ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO ALUVIAL DE PUERTO JIMÉNEZ:

Comprendido entre los cauces del río Tigre y Tamales, Golfito, Puntarenas.

Investigador Responsable:

Mario Enrique Arias Salguero

Mayo, 2016

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN……..……..10

   1.1. Aspectos generales de la zona……..10

   1.2. Justificación y objetivos…….……..10

   1.3. Actividades realizadas en esta investigación……...12

   1.4. Investigadores……...14

2. RÉGIMEN HIDROLÓGICO……15

   2.1. Meteorología……..15

   2.2. Hidrografía……...…..19

3. GEOMORFOLOGÍA……..……22

   3.1. Formas de origen marino…….....24

   3.2. Formas de origen fluvial ……25

   3.3. Formas de origen denudacional…….25

4. CONTEXTO GEOLÓGICO……...28

   4.1. Complejo Acresional Osa – Caño…….…28

   4.2. Grupo Charco Azul……...30

   4.3. Grupo Puerto Jiménez…….....34

5. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA……36

   5.1. Sondeos Eléctricos Verticales de calibración……..…40

   5.2. Profundidad del basamento estimado a partir de los SEV……43

   5.3. Interpretación de los SEV……..……48

6. MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO……55

   6.1. Inventario de pozos y nacientes……...……..……...55

   6.2. Flujo del agua subterránea……..……..……59

6.3. Campaña de Aforos…….....…….……....61

6.4. Perfiles hidrogeológicos……..72

6.5. Unidades hidrogeológicas locales…….....80

7. DETERMINACIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL……82

7.1. Aplicación del balance hídrico de suelos…….……82

7.1.1. Parámetros necesarios……82

7.1.1.1. Precipitación zonal……82

7.1.1.2. Pendientes en porcentaje……84

7.1.1.3. Uso del suelo……..84

7.1.1.4. Infiltración…….....87

7.1.1.5. Parámetros del suelo……93

7.1.1.6. Evapotranspiración……99

7.1.2. Zonas del balance hídrico de la zona……...100

7.2. Resultados……...102

8. PROTECCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO……...107

8.1. Concepto de vulnerabilidad hidrogeológica……...107

8.2. Uso de los mapas de vulnerabilidad hidrogeológica……107

8.3. La metodología GOD……108

8.4. Determinación de la vulnerabilidad hidrogeológica para la Unidad Hidrogeológica Puerto Jiménez……...109

8.5. Red de monitoreo……...112

9. CONCLUSIONES……..118

10. RECOMENDACIONES……123

11. REFERENCIAS……126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa del área de estudio de Puerto Jiménez, distrito Jiménez, cantón Golfito de Puntarenas.……..11

Figura 2: Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio.……..16

Figura 3: Gráfico de la precipitación mensual reportada en las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio.……...17

Figura 4: Mapa de las subcuencas contempladas en el área de estudio.……20

Figura 5: Mapa del patrón de drenaje del área de estudio.……21

Figura 6: Mapa geomorfológico y lineamientos del área de estudio.……23

Figura 7: Afloramiento del basalto masivo correlacionado con el Complejo Acresional Osa - Caño, en el lecho del río Tigre, coordenadas Lambert norte 602 049 / 55 905.……..29

Figura 8: Afloramiento del basalto masivo correlacionado con el Complejo Acresional Osa - Caño, en el lecho del río Tigre, coordenadas Lambert norte 599 921 / 55 105.……..29

Figura 9: Afloramiento de las lutitas gris verdosas o azuladas, en el lecho del río Tamales, coordenadas Lambert norte 612 903 / 50 106. Las lutitas se encuentran buzando S45W / 25°.……31

Figura 10: Afloramiento de las lutitas gris verdosas o azuladas, en el lecho del río Nuevo, coordenadas Lambert norte 605 576 / 54 997. Las lutitas se encuentran buzando S10W / 3°.……..31

Figura 11: Fotografía de la secuencia de areniscas y lutitas que afloran en el río Nuevo, en las coordenadas Lambert Norte 606 431 / 55 571. Los estratos buzan Wf / 20°.……...32

Figura 12: Fotografía de la deformación sinsedimentario encontrada en la divisoria montañosa Norte del río Corozal, en las coordenadas 607 920 / 50 403.……..…33

Figura 13: Fotografía de la deformación sinsedimentario encontrada en la divisoria montañosa Norte del río Corozal, en las coordenadas 607 920 / 50 403.……..33

Figura 14: Mapa geológico del área de estudio. Compilado y modificado de Berrangé (1989), Buchs & Baumgartner (2007) y Zamora (2007)……35

Figura 15: Equipo utilizado para realizar los SEV……36

Figura 16: Fotografía del Sondeo Eléctrico Vertical realizado en el área de estudio, a un costado del aeropuerto de Puerto Jiménez……37

Figura 17: Esquema simplificado de un Sondeo Eléctrico. A medida que se abre la distancia AB, aumenta la profundidad de investigación ……38

Figura 18: Mapa de ubicación de los SEV realizados en el área de estudio……..39

Figura 19: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) para el SEV código PJ – D1……43

Figura 20: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) para el SEV código PJ – D2……44

Figura 21: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) para el SEV código PJ – D4……44

Figura 22: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) para el SEV código PJ – E1……45

Figura 23: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) para el SEV código PJ – E2……45

Figura 24: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) para el SEV código PJ – E3……46

Figura 25: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) para el SEV código PJ – E4……46

Figura 26: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) para el SEV código PJ – F1……47

Figura 27: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) para el SEV código PJ – F2……47

Figura 28: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) con la curva de ajuste del modelo de capas para el SEV código PJ – D4……49

Figura 29: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) con la curva de ajuste del modelo de capas para el SEV código PJ – E3……49

Figura 30: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) con la curva de ajuste del modelo de capas para el SEV código PJ – D2.……50

Figura 31: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) con la curva de ajuste del modelo de capas para el SEV código PJ – D1.……50

Figura 32: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) con la curva de ajuste del modelo de capas para el SEV código PJ – F2. ……51

Figura 33: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) con la curva de ajuste del modelo de capas para el SEV código PJ – F1.……52

Figura 34: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) con la curva de ajuste del modelo de capas para el SEV código PJ – E1.……53

Figura 35: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) con la curva de ajuste del modelo de capas para el SEV código PJ – E2.……53

Figura 36: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) con la curva de ajuste del modelo de capas para el SEV código PJ – E4.……54

Figura 37: Gráfico de la cantidad de pozos artesanales por cada uno de los usos reconocidos en las giras de campo.……...56

Figura 38: Gráfico del porcentaje de pozos inscritos en SENARA por cada uno de los usos reportados.……..57

Figura 39: Mapa del inventario de pozos y nacientes en el área de estudio.……..58

Figura 40: Mapa de equipotencial y dirección del flujo de agua subterránea en el área de estudio.……....60

Figura 41: Mapa de ubicación de los puntos donde se aforaron los ríos Nuevo, Corozal y Tamales.……62

Figura 42: Esquema de las secciones transversales de los ríos en las cuales se realizaron aforos.……...63

Figura 43: Fotografía de la sección del Río Nuevo, aguas arriba, donde se realizó el aforo.……65

Figura 44: Fotografía de la sección del Río Nuevo, aguas abajo, donde se realizó el aforo.……65

Figura 45: Fotografía de la sección del Río Corozal, aguas abajo, donde se realizó el aforo.……70

Figura 46: Fotografía de la sección del Río Corozal, aguas arriba, donde se realizó el aforo.……70

Figura 47: Fotografía de la sección del Río Tamales, aguas arriba, donde se realizó el aforo.……...71

Figura 48: Fotografía de la sección del Río Tamales, aguas abajo, donde se realizó el aforo.……...71

Figura 49: Mapa de ubicación de los perfiles hidrogeológicos y los SEV para el área de estudio.……73

Figura 50: Perfil hidrogeológico D para el área de estudio. …….....76

Figura 51: Perfil hidrogeológico F para el área de estudio. ……...78

Figura 52: Perfil hidrogeológico E para el área de estudio. ……...80

Figura 53: Mapa de distribución de la precipitación, según la estación meteorológica, propuesto para el área de estudio. ……83

Figura 54: Mapa de pendientes del área de estudio, en los rangos requeridos por la metodología Schosinsky (2006) con sus respectivos valores de Kp. ……85

Figura 55: Mapa de uso de suelo con los respectivos valores de Kv propuestos por Schosinsky (2006), para el área de estudio.……86

Figura 56: Mapa de la infiltración del suelo del área de estudio. ……89

Figura 57: Mapa de zonas geopodológicas para el área de estudio……91

Figura 58: Mapa de distribución de la infiltración con sus respectivos valores de Kfc para la zona de estudio.……92

Figura 59: Mapa de la textura del suelo para el área de estudio.……..94

Figura 60: Mapa de la distribución espacial de la capacidad de campo (CC) en el área de estudio.……96

Figura 61: Mapa de distribución del punto de marchitez (PM) ……..97

Figura 62: Mapa de distribución de la densidad aparente (DA) para el área de estudio.……98

Figura 63: Mapa de distribución de las zonas definidas del balance hídrico para el área de estudio.……...101

Figura 64: Mapa de recarga potencial anual en cada zona utilizada en el balance hídrico de suelos ……..……..103

Figura 65: Mapa de porcentaje de recarga potencial anual en cada zona utilizada en el balance hídrico de suelos para el área de estudio.……..106

Figura 66: Diagrama para determinar la vulnerabilidad con la metodología GOD. Fuente: Foster et al. (2002)……109

Figura 67: Mapa de vulnerabilidad hidrogeológica para el área de estudio, utilizando la metodología GOD…….....111

Figura 68: Propuesta de la red de monitoreo de pozos ……...…115

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio reportadas por el IMN……15

Cuadro 2: Datos meteorológicos reportados en la estación Finca El Patio……18

Cuadro 3: Datos meteorológicos reportados en la estación Los Patos……18

Cuadro 4: Detalle de la información de pozos utilizada para calibrar los SEV realizados en el área de estudio……41

Cuadro 5: Profundidades en las que aparecen las intercalaciones entre areniscas y lutitas de la Formación Peñita en cada SEV realizado……43

Cuadro 6: Inventario de pozos disponible en las bases de datos del SENARA y AyA……55

Cuadro 7: Resumen de los usos, caudales, horas y niveles máximos de explotación indicados en los pozos de la base de datos del SENARA……57

Cuadro 8: Cálculo del caudal para los aforos realizados en el Río Nuevo……66

Cuadro 9: Cálculo del caudal para los aforos realizados en el Río Corozal……67

Cuadro 10: Cálculo del caudal para los aforos realizados en el Río Tamales……68

Cuadro 11: Resumen de la interpretación de los SEV PJ – D1, PJ – D2, PJ – E3 y PJ – D4 para el trazo del perfil hidrogeológico D……75

Cuadro 12: Resumen de la interpretación de los SEV PJ – D1, PJ – D2, PJ – E3 y PJ – D4 para el trazo del perfil hidrogeológico D……77

Cuadro 13: Resumen de la interpretación de los SEV PJ – E1, PJ – E2, PJ – E3 y PJ – E4 para el trazo del perfil hidrogeológico E……79

Cuadro 14: Resumen del modelo hidrogeológico conceptual ……..81

Cuadro 15: Datos de la capacidad de infiltración y el coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo, para el área de estudio……..88

Cuadro 16: Datos de los parámetros que describen la categorización de las zonas geopodológicas para el área de estudio……..90

Cuadro 17: Resultados del balance hídrico, utilizando la metodología de Schosinsky (2006), para el área de estudio……104

Cuadro 18: Cálculo del índice de vulnerabilidad hidrogeológica para la Unidad Hidrogeológica Puerto Jiménez……110

Cuadro 19: Sitios propuestos para la perforación de piezómetros que sirvan como red de monitoreo del agua subterránea del acuífero aluvial……116

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Aspectos generales de la zona

La zona de estudio se sitúa en la Península de Osa y corresponde con el área definida entre los ríos Tigre y Tamales hasta las divisorias de agua del sector montañoso. En total la zona de estudio tiene una extensión de 173,64 km^2. En la figura 1 se muestra el mapa de ubicación.

Administrativamente, la zona de estudio corresponde el distrito Puerto Jiménez que posee 71 796,228 Ha y pertenece al cantón Golfito de la provincia de Puntarenas.

1.2. Justificación y objetivos

Puerto Jiménez es un pueblo que se remota a los años 1960, es la entrada a la Península de Osa y de Corcovado, está situado frente al Golfo Dulce en el Sur de Costa Rica. El cultivo del banano lo convirtió en un pequeño pero importante pueblo, con facilidades de acceso por tierra, mar y aire.

Hoy día, Puerto Jiménez es uno de los pueblos más desarrollados de la Península de Osa; actualmente mucho del auge comercial del pueblo es debido al turismo, es por eso que se han desarrollado múltiples negocios con oferta para turistas nacionales y extranjeros.

En vista del eminente crecimiento de la región se hace necesario conocer sobre el estado de las aguas subterráneas para la planificación del uso y conservación de dicho recurso.

La Dirección de Agua del Ministerio de Ambiente y Energía, mediante la realización de este proyecto, lo que pretende es generar investigación en el acuífero aluvial de Puerto Jiménez, comprendido entre los ríos Tigres y Tamales – Golfito, Puntarenas, mediante la aplicación y determinación del balance hídrico, establecer su disponibilidad hídrica, determinar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero y elaborar un modelo hidrogeológico conceptual. El estudio del acuífero tiene la finalidad de servir de herramienta técnica para desarrollar una adecuada gestión de protección y aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo y la calidad del mismo.

El objetivo general del proyecto consiste en realizar un estudio hidrogeológico del acuífero aluvial de Puerto Jiménez comprendido entre los cauces del río Tigre y Tamales, Golfito, Puntarenas, para establecer su potencial hídrico.

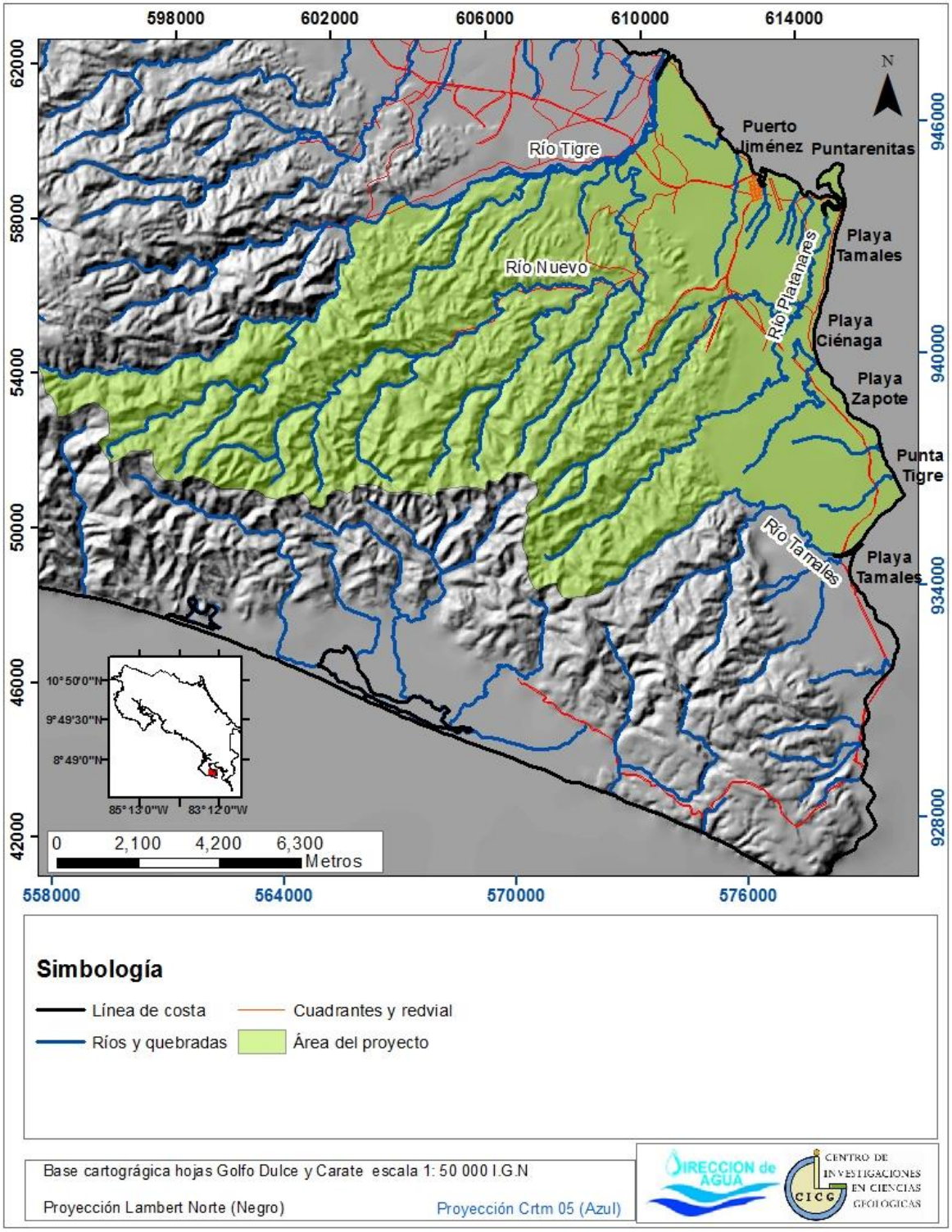


Figura 1: Mapa del área de estudio de Puerto Jiménez, distrito Jiménez, cantón Golfito de Puntarenas. Fuente: Elaboración propia.

1.3. Actividades realizadas en esta investigación

- Evaluar todos los estudios realizados hasta el momento en la zona de interés.
- Mapa de ubicación.
- Geología regional: Generar una caracterización geológica del área de interés. Realizar un mapa geológico y estructural construido con el mayor detalle de escala disponible.
- Geomorfología: Se debe generar una caracterización geomorfológica del área de interés. realizar un mapa geomorfológico construido con el mayor detalle de escala disponible.
- Uso de suelo: revisar el uso actual de la tierra con base en las fotografías aéreas más actualizadas disponibles, con comprobación de campo. Identificar las fuentes potenciales de contaminación. Elaborar un mapa de uso de suelo.
- Muestreo y análisis de suelos: se debe determinar los datos de capacidad de campo, textura, porosidad, densidad del suelo, porcentaje de humedad, y punto de marchitez para cada una de las unidades hidrogeológicas identificadas. Presentar la ubicación de las pruebas geo-referenciadas con GPS y en un mapa.
- Realizar pruebas de infiltración en la zona aluvial y en las formaciones adyacentes. 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.
- 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).
- Realizar una campaña de aforos durante la época seca en los cauces de agua ubicados dentro del área de influencia del estudio para determinar los sectores influentes y efluentes.
- Realizar una campaña geofísica en los sectores de interés, con el fin de verificar el espesor disponible de aluvión y determinar las profundidades donde se ubica el basamento local.

- 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 un resumen del inventario a manera de tabla.

- Aportar mapa de ubicación de pozos, manantiales y captaciones superficiales.

- En función de la información disponible en la Dirección de Agua y lo recolectado en campo, determinar el caudal de extracción. Se debe diferenciar el consumo de agua por uso (doméstico, industrial, turístico, comercial, agroindustrial y agropecuario) y por jornadas de bombeo para cada una de las fuentes en el acuífero. Diferenciar las que han sido concesionadas.

- Determinar la recarga potencial de la zona de estudio.

- Modelo hidrogeológico conceptual. Describir las propiedades básicas del acuífero: Profundidad del nivel freático. Propiedades hidráulicas básicas obtenidas de datos, incluyendo dirección de flujo y gradiente hidráulico del agua subterránea. Revisar las pruebas de bombeo existentes para la zona de estudio y obtener los parámetros hidráulicos.

- Realizar perfiles hidrogeológicos, en donde se involucre la zona montañosa con la aluvial, en función de la información disponible.

- Elaborar el respectivo mapa de curvas equipotenciales, con su debida georreferenciación.

- Proponer una red de monitoreo de calidad de agua subterránea que incluya, sitios de monitoreo, frecuencia de monitoreo y de una recomendación de los parámetros que se deben medir. El monitoreo debe diseñarse también para poder identificar contaminación por intrusión salina.

- Indicar recomendaciones sobre la gestión de la oferta y la demanda en el acuífero.

1.4. Investigadores

En la ejecución del presente proyecto están participando en diferentes etapas los siguientes profesionales:

- Lic. Mariel Celeste González Artavia, en la recolección de información bibliográfica, coordinación en la realización de trabajo de campo, supervisión en el levantamiento e interpretación de muestras de suelos, pruebas de infiltración y aforos, procesamiento de datos de laboratorio, elaboración de figuras y redacción general.
- Geól: Carlos David Araya Quirós y Hazel Barrantes Sandoval como asistentes en la recolección y análisis de datos de campo.
- 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

2.1. Meteorología

Cerca del área de estudio el IMN reportó 6 estaciones meteorológicas, las cuales se indican en cuadro 1 y se muestran en la figura 2. De acuerdo con la ubicación de las mismas, las más cercanas al área de estudio son las estaciones Finca El Patio y Los Patos.

Cuadro 1: Estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio reportadas por el IMN.

Estación	No	Coordenadas geográficas (grados y minutos)		Elevación (m)	Coordenadas geográficas (decimales)		Coordenadas Lambert Norte Costa Rica	
		Longitud	Latitud		Longitud	Latitud	Longitud	Latitud
Finca El Patio	100663	83°25´	08°36´	8	83,43	8,6	599484,495	65485,847
El Bonito	100623	83°31´	08°34´	170	83,52	8,57	589734,43	61927,10
Los Patos	100619	83°25´	08°36´	170	83,42	8,60	600737,65	65645,80
San Pedrillo	100617	83°44´	08°37´	20	83,73	8,62	565860,13	67406,18
Rincón	10039	83°30´	08°41´	10	83,50	8,68	591535,91	74841,16
Sirena	100611	83°36´	08°29´	3	83,60	8,48	580577,51	52683,28

En la figura 3 se muestra la precipitación mensual de las estaciones meteorológicas El Bonito, Finca El Patio (cuadro 2), Los Patos (cuadro 3), San Pedrillo, Rincón y Sirena. La época lluviosa ocurre de mayo a noviembre, mientras que la época seca de diciembre a abril. Las mayores precipitaciones ocurren en octubre, en enero y febrero se reportan las precipitaciones más bajas. Las estaciones San Pedrillo y El Bonito son las que reportan mayores precipitaciones anuales: 6102, 4 y 6074 mm respectivamente.

