca, lo mismo que por la presencia de suelos descubiertos, como en el área específica del botadero, en general estos suelen ser factores que disminuyen considerablemente la retención en el follaje e incrementan la recarga potencial. Otro aspecto importante a mencionar es que se presentan los valores más bajos de capacidad de campo y punto de marchitez, esto quiere decir que para el caso específico de esta zona un aguacero no tan intenso podría llevar con más facilidad el suelo a su estado de capacidad de campo, siendo en esta condición en la que se produce la mayor tasa de infiltración.

Hacia el extremo norte del área de estudio se obtuvieron también dos zonas con altos valores de recarga potencial, en las cuales se presentan condiciones muy similares a las descritas para el caso anterior con un uso de suelo destinado principalmente a la presencia de pastos para actividades ganaderas, en este caso y al igual que en los anteriores la no presencia de una cobertura vegetal más amplia termina por favorecer el proceso de recarga potencial.

Una vez obtenidos los resultados del balance hídrico aplicado en el área de estudio, mediante la definición de las diferentes zonas de balance, se procedió a estimar la recarga potencial anual total para dicha área, esta estimación se derivó a partir de la suma de los distintos valores de recarga potencial obtenidos para cada una de las 33 zonas de balance establecidas, obteniéndose como resultado una recarga potencial total igual a 80 641 599,3 m³, cifra que refleja el alto potencial de recarga que posee el área de estudio, alcanzando valores máximos de hasta 873 748 m³ de manera específica para algunas de las zonas definidas en dicho balance.

En lo que respecta a la estimación de la escorrentía anual se logró determinar el predominio de valores significativamente bajos para el área de estudio, tal y como se puede apreciar en la Figura 55, oscilando entre los 0 y 150 mm para la mayor parte del área de estudio, esto quizás pudo deberse en primer lugar a la topografía existente en la zona, la cual en más del 70 % de la misma es plana, situación que sin duda termina por favorecer el proceso de infiltración del agua en los suelos y reduce considerablemente la probabilidad de ocurrencia de escorrentía, mientras que para el caso de las zonas montañosas este factor se ve minimizado por la presencia de vegetación abundante y de suelos con texturas arenosas que favorecen también el proceso de infiltración. Los mayores valores obtenidos de escorrentía se localizaron en el sector E del área con máximos de hasta 2586 mm, estos se relaciona con la presencia de una mayor pendiente asociada a un mayor grado de deforestación inducida por la presencia de actividades agrícolas.

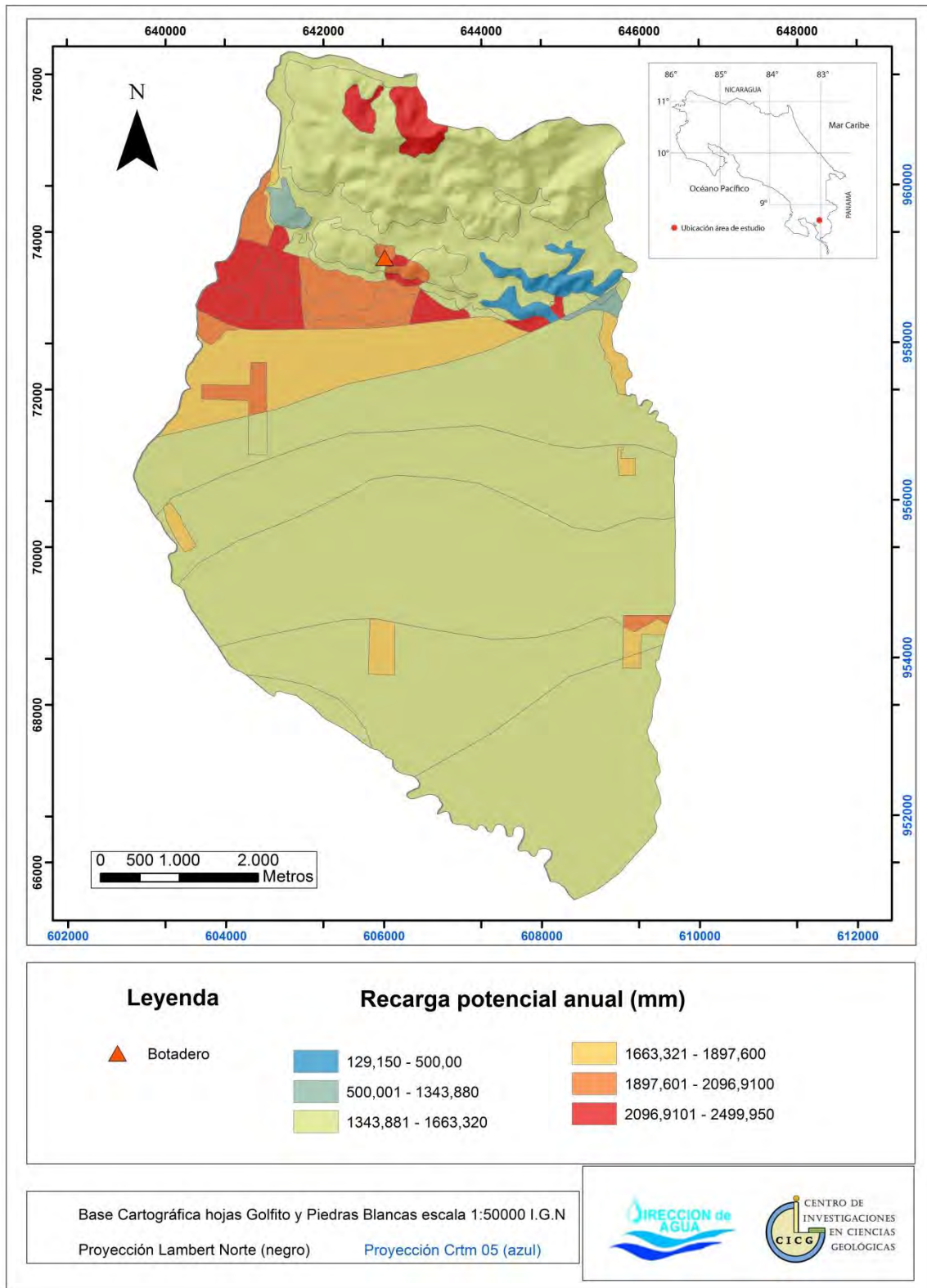


Figura 54: Mapa de distribución de la recarga potencial. Fuente: Elaboración propia.

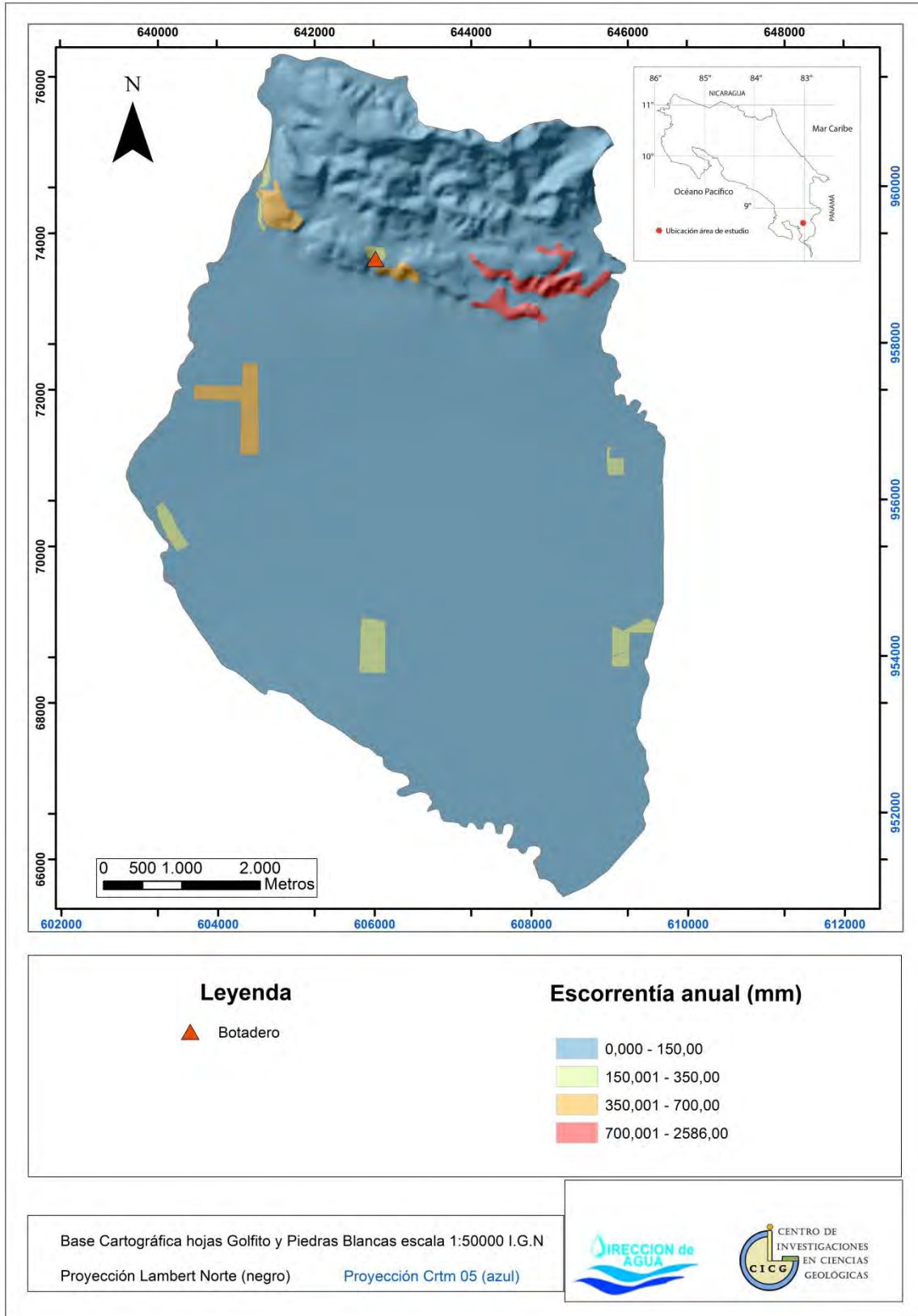


Figura 55: Mapa de distribución de la escorrentía anual. Fuente: Elaboración propia.

8 PROTECCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

8.1 Concepto de vulnerabilidad hidrogeológica

Este concepto está basado en la asunción de que el ambiente físico puede proveer algún grado de protección a las aguas subterráneas, producto de los impactos naturales y antrópicos. El término de vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación fue introducido en 1969 por J. Margat.

El concepto fundamental de la vulnerabilidad del agua subterránea es que alguna área es más vulnerable que otra. Este concepto ha ido evolucionando gradualmente desde la mera evaluación de características hidrogeológicas a la valoración del riesgo de contaminación de un acuífero por actividades humanas, por ello, la vulnerabilidad es una propiedad intrínseca del sistema de agua subterránea y no depende del impacto humano ni natural.

Hay vario tipos de vulnerabilidad: intrínseca o natural: es definida en función de los factores hidrogeológicos. Por otro lado, tenemos la vulnerabilidad específica: incluye en este caso, el impacto humano y requiere de la evaluación del potencial de atenuación del contaminante.

Esta depende sobre todo de la cantidad, calidad y representatividad de los datos utilizados. Los principales atributos utilizados en las evaluaciones de vulnerabilidad intrínseca son: recarga, propiedades del suelo, características de las zonas no saturada y saturada. Parámetros utilizados frecuentemente son: topografía, relación agua superficial-agua subterránea, y la naturaleza de la capa sobreyacente del acuífero, estos parámetros se emplean en diversas metodología.

Estos mapas son particularmente útiles para regular, manejar y tomar decisiones a nivel gubernamental.

Los mapas de vulnerabilidad son una buena herramienta para hacer una valoración local y regional del potencial grado de afectación, identificando área susceptibles a la contaminación, diseñando redes de monitoreo, y evaluando el grado de contaminación difusa.

Estos mapas también son de gran ayuda en el proceso educativo e informativo para los tomadores de decisión en la protección del agua subterránea, riesgo y prevención de la contaminación.

8.2 Metodología GOD

La metodología utilizada en esta investigación es la GOD, desarrollada originalmente por Foster (1987): asigna índices entre 0 y 1 a tres variables del acrónimo en inglés GOD:

- ◆ **G**: ground water occurrence: “Tipo de acuífero”.
- ◆ **O**: overall aquifer class: “Litología de la cobertura”.
- ◆ **D**: depth: “Profundidad del agua o del acuífero”.