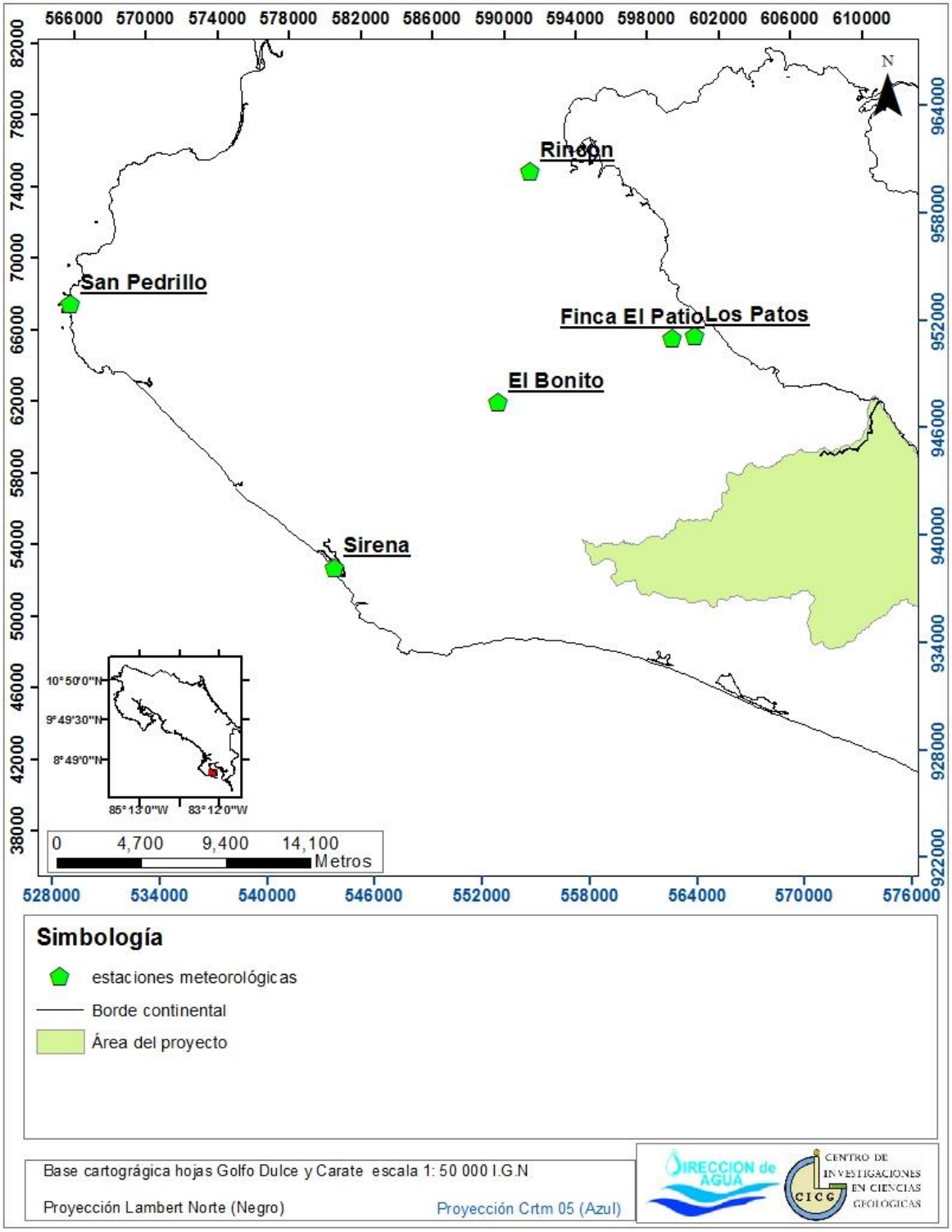


Figura 2: Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

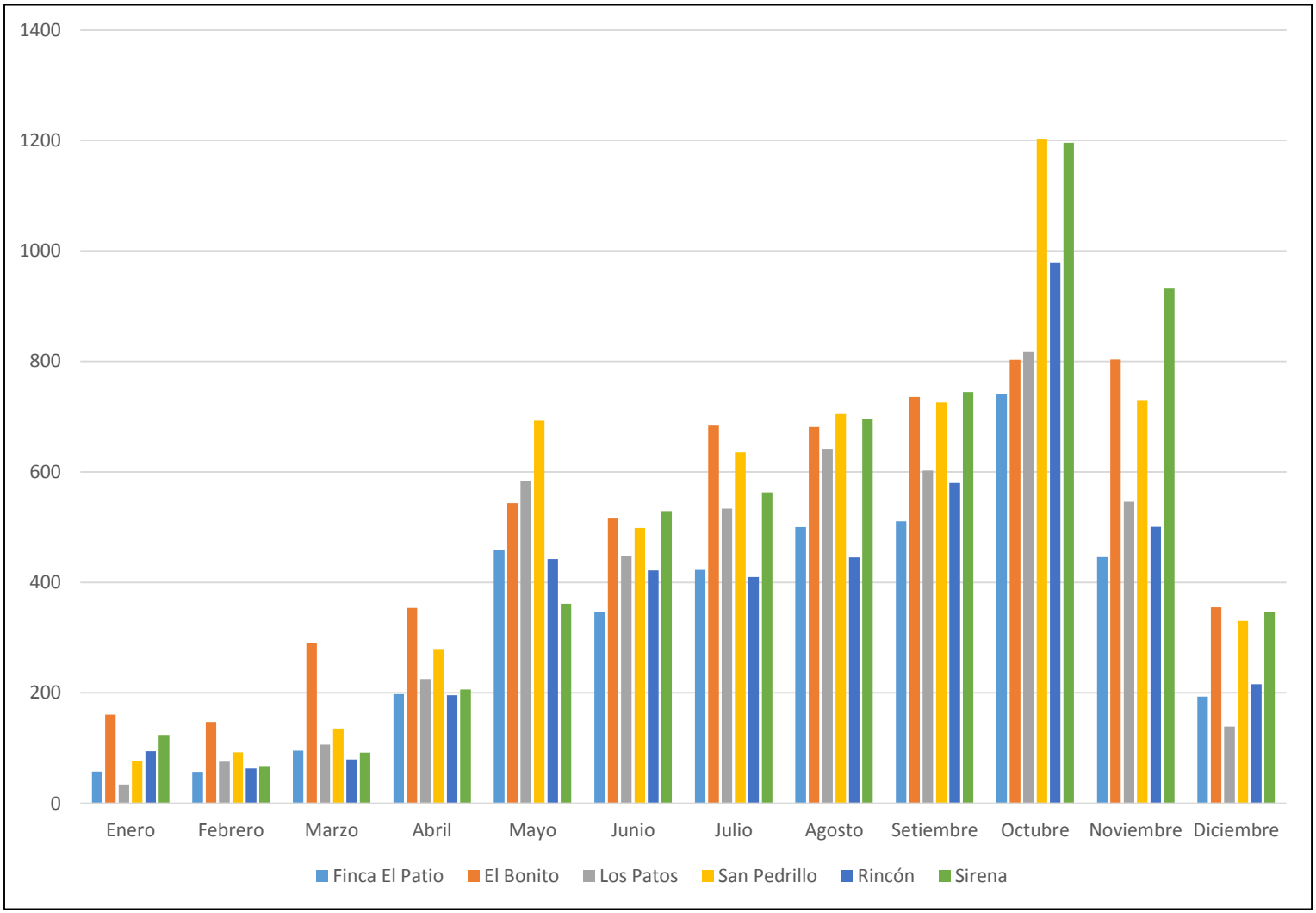


Figura 3: Gráfico de la precipitación mensual reportada en las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 2: Datos meteorológicos reportados en la estación Finca El Patio.

	Per.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
LLUVIA	2004 - 2011	57,7	56,8	95,4	197,8	458	346,2	422,6	500,2	510,5	741,5	445,6	193,4	4025,7
DIAS LLUVIA	2004 - 2011	13	10	14	18	26	25	27	29	28	27	27	21	265
TEMP MAX	2004 - 2011	32,4	33,2	33,8	32,9	31,9	31,6	31,4	31,7	31	29,5	30,3	31,3	31,8
TEMP MIN	2004 - 2011	22,3	22,22	23,1	23,5	23,6	23,5	23	23,1	23,1	23,1	23,1	22,5	23
TEMP MED	2004 - 2011	27,4	27,7	28,5	28,2	27,8	27,6	27,2	27,5	27,1	26,3	26,7	26,9	27,4
VIENTO	2004 - 2011	3,4	3,7	3,8	3,6	3,5	3,3	3,3	3,4	3,4	3,1	3,2	3,3	3, 4
HUMEDAD	2004 - 2011	83	80	80	84	87	87	87	87	88	90	89	86	86

Cuadro 3: Datos meteorológicos reportados en la estación Los Patos.

	Periodos	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
LLUVIA	2002-2010	33,9	75,5	106,3	225,1	583,1	447,9	533,5	642	602,3	816,8	546,1	138,8	4751,3
DIAS LLUVIA	2002-2010	6	6	9	18	22	26	26	28	28	27	26	13	235

Las estaciones meteorológicas San Pedrillo, El Bonito y Sirena, se encuentran al oeste de la divisoria de la Península de Osa. Las estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio son las estaciones Finca El Patio y Los Patos.

2.2. Hidrografía

El área de estudio está conformada por tres subcuencas, que se muestran en la figura 4 y se detallan a continuación.

La parte de la subcuenca del Río Tigre situada al Norte del área de estudio, tiene una extensión de 104 Km^2, lo que constituye el 59,9% del área de estudio. Esta subcuenca incluye solo la margen derecha del Río Tigre. El cauce principal del Río Tigre tiene una longitud aproximada de 1,5 km con una dirección suroeste – noreste, en la parte alta de la cuenca tiene un orden de 3, en la parte media el orden es de 4 y 5, alcanzando el orden 6 cerca de la desembocadura. Cuando el Río Tigre alcanza el orden de 6 hay un cambio pronunciado en la dirección del mismo. El patrón de drenaje de la subcuenca se muestra en la figura 5 y es del tipo subdendrítico en la parte alta y media, y es meándrico y entrelazado en la parte baja de la subcuenca. Los afluentes principales del Río Tigre son: Quebrada Piedras Blancas, Quebrada Gallardo y el Río Nuevo (Quebrada Lajitas, Quebrada Lajas, Quebrada Higueron y Quebrada Balsa).

La subcuenca Río Platanares se ubica en la parte central del área de estudio e incluye el poblado de Puerto Jiménez, abarca un área de 47, 8 Km^2 que corresponde con un 27,5% del área de estudio. El Río Platanares tiene un dirección suroeste – noreste y un patrón de drenaje paralelo subdendrítico. Los afluentes del Río Platanares son: Quebrada Victoria, Río Corozal y Quebrada Ciénaga. En la parte baja de la subcuenca el río lleva una dirección paralela a la línea de costa y desemboca en el mar, de igual manera otros drenajes como Quebrada Ignacia, Quebrada Cacao, Estero Pueblo Nuevo y Estero Conte, muestran este comportamiento. Estos drenajes son de orden 2 y 3, mientras que el Río Platanares alcanza un orden 5 en la desembocadura.

La subcuenca del Río Tamales dentro del área de estudio involucra solamente la margen izquierda de dicho río, se extiende 21,97 Km^2 lo que corresponde con un 12,63% del área del proyecto. El Río Agua Caliente (orden de drenaje 3) es el único afluente del Río Tamales (orden de drenaje 4) dentro del área de estudio. El patrón de drenaje es de tipo pinado y presenta una dirección suroeste – noreste, desembocando paralelamente a la línea de costa.

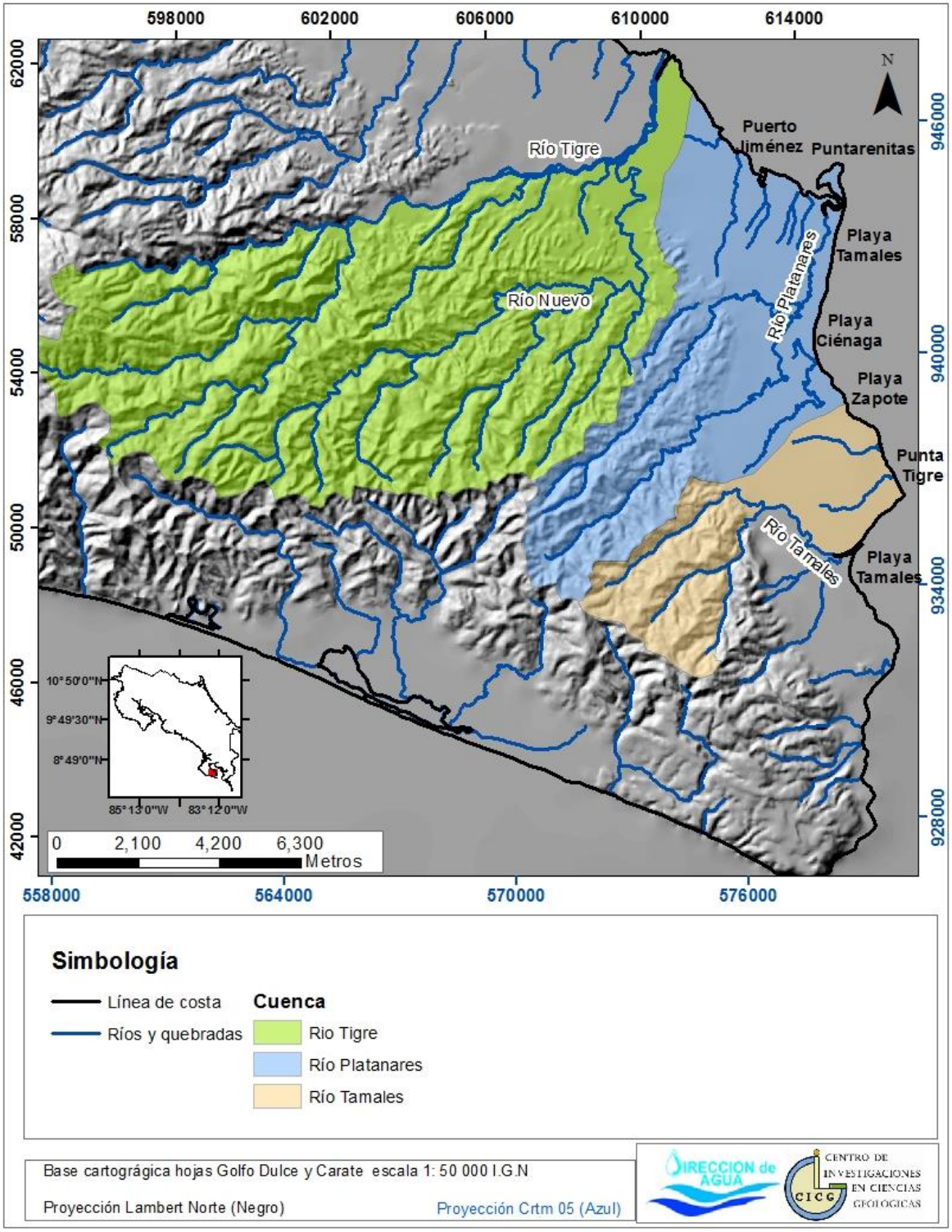


Figura 4: Mapa de las subcuencas contempladas en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

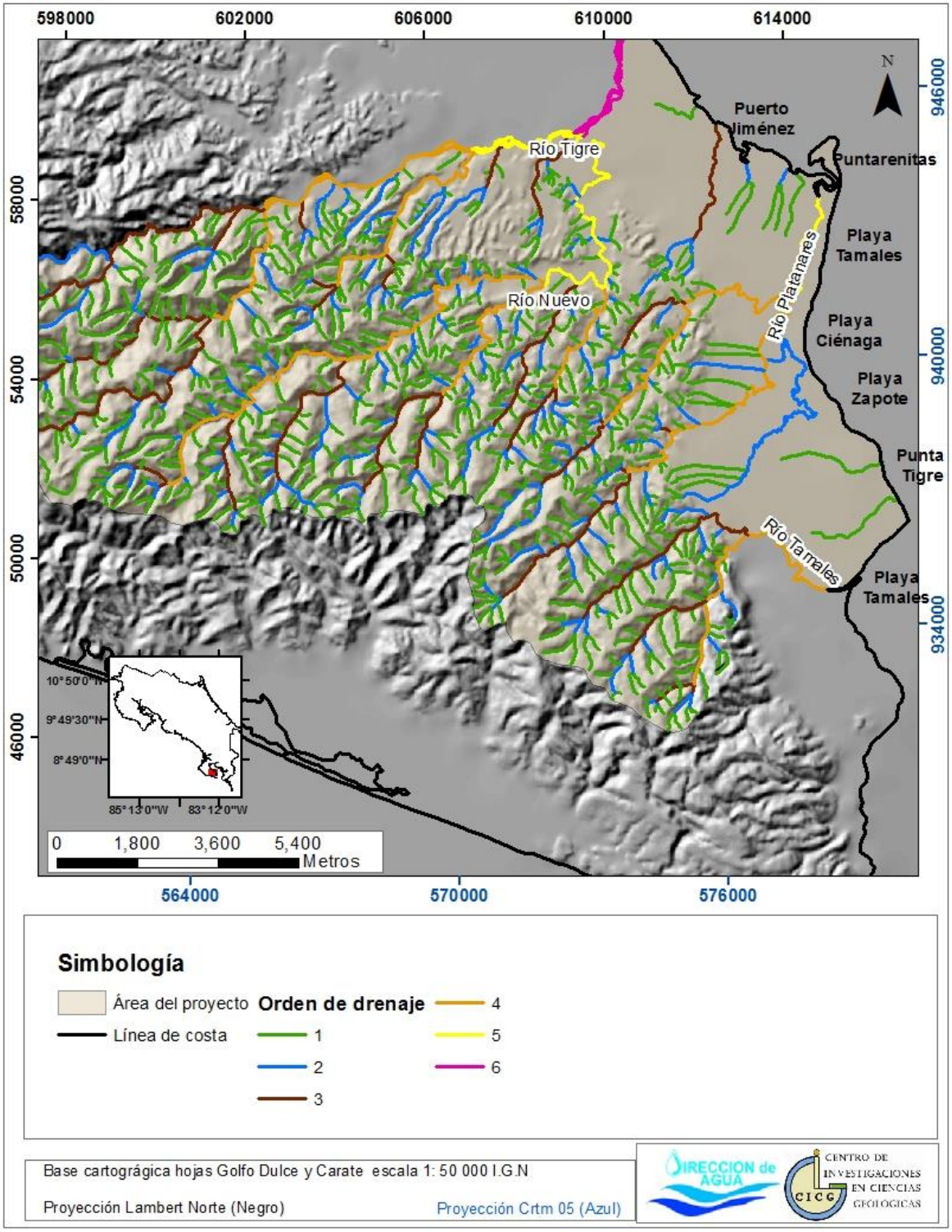


Figura 5: Mapa del patrón de drenaje del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

3. GEOMORFOLOGÍA

Geomorfológicamente, Salazar (2000) divide el área de estudio en dos unidades: Serranías de la Península de Osa y Planicie aluvial de la Península de Osa. Para las serranías el autor indica una dirección noroeste a sureste, con un patrón de drenaje rectangular, debido a las fallas en dirección noroeste - sureste y noreste – suroeste.

Según Bergoeing (1978), se compone de las siguientes unidades.

- El relieve Cuaternario (Pleistoceno) fallado en varias direcciones, predominando el rumbo NW – SE. La composición litológica consiste predominantemente en lutitas, asociadas con areniscas y calizas arrecifales, así como conglomerados compuestos por clastos sedimentarios y volcánicos. La tectónica es activa y el área continúa sometida a un solevantamiento epirogénico.
- La terraza litoral (Cuaternario) formada debido a la acumulación de sedimentos, predominantemente continentales y a los movimientos de tectónica de bloques. El autor detalla diferentes niveles litorales que han hecho avanzar la línea de costa, además indica que la terraza litoral posee un basculamiento general hacia el Norte, según lo insinúa el drenaje y los paleo-cordones litorales.

En función del modelo de sombras, las pendientes y algunas imágenes satelitales, para la escala de trabajo del presente proyecto se identificaron las unidades geomorfológicas delimitadas en la figura 6 y descritas a continuación.

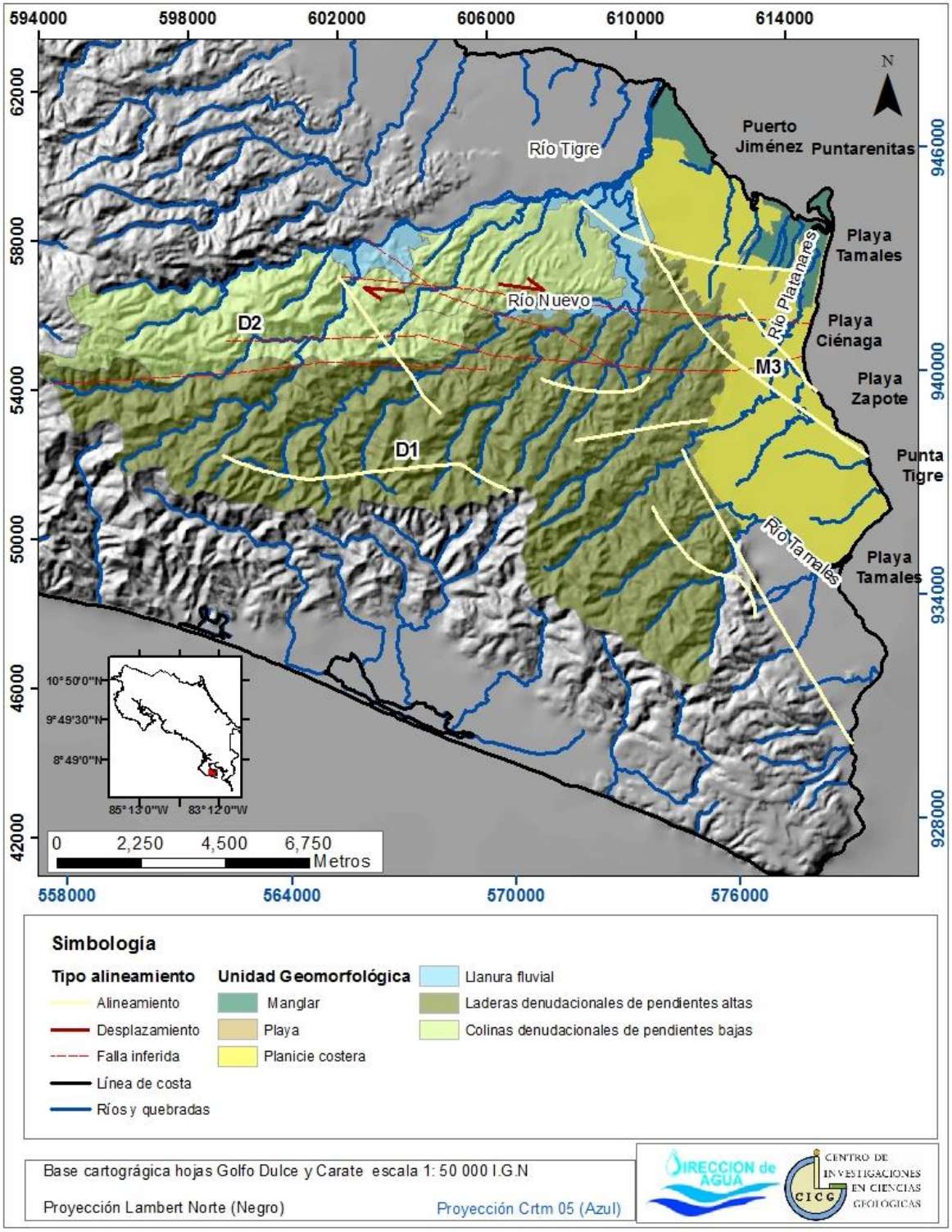


Figura 6: Mapa geomorfológico y lineamientos del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

3.1. Formas de origen marino

- **Manglares (M1)**

Ubicación: al noreste del área de estudio sobre la línea de costa asociados a la desembocadura del Río Tigre y el Río Platanares.