La estimación de este índice de vulnerabilidad, involucra una serie de etapas concretas:

- ◆ Identificar el grado de confinamiento hidráulico del acuífero y asignarle un índice a este parámetro en una escala de 0,0 a 1,0.
- ◆ Especificar las características del sustrato suprayacente a la zona saturada del acuífero en términos de: a) grado de consolidación (teniendo en cuenta la probable presencia de permeabilidad secundaria por fracturas) y b) tipo de litología (considerando indirectamente la porosidad, permeabilidad y contenido de humedad de la zona no saturada) y asignar un índice a este parámetro en una escala de 0,4 a 1,0.
- ◆ Estimar la distancia o profundidad al nivel del agua (en acuíferos no confinados) o profundidad al techo del primer acuífero confinado, con la consiguiente asignación de un índice en una escala de 0,6 a 1,0.

El índice final integrado de vulnerabilidad de acuíferos GOD, es el producto de los índices obtenidos para cada uno de estos parámetros. Foster, *et al.* (2002), presentan el diagrama de la figura 56, para la descripción de la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación.

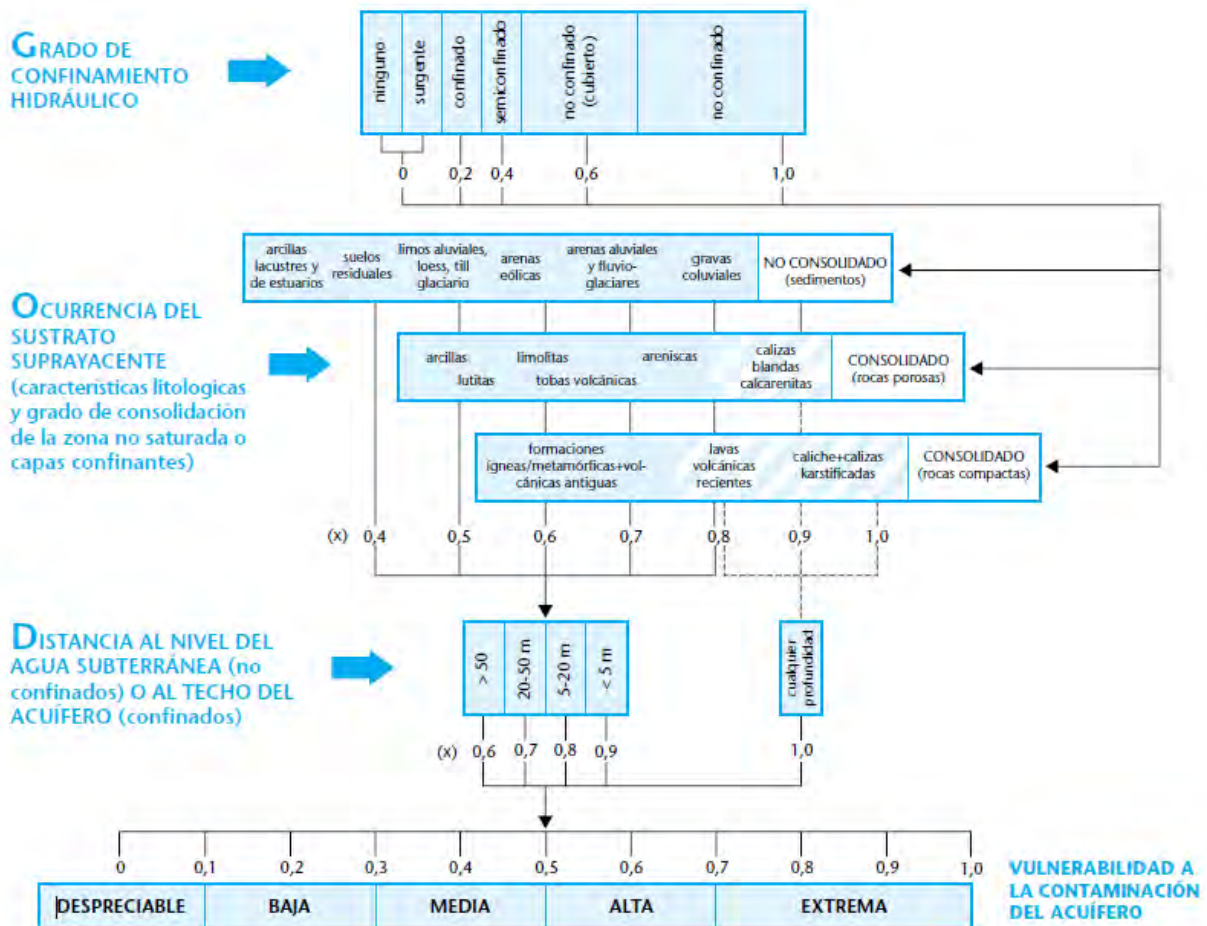


Figura 56: Diagrama esquemático de la metodología GOD, para la determinación de la vulnerabilidad hidrogeológica. Fuente: Foster, *et al.* 2002.

8.3 Determinación de la vulnerabilidad hidrogeológica para el área de estudio

A partir del modelo conceptual hidrogeológico se definió la existencia en la zona de cuatro niveles de agua, los cuales han sido nombrados en el presente estudio como Unidad Hidrogeológica La Esperanza, Unidad Hidrogeológica Manigordo (nivel superior e inferior) y Unidad Hidrogeológica Río Claro. A continuación se procede a calcular el índice de vulnerabilidad hidrogeológica utilizando la metodología GOD para dichas unidades.

8.3.1 Análisis de vulnerabilidad de la Unidad Hidrogeológica La Esperanza

Esta unidad se encuentra asociada con los depósitos aluviales ubicados hacia la parte plana del área de estudio. A partir del modelo propuesto se caracteriza como 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 se encuentra a una profundidad

promedio inferior a los 5 m. Este nivel de agua se encuentra cubierto por una delgada capa de suelo de composición mayoritariamente arcillosa, tal y como se determinó a partir de los resultados de los análisis de muestras de suelo recolectadas. El detalle de la valoración de los parámetros de la metodología GOD para esta unidad se presenta en el cuadro 23.

Cuadro 23: Valoración del índice de vulnerabilidad hidrogeológica para la Unidad Hidrogeológica La Esperanza.

Parámetro	Unidad Hidrogeológica La Esperanza
Grado de confinamiento Hidráulico	No confinado cubierto
Valoración	0,6
Ocurrencia del sustrato suprayacente	Arcillas
Valoración	0,3
Distancia al agua (m)	<5
Valoración	0,9
Índice de vulnerabilidad	0,162
Valoración	Vulnerabilidad baja

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología GOD para esta unidad hidrogeológica, se determinó que la misma presenta una baja vulnerabilidad intrínseca, la cual se justifica por la presencia de una cobertura de suelos con texturas predominantemente arcillosos, los cuales tienden a reducir considerablemente la velocidad de infiltración del agua, disminuyendo con ello la posible incursión de contaminantes a la unidad acuífera. En la figura 57 se muestra el mapa de vulnerabilidad definido para esta Unidad Hidrogeológica.

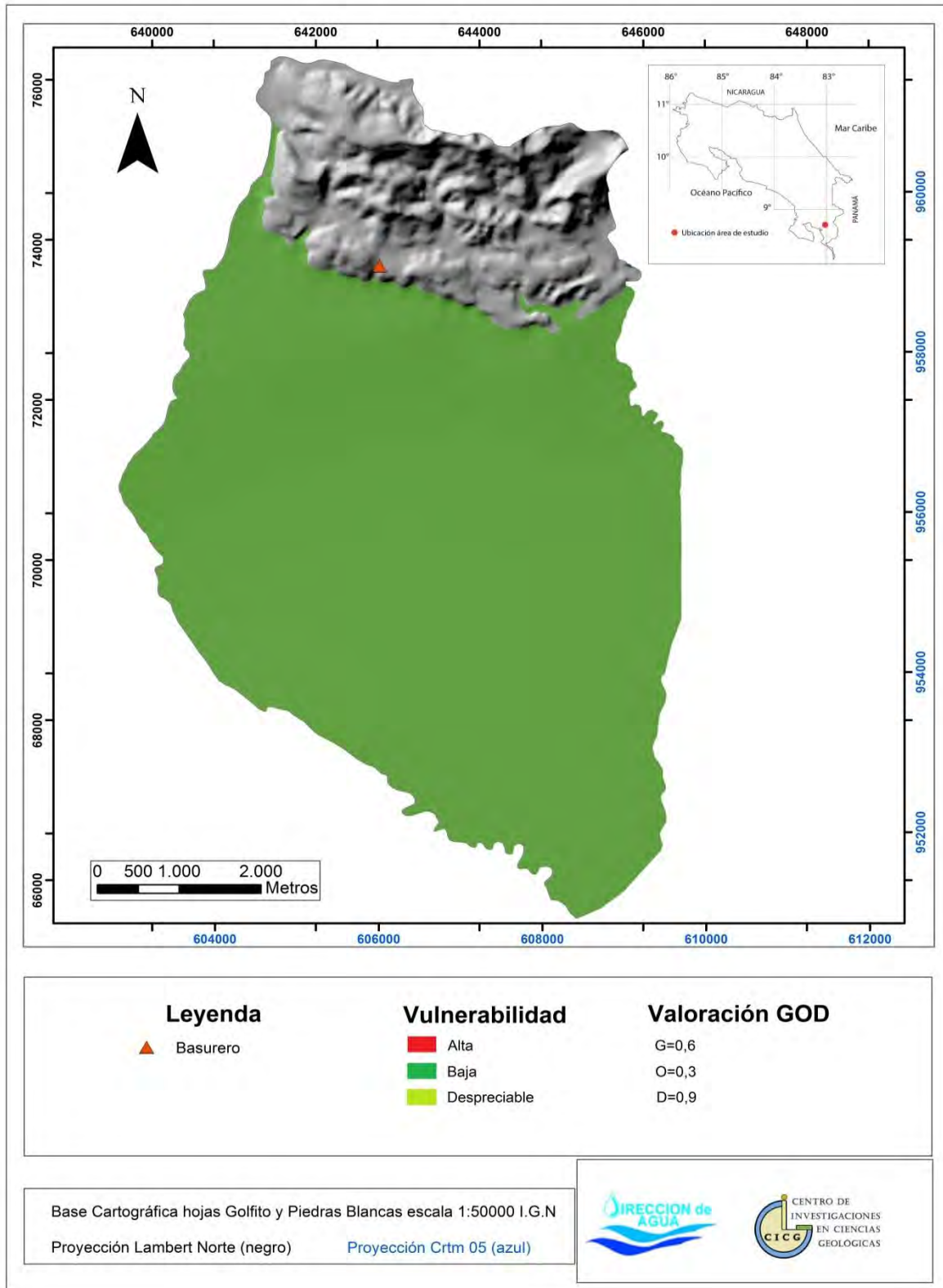


Figura 57: Vulnerabilidad hidrogeológica para la unidad acuífera La Esperanza. Fuente: Elaboración propia.

8.3.2 Análisis de vulnerabilidad de la Unidad Hidrogeológica Manigordo

Para esta unidad hidrogeológica se debe tomar en cuenta la existencia de dos niveles de agua, más superficial de ellos se ubica hacia la parte norte del área de estudio, específicamente hacia la zona montañosa cercana al área del botadero, se considera como un acuífero de tipo no confinado cubierto, cuyo nivel de agua se estima que se encuentra de entre 5 y 10 m de profundidad, aunque se considera que en algunos sitios pudiera 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 freáticos o lloraderos.

Este nivel superior se halla cubierto por una capa de suelo mayoritariamente arcilloso 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 es significativamente mayor, ya que el diseño de dicho botadero implicó el desarrollo de celdas para el depósito de los residuos, las cuales pudieron alcanzar hasta una profundidad de 6 m, con lo cual no se descarta que exista una interacción directa de los lixiviados generados a partir de la deposición de los residuos en el botadero con el nivel acuífero, esto debido a la remoción parcial o total de la cobertura superficial protectora del mismo.

En el cuadro 24 se muestra la valoración correspondiente para este nivel 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 de superior una vulnerabilidad variable entre moderada a baja (figura 58).

Cuadro 24: Valoración del índice de vulnerabilidad hidrogeológica para el nivel superior de la Unidad Hidrogeológica Manigordo.