Morfología: en el área de estudio son hábitats comunes en el área del proyecto pero fuertemente invadidos por las actividades antropogénicas, por lo que su extensión ha variado con el tiempo. Para efectos de escala, se incluye en esta unidad el Estero Bocón, el Estero Pueblo Nuevo y el Estero Conte. Son zonas de inundación intermareales de relieves planos.

Tipo de Roca: suelos arcillosos y arenosos ricos en materia orgánica.

Edad: Reciente.

Morfogénesis: se deben a la relación biológica entre las mareas y desembocaduras de los ríos.

- **Playa (M2)**

Ubicación: sobre la línea de costa. Corresponde con Playa Tigre, Playa Platanares, Playa Ciénaga y Playa Zapote

Morfología: tiene una forma alargada estrechamente asociada a la línea de costa, el ancho no es mayor a los 50 m.

Tipo de Roca: son playa con material arenosos, en algunos casos como en Playa Ciénaga pueden haber sectores con bloques de tamaños centimétricos asociados a rocas sedimentarias.

Edad: Holoceno.

Morfogénesis: erosión y depositación marina.

- **Planicie costera (M3)**

Ubicación: al Este del área de estudio.

Morfología: son relieves planos sin pendientes, aunque en el sector Sur puede presentar algunas terrazas. Poco disectadas con patrones de drenajes paralelos. Abarca un área de 33 Km^2, que corresponde con un 18,9 % del área de estudio.

Tipo de Roca: son arenas de playas, aunque localmente pueden haber conglomerados o bien barros azules producto de la meteorización de rocas sedimentarias.

Edad: Cuaternario.

Morfogénesis: se debe al levantamiento de la costa y la actividad marina.

3.2. Formas de origen fluvial

- **Llanura fluvial (F1)**

Ubicación: en la parte central Norte del área de estudio, alrededor de los ríos Tigre y Nuevo.

Morfología: se extiende 7,68 Km^2, aproximadamente 4,4% del área del proyecto. Presenta una forma alargada con una topografía suave y ondulada con pendientes menores a 3°. Se encuentra fuertemente disectadas con patrón de drenaje meándrico. Localmente en el Río Tigre y Río Nuevo hay barras longitudinales de sedimentación.

Tipo de Roca: guijaros, arenas inconsolidadas, suelos arenosos y conglomerados.

Edad: Cuaternario.

Morfogénesis: a la dinámica de los ríos Tigre y Nuevo.

3.3. Formas de origen denudacional

- **Laderas denudacionales de pendientes altas (D1)**

Ubicación: el sector montañoso al Sur del área de estudio.

Morfología: forma tabular rectangular de una extensión de 91,40 Km^2 (aproximadamente 52,4% del área de estudio). El relieve se encuentra muy disectado con patrones de drenaje paralelos y pinados, y pendientes entre 10 y 45°, pero puede ser mayor en los cañones de los ríos.

Tipo de Roca: Grupo Charco Azul

Edad: Pleistoceno.

Morfogénesis: levantamiento de la plataforma marina por la actividad tectónica y la posterior erosión de los mismos.

- **Colinas denudacionales de pendientes bajas (D2)**

Ubicación: en el sector montañoso Norte del área de estudio.

Morfología: forma irregular con una topografía suave y ondulada, moderadamente disectada con patrones de drenajes subdendríticos. Las pendientes son generalmente menores a los 3° aunque en algunas terrazas puede alcanzar los 30°. Se extiende un área de 37,06 Km^2, lo que corresponde con un 21,25 % del área del proyecto.

Tipo de Roca: Grupo Osa y Grupo Charco Azul.

Edad: la edad de las rocas es Paleoceno.

Morfogénesis: levantamiento de la plataforma marina por la actividad tectónica y la posterior erosión de los mismos.

Descripción de estructuras

Debido a que en los pocos informes geológicos de la zona no se menciona la geología estructural de Puerto Jiménez, se ha incluido en el mapa geomorfológico una serie de fallas y alineamientos propuestos e inferidos a partir del modelo de sombras, curvas de nivel y el patrón de drenaje. Estas estructuras se encuentran en la parte central del área de estudio y presentan una dirección predominante Este – Oeste y noroeste - sureste.

- **Fallas inferidas**

Un afluente del Río Tigre, la Quebrada Gallardo, Río Nuevo, Quebrada Lajas, Quebrada Higuerón, Quebrada Balso, Quebrada Victoria y Río Corozal, muestran una variación en la dirección del drenaje, cambia de una dirección suroeste – noreste a una dirección cercana a Este franco – Oeste franco. En los casos del afluente del Río Tigre y la Quebrada Gallardo el desfasamiento es leve y localizado, por lo que los drenajes en general mantienen la dirección inicial. Pero en el resto de los drenajes el cambio es abrupto. Estas fallas se asocian a la Falla Osa del Cuaternario definida por Denyer et al. (2009).

Otros desvíos de estos mismos ríos es delimitada desde un meandro del río Tigre hasta la Quebrada Balso con una dirección noroeste – sureste. Las otras dos fallas restantes, con dirección Este – Oeste, están asociadas a patrones de drenajes rectos en la parte alta de la cuenca del Río Tigre y el límite entre la zona montañosa y la zona plana.

- **Alineamientos**

Hay un alineamiento cerca de la divisoria sur del Río Nuevo, el cual provoca los desvíos de algunos patrones de drenajes, tiene una dirección Este – Oeste. Otros alineamientos en el sector montañosos son alineaciones de segmentos de los drenajes con algunos cerros. En general presentan una dirección Este – Oeste, excepto en la subcuenca del río Tamales, donde la dirección predominante es noroeste – sureste, y en la zona litoral cerca de Puerto Jiménez, donde hay cambio abruptos y locales en los ríos con una dirección noroeste – sureste.

4. CONTEXTO GEOLÓGICO

Con base en la nomenclatura propuesta por Buchs & Baumgartner (2007), el mapa geológico para el área de estudio se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** (al final de esta sección) y a continuación se detalla la descripción de las formaciones geológicas.

4.1. Complejo Acresional Osa - Caño

Es el basamento pre – Neógeno, las rocas del complejo están representadas por los sedimentos detríticos de arco y bloques de origen oceánico de diferente naturaleza, el conjunto forma un mélange de acreción (Di Marco, 1994).

También llamado Bloque Rincón por Di Marco (1994), conformado por rocas basálticas que en el área de estudio afloran en el río Tigre, rocas sedimentarias del Cretácico superior y del Paleoceno/Eoceno y rocas ígneas plutónicas.

La definición del Complejo Ígneo Osa indica que consiste principalmente en basaltos en almohadillas y basaltos masivos, asociados en menor abundancia con cherts, cherts (pedernales) radiolaríticos, calizas foraminíferas micríticas, sedimentos detríticos, gabros y doleritas (Berrangé & Thorpe, 1988; Di Marco, 1994; Buchs, 2003; Buchs & Baumgartner, 2007).

De acuerdo con Buchs & Baumgartner (2007), la edad de las lavas es Campaniano – Maastrichtiano, la sedimentación pelágica post – volcánica y pre-acrecionaria es de Edad Paleoceno – Eoceno, otras calizas pelágicas (edad Eoceno medio) asociadas con lavas en almohadillas alcalinas que pertenecen a montes submarinos fueron incorporadas durante el proceso de acreción.

Localmente este Complejo aflora en ambas márgenes del río Tigre desde las coordenadas 602 345 / 56 780 a una elevación de 100 m hacia la parte alta de la cuenca del río Tigre. Se describe como un basalto masivo, color gris oscuro azulado a negro, con vetas de calcita (figuras 7 y 8).

Figura 7: Afloramiento del basalto masivo correlacionado con el Complejo Acresional Osa - Caño, en el lecho del río Tigre, coordenadas Lambert norte 602 049 / 55 905. Fuente: Elaboración propia.

Figura 8: Afloramiento del basalto masivo correlacionado con el Complejo Acresional Osa - Caño, en el lecho del río Tigre, coordenadas Lambert norte 599 921 / 55 105. Fuente: Elaboración propia.

4.2. Grupo Charco Azul

Es descrita como Formación Charco Azul por Corrigan (1986), pero posteriormente Coates et al. (1992), le asigna una nomenclatura de Grupo Charco Azul.

Corrigan (1986), la describe como una secuencia de rocas sedimentarias de edad Plioceno temprano a Pleistoceno. Mientras que Coates et al. (1992), la define como una secuencia sedimentaria principalmente volcaniclástica, transgresiva / regresiva del ciclo sedimentario.

- **Formación Peñita**

Consiste en arcillas, lutitas verde azulado y litoareniscas algunas veces con glauconita, ocasionalmente rica en moluscos y consistentemente rica en foraminíferos bentónicos y planctónicos. La unidad basal es una litoarenisca azul verdosa, localmente con canales de conglomerados volcánicos. El espesor es de 1 200 m y la edad es Plioceno temprano (Coates et al., 1992).

La litología más abundante es una arenisca de grano fino a medio, bien sorteado, masivo y caracterizado por lentes conglomerados (espesores entre 4 y 16 cm) y horizontes con concresiones de calcita cementada (Corrigan, 1986).

Miembro La Vaca: Consiste en un conglomerado grueso, volcánico, verde grisáceo, con espesor de 900 m que aflora en la Península de Burica, desde el río La Vaca hasta la bahía Pavón (Coates et al.,1992).

Localmente, en el área de estudio se observa una secuencia sedimentaria, la capa más inferior que se observó aflorar sirve como una capa guía en el río Tamales, río Nuevo y río Tigre, y consiste de una lutita color gris – verde azulada, que meteoriza a una barro limoso color azul (figura 9). En el río Tamales se encuentra buzando al suroeste.

Por encima de esta lutita, se observaron intercalaciones de areniscas, lutitas (figuras 10, 11 y 12) y conglomerados con diferentes tamaños de grano, de color, gris, beige y café. Generalmente los estratos se encuentran horizontales, pero algunos buzamientos medidos indican orientaciones noroeste y oeste.

El techo de la secuencia, observado en la divisoria norte del río Corozal, está conformado por intercalaciones de arenisca café y un conglomerado, con deformación sinsedimentaria (figura 13).

Figura 9: Afloramiento de las lutitas gris verdosas o azuladas, en el lecho del río Tamales, coordenadas Lambert norte 612 903 / 50 106. Las lutitas se encuentran buzando S45W / 25°. Fuente: Elaboración propia.

Figura 10: Afloramiento de las lutitas gris verdosas o azuladas, en el lecho del río Nuevo, coordenadas Lambert norte 605 576 / 54 997. Las lutitas se encuentran buzando S10W / 3°. Fuente: Elaboración propia.

Figura 11: Fotografía de la secuencia de areniscas y lutitas que afloran en el río Nuevo, en las coordenadas Lambert Norte 606 431 / 55 571. Los estratos buzan Wf / 20°. Fuente: Elaboración propia.

Figura 12: Fotografía de la deformación sinsedimentario encontrada en la divisoria montañosa Norte del río Corozal, en las coordenadas 607 920 / 50 403. Fuente: Elaboración propia.

Figura 13: Fotografía de la deformación sinsedimentario encontrada en la divisoria montañosa Norte del río Corozal, en las coordenadas 607 920 / 50 403. Fuente: Elaboración propia.

4.3. Grupo Puerto Jiménez

Mencionados por primera vez por Barritt & Berrangé (1987), como depósitos Cuaternarios que raras veces exceden los 20 m de espesor. Luego Berrangé & Thorpe (1988), los definen como depósitos Cuaternarios indeferenciados aluviales y swamp.

Posteriormente Berrangé & Thorpe (1988), lo definen como Grupo Osa refiriéndose a una secuencia sedimentaria, edad Plioceno, semi consolidada de tipo grauvacas. Luego Berrangé (1989), la define como una secuencia de conglomerados, areniscas, limolitas y arcillitas que están semiconsolidados a litificados, de color gris – verdusco, gradados y de tipo grauvaca, con un espesor mínimo de 800 m y edad Plioceno medio a superior.

El Grupo Osa es sobreyacida discordantemente por sedimentos no consolidados Cuaternarios del Grupo Puerto Jiménez y se caracteriza por cambio abruptos verticales y laterales de facies, con depósitos auríferos en los conglomerados (Berrangé, 1989).

Los ambientes de sedimentación son fluviales de agua dulce, estuarino – deltaico de agua salobre, plataforma somera y cuenca marina profunda (Berrangé, 1989). Según Berrangé (1989), la depositación ocurrió en una cuenca pull apart que se hundió a intervalos, formada por fallas de desplazamiento de rumbo anastomosadas, que son de dirección noroeste con rumbo paralelo a la costa.

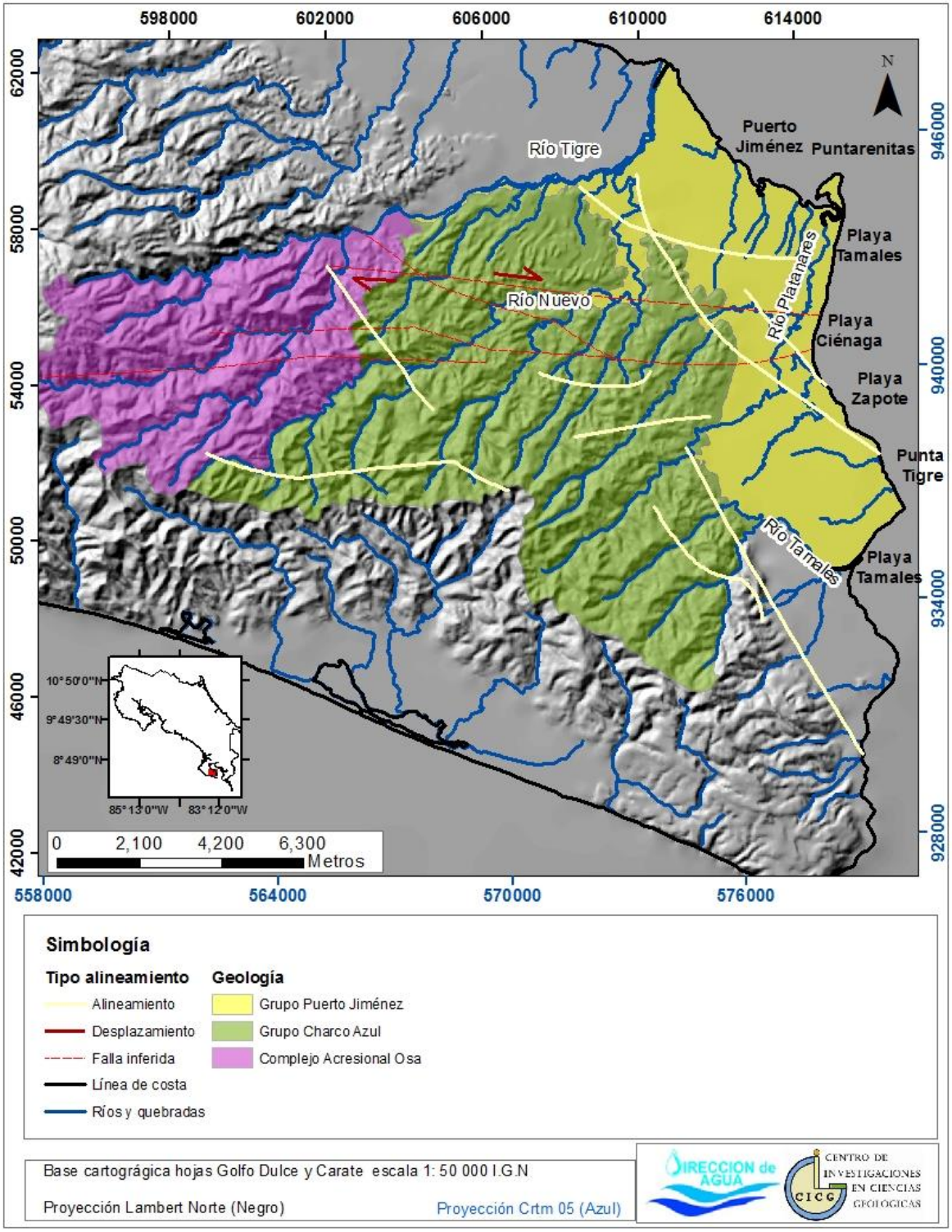


Figura 14: Mapa geológico del área de estudio. Compilado y modificado de Berrangé (1989), Buchs & Baumgartner (2007) y Zamora (2007).

5. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

En la realización de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) fue aplicado el dispositivo electródico tipo Schlumberger empleando diferentes aperturas, adaptadas a las condiciones encontradas en la zona de estudio, la abertura máxima de AB/2 fue de 100 m. El equipo usado fue el modelo SYSCAL_R1/PLUS de la IRIS Instruments® con cuatro electrodos (Figura 15). Los datos medidos en el campo se adjuntan en el Anexo D (digital).

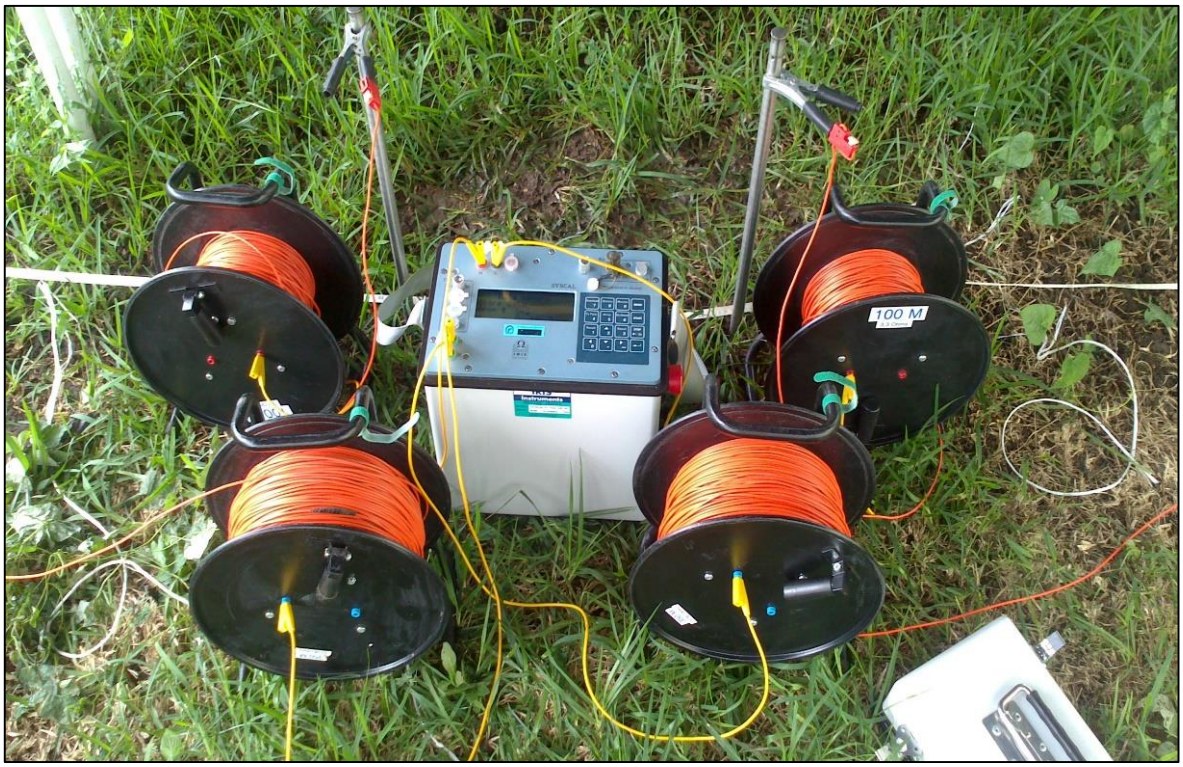


Figura 15: Equipo utilizado para realizar los sondeos eléctricos verticales (SEV). Fuente: Elaboración propia.

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 cercana al sitio de interés.

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), indica que la geoeléctrica 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). La figura 16 muestra el dispositivo de medición en el campo.

Figura 16: Fotografía del Sondeo Eléctrico Vertical realizado en el área de estudio, a un costado del aeropuerto de Puerto Jiménez. Fuente: Elaboración propia.

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

$$K = 2\pi\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)^{-1}$$

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 geoeléctrico y su escogencia depende de las características del objeto de estudio.

Dispositivo electródico Schlumberger

Es el arreglo electródico (figura 17) utilizado en este estudio, se define en primer instancia el punto central (O) y los electrodos de corriente se van desplazando simétricamente correspondiendo a la distancia AB/2, así la corriente eléctrica atravesará cada vez a mayor profundidad (Sánchez, 2014).

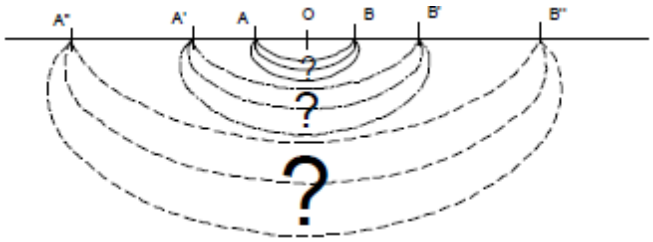


Figura 17: Esquema simplificado de un Sondeo Eléctrico. A medida que se abre la distancia AB, aumenta la profundidad de investigación. Tomado de Sánchez (2014).

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

La profundidad de investigación teórica máxima alcanzada la tercera parte de la abertura de los electrodos A y B.

La elaboración e interpretación de SEV en sitios seleccionados se realizó con la finalidad de detallar la geología local y sustentar los perfiles hidrogeológicos para plantear el modelo hidrogeológico conceptual.