Parámetro	Unidad Hidrogeológica Manigordo (Nivel superior)
Grado de confinamiento Hidráulico	No confinado cubierto
Valoración	0,6
Ocurrencia del sustrato suprayacente	Arcillas y Conglomerados
Valoración	0,6
Distancia al agua (m)	Entre <5 y >5
Valoración	0,9 – 0,7
Índice de vulnerabilidad	0,32 -0,252
Valoración	Vulnerabilidad moderada-baja

El segundo nivel de agua determinado para la Unidad Hidrogeológica Manigordo 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, 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.

En el cuadro 25 se presenta la valoración correspondiente de los parámetros implementados en la metodología GOD, en este caso se determinó un grado de vulnerabilidad despreciable para este nivel acuífero inferior.

Cuadro 25: Valoración del índice de vulnerabilidad hidrogeológica para el nivel inferior de la Unidad Hidrogeológica Manigordo.

Parámetro	Unidad Hidrogeológica Manigordo (Nivel inferior)
Grado de confinamiento Hidráulico	Confinado
Valoración	0,2
Ocurrencia del sustrato suprayacente	Arcillas, arenas y gravas
Valoración	0,3-0,6
Distancia al agua (m)	80-85
Valoración	0,5
Índice de vulnerabilidad	0,03-0,06
Valoración	Vulnerabilidad despreciable

En la figura 58 muestra el mapa de vulnerabilidad correspondiente para la Unidad Hidrogeológica Manigordo, tomando en cuenta la valoración realizada tanto para el nivel superior ubicado hacia la parte norte del área de estudio como para el nivel inferior el cual fue definido para la parte central y sur de dicha área.

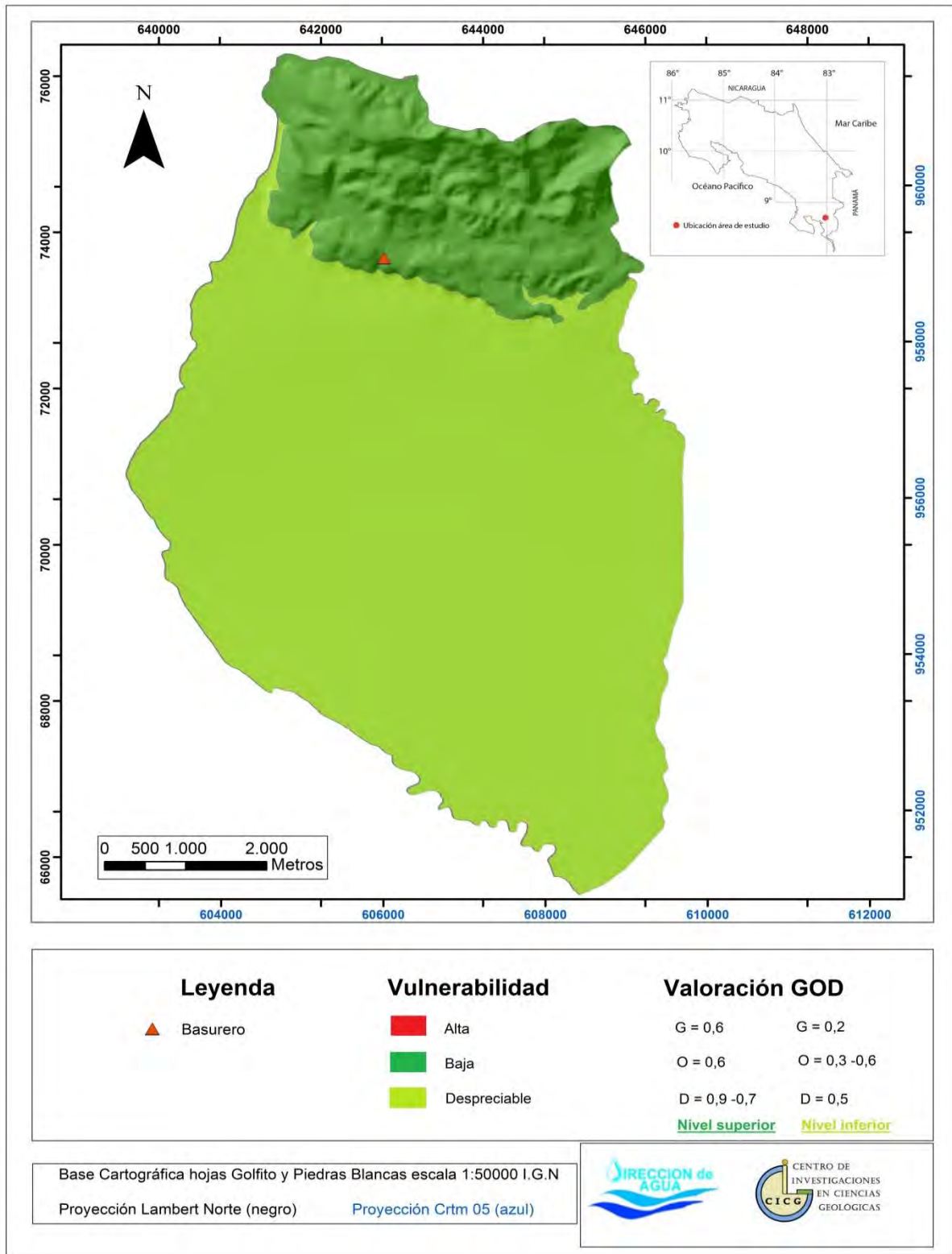


Figura 58: Vulnerabilidad hidrogeológica para la Unidad hidrogeológica Manigordo. Fuente: Elaboración propia.

8.3.3 Análisis de vulnerabilidad de la Unidad Hidrogeológica Río Claro

Esta unidad hidrogeológica fue definida con base en la información de pozos y de algunos sondeos realizadas sobre la parte plana del área de estudio, con lo cual se logró determinar la existencia de un nivel acuífero a una profundidad cercana a los 120 m en dicha área, caracterizando este nivel como un acuífero de tipo confinado, el cual es sobreyacido tanto por la Unidad de Areniscas Finas grisáceas como por el relleno aluvial de la zona.

Con base en la información anterior se realizó la respectiva valoración de cada uno de los parámetros implementados en la metodología GOD para la determinación de vulnerabilidad hidrogeológica, los cuales se detallan en el cuadro 26, obteniéndose como resultado un grado de vulnerabilidad despreciable para este nivel acuífero.

En la figura 59 muestra el mapa de vulnerabilidad correspondiente para esta unidad hidrogeológica.

Cuadro 26: Valoración del índice de vulnerabilidad hidrogeológica para la Unidad Hidrogeológica Río Claro.

Parámetro	Unidad Hidrogeológica Río Claro
Grado de confinamiento Hidráulico	Confinado
Valoración	0,2
Ocurrencia del sustrato suprayacente	Roca arcillitizada
Valoración	0,5-0,7
Distancia al agua (m)	>100 m
Valoración	0,3
Índice de vulnerabilidad	0,03-0,042
Valoración	Vulnerabilidad despreciable

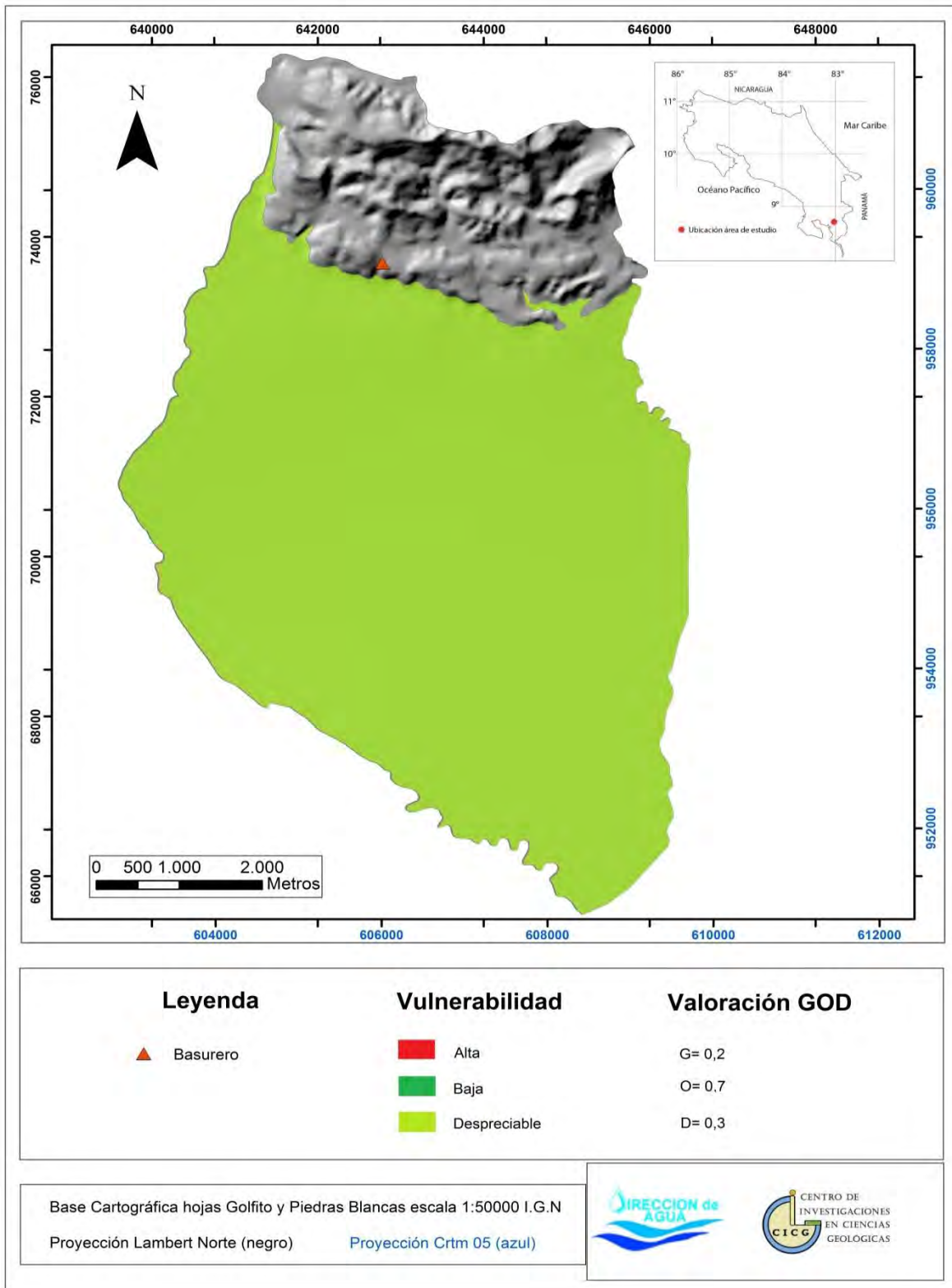


Figura 59: Vulnerabilidad hidrogeológica para la Unidad hidrogeológica Río Claro. Fuente: Elaboración propia.

8.4 Fuentes potenciales de contaminación detectados dentro del área de estudio.

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

Entre los principales focos potenciales de contaminación detectados destacan los siguientes:

8.4.1 Botadero

Tal y como ya se ha mencionado la presencia del botadero representa una posible fuente de contaminación. En el caso de las aguas subterráneas, la unidad hidrogeológica con mayor grado de impacto potencial es la Unidad Hidrogeológica Manigordo, específicamente el nivel superior, mismo que según lo mencionado en las secciones anteriores corresponde con un nivel acuífero poco profundo, el cual pudiese 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 pudiese 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 lateral entre ambos niveles acuíferos, con lo cual existiría una mayor propagación de la pluma de contaminantes causada por el botadero, sobre todo considerando que del acuífero aluvial se está abasteciendo de agua a la comunidad de la Esperanza.

8.4.2 Manejo de aguas negras en el poblado de la Esperanza

Según lo visualizado durante las giras de campo (figura 60), en el poblado de la Esperanza de Río Claro existen deficiencias en cuanto al manejo y la disposición de las aguas residuales, ya que las mismas son descargadas de manera directa sobre la red de alcantarillado pluvial sin ningún tipo de tratamiento previo. Esto 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, sin olvidar también la amenaza a la salud pública que esta situación representa, pudiendo ser el medio para la

propagación de enfermedades, virus y sitios de incubación de mosquitos transmisores de enfermedades que eventualmente pueden afectar a los habitantes de dicho poblado.



Figura 60: Contaminación por descarga de aguas negras sobre la vía pública en el poblado de La Esperanza de Río Claro. Fuente: Elaboración propia.

8.4.3 Contaminación por actividad pecuaria

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.

8.4.4 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, 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 podrían 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.

Otras fuentes potenciales de contaminación que pueden presentarse en esta área asociadas con las labores propias de los cultivos 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 parece 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 que representa un importante foco de contaminación para el recurso hídrico de la zona.

En la figura 61 se presenta el mapa de ubicación de las fuentes potenciales de contaminación descritas anteriormente.

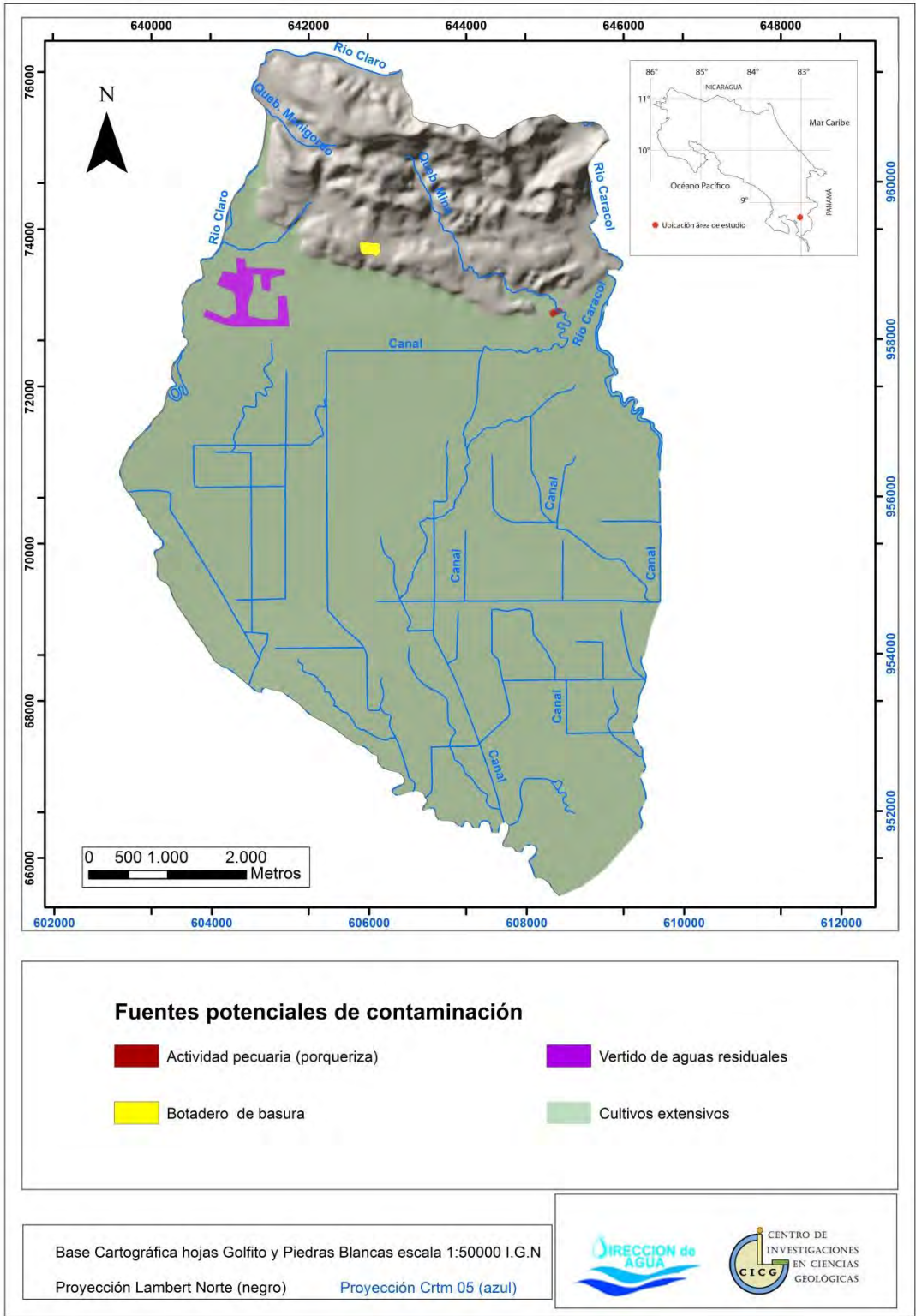


Figura 61: Mapa de fuentes potenciales de contaminación detectadas en el área de estudio.
Fuente: Elaboración propia.

8.5 Análisis del riesgo de contaminación

Para la determinación del riesgo a la contaminación de los sistemas acuíferos se implementó la metodología mostrada en la Figura 62, misma que se base en la relación de dos factores como los son: en primer lugar el grado de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, el cual depende de las características de suelo o estratos de roca que sobre yacen dicho nivel, y en segundo lugar de la proporción o carga de contaminantes que pudiesen ser aportados a un acuífero como consecuencia de las diferentes actividades humanas desarrolladas en superficie.

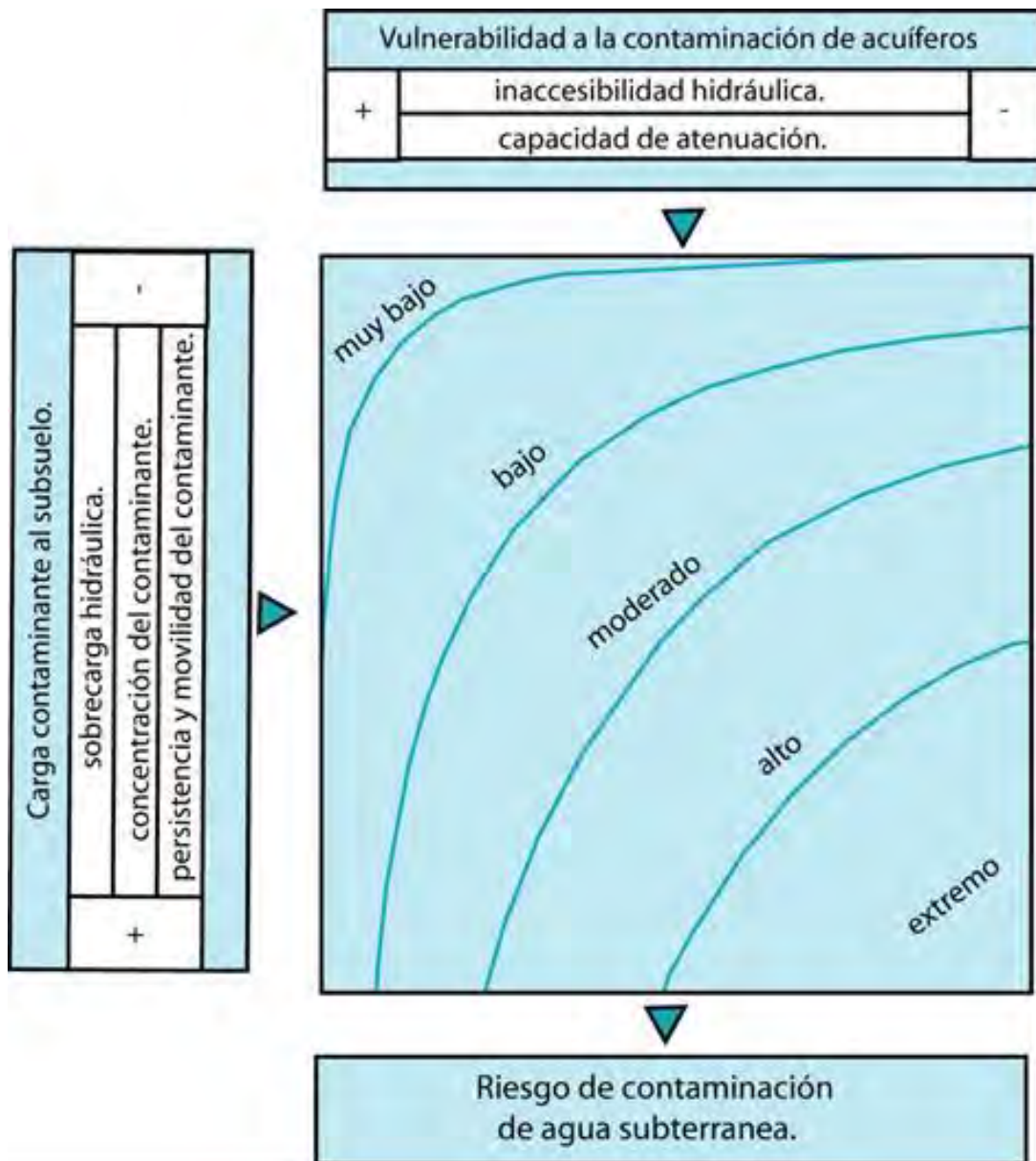


Figura 62: Esquema conceptual para la evaluación del riesgo de los recursos hídricos subterráneos. (Tomado de Foster *et al.*, 2002).

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.

Las zonas más críticas se presentan donde se desarrollen actividades capaces de generar elevadas cargas de contaminante, coincidiendo su ubicación con áreas definidas como de alta o extrema vulnerabilidad hidrogeológica.

La evaluación del riesgo a la contaminación es un procedimiento fundamental para la protección del recurso hídrico, ya que permite detectar aquellas actividades humanas que podrían tener un mayor impacto negativo sobre la calidad de las aguas subterráneas, siendo a su vez una herramienta esencial a tomar en cuenta en todo proceso de planificación de uso de suelo.

8.5.1 Determinación del riesgo a la contaminación hidrogeológica

Para la definición del riesgo a la contaminación hidrogeológica en el área de estudio se ha utilizado como base la matriz mostrada en el cuadro 27.

Cuadro 27: Matriz para la determinación del riesgo a la contaminación hidrogeológica (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 63 se muestra el mapa de riesgo a la contaminación hidrogeológica establecido para el área de estudio, 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.

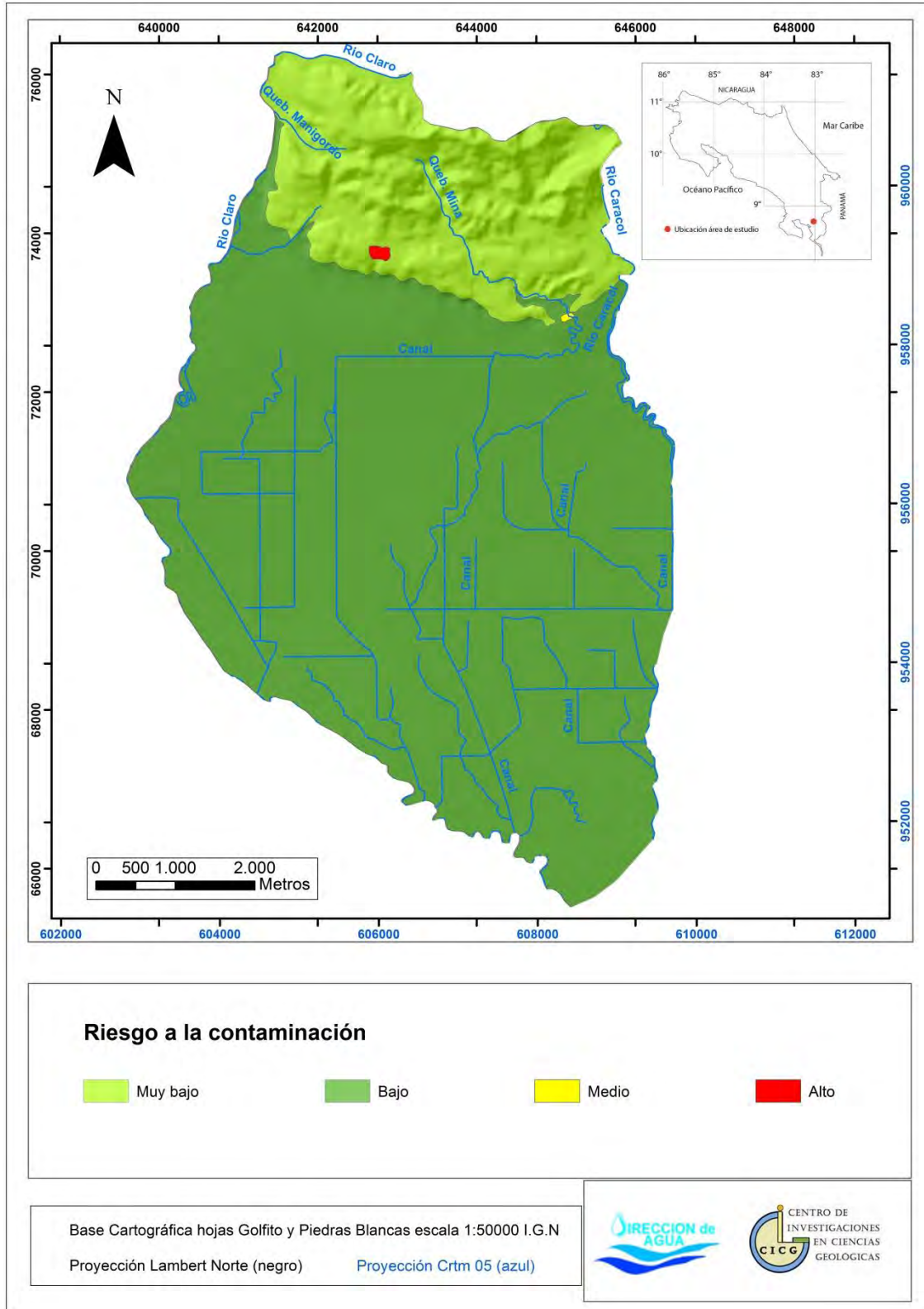


Figura 63: Mapa de riesgo de contaminación para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con lo mostrado en esta figura, se observa que la principal fuente potencial de contaminación para el área de estudio (por su extensión) está relacionada con la presencia de zonas cuyo uso de suelo está asociado a la existencia de cultivos extensivos, principalmente de Palma y en menor grado de otros tipos de cultivos como por ejemplo maíz, estos se hallan fundamentalmente hacia la parte plana del área de estudio, específicamente sobre el relleno aluvial de la zona, para el cual según el análisis de vulnerabilidad hidrogeológica realizado se determinó una baja vulnerabilidad, a la vez que se ha considerado una carga de contaminantes generados por la actividad propia de los cultivos catalogada como moderada, obteniéndose como resultado un bajo riesgo a la contaminación hidrogeológica para esta actividad, esto a partir de la interacción de los parámetros de vulnerabilidad y carga de contaminantes.