En total se realizaron 9 SEV, para sustentar 2 perfiles en dirección Norte - Sur y 1 perfil Oeste – Este. La ubicación de los SEV y el trazo de los perfiles se muestran en la figura 18**.**

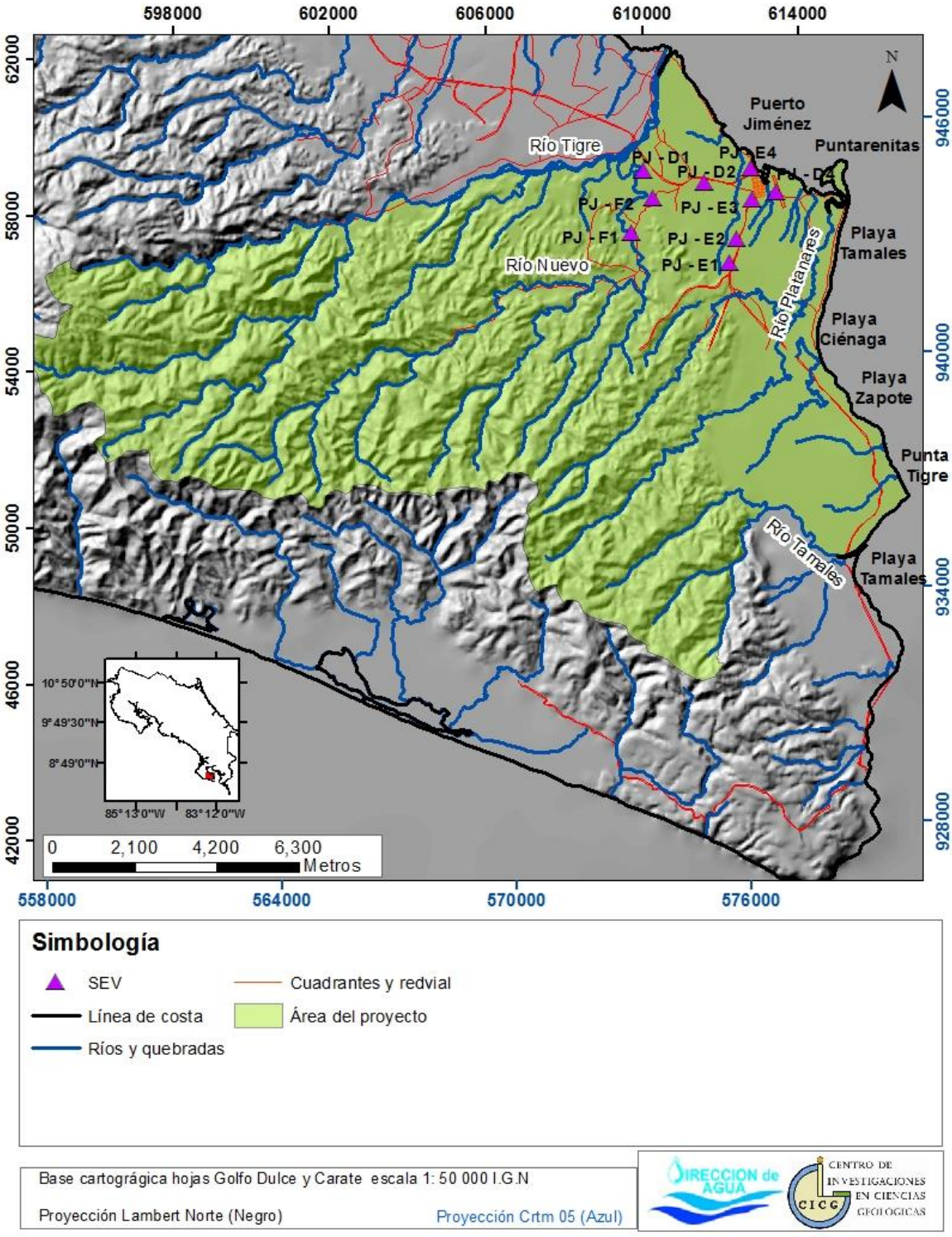


Figura 18: Mapa de ubicación de los SEV realizados en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

5.1. Sondeos Eléctricos Verticales de calibración

La distribución de los SEV realizó en función a las posibilidades reales de acceso a las propiedades y tomando en consideración la distancia necesaria para la extensión de los electrodos. Por otro lado, la prospección se concentró en el sector de Puerto Jiménez, al existir información de pozos que permitieran la calibración y validación de la interpretación.

Los sondeos eléctricos verticales: PJ-D4 y PJ-E3 son sondeos de calibración situados cerca de los pozos GD-13, GD-14, GD-15, GD-16, GD-11, GD-10, GD-6, GD-5 y GD-2.

En el cuadro 4 se detallan las principales observaciones para la calibración de los SEV. En él se puede concluir que la interpretación del SEV PJ –D4 debe coincidir o ser similar a la siguiente interpretación:

- Capa 1: presenta un espesor de 3 de suelos de arenas color café, no consolidadas, con fragmentos redondeados y subangulares, granulometría principalmente fina y bien seleccionadas.
- Capa 2: presenta un espesor de 6 m de arenas color gris, granulometría media a gruesa, no consolidada, fragmentos subangulares y redondeados, mal seleccionados.
- Capa 3: presenta un espesor de 6 m de una arena gris, sin consolidar, de granulometría variable, muy mal seleccionadas. En el techo de esta capa puede presentarse una pequeña capa de arena gris verdoso, granulometría muy fina, bien seleccionada.

Mientras que la interpretación del SEV PJ – E3 debe concordar con lo siguiente:

- Capa 1: suelo arenoso color café, espesor menor a 3m.
- Capa 2: puede corresponder con arenas y gravas gruesas color gris, no consolidadas y mal seleccionadas. O bien con arenas color gris, granulometría fina bien seleccionadas. Espesores variables entre 3 a 9 m.
- Capa 3: gravas muy gruesas, mal seleccionadas, sin consolidar con clastos de areniscas verdosas. Espesores variables entre 2 a 8 m.
- Capa 4: arcillas verdosas muy plásticas e impermeables.

Además estas interpretaciones indican que el modelo de capas que se debe interpretar con el software, es un modelo de entre 3 y 4 capas.

Cuadro 4: Detalle de la información de pozos utilizada para calibrar los SEV realizados en el área de estudio.

Pozo	SEV	Descripción litológica	Posición de las rejillas	Características hidrogeológicas
GD-13	PJ-D4	0 a 3m: Arena de color café, granulometría fina, no consolidada, de fragmentos redondeados bien seleccionados. 3 a 9 m: Arena de color gris con granulometría gruesa, no consolidada, de fragmentos subangulares y mal seleccionados. 9 a 15 m: Arena gris de granulometría fina a gruesa, muy mal seleccionada, sin consolidar.	3 a 15m	Ne: 1,21 mbns ND: 2,84 mbns T: 69 m^2/d S: 0,10 Q: 4,1 l/s
GD-14	PJ-D4	0 a 3m: Suelos de arena café con granulometría media a gruesa, no consolidada, de fragmentos subangulares, bien seleccionados. 3 a 9m: Arena gris de granulometría media, no consolidada, los granos son subredondeados, selección pobre. 9 a 10m: Arena gris verdosa de granulometría muy fina, muy bien seleccionada, sin consolidar, evidente influencia costera.	4 a 10m	Ne: 1,10 mbns ND: 2,92 mbns T: 18 m^2/d S: 0,10 Q: 0,10 l/s
GD-15	PJ-D4	0 a 3m: Arena de color café con granulometría fina, no consolidada de fragmentos redondeados bien seleccionados. 3 a 9m: Arena de color gris con granulometría gruesa, no consolidada, de fragmentos subangulares mal seleccionados. 9 a 14m: Arena gris de granulometría fina a gruesa, muy mal seleccionadas, sin consolidar.	2 a 14m	Ne: 0,9 mbns ND: 3,02 mbns T: 283 m^2/d S: 0,10 Q: 4,88 l/s
GD-2	PJ-E3	0 a 1m: Limo marrón, arena muy fina. 1 a 17m: Arena sana, entre media y fina. 17 a 19m: Limo y arena muy fina. No se recomienda captarla.	13 a 16m	Ne: 3,68 mbns ND: 9,19 mbns
GD-5	PJ-E3	0 a 1m: Suelo arcilloso. 1 a 2m: Arenas gruesas café. 2 a 6m: Arenas muy finas. 6 a 13m: Arenas gruesas, permeabilidad alta. 13 a 14m: Arenas muy finas a gruesas. 14 a 18 m: Arenas muy finas con arcillas.	9 a 15m	Ne: 3,76 mbns ND: 10,07 mbns Q: 11 l/s
GD-6	PJ-E3	0 a 5m: Arenas medias a finas. 5 a 8m: Arenas finas con contenidos de limos. 8 a 9m: Arenas medias a finas. 9 a 10m: Limo 10 a 20m: Arena gruesa a media. 20 a 22m: Arcilla limosa	13 a 19m	Ne: 4,47 mbns ND: 15,14 mbns Q: 8 l/s

GD-10	PJ-E3	0 a 2m: Arena muy fina color café, oxidada con arcilla. 2 a 11m: Arena y grava gruesa de color gris con granulometría gruesa, no consolidada, mal seleccionada, muy buena permeabilidad. 11 a 16m: Arena gris de granulometría fina a muy fina, bien seleccionada, sin consolidar, retrabajada. 16 a 26m: Arcilla de color verdoso muy plástica e impermeable.	4 a 26m	Ne: 1 mbns ND: 12 mbns T: 48 m^2/d Q: 5,3 l/s
GD-11	PJ-E3	0 a 3m: Suelo arcilloso color café. 3 a 11m: Arena fina bien seleccionada, muy buena permeabilidad, color negro. 11 a 13m: Grava muy gruesa mal seleccionada, sin consolidar, clastos de areniscas verdosas. 13 a 16m: Arena con arcilla verdosa muy plástica, baja permeabilidad. 16 a 21m: Arcilla color verdosa muy plástica e impermeable.	3 a 21m	Ne: 1 mbns ND: 9,98 mbns T: 10 m^2/d Q: 5,4 l/s
GD-16	PJ-E3	0 a 3m: Suelo arenoso café amarillento. 3 a 5m: Arena fina bien seleccionada de moderada permeabilidad. 5 a 7m: Grava muy gruesa mal seleccionada, buena permeabilidad. 7 a 14m: Arcilla verdosa muy plástica e impermeable.	3 a 14m	Ne: 4 mbns ND: 8 mbns T: 20 m^2/d Q: 4,8 l/s

****Ne es nivel estático; ND es nivel dinámico; T es transmisividad; S es coeficiente de almacenamiento y Q es caudal.***

5.2. Profundidad del basamento estimado a partir de los SEV

En todos los SEV realizados (Figuras 19 a 27), se puede identificar al final de las gráficas de AB/2 contra la resistividad aparente, una anomalía en la distribución de los datos de campo. Esto se debe a que el basamento corresponde con la formación Peñita del Grupo Charco Azul que consiste de intercalaciones entre areniscas y lutitas, de esta manera, la anomalía en los puntos finales de las gráficas se debe a que los espesores de las capas de areniscas y lutitas son pequeños y los contrastes de resistividad muy alta. Dichas gráficas, tal como están no son posibles de interpretar en el software por lo que se debe proceder a editarlas antes de la interpretación con el software. No obstante, las gráficas completas permiten identificar la profundidad a la que afloran las intercalaciones de la formación Peñita en cada SEV (equivalente al espesor del material aluvional que las sobreyace) dichos resultados se muestran en el cuadro 5.

Cuadro 5: Profundidades en las que aparecen las intercalaciones entre areniscas y lutitas de la Formación Peñita en cada SEV realizado, equivalente al espesor del material aluvional que las sobreyace.

SEV	Profundidad (m)
PJ – D1	30
PJ – D2	25
PJ – D4	15
PJ – E1	30
PJ – E2	30
PJ – E3	9
PJ – E4	12
PJ – F1	30
PJ – F2	6,5

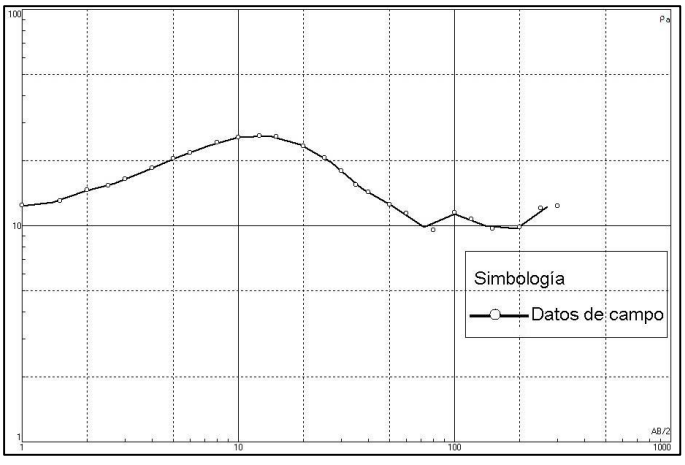


Figura 19: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) para el SEV código PJ – D1. Fuente: Elaboración propia.

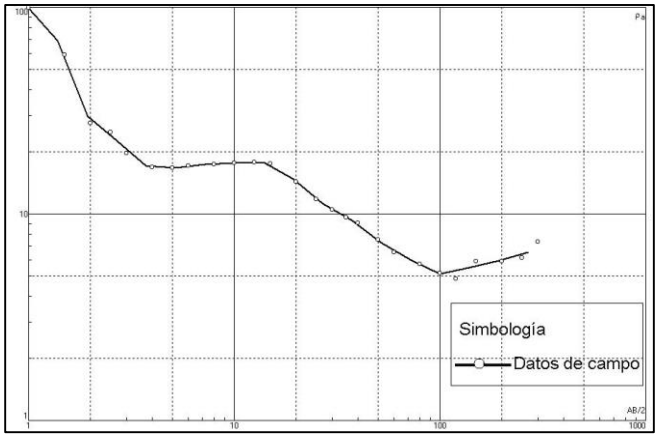


Figura 20: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) para el SEV código PJ – D2. Fuente: Elaboración propia.

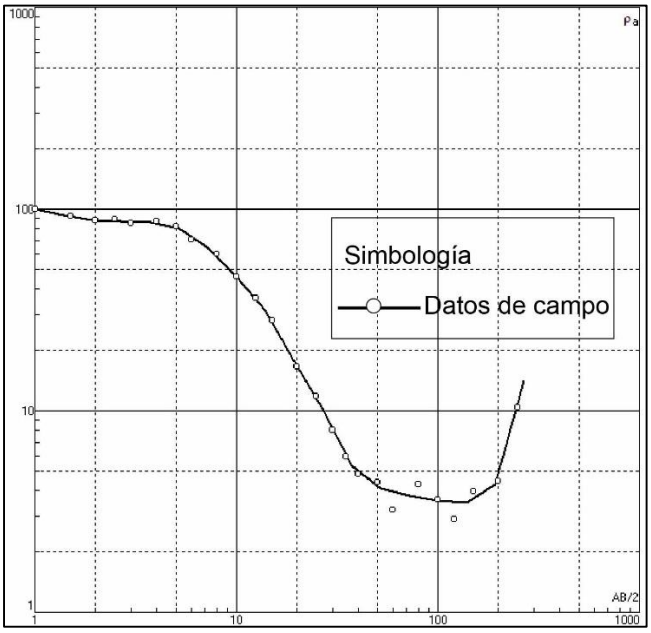


Figura 21: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) para el SEV código PJ – D4. Fuente: Elaboración propia.

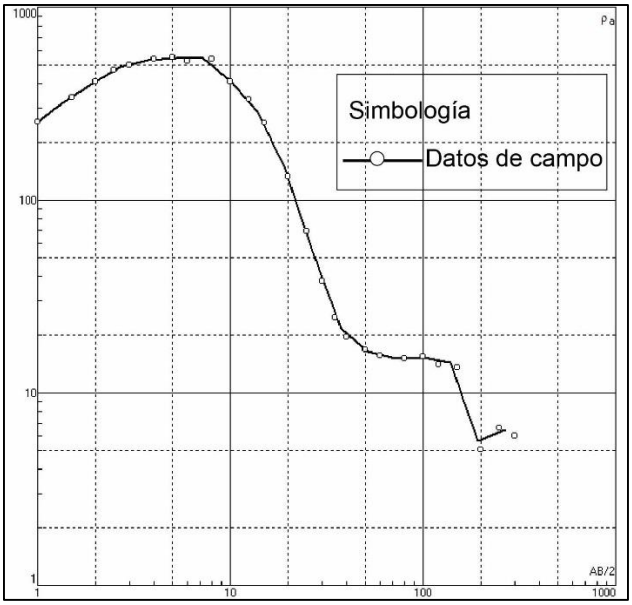


Figura 22: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) para el SEV código PJ – E1. Fuente: Elaboración propia.

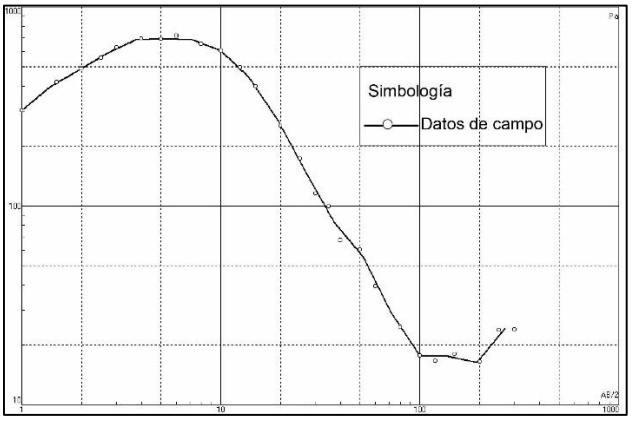


Figura 23: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) para el SEV código PJ – E2. Fuente: Elaboración propia.

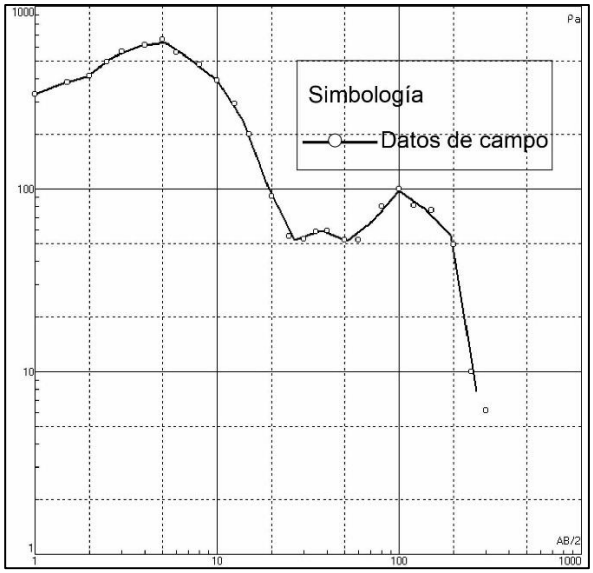


Figura 24: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) para el SEV código PJ – E3. Fuente: Elaboración propia.

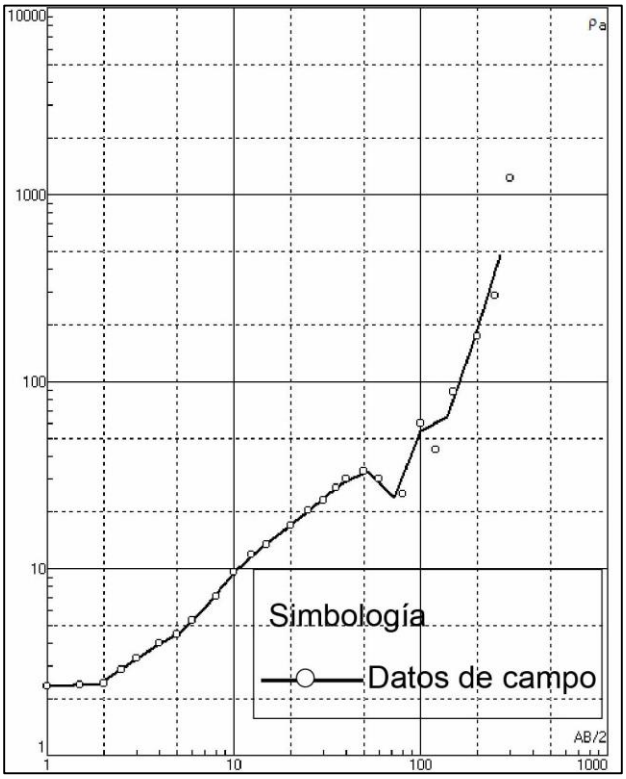


Figura 25: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) para el SEV código PJ – E4. Fuente: Elaboración propia.

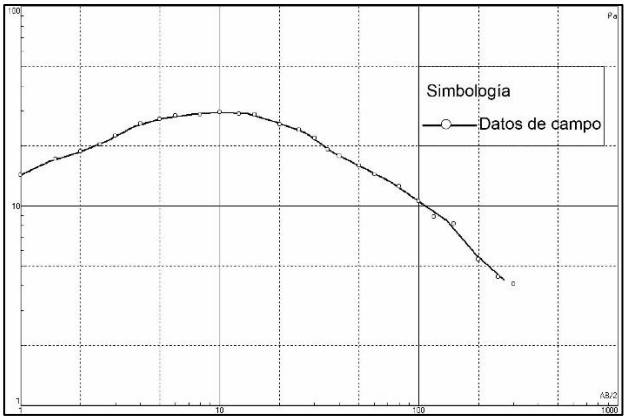


Figura 26: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) para el SEV código PJ – F1. Fuente: Elaboración propia.

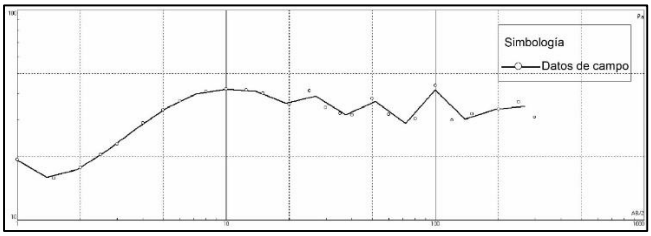


Figura 27: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) para el SEV código PJ – F2. Fuente: Elaboración propia.

5.3. Interpretación de los SEV

Debido a que los sondeos PJ – D4 y PJ – E3 son de calibración, estos son los primeros que se interpretarán.

En la figura 28 se muestra el modelo de capas establecido para el SEV PJ – D4 a partir de la interpretación de pozos propuesta en el apartado de calibración. De esta manera con un 4,68% de error se puede interpretar la litología del SEV desde la superficie hasta el afloramiento de la formación Peñita de la siguiente manera:

- Capa 1: Suelo arenoso color café, no consolidado, de 3 m de espesor con una resistividad de 95 Ωm (***léase ohmm***).
- Capa 2: Arenas color gris, de granulometría gruesa, no consolidada. Espesor de 9 m y resistividad de 45 Ωm.
- Capa 3: Arenas color gris, granulometría variable, mal seleccionadas y no consolidadas. La resistividad es de 4 Ωm, indicativo de que se encuentra saturada.

Para el sodeo PJ – E3 (figura 29) con la información de calibración, se plantea el siguiente modelo de 3 capas con un porcentaje de error de 4,49%.

- Capa 1: suelo arenoso con arcillas de 0,75m de espesor, con una resistividad de 270 Ωm.
- Capa 2: gravas secas con un espesor de 3,25m y una resistividad de 1000 Ωm.
- Capa 3: arenas gruesas con una resistividad de 28 Ωm. Asociándose con el aluvión saturado.

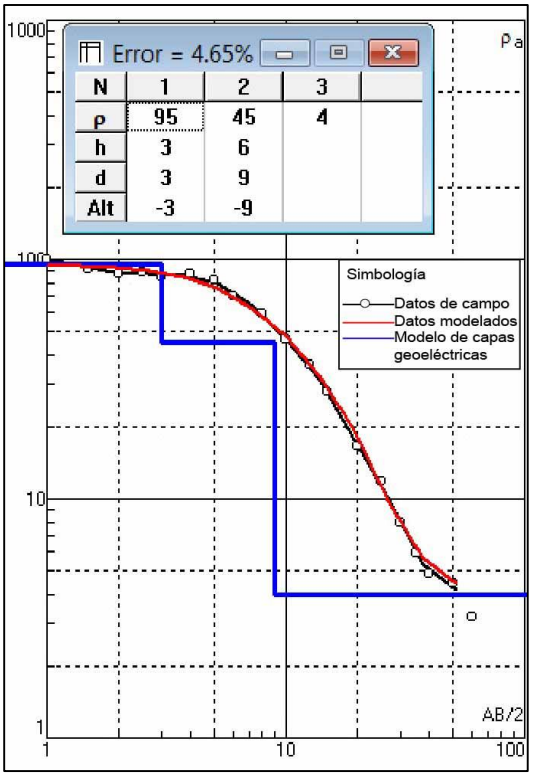


Figura 28: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) con la curva de ajuste del modelo de capas para el SEV código PJ – D4. Fuente: Elaboración propia.

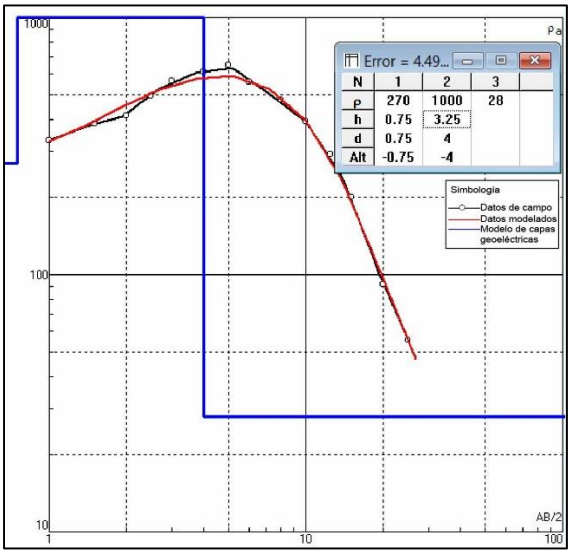


Figura 29: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) con la curva de ajuste del modelo de capas para el SEV código PJ – E3. Fuente: Elaboración propia.

A partir de los SEV anteriores, se puede establecer el siguiente modelo de 3 capas para el sondeo PJ-D2 (figura 30).

- Capa 1: Suelo arenoso con arcillas de 0,5 m de espesor, con una resistividad de 210 Ωm.
- Capa 2: Arenas gruesas o gravas con un espesor de 14,5 m y una resistividad de 17 Ωm, lo que indican que están saturadas.
- Capa 3: Arenas saturadas con una resistividad de 5 Ωm.

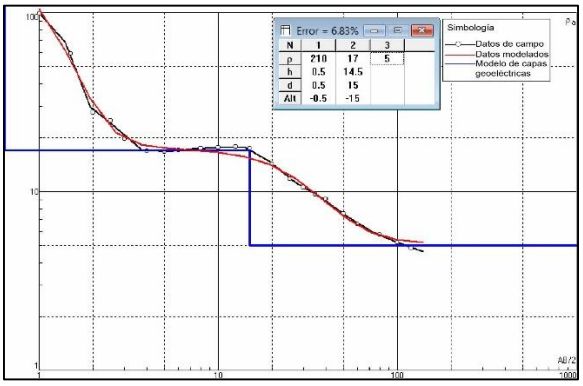


Figura 30: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) con la curva de ajuste del modelo de capas para el SEV código PJ – D2. Fuente: Elaboración propia.

El modelo de 3 capas propuesto para el sondeo PJ – D1 (figura 31) es el siguiente:

- Capa 1: suelo arcillo arenoso de 1,5 m de espesor con una resistividad de 22,5 Ωm.
- Capa 2: Gravas secas con 9 m de espesor y una resistividad de 68 Ωm.
- Capa 3: Arenas gruesas saturadas con una resistividad de 17,5 Ωm.

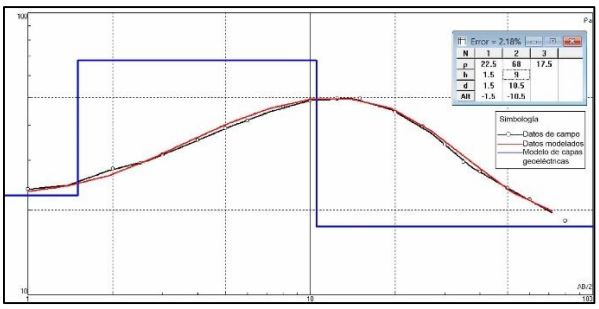


Figura 31: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) con la curva de ajuste del modelo de capas para el SEV código PJ – D1. Fuente: Elaboración propia.

El sondeo PJ – F1 (figura 32) se puede correlacionar con la litología del pozo artesanal PJ-53, el cual se encontraba en construcción durante el proyecto, y los materiales extraídos se observaron en el lugar de excavación así como los datos de profundidad de los mismos. De esta manera se propone el siguiente modelo de capas.

- Capa 1: suelo café con clastos de tamaños milimétricos, mal seleccionados y subredondeados, de color café, naranja y rojizo. El espesor es de 2m con una resistividad de 16,5 Ωm.
- Capa 2: Arena muy fina, color gris azulada, no consolidad, plástica e impermeable. Espesor de 2 m con una resistividad de 280 Ωm.
- Capa 3: Arenas finas a medias, color gris, no consolidada y con una resistividad de1 Ωm, por lo que se encuentra saturada.

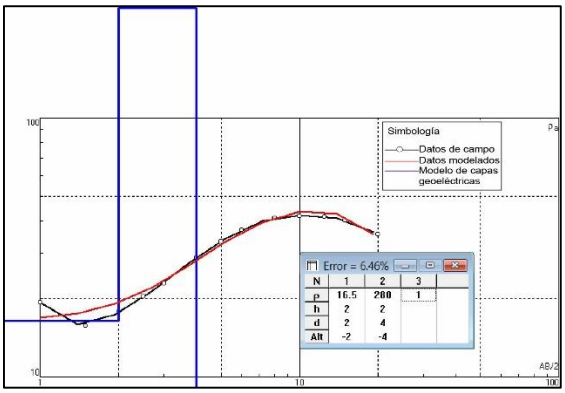


Figura 32: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) con la curva de ajuste del modelo de capas para el SEV código PJ – F2. Fuente: Elaboración propia.

Por su parte el sondeo PJ - F2 (figura 33), mediante observaciones de campo y el contexto anterior se plantea el siguiente modelo.

- Capa 1: 0,5 m del suelo café con clastos de tamaños milimétricos, mal seleccionados y subredondeados, de color café, naranja y rojizo. La resistividad es de 10 Ωm.
- Capa 2: Gravas y arenas gruesas correspondientes con el aluvión del río Nuevo. Espesor de 19 m y resistividad de 30 Ωm. Se encuentran saturadas.
- Capa 3: Arenas saturadas con resistividad de 8 Ωm.

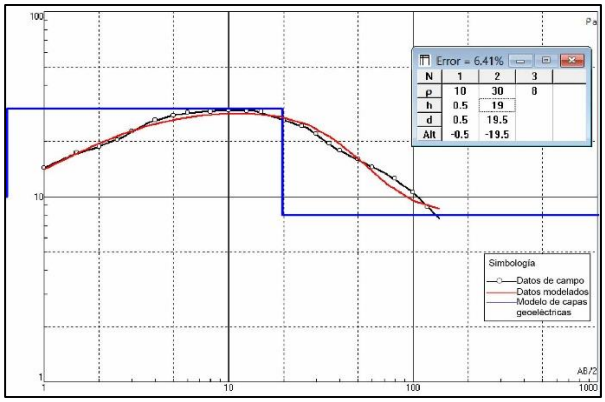


Figura 33: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) con la curva de ajuste del modelo de capas para el SEV código PJ – F1. Fuente: Elaboración propia.

La inversión del SEV código PJ – E1 (figura 34) se estableció el siguiente modelo de 3 capas.

- Capa 1: 0,5 m de espesor de un suelo arenoso con una resistividad de 170 Ωm.
- Capa 2: 4,5 m de espesor de gravas secas con una resistividad de 820 Ωm.
- Capa 3: arenas saturadas con una resistividad de 15 Ωm.

La interpretación del sondeo PJ – E2 (figura 35) se estableció el siguiente modelo de 4 capas.

- Capa 1: 0,5 m de espesor de un suelo arenoso con una resistividad de 190 Ωm.
- Capa 2: 4,5 m de espesor de gravas secas con una resistividad de 1200 Ωm.
- Capa 3: 22 m de espesor de arenas secas no consolidadas con una resistividad de 100 Ωm.
- Capa 4: arenas saturadas con una resistividad de 11 Ωm.

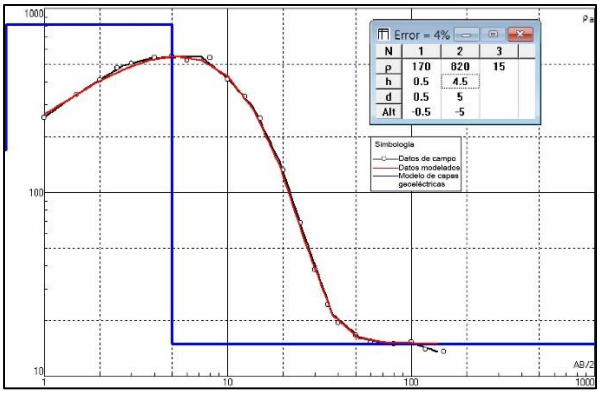


Figura 34: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) con la curva de ajuste del modelo de capas para el SEV código PJ – E1. Fuente: Elaboración propia.

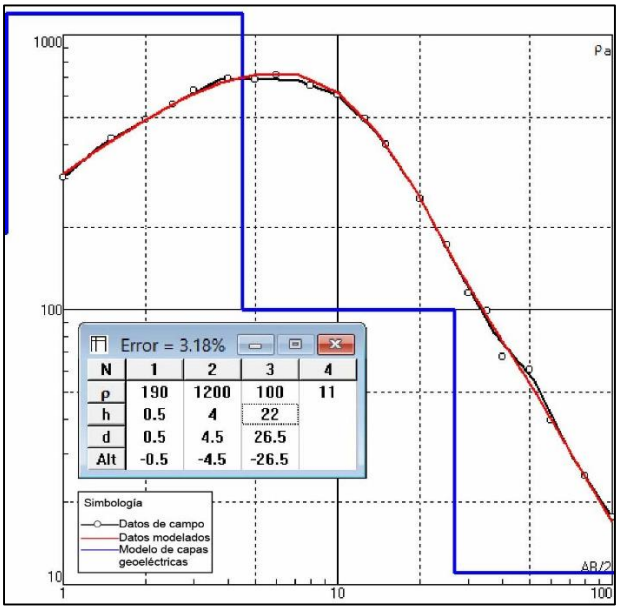


Figura 35: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) con la curva de ajuste del modelo de capas para el SEV código PJ – E2. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente para el SEV con código PJ – E4 (figura 36) se estableció el siguiente modelo de 2 capas.

- Capa 1: 2,3 m de espesor de arena de playa (saturada con agua de mar) con una resistividad de 2,2 Ωm.
- Capa 2: areniscas consolidadas, mal seleccionadas y erosionadas con una resistividad de 125 Ωm.

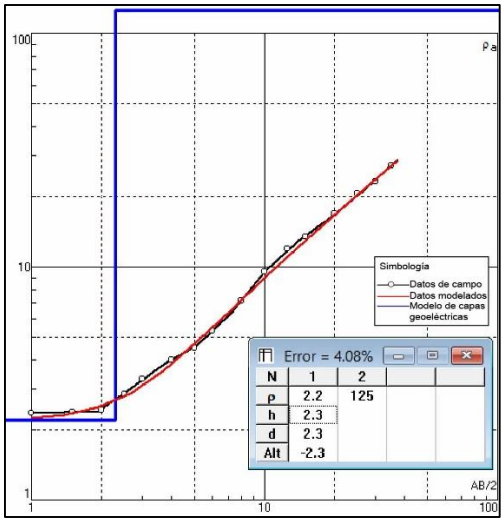


Figura 36: Gráfico de la separación AB/2 versus resistividad aparente (ρ_a) con la curva de ajuste del modelo de capas para el SEV código PJ – E4. Fuente: Elaboración propia.

Los perfiles de correlación se muestran en las figuras 50, 51 y 52 más adelante, como perfiles hidrogeofíscos en los cuales se relacionan las diferentes capas geoeléctricas con las litologías ycaracterísticas hidrogeológicas de los materiales reportados en los pozos.

6. MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO

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 del AyA.

6.1. Inventario de pozos y nacientes

En total se recopilaron 16 pozos de las bases de datos del AyA y SENARA, los mismos se muestran cuadro 6 y figura 39. La Dirección de Aguas, en oficio DH-1347-2014, indicó que no se registran pozos en su base de datos. Adicional a esto es importante indicar que algunos pozos del AyA no se reportan en la base de datos del SENARA (11 – 27 y 11 – 26) y otros pozos presentan diferente codificación entre SENARA y AyA, incluso hay un pozo del AyA que cuenta con 2 códigos diferentes en la base de datos del AyA.

Cuadro 6: Inventario de pozos disponible en las bases de datos del SENARA y AyA.

Código de pozo	Base de datos	Longitud Lambert Norte	Latitud Lambert Norte
GD – 1	SENARA	614160	56954
GD – 2	SENARA - AyA	613057	58303
GD – 5 (98 – 50 o 99 – 001)	SENARA - AyA	612956	58352
GD – 6 (03-04)	SENARA - AyA	613056	58353
GD – 7	SENARA	614058	55438
GD – 8	SENARA	612784	55590
GD – 9	SENARA	613343	55127
GD – 10	SENARA	612531	58362
GD – 11	SENARA	612609	58424
GD – 12	SENARA	612609	58425
GD – 13	SENARA	613666	58645
GD – 14	SENARA	613661	58737
GD – 15	SENARA	613817	58505
GD – 16	SENARA	612467	58257
11 – 27	AyA	613116,5	58324,7
11 – 26	AyA	613206,5	58307,7

El detalle de la información de pozos como: caudal recomendado, caudal concesionado, caudal de prueba de bombeo, horas recomendadas, nivel de bombeo, profundidad y niveles estáticos y dinámicos se encuentran detallados (cuando existen) en el anexo de pozos, así mismo el expediente de la base de datos del SENARA se ha adjuntado en dicho anexo. Es imperativo aclarar a pesar de los intentos realizados no fue posible acceder a estos pozos en el campo, tanto por falta de permisos como por limitaciones de ubicación en coordenadas.

A pesar de lo anterior, se procedió a realizar un inventario de pozos en el sitio, lográndose identificar 104 pozos artesanales, que se representan en la figura 39 y cuya información se muestra en los anexos (digital en la contraportada de este informe).

En el gráfico mostrado en la figura 37 muestra la cantidad de pozos por cada uno de los usos, según la información recolectada en las giras de campo, siendo el uso doméstico (35,58%) el de mayor cantidad, seguida por riego (20,19%) y doméstico y consumo humano (14,42%). Aunque hay un porcentaje de 16,35% de los pozos que se encuentran en estado de abandono y no se utilizan actualmente. Es importante mencionar que los pozos que se utilizan para consumo humano y doméstico se ubican en los sectores donde no hay distribución de agua potable por parte del AyA, y justo en el sector de playa Platanares es donde se encuentra el sector hotelero, donde cada uno cuenta con sus propios pozos para sus diferentes usos, los cuales no se encuentran concesionados ni reportados al SENARA. No es posible cuantificar los caudales de explotación ante la falta de información.

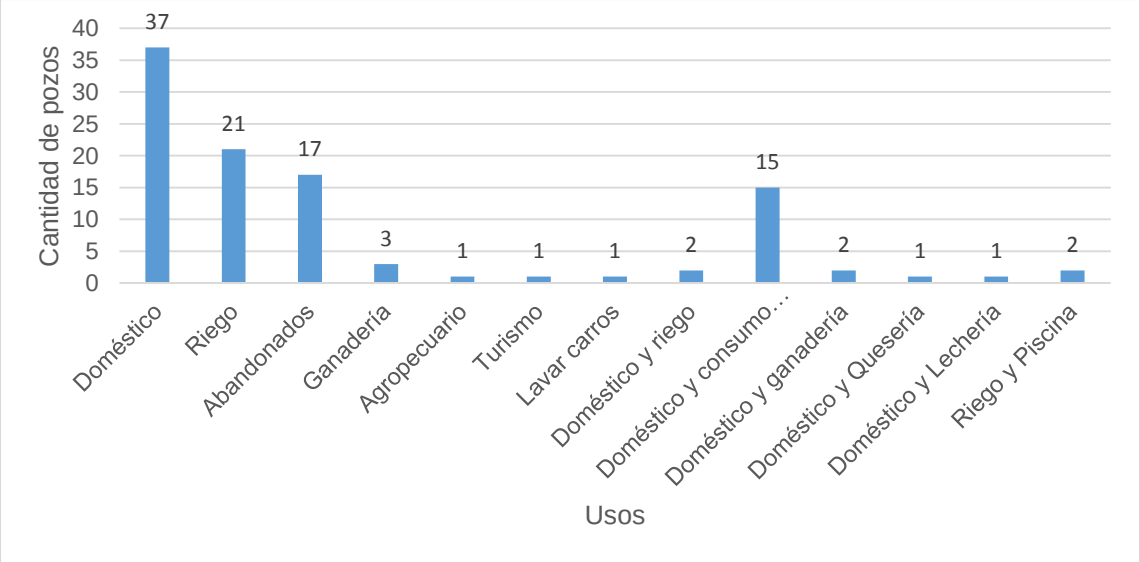


Figura 37: Gráfico de la cantidad de pozos artesanales por cada uno de los usos reconocidos en las giras de campo. Fuente: Elaboración propia.

Respecto los 16 pozos disponibles en la base de datos del SENARA y AyA, cinco de estos son para abastecimiento público y uno es una solicitud (GD -1) que no se completó. No obstante los expedientes de SENARA y AyA recolectados no cuentan con la información sobre el caudal y la jornada de explotación recomendada. De los restantes 10 pozos, la información sobre usos y su explotación se encuentra en el cuadro 7 y figura 38. Los pozos GD – 8 y GD – 9 se encuentran captando un acuífero inferior asociado a la Formación Peñita, que solo se reporta en estos dos pozos.

Cuadro 7: Resumen de los usos, caudales, horas y niveles máximos de explotación indicados en los pozos de la base de datos del SENARA.

Código de pozo	Uso	Caudal recomendable de explotación (l / s)	Horas diarias recomendables (h)	Nivel de bombeo máximo recomendable (m)
GD – 7	Varios	6.3	12 bombeo - 1 recuperación	3,3
GD – 8	Turismo	0.14	8 bombeo - 1 recuperación	28,5
GD – 9	Doméstico	0.63	12 bombeo - 1 recuperación	21,57
GD – 10	Turismo	4	12	10
GD – 11	Turismo	4	12	10
GD – 12	Turismo	4	12	10
GD – 13	Riego – Turismo	1.79	12	2,31
GD - 14	Riego - Doméstico - Turismo	0.6	12	2,3
GD - 15	Riego – Turismo	2.85	12	2,5
GD - 16	Turismo	4	12	9

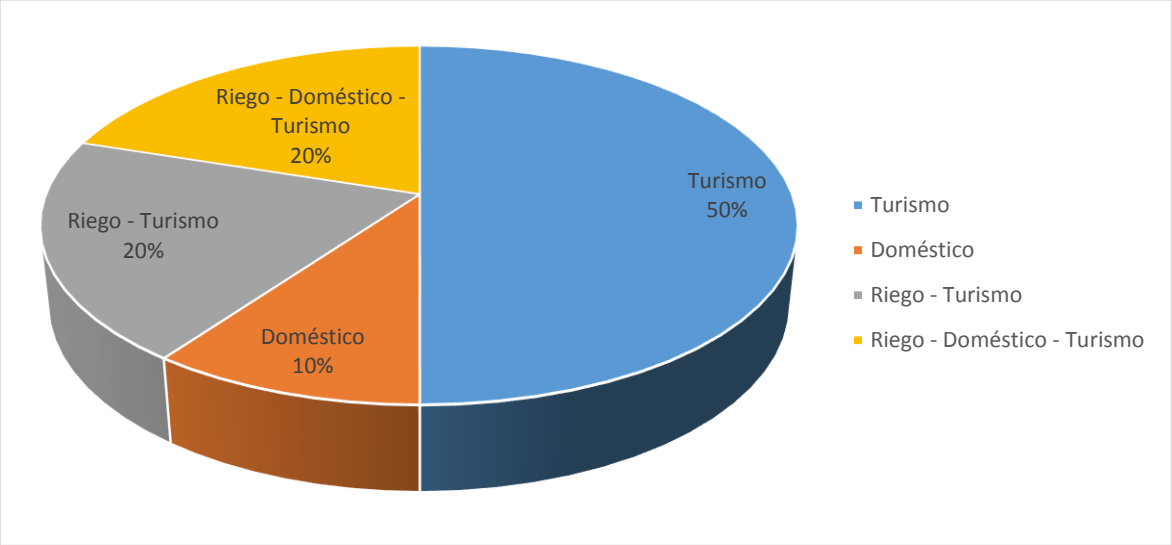


Figura 38: Gráfico del porcentaje de pozos inscritos en SENARA por cada uno de los usos reportados. Fuente: Elaboración propia.

Sobre las nacientes, la oficina del MINAE en Puerto Jiménez indicó que no poseen un registro de manantiales, del trabajo de campo realizado solamente se logró caracterizar dos nacientes en el área de estudio, que se muestra en el mapa de la figura 39 y su caracterización, en función de la información materialmente disponible, se encuentra en los anexos (en forma digital en la contraportada de este informe).

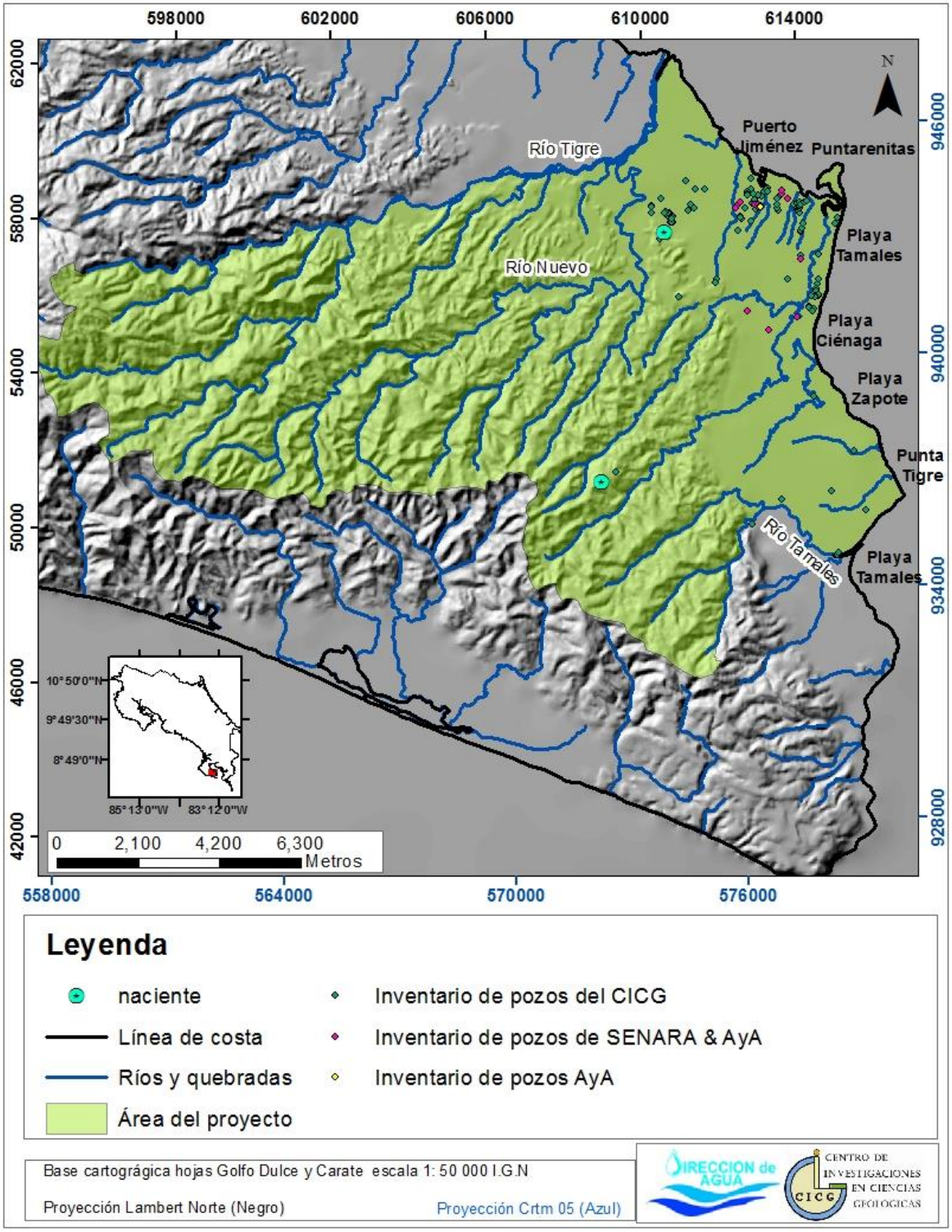


Figura 39: Mapa del inventario de pozos y nacientes en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

6.2. Flujo del agua subterránea

La figura 40 muestra las equipotenciales y las líneas de dirección de flujo a partir de los datos recolectados durante el inventario de pozos. La representatividad de este mapa de equipotenciales es máxima, puesto que se realizó a partir de datos medidos de los niveles de agua en los pozos artesanales inventariados, de esta manera se aseguró de tener datos representativos para el mismo periodo y del mismo nivel de agua subterráneo.