Por su parte para el caso específico del botadero de basura y las fuentes de contaminación asociadas a la actividad pecuaria se obtuvo como resultado un riesgo hidrogeológico considerado como alto y moderado respectivamente, tomando en cuenta una carga de contaminantes potencialmente elevada para ambos casos y una vulnerabilidad hidrogeológica que oscila entre baja y moderada para el caso del botadero y baja para la zona en la cual se ubica la actividad pecuaria citada como posible fuente de contaminación, que en este caso corresponde con una porqueriza.

9 Propuesta red de monitoreo

El primer paso para una adecuada gestión del recurso hídrico, es la instalación de una red del monitoreo de la cantidad y calidad del agua (Arias, 2013).

El término monitoreo implica seguimiento y por lo tanto, se refiere a mediciones y muestreos reiterados (periódicos). La periodicidad del monitoreo, depende de variados factores: régimen de flujo (natural o artificial - extracción); fuentes reconocidas o potenciales de contaminación (ubicación y características), carga, movilidad, persistencia y toxicidad de los contaminantes; tamaño del acuífero; comportamiento hidráulico (libre, semiconfinado o confinado); características y espesor de la zona subsaturada; características y posición de la zona de recarga y profundidad de los acuíferos semi y confinados; relación exceso - déficit y periodicidad de la recarga; presupuesto, entre otros.

Los principales objetivos de una campaña de monitoreo de aguas subterráneas incluyen (Auge 2006, 2008):

- Soportar la estrategia de protección de aguas subterráneas en los niveles locales, regionales y nacionales con el objetivo de preservar sus propiedades naturales especialmente para propósitos de abastecimiento de agua potable.

- Proveer datos representativos sobre el estado natural y las tendencias del sistema hidrogeológico con fines de planeación, manejo y toma de decisiones sobre la protección y conservación de las aguas subterráneas.
- Disponer de datos precisos y confiables para ayudar a identificar la existencia de fuentes puntuales y difusas de contaminación.
- Producir datos para estudiar los cambios en el espacio y en el tiempo en la calidad de los sistemas hidrogeológicos debido a procesos naturales.

El desarrollo de la estrategia debe tener en cuenta que los objetivos de monitoreo dependen del nivel (nacional, regional, local), de las prioridades, de los intereses y de las necesidades de los usuarios y por ello su determinación es complicada. En sentido amplio, son objetivos comunes (IDAM 2002,2007):

- Identificar las propiedades físicas, químicas y biológicas del sistema de aguas subterránea.
- Definir el estado, en cantidad y calidad, de las aguas subterráneas (identificar formaciones geológicas, características hidroquímicas).
- Identificar los efectos de los procesos naturales y los impactos humanos de los sistemas hidrogeológicos.
- Pronosticar a largo plazo las tendencias en cantidad y calidad de las aguas subterráneas.
- Definir el grado de vulnerabilidad de los sistemas hidrogeológicos.
- Definir medidas a ser adoptadas para prevenir la degradación de las aguas subterráneas o restaurar los acuíferos que ya han sido afectados.
- Determinar prioridades y conflictos entre los usuarios de los recursos hídricos subterráneos y otros recursos naturales (estudio socio-económico).

El sistema de monitoreo incluye las siguientes actividades (Arias, 2013; Quintana 2008; Morelio & Torres, 2002):

- Delimitación del área de monitoreo.
- Análisis de la estructura geológica, el sistema de flujo de aguas subterráneas y la calidad de las aguas subterráneas.
- Diseño de la red de monitoreo.
- Designación e implementación de métodos de campo y procedimientos analíticos de laboratorio.
- Determinación de la frecuencia de muestreo y selección de variables a ser analizadas incluyendo muestras de campo y blancos como parte de los procesos de aseguramiento control de calidad.

- Manejo de la base de datos, especialmente en lo relacionado con manipulación, procesamiento y evaluación de los datos.

La selección de los sitios para el muestreo de la calidad y cantidad de las aguas subsuperficiales y subterráneas deberá diseñarse a partir del modelo hidrogeológico conceptual y de los sistemas acuíferos presentes en cuencas y/o subcuencas hidrogeológicas (Arias, 2013). Es importante destacar que las variaciones naturales de los niveles y la calidad de las aguas subterráneas están íntimamente relacionadas con las variaciones espaciales y temporales de variables meteorológicas e hidrológicas que definen las diferentes épocas climáticas.

Desde el punto de vista hidrogeológico es importante conocer el tipo de acuífero a monitorear teniendo en cuenta (Arias, 2013):

- El marco geológico y estructural
- El modelo de flujo que defina sus zonas de recarga, tránsito y descarga
- Las relaciones entre río- acuífero, sus parámetros hidráulicos, sus características hidrogeoquímicas naturales.
- La recarga proveniente de la precipitación, sus recursos y reservas.
- La vulnerabilidad y las fuentes potenciales puntuales y/o difusas de contaminación.

La mayoría de estos factores incide también en la distribución y separación de los pozos para monitoreo, cuya principal virtud consiste en que sean hábiles para brindar valores representativos de los potenciales hidráulicos y para permitir un muestreo que también sea representativo de la calidad del acuífero.

Con base en la información recabada en las secciones anteriores del presente informe se recomienda la creación de una red de monitoreo tanto de agua subterránea como superficial, esto con el fin de tener un mayor control sobre la influencia que pueda tener la presencia del botadero sobre la calidad de los acuíferos y cuerpos de agua superficial de la zona. A continuación se presenta con más detalle algunas recomendaciones a seguir para la instalación de dichas redes de monitoreo.

9.1 Red de monitoreo de agua subterránea

En concordancia con el inciso h, artículo 1 del Reglamento sobre Rellenos Sanitarios (N. 27378-S) se recomienda la construcción de al menos 4 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.

La construcción de estos piezómetros permitirá a su vez la obtención de información útil sobre niveles de agua subterránea, lo cual sería de utilidad para obtener una mayor comprensión de su dinámica, siendo el faltante de esta información una de las mayores limitantes encontradas durante el desarrollo de la presente investigación.

En el cuadro 28 se presenta una propuesta de la ubicación de cada uno de los piezómetros recomendados. Se propone que estos tengan una profundidad promedio de entre 20 a 25 m, de acuerdo con las condiciones propias del lugar referentes a profundidad de niveles estáticos.

Cuadro 28: Propuesta de ubicación de piezómetros.

Piezómetro	Longitud Lambert N.	Latitud Lambert N.
1	642663	73828
2	642902	73799
3	642852	73651
4	642915	73461

Las profundidades de los niveles de agua subterránea se medirán con el empleo de una sonda, tomando como referencia el nivel del suelo.

Se anotará para cada medición los siguientes datos: fecha y hora de la medición, nombre de quien realiza la medición, punto de referencia para la medición del nivel del agua, elevación del punto de referencia sobre el suelo, condiciones especiales como lluvia y otros que puedan afectar el nivel (Dirección de Aguas, 2009).

En caso de que la medición se realice el mismo día del muestreo, la medición del nivel debe hacerse antes de la toma de la muestra para que represente las condiciones naturales del acuífero y no se vaya a medir un falso nivel estático que más bien corresponde con un nivel de recuperación parcial originado por el abatimiento de nivel del agua durante la purga. Este error podría producirse principalmente en sitios poco permeables de lenta recuperación (Dirección de Aguas, 2009).

Los parámetros a medirse en el campo son al menos los siguientes: color, olor, turbidez, conductividad eléctrica, temperatura y pH.

En este caso particular, hay que recordar que el inciso c del artículo 20 del Reglamento sobre Rellenos Sanitario (N. 27378-S) establece que como mínimo se deben analizar los siguientes parámetros en laboratorio, los cuales se deben realizar trimestralmente:

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Potencial Hidrógeno (pH)
- Sólidos Totales (ST)
- Cromo total (Cr)

- • Plomo (Pb)
- • Mercurio (Hg)
- • Níquel (Ni)

Para complementar estos parámetros se propone medir además: dureza total, la turbidez, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, sólidos suspendidos, carbono orgánico disuelto (DOC), cloruros, fluoruros, sulfatos, nitratos, hierro, 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. Estos parámetros al ser complementarios de los establecidos en el Reglamento de Rellenos Sanitarios, se recomiendan que la frecuencia de medición sea al menos semestral.

En la figura 64 se muestra la distribución de cada uno de los piezómetros propuestos a construir en los alrededores del vertedero.

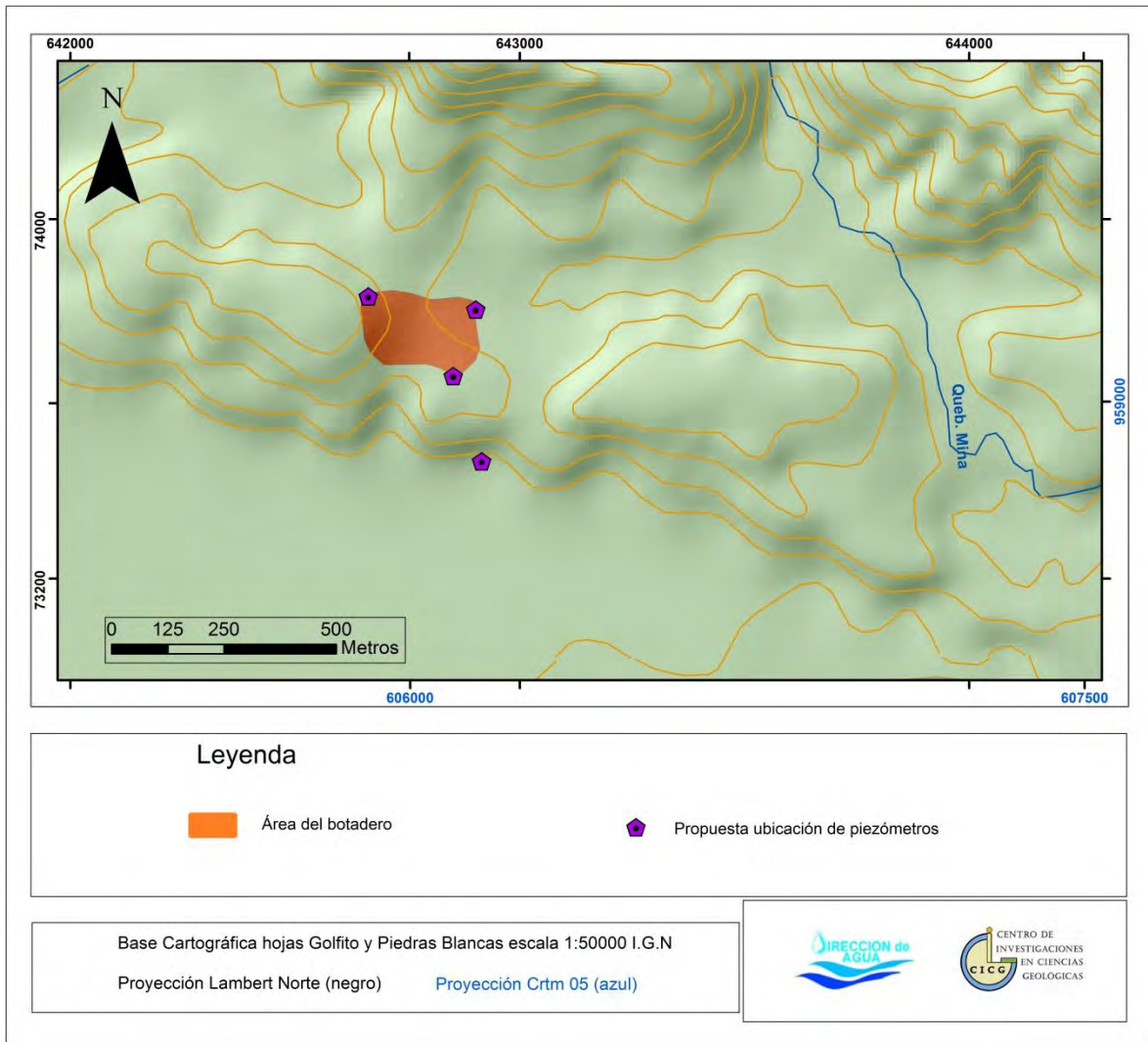


Figura 64: Distribución espacial de los piezómetros propuestos para la zona cercana al vertedero. Fuente: Elaboración propia.