Como se puede observar en la figura 40, la falta de pozos entre el área de Puerto Jiménez y Tamales no permitió darle continuidad a las equipotenciales en todo el área aluvial objeto de estudio.

La información disponible indica que en el sector de Puerto Jiménez la dirección de flujo es perpendicular a la línea de costa y hacia Playa Platanares y Playa Ciénaga parece haber un cambio leve de dirección de flujo que desemboca hacia la línea de costa.

Por otro lado en el sector del Río Tamales se puede observar que el flujo de agua subterránea se orienta hacia la desembocadura de dicho río.

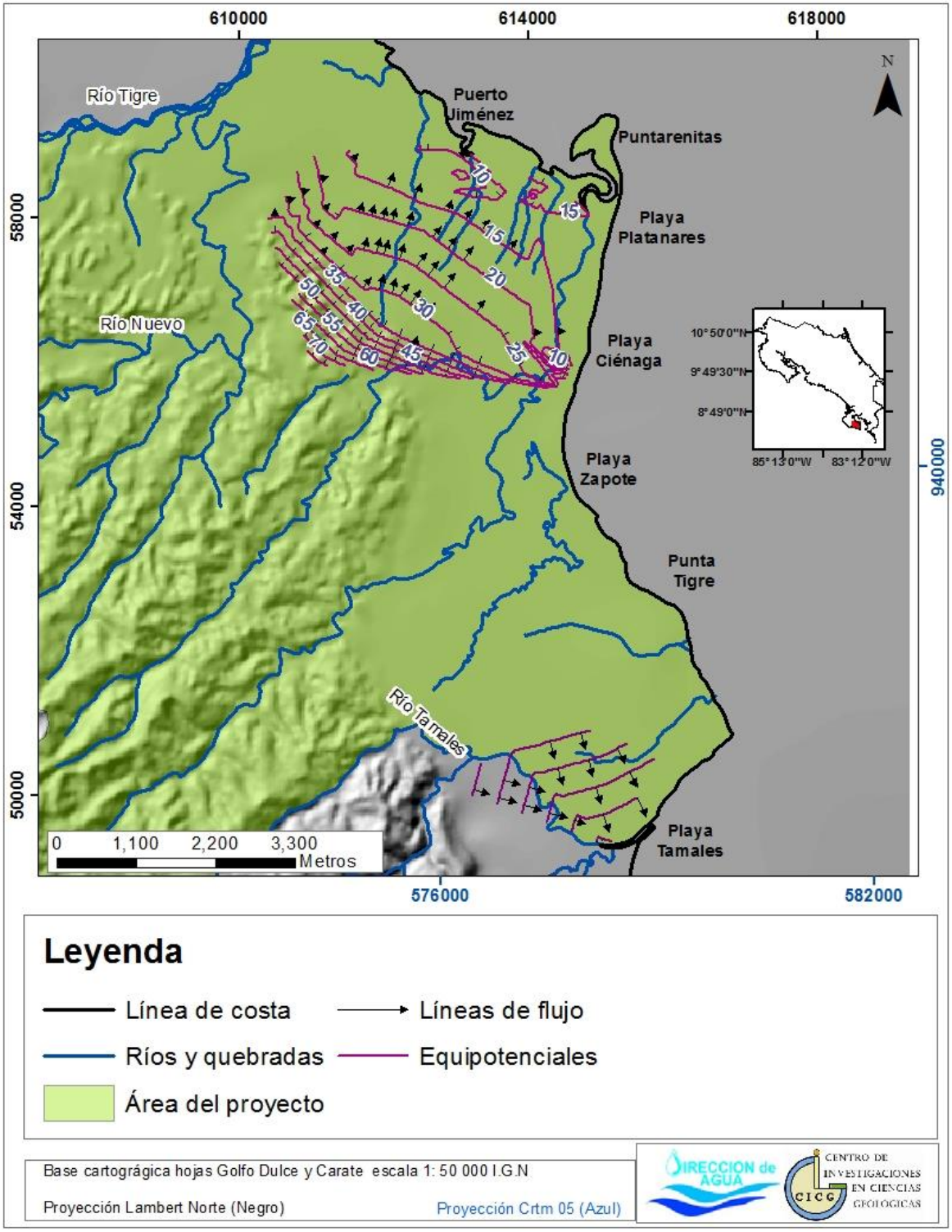


Figura 40: Mapa de equipotencial y dirección del flujo de agua subterránea en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

6.3. Campaña de Aforos

En el área de estudio se encuentran los siguientes ríos: Río Tigre, Río Nuevo (afluente del río Tigre), Río Corozal (afluente del río Platanares), Río Platanares y Río Tamales. Así como las siguientes quebradas: Quebrada Ignacia, Quebrada Cacao, Quebrada Ciénaga, Quebrada Colorada y Quebrada Tigre.

Los aforos de los ríos de la zona de estudio se efectuaron para el mes de enero del 2016, que se considera iniciada la época seca. Los mismos tenían la finalidad de establecer en la parte baja de las cuencas si los ríos son efluentes o influentes. En la Figura 41se muestran los sitios donde se realizaron los aforos para cada río y en la Figura 42 el esquema del perfil transversal de cada aforo.

La distribución de los puntos de las secciones de aforo se realizó en función a las posibilidades reales de acceso, disponibilidad de agua en el cauce y seguridad (debido a la presencia de cocodrilos). Así, las quebradas mencionadas anteriormente no se aforaron puesto que se encontraban casi secas y el agua estaba estancada, condiciones no apropiadas para realizar los aforos con los molinetes disponibles.

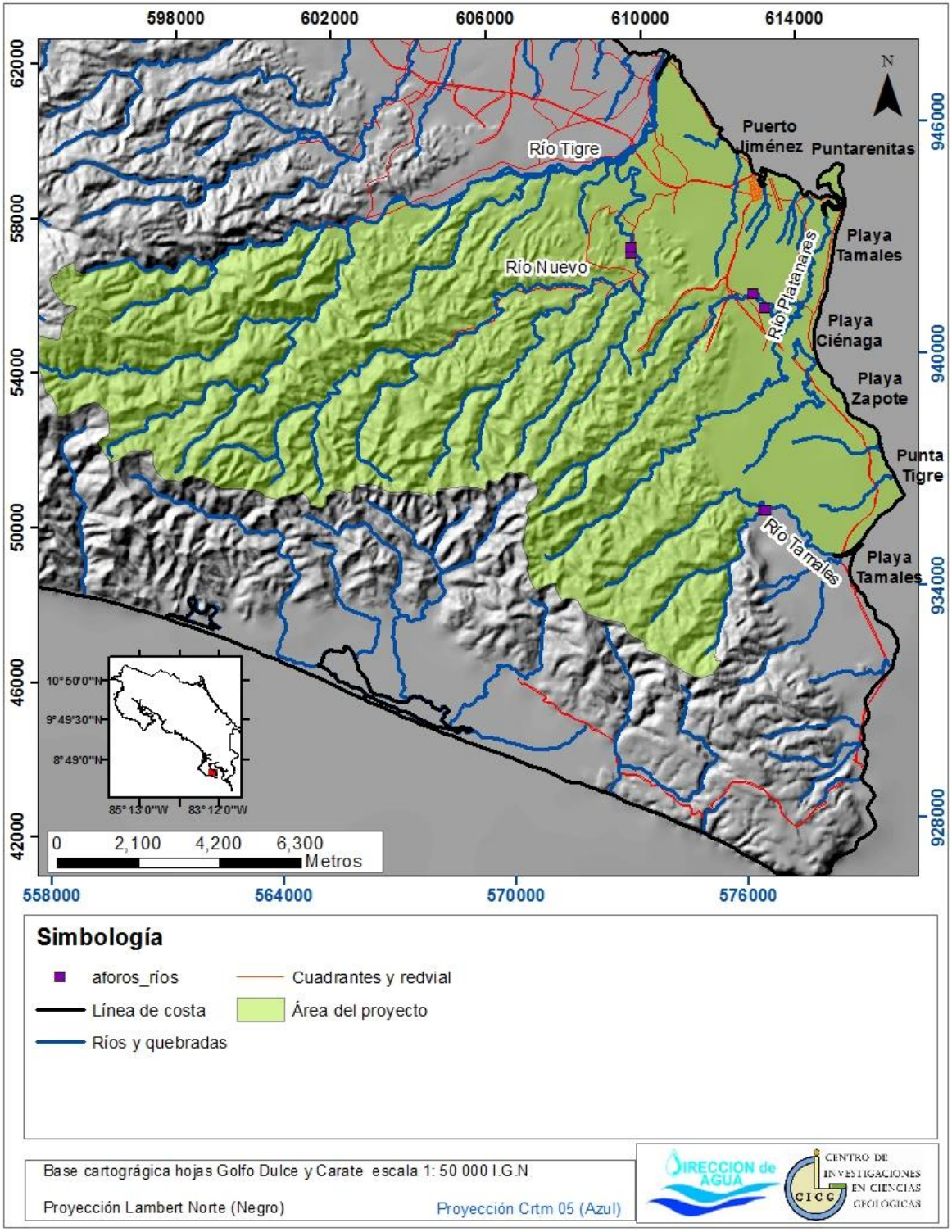


Figura 41: Mapa de ubicación de los puntos donde se aforaron los ríos Nuevo, Corozal y Tamales. Fuente: Elaboración propia.

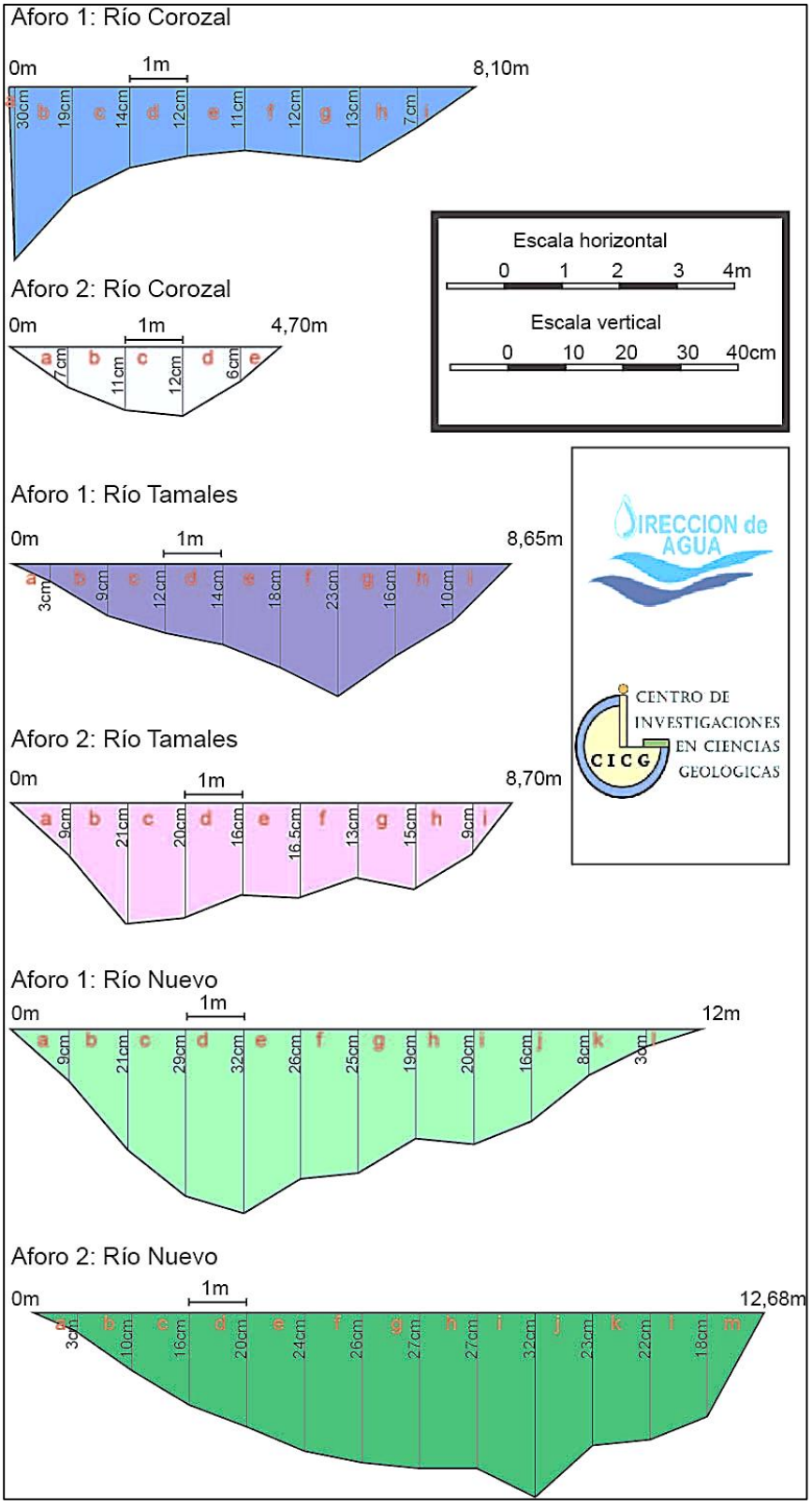


Figura 42: Esquema de las secciones transversales de los ríos en las cuales se realizaron aforos. Fuente: Elaboración propia.

El río Tigre en la parte baja de la cuenca presenta un patrón de drenaje méandrico y entrelazado con abundantes barras arenosas que se encuentran en explotación de cauce de dominio público. Esta condición hace que se presenten brotes de agua en varias partes del cauce y se ramifiquen los cauces con agua en verano, lo que vuelve complicada la cuantificación total del caudal en una sección determinada. Por esta razón no se realizaron aforos en el río Tigre.

El río Nuevo también presenta un patrón de drenaje entrelazado, no obstante si fue posible establecer un tramo corto del cauce donde no hubiera quebradas que aportaran agua al río y donde no hubiera bifurcación del río (Figura 43 y Figura 44). El dato de los aforos se muestra en el cuadro 8 y revela una disminución significativa del caudal, lo que se interpreta como que el río Nuevo aporta caudal al acuífero.

El río Corozal (figura 45 y Figura 46) si presenta las condiciones idóneas, flujo perceptible para el molinete en segmentos rectos del río sin aportes o bifurcaciones. El dato de los aforos (cuadro 9) indica que hay un aumento del caudal río abajo, lo que se interpreta como un aporte del acuífero hacia el río.

El río Platanares no se pudo aforar, en la parta baja del río hay presencia de cocodrilos y en la parte media el río bordea o se encuentra dentro de las propiedades de la empresa TRANQUILITY, que no se mostró cooperativa con esta investigación ya que la seguridad no permitió el acceso en los alrededores. Esta empresa además parece estar aprovechando las aguas del río Platanares.

Mientras que en el río Tamales (figuras 47 y 48) si se realizaron dos aforos rápidos y en distancias cortas, debido a que igual que en el río Platanares, se observaron cocodrilos en el río. El resultado de los aforos (cuadro 10), indica un aumento del caudal río abajo, lo que se interpreta como un aporte del acuífero.

Figura 43: Fotografía de la sección del Río Nuevo, aguas arriba, donde se realizó el aforo. Fuente: Elaboración propia.

Figura 44: Fotografía de la sección del Río Nuevo, aguas abajo, donde se realizó el aforo. Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 8: Cálculo del caudal para los aforos realizados en el Río Nuevo.

Aforo aguas arriba en el Río Nuevo										
Prof (m)	**Dist (m)**	**Prom. Prof (m)**	**Long (m)**	**B**	**A (m^2)**	**Vel. fondo (m/s)**	**Vel. medio (m/s)**	**Vel. superficie (m/s)**	**Vel. Prom (m/s)**	**Caudal (m^3/s)**
0,00	0,00	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	-	-
9,00	1,00	4,50	1,00	a	4,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
2,00	2,00	15,00	1,00	b	15,00	0,10	-	0,20	0,06	0,900
29,00	3,00	25,00	1,00	c	25,00	0,20	0,30	0,40	0,24	6,000
32,00	4,00	30,50	1,00	d	30,50	0,30	0,40	0,40	0,33	10,167
26,00	5,00	29,00	1,00	e	29,00	0,40	0,40	0,50	0,40	11,600
25,00	6,00	25,50	1,00	f	25,50	0,20	0,40	0,40	0,38	9,775
19,00	7,00	22,00	1,00	g	22,00	0,30	0,40	0,50	0,37	8,067
20,00	8,00	19,50	1,00	h	19,50	0,20	0,30	0,30	0,33	6,500
16,00	9,00	18,00	1,00	i	18,00	0,10	-	0,20	0,22	3,960
8,00	10,00	12,00	1,00	j	12,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,720
3,00	11,00	5,50	1,00	k	5,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
0,00	12,00	1,50	1,00	l	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
Total					**208,00**				**0,200**	**57,688**
Aforo aguas abajo en el Río Nuevo										
Prof (m)	**Dist (m)**	**Prom. Prof (m)**	**Long (m)**	**B**	**Área (m^2)**	**Vel. fondo (m/s)**	**Vel. medio (m/s)**	**Vel. superficie (m/s)**	**Vel. Prom (m/s)**	**Caudal (m^3/s)**
0,00	0,00	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	-	-
3,00	0,68	1,50	0,68	a	1,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
10,00	1,68	6,50	1,00	b	6,50	0,00	-	0,10	0,02	0,130
16,00	2,68	13,00	1,00	c	13,00	0,10	-	0,20	0,10	1,300
20,00	3,68	18,00	1,00	d	18,00	0,10	0,20	0,30	0,18	3,240
24,00	4,68	22,00	1,00	e	22,00	0,10	0,30	0,30	0,22	4,767

26,00	5,68	25,00	1,00	f	25,00	0,20	0,40	0,30	0,27	6,667
27,00	6,68	26,50	1,00	g	26,50	0,20	0,40	0,40	0,32	8,392
27,00	7,68	27,00	1,00	h	27,00	0,30	0,40	0,40	0,35	9,450
32,00	8,68	29,50	1,00	i	29,50	0,20	0,20	0,30	0,30	8,850
23,00	9,68	27,50	1,00	j	27,50	0,10	-	0,10	0,18	4,950
22,00	10,68	22,50	1,00	k	22,50	0,00	-	0,00	0,05	1,125
18,00	11,68	20,00	1,00	l	20,00	0,00	-	0,10	0,03	0,500
0,00	12,68	9,00	1,00	m	9,00	0,00	-	0,00	0,03	0,225
Total					**247,520**				**0,156**	**49,595**

**Prof: Profundidad; Dist: Distancia; Prom. Prof: Promedio de Profundidad; Long: Longitud del tramo; B: Bloque; A: área; Vel. Fondo: Velocidad en el fondo; Vel. Medio: velocidad en el medio; Vel. Superficie: velocidad en superficie; Vel. Prom: velocidad promedio en cada bloque.*

Cuadro 9: Cálculo del caudal para los aforos realizados en el Río Corozal.

Aforo aguas abajo en el Río Corozal									
Prof (m)	**Dist (m)**	**Prom. Prof (m)**	**Long (m)**	**B**	**Área (m^2)**	**Vel. fondo (m/s)**	**Vel. superficie (m/s)**	**Vel. Prom (m/s)**	**Caudal (m^3/s)**
0,00	0,00	-	-	-	-	0,00	0,00	-	-
0,30	0,10	0,150	0,10	a	0,015	0,00	0,00	0,00	0,000
0,19	1,10	0,245	1,00	b	0,245	0,10	0,10	0,05	0,012
0,14	2,10	0,165	1,00	c	0,165	0,10	0,10	0,10	0,017
0,12	3,10	0,130	1,00	d	0,130	0,10	0,10	0,10	0,013
0,11	4,10	0,115	1,00	e	0,115	0,10	0,10	0,10	0,012
0,12	5,10	0,115	1,00	f	0,115	0,10	0,10	0,10	0,012
0,13	6,10	0,125	1,00	g	0,125	0,10	0,10	0,10	0,013
0,07	7,10	0,100	1,00	h	0,100	0,10	0,00	0,08	0,008
0,00	8,10	0,035	1,00	i	0,035	0,00	0,00	0,03	0,001
Total					**1,045**			**0,072**	**0,086**

Aforo aguas arriba en el Río Corozal									
Prof (m)	**Dist (m)**	**Prom. Prof (m)**	**Long (m)**	**B**	**Área (m^2)**	**Vel. fondo (m/s)**	**Vel. superficie (m/s)**	**Vel. Prom (m/s)**	**Caudal (m^3/s)**
000	0,00	-	-	-	-	0,00	0,00	-	-
0.,07	1,00	0,035	1,00	a	0,035	0,10	0,10	0,05	0,002
0,11	2,00	0,090	1,00	b	0,090	0,10	0,30	0,15	0,014
0,12	3,00	0,115	1,00	c	0,115	0,20	0,30	0,23	0,026
0,06	4,00	0,090	1,00	d	0,090	0,10	0,10	0,18	0,016
0,00	4,70	0,030	0,70	e	0,021	0,00	0,00	0,05	0,001
Total					**0,351**	**Total**		**0,130**	**0,058**

Prof: Profundidad; Dist: Distancia; Prom. Prof: Promedio de Profundidad; Long: Longitud del tramo; B: Bloque; A: área; Vel. Fondo: Velocidad en el fondo; Vel. Medio: velocidad en el medio; Vel. Superficie: velocidad en superficie; Vel. Prom: velocidad promedio en cada bloque.

Cuadro 10: Cálculo del caudal para los aforos realizados en el Río Tamales.

Aforo aguas arriba en el Río Tamales									
Prof (m)	**Dist (m)**	**Prom. Prof (m)**	**Long (m)**	**B**	**Área (m^2)**	**Vel. fondo (m/s)**	**Vel. superficie (m/s)**	**Vel. Prom (m/s)**	**Caudal (m^3/s)**
0,00	0,00					0,00	0,00		
0,03	0,65	0,02	0,65	a	0,010	0,00	0,00	0,000	0,000
0,09	1,65	0,06	1,00	b	0,060	0,00	0,00	0,000	0,000
0,12	2,65	0,11	1,00	c	0,105	0,00	0,00	0,000	0,000
0,14	3,65	0,13	1,00	d	0,130	0,00	0,00	0,000	0,000
0,18	4,65	0,16	1,00	e	0,160	0,10	0,10	0,050	0,008
0,23	5,65	0,21	1,00	f	0,205	0,10	0,20	0,125	0,026
0,16	6,65	0,20	1,00	g	0,195	0,10	0,20	0,150	0,029
0,10	7,65	0,13	1,00	h	0,130	0,00	0,00	0,075	0,010
0,00	8,65	0,05	1,00	i	0,050	0,00	0,00	0,000	0,000
Total					1,045	**Total**		0,044	0,073

Aforo aguas abajo en el Río Tamales									
Prof (m)	**Dist (m)**	**Prom. Prof (m)**	**Long (m)**	**B**	**Área (m^2)**	**Vel. fondo (m/s)**	**Vel. superficie (m/s)**	**Vel. Prom (m/s)**	**Caudal (m^3/s)**
0,00	0,00					0,00	0,00		
0,09	0,70	0,05	0,70	a	0,03	0,00	0,00	0,00	0,000
0,21	1,70	0,15	1,00	b	0,15	0,00	0,00	0,00	0,000
0,20	2,70	0,21	1,00	c	0,21	0,10	0,20	0,08	0,015
0,16	3,70	0,18	1,00	d	0,18	0,10	0,10	0,13	0,023
0,17	4,70	0,16	1,00	e	0,16	0,10	0,10	0,10	0,016
0,13	5,70	0,15	1,00	f	0,15	0,00	0,10	0,08	0,011
0,15	6,70	0,14	1,00	g	0,14	0,10	0,10	0,08	0,011
0,09	7,70	0,12	1,00	h	0,12	0,00	0,00	0,05	0,006
0,00	8,70	0,05	1,00	i	0,05	0,00	0,00	0,00	0,000
Total					**1,182**	**Total**		**0,056**	**0,082**

Prof: Profundidad; Dist: Distancia; Prom. Prof: Promedio de Profundidad; Long: Longitud del tramo; B: Bloque; A: área; Vel. Fondo: Velocidad en el fondo; Vel. Medio: velocidad en el medio; Vel. Superficie: velocidad en superficie; Vel. Prom: velocidad promedio en cada bloque.

Figura 45: Fotografía de la sección del Río Corozal, aguas abajo, donde se realizó el aforo. Fuente: Elaboración propia.

Figura 46: Fotografía de la sección del Río Corozal, aguas arriba, donde se realizó el aforo. Fuente: Elaboración propia.

Figura 47: Fotografía de la sección del Río Tamales, aguas arriba, donde se realizó el aforo. Fuente: Elaboración propia.

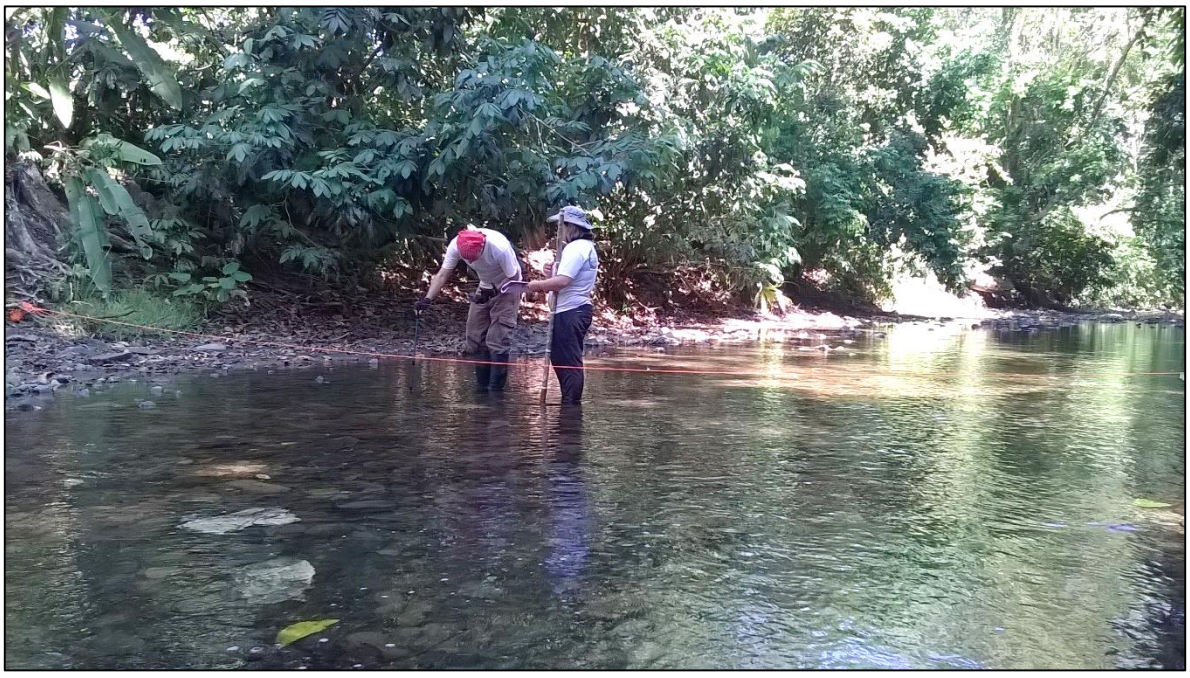


Figura 48: Fotografía de la sección del Río Tamales, aguas abajo, donde se realizó el aforo. Fuente: Elaboración propia.

6.4. Perfiles hidrogeológicos

Se trazaron tres perfiles hidrogeofísicos que contemplan la intrepretación de los SEV con las características hidrogeológicas del sitio obtenidas en función de la información de los pozos cercanos en la zona aluvial En la figura 49 se muestra la ubicación de los mismos, así como la ubicación de los SEV y pozos. Estos perfiles son producto de la interpretación de un modelo geoeléctrico de 4 o 5 capas (cuadros 11, 12,13).

Debido a la carencia de información disponible, no se ha contemplado la interacción en estos perfiles con las zonas montañosas.

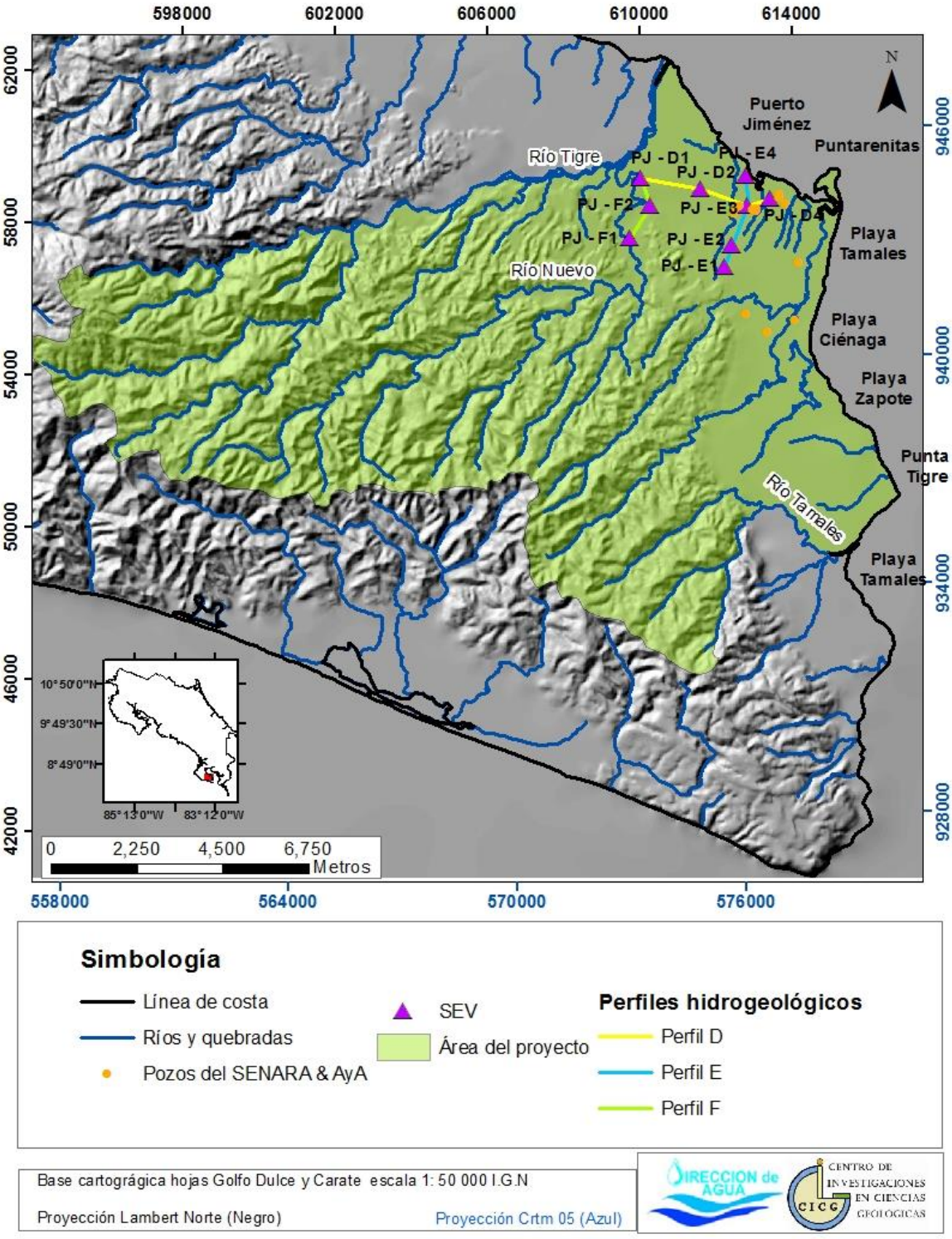


Figura 49: Mapa de ubicación de los perfiles hidrogeofísico y los SEV para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

El perfil hidrogeofísico D (figura 50) presenta una orientación casi paralela a la línea de costa (NW – SE), desde el Río Tigre hasta el centro de Puerto Jiménez.

La capa más superficial consiste de un suelo arenoso color gris, similar a la arena de playa. Su espesor varía entre 0,5 m y 3 m de espesor, aumentando hacia el centro de Puerto Jiménez. Pero hacia el Oeste, el suelo se vuelve más arcilloso y café, con un espesor de 1,5 m. Los valores de resistividad del suelo arenoso color gris varían entre 270 y 95 Ω m. Por su parte, el suelo café muestra una resistividad que ronda los 22 Ω m.

Por debajo de la capa de suelo, se reportan ocasionalmente lentes o cuñas de gravas secas, que podrían asociare con paleocanales debido a la cercanía con el Río Tigre y la Quebrada Ignacia. Los espesores son variables (el SEV PJ – D1 reporta 9 m de espesor, mientras que el SEV PJ – E3 indica 3,25 m de espesor), así como las resistividades de 68 Ω m en PJ – D1 que posiblemente corresponde con el aluvión del Río Tigre y 1 000 Ω m en la cercanía de la Quebrada Ignacia.

Subyaciendo las gravas secas y los suelos se encuentran dos capas de arenas no consolidadas que constituyen el acuífero aluvial. La capa superior de arenas tiene una granulometría de media a gruesa, con espesores variables entre 19,5 m y 5 m y resistividades entre 45 Ω m y 17,5 Ω m. Mientras que la capa inferior tiene un espesor menor, entre 10 y 3 m, una resistividad promedio de 4,5 Ω m y corresponde con una arena de granulometría principalmente finas.

Por debajo del acuífero, aflora una capa limosa verde producto de la erosión de la secuencia inmediatamente inferior, que se trata de intercalaciones entre areniscas y lutitas verdosas. Dado que esta es la última capa no se puede establecer su espesor ni resistividad.

Cuadro 11: Resumen de la interpretación de los SEV PJ – D1, PJ – D2, PJ – E3 y PJ – D4 para el trazo del perfil hidrogeofísico D.

SEV	PJ-D1				PJ-D2				PJ-E3				PJ-D4			
Parm	***Res***	***e***	***Prof***	***Descrip***	***Res***	***e***	***Prof***	***Descrip***	***Res***	***e***	***Prof***	***Descrip***	***Res***	***e***	***Prof***	***Descrip***
Capa 1	22,5	1.5	0 a 1,5	Suelo café con clastos	210	0,5	0 a 0,5	Suelo arenoso	270	0,75	0 a 0,75	Suelo arenoso	95	3	0 a 3	Suelo arenoso
Capa 2	68	9	1,5 a 10,5	gravas secas	17	14,5	0,5 a 15	Arenas gruesas saturadas	1000	3,25	0,75 a 4	Gravas seca	45	9	3 a 9	arenas gruesas saturadas
Capa 3	14	19,5	10,5 a 30	Arenas gruesas saturadas	5	10	15 a 25	Arenas saturadas	28	5	4 a 9	Arenas gruesas saturadas	4	3	9 a 15	Arenas saturadas
Capa 4	-	-	A partir de 30	Intercalaciones de areniscas y lutitas	-	-	A partir de 25	Intercalaciones de areniscas y lutitas	-	-	A partir de 9	Intercalaciones de areniscas y lutitas	-	-	A partir de 15	Intercalaciones de areniscas y lutitas

***Parm: Parámetro; Res: Resistividad (Ωm); e: Espesor (m); Prof: Profundidad (m); Descrip: Descripción.**

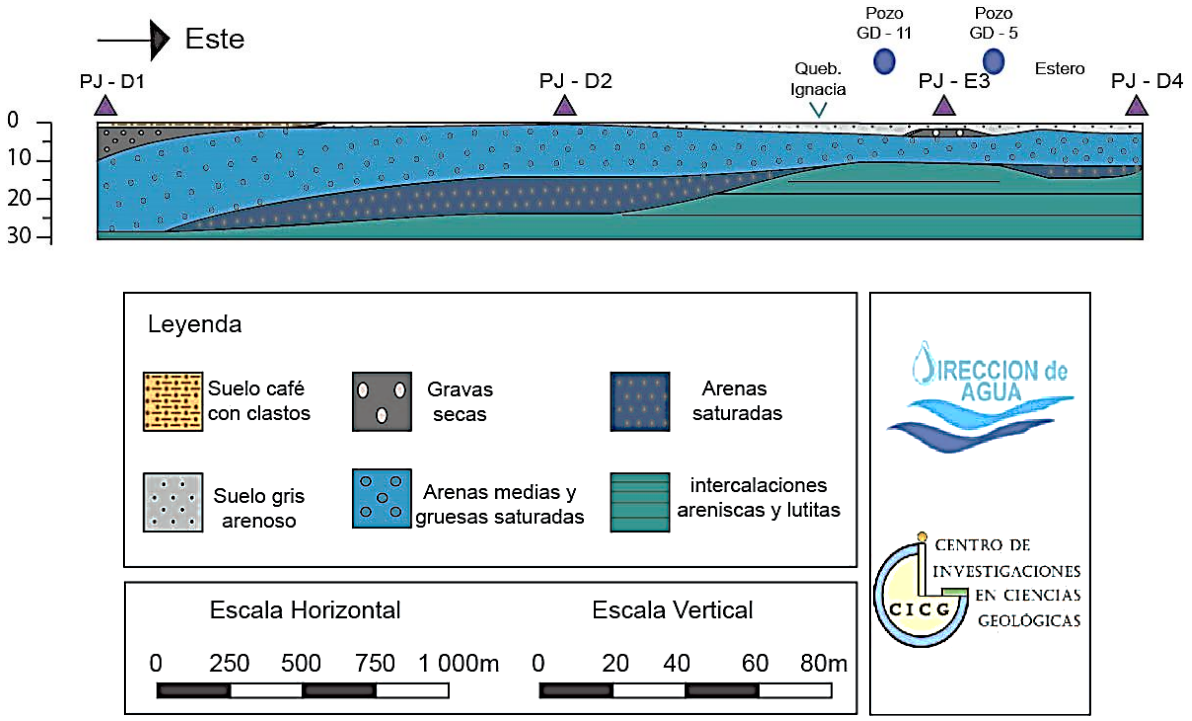


Figura 50: Perfil hidrogeofísico D para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

El perfil hidrogeofísico F (figura 51) presenta una dirección paralela al Río Nuevo, comienza cerca de una curva de este y termina donde comienza el perfil D, cerca del Río Tigre. En este perfil el acuífero aluvial aflora completo solo en el sector Sur, en el resto del perfil le falta la capa inferior o la superior.

La capa superior del acuífero muestra un espesor máximo de 19,5 m, y una resistividad entre 30 y 17,5 Ω m (se encuentra dentro del intervalo establecido en el perfil D).

Mientras que la capa inferior del acuífero muestra espesores entre 10,5 y 2,5 m y resistividades de 8 y 1 Ω m (valores cercanos a los establecidos en el perfil D).

En el perfil hidrogeológico F, aflora una capa en la parte central del perfil, constituido por arenas finas azules y secas, con un espesor de 2 m y una resistividad de 280 Ω m.

Cuadro 12: Resumen de la interpretación de los SEV PJ – D1, PJ – D2, PJ – E3 y PJ – D4 para el trazo del perfil hidrogeofísico D.

SEV	PJ-F1				PJ-F2				PJ-D1			
Parm	***Res***	***e***	***Prof***	***Descrip***	***Res***	***e***	***Prof***	***Descrip***	***Res***	***e***	***Prof***	***Descrip***
Capa 1	10	0,5	0 a 0,5	Suelo café con clastos	16,5	2	0 a 2	Suelo café con clastos	22,5	1,5	0 a 1,5	Suelo café con clastos
Capa 2	30	19	0,5 a 19,5	Arenas gruesas saturadas	280	2	2 a 4	Arenas finas color azul	68	9	1,5 a 10,5	gravas secas
Capa 3	8	10,5	19,5 a 30	Arenas saturadas	1	2,5	4 a 6,5	Arenas saturadas	17,5	19,5	10,5 a 30	Arenas gruesas saturadas
Capa 4	-	-	A partir de 30	Intercalaciones de areniscas y lutitas	-	-	A partir de 6,5	Intercalaciones de areniscas y lutitas	-	-	A partir de 30	Intercalaciones de areniscas y lutitas

***Parm: Parámetro; Res: Resistividad (Ωm); e: Espesor (m); Prof: Profundidad (m); Descrip: Descripción.**

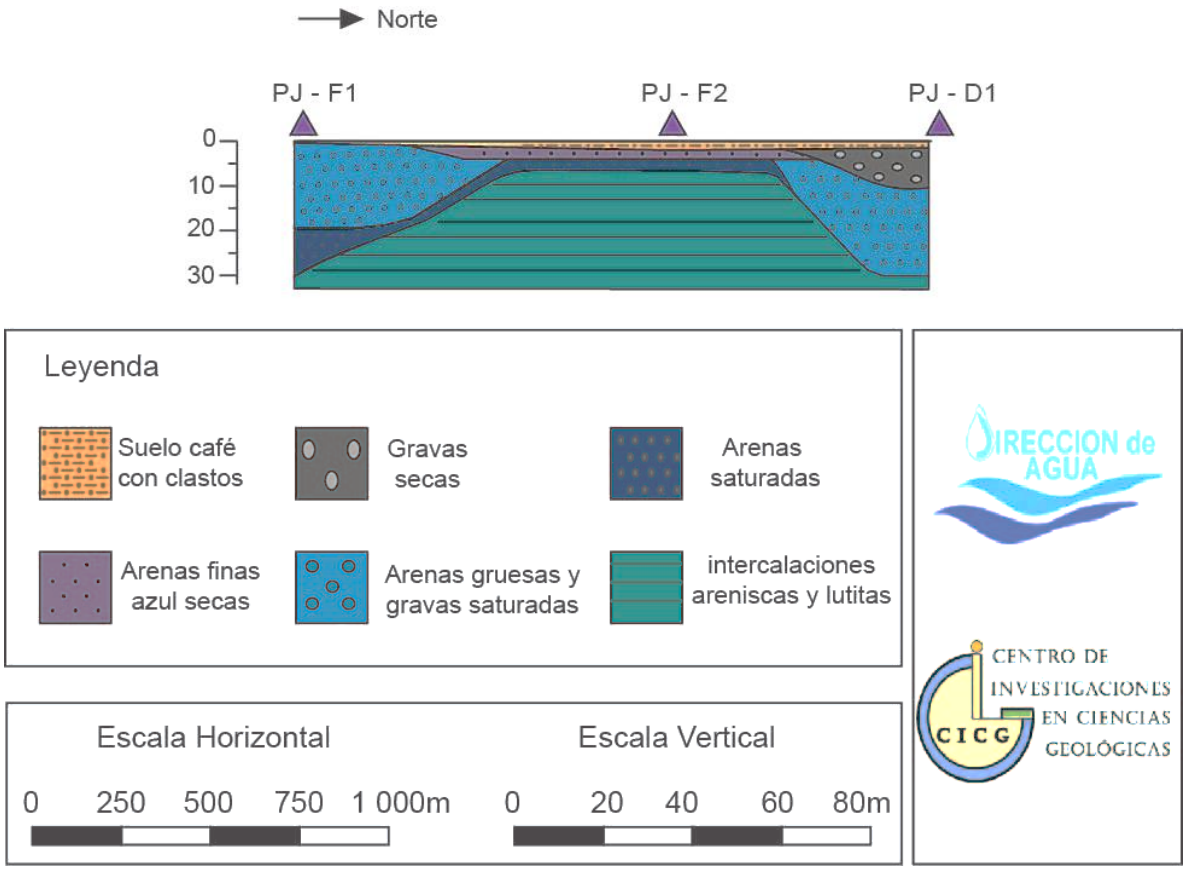


Figura 51: Perfil hidrogeofísico F para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el perfil hidrogeofísico E (figura 52) tiene una dirección perpendicular a la línea de costa y termina justo al nivel del mar. El espesor de la capa de suelo arenoso gris varía entre 0,5 y 0,75 m con una resistividad que varía entre 170 a 270 Ω m. Mientras que el espesor de arena de playa al Norte del perfil es de 2,3 m con una resistividad de 2 Ω m.

En la parte continental hay un espesor continuo de grava seca entre 3 y 4,5 m, con una resistividad entre 820 y 1200 Ω m.

En el perfil hidrogeofísico E solo aflora la capa superior del acuífero aluvial, constituido por las arenas medias a gruesas con espesor entre 5 y 25 m, siendo mayores hacia la parte continental. Las resistividades se encuentran en un rango entre 28 y 11 Ω m, siendo congruentes con lo indicado en los perfiles hidrogeológicos anteriores. En la parte central del perfil se reporta un lente o cuña de arenas secas de 100 Ω m y 22 m de espesor. Mientras que en la playa afloran unas areniscas consolidadas de 9,7 m de espesor y una resistividad de 125 Ω m, y subyaciendo todo se encuentran las intercalaciones de areniscas y lutitas verdes.