La distribución de los piezómetros se hizo con base en la información obtenida en los apartados anteriores, ubicándose dos de ellos en los extremos noreste y noroeste de la zona del botadero y un tercero en el extremo sur del mismo, esta distribución se hace con el objetivo de tener un control geométrico que permita inferir alguna dirección preferente de una determinada pluma de contaminantes que se esté propagando a través de la zona del botadero.

Por otro lado se ubicó un cuarto piezómetro en la parte sur del botadero, específicamente al pie de los cerros en los cuales este se ubica, esto debido a que según los resultados del balance hídrico realizado se determinó que la zona cercana al botadero presenta una

alta recarga potencial, por lo cual sería importante tener un parámetro de control que permita conocer la calidad del agua que pudiera estar siendo aportada desde la zona del vertedero hacia el acuífero aluvial ubicado al sur de este, el cual está representado en este estudio por la Unidad Hidrogeológica La Esperanza.

9.2 Red de monitoreo del agua superficial

Tal y como se mencionó anteriormente la quebrada Mina es el principal cuerpo de agua superficial con posible afectación por efecto del vertedero, razón por la cual es a esta quebrada a la que se le debe brindar un mayor seguimiento o control sobre la calidad de sus aguas.

Se recomienda hacer un monitoreo semestral en al menos tres secciones diferentes de la quebrada, siguiendo el curso natural de esta (figura 65), esto con el objetivo de evaluar la calidad del agua en cada una de estas secciones y a su vez poder localizar algún tipo de cambio en su composición o bien definir un área de mayor influencia o afectación por el aporte de contaminantes provenientes del botadero.

Dichos análisis deben tomar en cuenta la evaluación de parámetros bacteriológicos como la presencia de coliformes fecales y parámetros fisicoquímicos entre los que destacan la turbidez, conductividad eléctrica, pH, temperatura, oxígeno disuelto, sólidos disueltos, nitratos, fluoruros, sulfatos, manganeso, magnesio, sodio, hierro, cobre, plomo y zinc. Es importante además realizar una evaluación en función de los parámetros establecidos en el Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales (Decreto 33903-MINAE-S).

En el cuadro 29 se presenta una propuesta de sitios en los que se recomienda llevar a cabo dicho monitoreo.

Cuadro 29: Propuesta de sitios para el monitoreo de la calidad de aguas subterráneas

Sitio	Longitud Lambert N.	Latitud Lambert N.
1	643643	74093
2	644600	73196
3	645080	73109

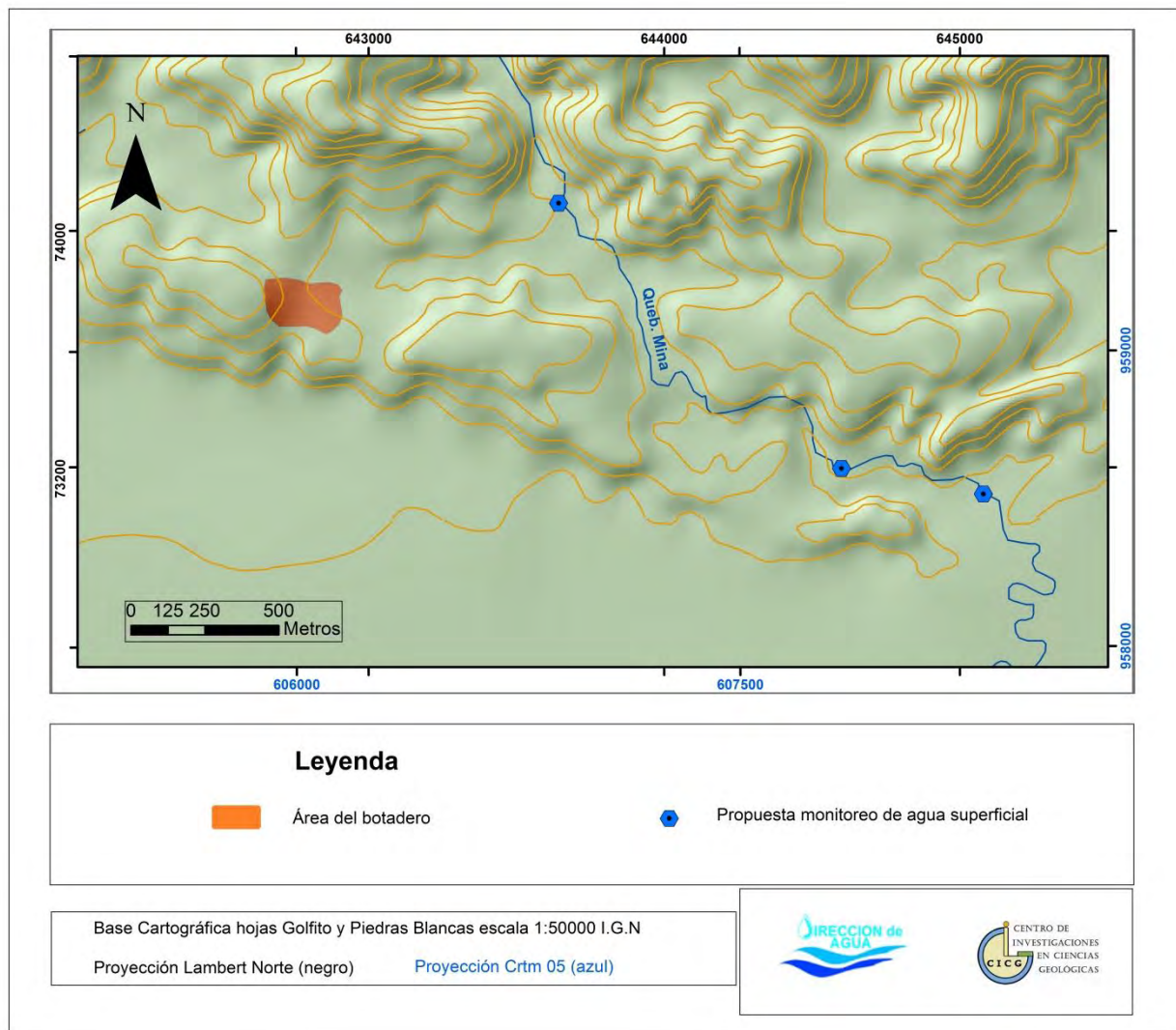


Figura 65: Ubicación de sitios propuestos para el monitoreo de agua superficial. Fuente: Elaboración propia.

10 CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

10.1 Conclusiones

10.1.1 Contexto Regional

Desde el punto de vista climático, la zona de estudio se caracteriza por presentar una precipitación promedio anual de 4306,9 mm, siendo los meses de setiembre y octubre los más lluviosos con valores de precipitación promedio que varían entre los 550 y 600 mm respectivamente, mientras que febrero corresponde con el mes más seco con precipitaciones que no superan los 100 mm. La información meteorológica para el área de estudio se extrajo de los datos disponibles en las estaciones Río Claro, Coto 50, Coto 52, Coto 54 y Coto 58 para el periodo de 1950 a 2011.

Las temperaturas promedio para el área de estudio oscilan entre los 26,3 y 27,7 °C, esto según la información disponible para las estaciones Río Claro y Corredores, los meses de marzo y abril son los más calurosos con temperaturas máximas de hasta 27,8 °C.

El área de estudio se caracteriza por presentar dos topografías bien establecidas, una zona montañosa ubicada hacia la parte norte con pendientes que oscilan entre los 16 y 35 °, y una zona plana ubicada hacia la parte central y sur del área de estudio. El patrón de drenaje para el área montañosa es de tipo dendrítico con presencia además de patrones de tipo rectangular y angular influenciados por la estratigrafía y efectos tectónicos locales. El régimen hídrico en la parte plana ha sido modificado y por tanto resulta difícil su definición.

El área de influencia indirecta del botadero se ha denominado en este estudio como parte de la Cuenca Ríos Claro-Caracol, misma que se determinó en función de la divisoria de agua al norte del botadero y el área limitada por los cauces río Claro y Caracol. Esta área a su vez se ha subdividido en 4 microcuencas en la zona montañosa que han sido nombradas como: Microcuenca Río Claro, Microcuenca Quebrada Manigordo, Microcuenca Quebrada Mina y Microcuenca Río Caracol.

Las geoformas dominantes en el área de estudio se han agrupado en 3 grupos de acuerdo a su origen, estas son: formas de origen fluvial, formas de origen estructural y formas de origen denudacional. Desde el punto de vista geológico se da el predominio de rocas de origen sedimentario de edad Oligoceno, las cuales se consideran como una secuencia de turbiditas que incluye facies de areniscas, lutitas, limolitas, arcillolitas y conglomerados.

10.1.2 Contexto local

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 Km², 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 Km². 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.

En lo que respecta a las características de los suelos del área de estudio, a partir de la realización de las pruebas de infiltración se obtuvo como resultado una velocidad de infiltración variable de moderada a baja en la mayoría de las pruebas efectuadas, siendo mucho más recurrentes los valores de infiltración menores a los 200 mm/día, no obstante; de manera puntual, en algunas regiones se obtuvieron velocidades de infiltración significativamente altas, tal es el caso del extremo NE del área de estudio, sitio en donde se registró una velocidad de infiltración de 5112 mm/día, siendo esta la velocidad de infiltración máxima obtenida para el área de estudio.

Se determinó que los tipos de suelo predominantes en la zona son aquellos con texturas variables entre franco arcillo-limoso a franco limoso, los cuales se hallan de manera extendida a lo largo de la zona plana correspondiente al relleno aluvial y que podrían ser la causa de las bajas velocidades de infiltración obtenidas para dicha zona. El segundo

tipo de suelo más abundante son aquellos con textura franco arenosa, los cuales se ubicaron hacia la parte norte del área de estudio. Finalmente para la zona cercana al botadero de basura se determinó una textura de suelo de tipo Franco arenosa.

Por su parte referente a la porosidad de los suelos, cabe mencionar que se obtuvieron resultados muy uniformes en los que respecta a este parámetro, con valores que oscilaron entre 47 y 49 %, los valores de capacidad de campo obtenidos variaron entre 23,61 y 37,28, ubicándose los máximos valores en la región central y sur del área de estudio, mientras que los valores más bajos se detectaron en la zona cercana al botadero de basura, la densidad aparente osciló entre 1,06 y 1,17 con valores máximos ubicados hacia la parte norte coincidiendo con la zona montañosa, y finalmente en lo que respecta al punto de marchitez los resultados obtenidos variaron entre 15,93 y 21,46 con valores máximos registrados hacia la región central y sur del área de estudio.

10.1.3 Modelo Hidrogeológico local

El modelo hidrogeológico definido por primera vez para la zona, contempla la existencia de tres Unidades Hidrogeológicas, 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 extracción 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 cubierto 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 de extracción 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 una caudal promedio de extracción de 14 l/s y una dirección de flujo hacia el SE, según el modelo de equipotenciales diseñado.

10.1.4 Recarga Potencial

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 entre 129 y 2500 mm, siendo predominantes los valores de recarga potencial de entre 1345 y 1665 mm, los cuales fueron determinados principalmente para la zona central y sur del área de estudio. 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.

10.1.5 Vulnerabilidad hidrogeológica

A partir de la aplicación de la metodología GOD se determinó el índice de vulnerabilidad intrínseca para cada una de las unidades hidrogeológicas definidas. En el caso de la Unidad Hidrogeológica La Esperanza se obtuvo un grado de vulnerabilidad bajo, justificado por la presencia de una cobertura de suelo arcilloso, la cual que sobreyace al nivel acuífero definido para esta unidad, reduciendo con ello la probabilidad de infiltración de sustancias contaminantes que pudieran alcanzar dicho nivel, en el caso de la Unidad Hidrogeológica Manigordo el índice de vulnerabilidad hidrogeológica obtenido para su

nivel acuífero superior es considerado como de bajo a moderado, mientras que en el caso del nivel inferior la vulnerabilidad obtenido es despreciable, misma categoría que se asigna para el caso de la Unidad Hidrogeológica Río Claro.

10.1.6 Situación del botadero de basura

Se considera este vertedero de basura como de relleno tipo manual. El botadero entró en funcionamiento en el año 1995, siendo clausurado y cerrado en varias ocasiones por el Ministerio de Salud, la última orden de clausura se dio el 27 de marzo del 2015, manteniéndose en esa condición hasta la fecha. Claramente este botadero incumple varios de los artículos establecidos en el Reglamento de Rellenos Sanitarios (N. 27378-S), específicamente los numerales 7, 13, 14, 20. Por su parte, este estudio viene a satisfacer parcialmente los requerimientos solicitados en el artículo 11.

Según el cálculo de la recarga potencial, la zona en la que se ubica el botadero presenta uno de los valores más altos de recarga anual (alcanzando valores máximos de hasta 2096 mm). Además, de acuerdo con los planos catastrales y constructivos del botadero se menciona la presencia de manantiales o nacientes de agua en las cercanías de la finca en donde este se ubica (sin embargo, no se pudieron constatar en el campo), por lo cual se deduce la existencia de un nivel acuífero poco profundo en la zona, mismo que pudiese estar siendo afectado de manera directa por la actividad propia del botadero, la cual se asocia principalmente con la generación de lixiviados que podrían estar afectando considerablemente la calidad de las aguas subterráneas en dicha zona. La profundidad del nivel del agua en el lugar no se logró determinar, sin embargo se estima que podría oscilar entre los 5 y 10 m, esto basado en información suministrada por personeros de la Municipalidad de Golfito durante la visita realizada al botadero, en la cual se mencionó que durante las labores de excavación y movimientos de tierra previo a la entrada en funcionamiento del botadero se encontró un nivel de agua a 5 m de profundidad.

Los suelos en el área generalmente presentan texturas mayoritariamente arenosas y con rangos de conductividad hidráulica que varían de moderada a rápida, esto según los resultados del muestreo de suelos efectuado, aspectos que contrastan con las características de suelos recomendadas en el reglamento para rellenos sanitarios, los cuales deben garantizar cierto grado de impermeabilidad.

El botadero se encuentra en un área topográficamente elevada, con lo que se consideraría mínimo el riesgo de inundación, además no se observaron cuerpos de agua superficial propiamente en el área del botadero, no obstante en los planos constructivos del botadero se menciona la presencia de quebradas de carácter intermitente en las cercanías de este.

El poblado de la Esperanza es el centro urbano más próximo al área del botadero, se encuentra ubicado a una distancia aproximada de 1,8 km.

En el área del botadero no se evidencian rasgos significativos que muestren inestabilidad del terreno o amenaza de deslizamientos, se destaca la presencia de manera puntual de algunas cárcavas o sumideros (Figura 66), las cuales posiblemente fueron originadas de manera artificial como parte de la confección del drenaje del botadero durante su diseño.



Figura 66: Presencia de cárcavas o sumideros en la zona del botadero de Golfito. Fuente: Elaboración propia.

Geológicamente el área se caracteriza por la presencia de una serie de conglomerados con clastos de diversa composición tanto ígneos como sedimentarios, de tamaño centimétrico a decimétrico y con formas generalmente subredondeadas a redondeadas, los cuales se hallan inmersos en una matriz arcillosa de color café-naranja en una relación clastos- matriz de aproximadamente 70-30%.

El botadero cuenta con vías internas de lastre en buen estado y con su debida rotulación (figura 67), por su parte el camino de acceso al botadero desde la ruta interamericana sur se encuentra con un mayor grado deterioro y es transitable solo con vehículos de doble tracción.



Figura 67: Rotulación de las diferentes secciones del botadero de basura de Golfito. Fuente: Elaboración propia.

El área del botadero cuenta con un portón que restringe el acceso a la misma (Figura 68), no se observó un cercado periférico, sin embargo cabe mencionar que esta área se encuentra rodeada en gran parte por una zona montañosa que hace difícil su accesibilidad a través de sus márgenes.



Figura 68: Portón de acceso al área del botadero de basura de Golfito. Fuente: Elaboración propia.

El botadero cuenta con canales periféricos para la recolección de aguas pluviales.

No se cuenta con una planta para el tratamiento y recolección de los líquidos lixiviados, ni sistemas de drenaje para estos, tampoco se cuenta con chimeneas para gases y humos.

No se observó infraestructura básica como servicios sanitarios, bodegas, casetas, ni sitios de atención de emergencias, sin embargo en este aspecto hay que resaltar que al momento de las visitas el botadero tenía varios meses de haberse clausurado, por lo que no se descarta que parte de esta infraestructura faltante pudiese haber sido removida durante las labores de cierre del mismo.

Se evidenciaron problemas con respecto al material utilizado como relleno o cobertura de los desechos, resultó notoria la escasez de dicho material, situación que se vio manifestada por la poca cobertura de los mismos, siendo en algunos puntos incluso observables los desechos en la superficie (Figura 69).



Figura 69: Problemática respecto a la escasez de material de cobertura sobre los desechos, causando su exposición en superficie. Fuente: Elaboración propia.

Según lo observado en el campo no se contó con una adecuada planificación de cierre de operaciones o configuración final del sitio del botadero, que contemplara la aplicación de algún tratamiento paisajístico que minimizara el impacto visual provocado por la actividad del botadero (Figura 70).



Figura 70: Impacto visual dejado por la actividad del botadero. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente cabe mencionar que no se cuenta con la infraestructura necesaria para evaluar o cuantificar el impacto generado por la actividad del botadero sobre la calidad de las aguas subterráneas de la zona, por lo cual resulta indispensable la construcción de al menos tres piezómetros (dentro de los linderos del botadero) con los cuales se pueda tener un monitoreo constante sobre los niveles acuíferos de la zona, con el fin de terminar el grado de afectación y detectar cualquier cambio significativo en la calidad de las aguas subterráneas.

En referencia a la afectación de las aguas superficiales cabe mencionar que al ubicarse el botadero en una zona topográficamente más elevada con respecto a una gran parte del área de estudio y tomando en cuenta la existencia del nivel acuífero poco profundo en la zona es probable que en ciertas zonas se dé la descarga en superficie de este nivel a través de manantiales con cierta carga de contaminantes, los cuales llegarían a mezclarse con el resto de los cuerpos fluviales en la zona. En específico se considera que la Quebrada Mina pudiera ser la que mayor afectación pueda tener por efecto del botadero, esto por su cercanía a este.

Durante el desarrollo del presente estudio se presentaron una serie de situaciones externas que dificultaron en cierta medida el cumplimiento a cabalidad de los objetivos y actividades trazadas en el planteamiento de este proyecto. En primer lugar cabe mencionar que para el área específica en la que se desarrolló este estudio la información bibliográfica disponible tanto de carácter geológico como hidrogeológico es muy escasa, prácticamente nula, convirtiendo esta investigación en pionera en su tipo para el área de estudio. Entre las carencias de información destacan las inconsistencias en las descripciones litológicas de pozos, la escasez de la información básica necesaria para definir los parámetros hidráulicos de cada una de estas unidades descritas, las limitaciones técnicas y logísticas para realizar pruebas de bombeo; de igual forma, la ejecución del perfilaje geoelectrico en el área del botadero de basura no se llevó a cabo debido a que no se contó con la topografía a detalle necesaria para su realización.

10.2 Recomendaciones

Resulta prioritario hacer efectiva la construcción de piezómetros en la zona cercana al botadero de basura, esto con el fin de contar con una red de monitoreo que sirva de base para precisar con mayor exactitud el impacto que este botadero ejerce sobre las aguas subterráneas y poder así detectar posibles cambios en la calidad de estas aguas. Además sería de mucha utilidad contar con esta red de monitoreo ya que representaría una fuente adicional de información, que ayudaría a mejorar la comprensión de la dinámica del agua subterránea en esta zona, lo cual sería fundamental tomando en cuenta el faltante en información de este tipo que existe para dicha área.

Es necesario que se realice un Estudio de Diagnóstico Ambiental (EDA) detallado para el Botadero. Si bien es cierto, su aplicación ante SETENA es voluntaria será de mucho provecho para que la Municipalidad de Golfito adquiera y planifique los compromisos ambientales que permitan el uso y cierre de este vertedero, específicamente en los referente a su Plan de Gestión Ambiental.

El EDA tiene dos objetivos fundamentales: i. identificar y cuantificar los impactos negativos significativos y riesgos que una actividad está ocasionando sobre el medio ambiente y la población, y ii. Definir y establecer las "medidas de control ambiental", necesarias para prevenir, atenuar o compensar dichos impactos negativos originados en el funcionamiento de la actividad, así como el control de los riesgos ambientales, para lo cual deberá proponer el correspondiente Programa de Adecuación Ambiental (PAA) y el Programa de Contingencia y Prevención de Accidentes (PCPA).

El objetivo de la realización del EDA es establecer las medidas correctivas y preventivas correspondientes en el marco de la "Guía Técnica Para Estudio de Diagnóstico Ambiental - EDA". La cual está basada en la Resolución N° 02572 - 2009 - SETENA, e incluye:

- Descripción del Medio Ambiente afectado: (parte de estos componentes han sido contempladas en este estudio).

Físico: análisis de la geología local, hidrogeología local, análisis de agua potable y residuales, realización de pruebas de infiltración y ensayos de suelo (porosidad, clasificación granulométrica y corte directo) cálculo del tránsito de contaminantes, análisis de las amenazas naturales (deslizamientos, sismos, volcánica, biogás, lixiviados)

Biológico: análisis de la flora y fauna afectada.

Social: uso de la tierra, características socio-económicas de la población aledaña, efecto de la economía informal, percepción sobre el proyecto y posibles impactos.

- Análisis del marco legal aplicable a la actividad.
- Identificación y evaluación de impactos y riesgos.
- Diseño del Plan de Contingencia y Prevención de Accidentes.
- Diseño del Plan de Adecuación Ambiental.
- Planteamiento de las medidas de control ambiental.

Es primordial prestar atención a las posibles fuentes de contaminación detectadas en el presente estudio, en especial es fundamental que se tomen las medidas necesarias por parte de las autoridades competentes para corregir la problemática existente en el tema del manejo de las aguas negras en la localidad de la Esperanza de Río Claro, sitio en donde se evidenció la descarga de estas aguas sobre el alcantarillado pluvial.

El uso del suelo este condiciona mucho la recarga de agua a los acuíferos de la zona, por lo que se recomienda evitar un sobre poblamiento en los sectores ubicados en las zonas montañosas, estas deberían ser utilizadas con efectos de reforestación o agricultura y ganadería de bajo impacto.

Se sugiere la aplicación de la matriz de criterios de usos del suelo, según la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos para la protección del recurso hídrico, realizada por SENARA (2006), la cual es de aplicación para todas aquellas zonas del país que cuenten con mapas de vulnerabilidad.

Se debe velar por el cumplimiento de la legislación vigente en el país referente a la protección del recurso hídrico, en especial aquellas normativas que regulen el establecimiento de zonas de protección de cursos de agua superficial, manteniendo con ello un monitoreo sobre todas aquellas actividades productivas que se desarrollen cerca de ríos o quebradas y que pudieran estar generando algún tipo de afectación sobre la calidad de sus aguas.

Las autoridades nacionales deben hacer valer la legislación ambiental establecida, especialmente en lo referente a las zonas de protección de los cuerpos de agua (quebradas y manantiales), con el fin de tener una zona de resguardo ante las actividades potencialmente contaminantes.

Es necesario que este estudio, sea considerado dentro de los planes de ordenamiento territorial en su justa dimensión: la escala de trabajo y el objetivo del estudio deben ser respetados. Es decir; que para diversas actividades específicas se debe presentar un estudio hidrogeológico local, que evalúe a mayor detalle el área de influencia de cada proyecto.

Es imperativo continuar con la inversión en la generación de conocimiento hidrogeológico, para ello es necesario ampliar la zona de estudio, prever la realización de una campaña de perforación exploratoria con un muy buen control litológico, y determinación de parámetros hidráulicos a partir de pruebas de bombeo, control de la calidad del agua subterránea, acompañada además de una campaña geofísica con mayor número de sondeos eléctricos verticales, incluyendo tomografías eléctricas en el área del botadero.

En este caso particular, debido a la existencia de una resolución de la Sala Constitucional (No. 12-002448-0007-CO), es necesario que tanto la Dirección de Aguas del MINAE, el Ministerio de Salud y la Municipalidad de Golfito trabajen en conjunto para coordinar las acciones y estudios necesarios para promover el manejo adecuado de los residuos del vertedero municipal e incidir en la protección efectiva del recurso hídrico.

Es necesario que la Dirección de Aguas migre sus bases de datos al sistema de coordenadas CRTM05, el cual es oficial en nuestro país a partir del Decreto Ejecutivo número 33797-MJ-MOPT, del 6 de junio del año 2007.

11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARIAS, M. E. 2002a: Aplicación de métodos geofísicos en Hidrogeología.- en Reynolds, J. (edit.) Manejo Integrado de Aguas Subterráneas. EUNED.
- ARIAS, M. E. 2002b: La prospección eléctrica y electromagnética en dos dimensiones y su aplicación en la hidrogeología. Rev. Geol. América Central. N.27. 21-26.
- ARIAS, M. E. 2002c: Aplicaciones Geofísicas a la Hidrogeología de Costa Rica. Rev. Geol. América Central. N: 27. 11-20.
- ARIAS, M. E. 2007: Comparación de los principales dispositivos utilizados en los sondeos eléctricos verticales. Revista de Ciencia y Tecnología, Univ. de Costa Rica, 25 (1-2): 7-23.
- ARIAS, M.E. 2009: Análisis del Plan de Monitoreo propuesto para la Gestión de la Seguridad Hídrica. En : Sardinal: ¿ejemplo de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico?. Informe del Consejo Universitario, Universidad de Costa Rica. 124 p.
- ARIAS, M., 2011: Estudio Hidrogeológico de la Cuenca del Río Frío. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas. Univ. de Costa Rica (Informe Interno), 129 págs + anexos.
- ARIAS, M.E., 2013: El monitoreo del agua subterránea como instrumento de gestión. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas. Univ. de Costa Rica (Informe Interno), 10 págs.
- ARIAS M.E. 2014. Estudio Hidrogeológico del área de influencia directa del botadero de basura de la municipalidad de Golfito, ubicado en la Fila Manigordo en la Esperanza de Río Claro, Golfito de Puntarenas: Plan de Trabajo Inicial. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Univ. de Costa Rica (Informe Interno), 20 págs.
- ARIAS M.E. 2015 Estudio Hidrogeológico del área de influencia directa del botadero de basura de la municipalidad de Golfito, ubicado en la Fila Manigordo en la Esperanza de Río Claro, Golfito de Puntarenas. Informe de Avance. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Univ. de Costa Rica (Informe Interno), 30 págs.

- ARIAS M.E. 2015 Estudio Hidrogeológico del área de influencia directa del botadero de basura de la municipalidad de Golfito, ubicado en la Fila Manigordo en la Esperanza de Río Claro, Golfito de Puntarenas: Informe de Campo. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Univ. de Costa Rica (Informe Interno), 62 págs incluyendo anexos.
- ASTM, 2004: Standard Guide for Establishing Nomenclature for Groundwater Aquifers. Designation D-6106-97, 17 págs.
- AUGE, M., 2008: Hidrogeología ambiental. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 295 p.
- AUGE, M., 2006: Métodos y técnicas para el monitoreo de acuíferos. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 21 p.
- 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 inédita).
- CORRIGAN, J. D., 1986: Geology of the Burica Peninsula, Panama-Costa Rica: Neotectonic implications for the southern Middle America convergent margin. - 152 págs. University of Texas at Austin, Austin, Texas (Tesis inédita).
- DENGO, G., 1962: Estudio geológico de la región de Guanacaste, Costa Rica. -Informe Semestral, Instituto Geográfico de Costa Rica, 1962: 1-112 págs.
- DI MARCO, G., 1994: Los terrenos acrecionados del sur de Costa Rica.- 184 págs. Univ. de Lausanne. [Tesis Doc.]
- DIRECCIÓN DE AGUAS, 2009: Plan de muestreo de la calidad de agua y niveles del agua subterránea en el acuífero Aluvial de Playa Panamá. http://www.da.go.cr/textos/E.acuiferos/acuifero_playa_panama/plan%20monitoreo%20playa%20panama.pdf [Consultado el 29/2/2016].-
- 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., GÓMEZ, D., D'ELIA, M. & PARIAS, M., 2002: Protección de la calidad del agua subterránea. – 115 págs. Mundi-Prensa Libros, S.A, Madrid.
- 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.

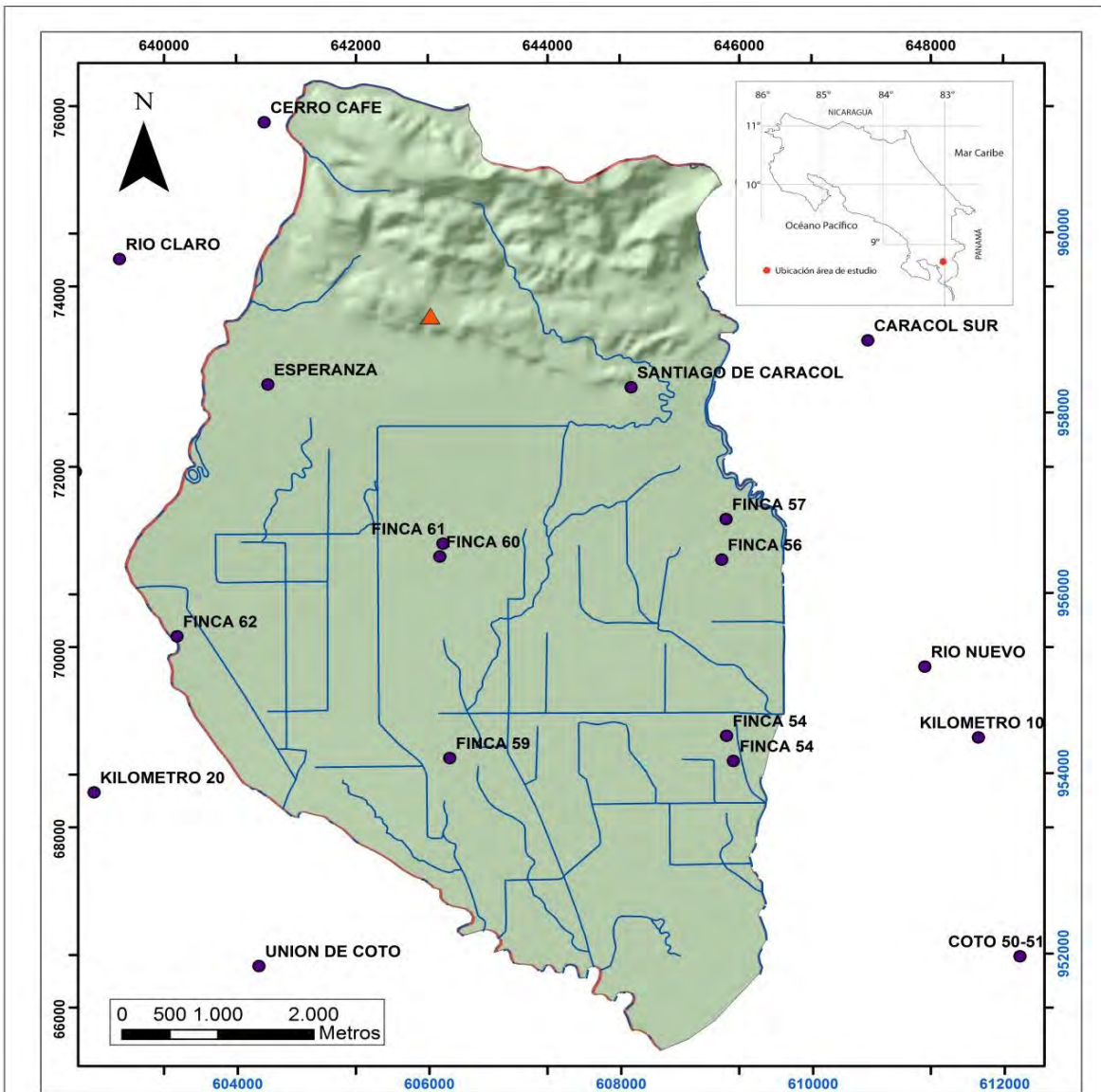
- IDEAM, 2007: Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. Bogotá, Colombia. 162 p.
- IDEAM, 2002: Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. Bogotá, Colombia, 83 p.
- LA GACETA, 1996: Reglamento de Reuso y Vertidos de Aguas Residuales, N. 33601 MINAE-S (25 de mayo de 1996).
- LA GACETA, 1998: Reglamento sobre Rellenos Sanitarios: N.27378-S. (9 de octubre de 1998).
- LA GACETA, 2007: Reglamento para la Evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales: N. 33903-MINAE-S. (17 de setiembre del 2007).
- LA GACETA, 2015: Reglamento para la calidad de agua potable. Decreto Ejecutivo 38924-S, aprobado el 1 de setiembre del 2015.
- 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.
- MARSILY, G. 1986: Quantitative hydrogeology, Academic Press, Orlando.
- MOLERIO L.F., & TORRES, J.C., 2002: Métodos geomatemáticos de diseño y optimización de redes de monitoreo de agua subterránea. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, XXIII (2), 38-45.
- MONTERO, W., 1994: Neotectonics and related stress distribution in a subduction-collisional zone: Costa Rica.- En Seyfried, H. (ed.): Geology of an evolving island arc: southeastern Central America. – Profil, 7: 125-141 págs.
- MORA, S.1979: Estudio geológico de una parte de la región sureste del Valle del General, provincia de Puntarenas, Costa Rica, 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. Revista geológica de América Central, 38: 21-31.
- OLSSON, A., 1942: Tertiary and Quaternary fossils from the Burica Peninsula of Panama and Costa Rica. Bulletin of American Paleontology, Nueva York, vol. 27 (106). 12-22 págs.

- QUINTANA C., 2008: Estrategia y métodos de monitoreo de aguas subterráneas. Concepción, Chile, 33 p.
- SÁNCHEZ.J., 2014: Sondeos eléctricos verticales. Material de curso- Dpto Geología Universidad Salamanca. España. <http://web.usal.es/javisan/hidro> (Consultado el 14 de diciembre de 2014).
- SCHOSINSKY, G. (2006): Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante balance hídrico de suelos.- Rev. Geol. Amér. Central, 34-35: 13-30.
- SENARA, 2015: Archivo nacional de pozos. Hojas topográficas Golfito y Piedras Blancas, escala 1:50000.
- SETENA, 2009: Establecimiento del Estudio de Diagnóstico Ambiental (EDA). Resolución 2286-2009 (25 de setiembre del año 2009).
- SETENA, 2009: Guía Técnica para Estudio de Diagnóstico Ambiental. Resolución 02572-2009 (2 de noviembre del 2009).
- SOLANO, J. & VILLALOBOS, R., 2012: regiones y subregiones climáticas de Costa Rica. Instituto Meteorológico Nacional, Gestión de Desarrollo. -32 págs.
- SPRECHMANN, P. (Ed.), 1984: Manual de Geología de Costa Rica, Vol. I: Estratigrafía. Editorial Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 320 págs.
- TOURNON, J. & ALVARADO, G., 1997: Mapa Geológico de Costa Rica, Folleto explicativo, escala 1:500 000. Editorial Tecnológica de Costa Rica. 60-61 págs.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Mario Enrique Arias Salguero', is centered on a light blue rectangular background.

Mario Enrique Arias Salguero

Investigador Responsable



Leyenda

- Poblados
- ▲ Basurero
- Ríos
- Área de estudio

Base Cartográfica hojas Golfito y Piedras Blancas escala 1:50000 I.G.N
 Proyección Lambert Norte (negro) Proyección Crtm 05 (azul)




Localización del estudio hidrogeológico en el área de influencia directa del botadero de basura de la municipalidad de Golfito.