Cuadro 13: Resumen de la interpretación de los SEV PJ – E1, PJ – E2, PJ – E3 y PJ – E4 para el trazo del perfil hidrogeofísico E.

SEV	PJ-E1				PJ-E2				PJ-E3				PJ-E4			
Parm	***Res***	***e***	***Prof***	***Descrip***	***Res***	***e***	***Prof***	***Descrip***	***Res***	***e***	***Prof***	***Descrip***	***Res***	***e***	***Prof***	***Descrip***
Capa 1	170	0,5	0 a 0,5	Suelo arenoso	190	0,5	0 a 0,5	Suelo arenoso	270	0,75	0 a 0,75	Suelo arenoso	2,2	2,3	0 a 2,3 m	Arenas de playa
Capa 2	820	4,5	0,5 a 5	Gravas seca	1200	4	0,5 a 4,5	Gravas seca	1000	3,25	0,75 a 4	Gravas seca	125	9,7	2,3 a 12 m	Areniscas consolidadas
Capa 3	15	25	5 a 30	Arenas gruesas saturadas	100	22	4,5 a 26,5	arenas secas	28	5	4 a 9	Arenas gruesas saturadas	-	-	A partir de 12 m	Intercala_ ciones de areniscas y lutitas
Capa 4	-	-	A partir de 30	Intercala_ ciones de areniscas y lutitas	11	3,5	26,5 a 30	Arenas gruesas saturadas	-	-	A partir de 9	Intercala_ ciones de areniscas y lutitas				
Capa 5					-	-	A partir de 30	Intercala_ ciones de areniscas y lutitas								

***Parm: Parámetro; Res: Resistividad (Ωm); e: Espesor (m); Prof: Profundidad (m); Descrip: Descripción.**

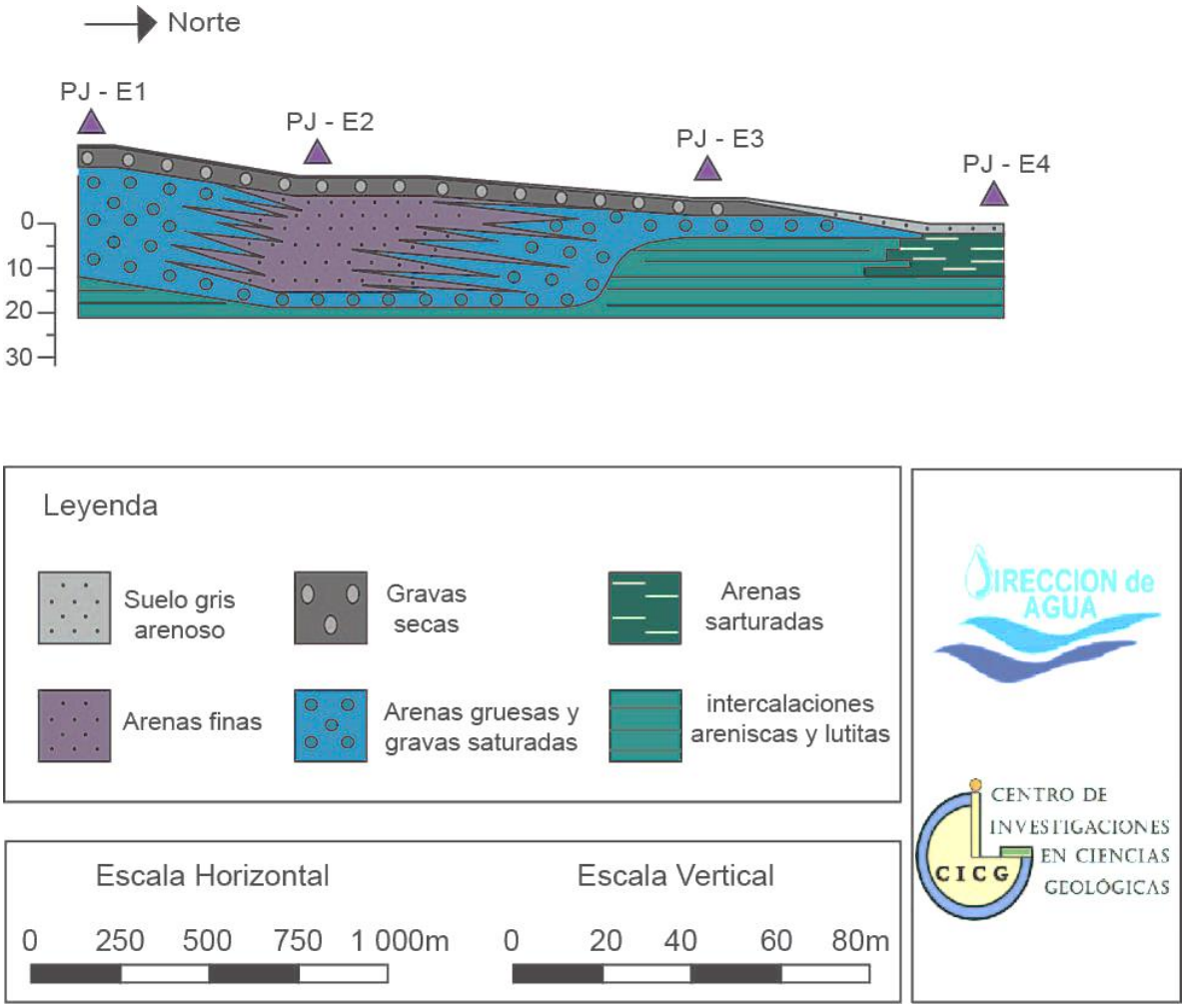


Figura 52: Perfil hidrogeofísico E para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

6.5. Unidades hidrogeológicas locales

Debido a las limitaciones de información, la determinación de las unidades hidrogeológicas locales se basó en la información proveniente del estudio geofísico realizado, los aforos diferenciales en varios cauces de ríos, la interpertación de la geología local con la litología de pozos pertenecientes a la base de datos del SENARA y el listado de pozos mapeados en el presente proyecto. La información obtenida se ha correlacionado con la información litológica y estructural realizada previamente, con lo cual se estableció el modelo hidrogeológico, una vez establecido se crearon tres perfiles hidrogeológicos, con el fin de expresar el modelado realizado.

Se ha establecido la presencia una unidad hidrogeológica utilizando los criterios de la ASTM (2004) y denominada: Unidad Hidrogeológico Puerto Jiménez.

Con esta interpretación se puede delimitar la Unidad Hidrogeológico Puerto Jiménez, como un acuífero aluvial con un espesor que varía entre los 5 y 30 m. La profundidad del agua puede aparecer a partir de los 0,5 m de profundidad. Se considera un acuífero libre y está compuesto por dos capas de arenas no consolidadas de diferentes granulometrías pero puede contener lentes arenosos o bien paleocanales de gravas que no almacenan agua siempre. En algunos tramos de los ríos Corozal y Tamales ellos reciben agua del acuífero, mientras que en un sector del río Nuevo, este recarga al acuífero. Es correlacionable con el Grupo Puerto Jiménez definido por Barritt & Berrangé (1987) como depósitos Cuaternarios y Berrangé & Thorpe (1988) como depósitos Cuaternarios indeferenciados aluviales y swamp.

Un resumen de las propiedades de esta Unidad Hidrogeológica se muestra en el cuadro 14

Cuadro 14: Resumen del modelo hidrogeológico conceptual

Características	Unidad Hidrogeológica Puerto Jiménez
Litología predominante	Arenas no consolidadas con granulometría media a gruesa en la capa superior y granulometrías fina en la capa inferior.
Espesor (m)	5 a 19,5m (capa superior) 2,5 a 10m (capa inferior)
Profundidad del agua (mbns)	A partir de 0,5 m (Capa superior)
Transmisividad (m^2/d)	7 (reportado en el pozo GD – 10) 10 (reportado en el pozo GD – 11) 18 (reportado en el pozo GD – 14) 20 (reportado en el pozo GD – 16) 69 (reportado en el pozo GD – 13) 283 (reportado en el pozo GD – 15)
Coeficiente de almacenamiento	0,10 (reportado en los pozos GD -13, GD – 14 y GD – 15)
Grado de confinamiento hidraúlico	Libre
Resisitividades (Ωm)	15 a 45 Ωm (capa superior) 1 a 8 Ωm (capa inferior)
Unidad estratigráfica	Grupo Puerto Jiménez
Edad	Cuaternario

7. DETERMINACIÓN DE LA RECARGA POTENCIAL

7.1. Aplicación del balance hídrico de suelos

Se realizó un balance hídrico de suelos para el área de estudio, utilizando la metodología propuesta por Shosinsky (2006). El objetivo del balance hídrico es determinar las zonas de mayor potencial de recarga dentro de las áreas estudiadas.

7.1.1. Parámetros necesarios

Para realizar el balance hídrico del suelo, se debe tener como mínimo parámetros meteorológicos de precipitación y temperatura. También se requiere la infiltración mensual de lluvia en el suelo, que se consigue con la metodología de doble anillo. Además es necesario conocer las propiedades hidrológicas del suelo (zona no saturada), como la capacidad de campo, el punto de marchitez y la densidad aparente, que 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 el área donde se va a realizar el balance del suelo; esta profundidad se obtuvo por medio de observaciones en el campo.

Una vez determinadas las características hidrometeorológicas, las propiedades hidrológicas de los suelos, las propiedades del terreno y el uso de la tierra, se construyen zonas con 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 atributos que se detallan en los siguientes apartados.

7.1.1.1. Precipitación zonal

Generalmente, para su elaboración se considera el método de los polígonos de Thiessen tomando en cuenta las estaciones meteorológicas más cercanas. En este caso particular, todas las estaciones meteorológicas se encuentran muy lejos del área de estudio por lo que realizar los polígonos de Thiessen no calza dentro del área de estudio. Debido a que las estaciones meteorológicas más cercanas son Finca El Patio y Los Patos, pero Los Patos no contiene información de temperatura se va seleccionar los datos de la estación meteorológica Finca El Patio (figura 53) para aplicar el balance hídrico.

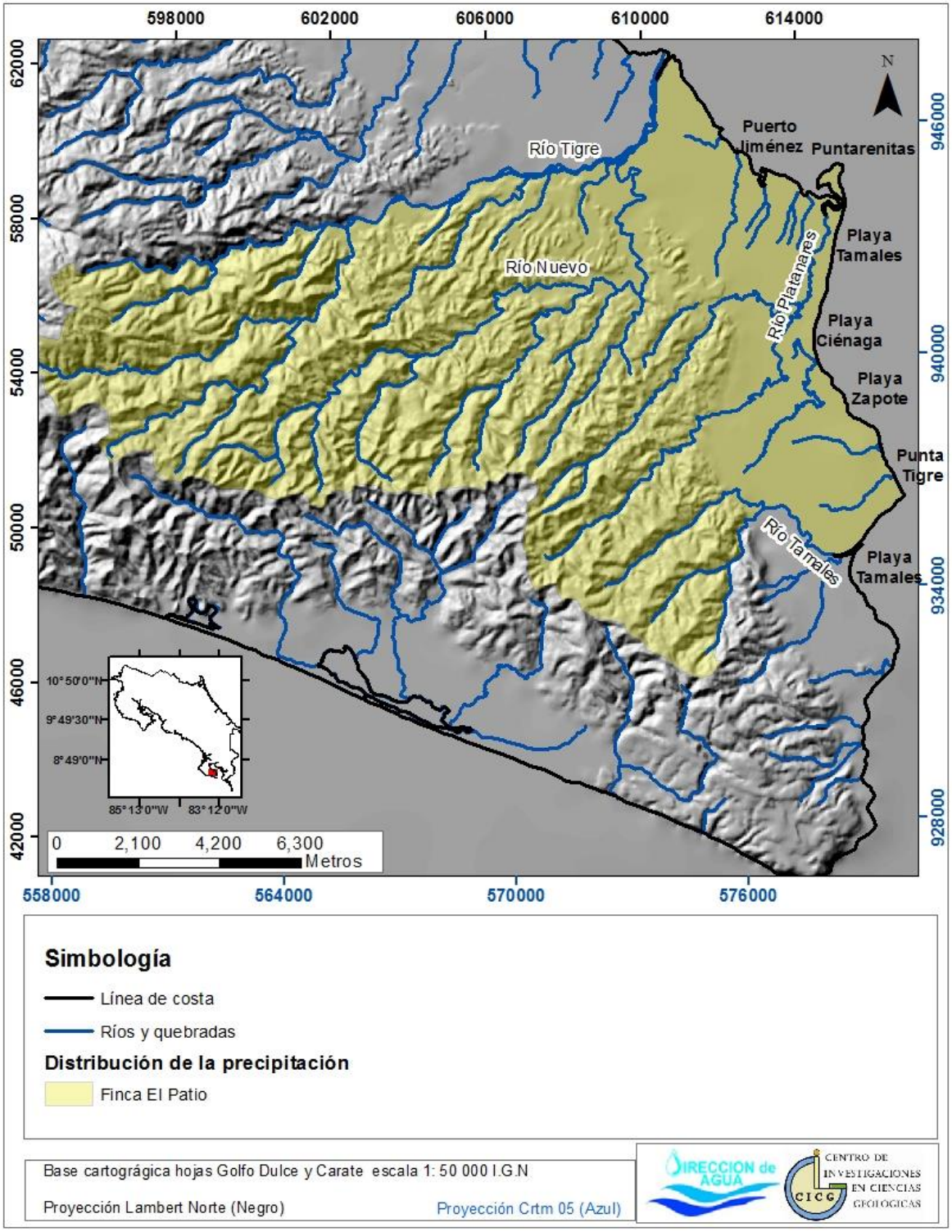


Figura 53: Mapa de distribución de la precipitación, según la estación meteorológica, propuesto para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

7.1.1.2. Pendientes en porcentaje

En la figura 54 se muestra el mapa de pendientes para el área de estudio. La parte montañosa presenta pendientes mayores al 7%, mientras que en la planicie costera, al pie del sector montañoso las pendientes varían entre 2,1 y 7%, luego predominan las pendientes entre 0,41 y 2% y en los alrededores de las playas y esteros las pendientes varían entre 0,4 y 0%.

7.1.1.3. Uso del suelo

El mapa de uso de la tierra utilizado para la elaboración del balance hídrico de suelos, fue cartografiado por medio de imágenes satelitales de GOOGLE EARTH y las visitas de campo. En total se clasifico el uso de suelo en cuatro clases: urbano, bosques, pastos y cultivos.

La categoría de uso urbano, se representa como fuentes difusas, sin embargo se han identificado algunas fuentes potenciales de contaminación tipo puntual como: dos estaciones gasolineras (en el centro de Puerto Jiménez y la del aeropuerto).

El mapa de uso de suelo se reclasificó en función de la metodología Schosinsky (2006) con el fin de obtener el factor de vegetación (Kv) y se representa en la figura 55. Como resultado se obtuvo un valor de Kv de 0 para los sectores dominados por infraestructura urbana; un kv de 0,1 para sectores dominados por actividades agrícolas; un kv de 0,18 para sectores dominados por pastizales y un 0,2 para sectores en donde predominen los bosques tanto secundarios como primarios.

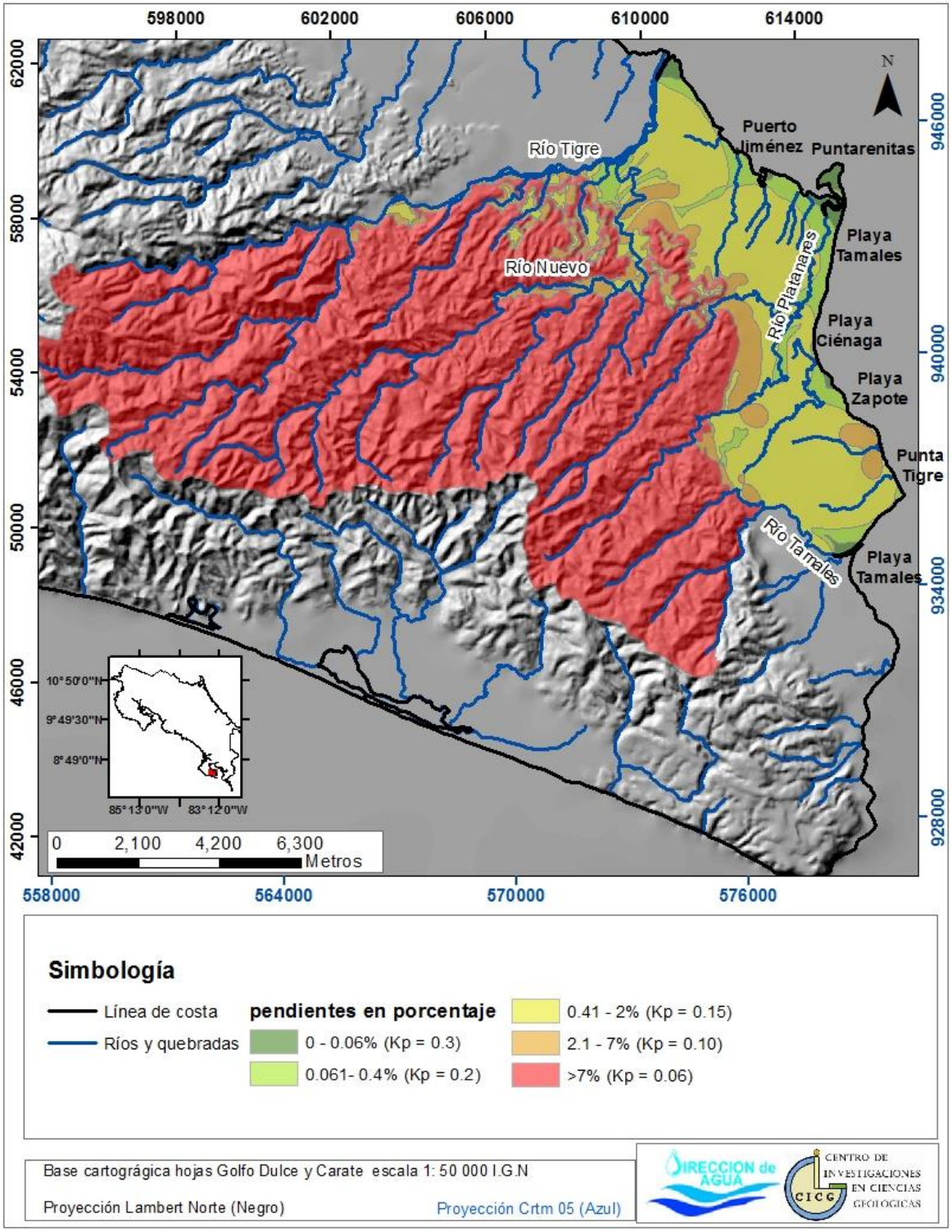


Figura 54: Mapa de pendientes del área de estudio, en los rangos requeridos por la metodología Schosinsky (2006) con sus respectivos valores de Kp. Fuente: Elaboración propia.

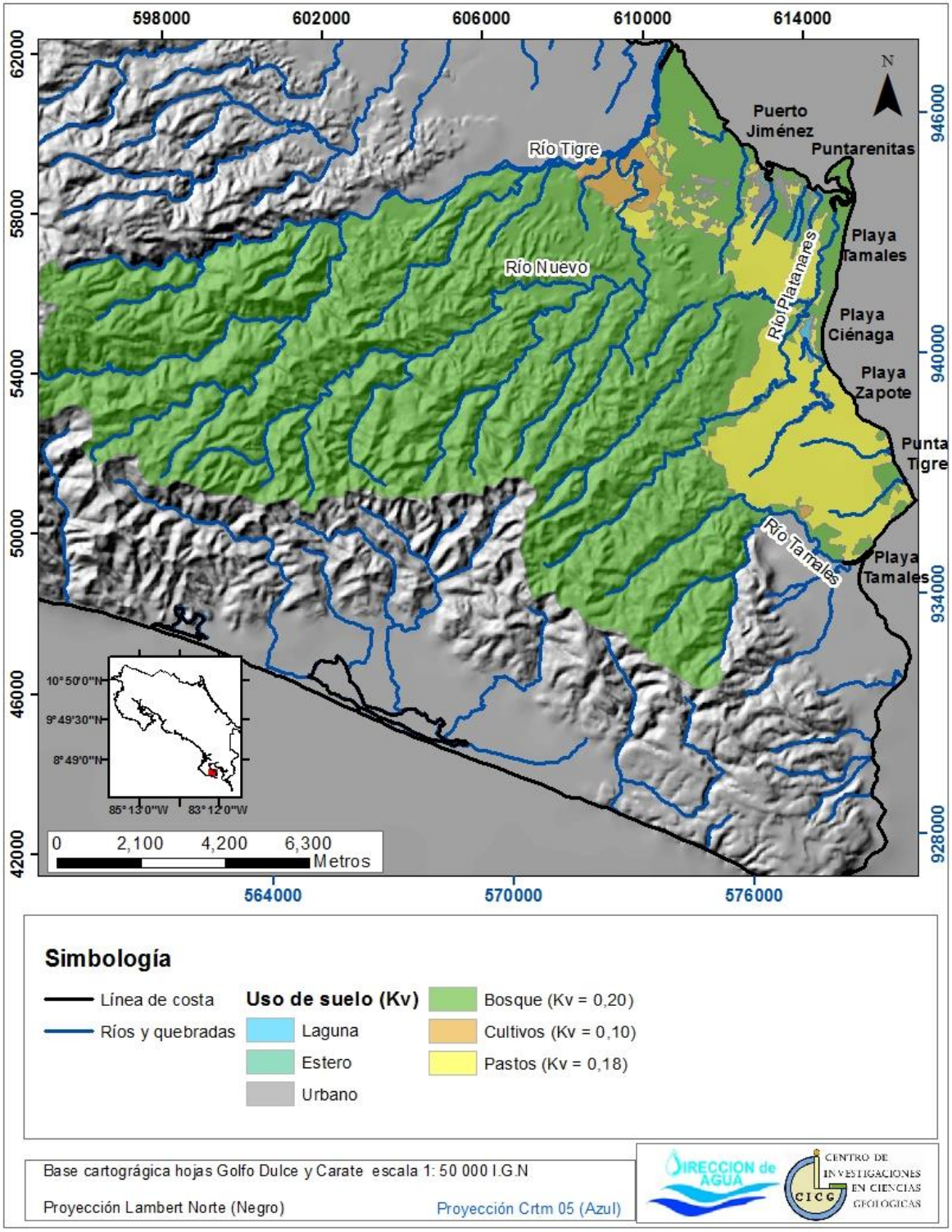


Figura 55: Mapa de uso de suelo con los respectivos valores de Kv propuestos por Schosinsky (2006), para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

7.1.1.4. 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.

Se realizaron un total de 10 pruebas de infiltración con la metodología de doble anillo. La distribución de los puntos de muestreo se realizó en función a las posibilidades reales de acceso a las propiedades y a la presencia de fuentes de agua cercana para utilizarlas en los ensayos de infiltración.

Las pruebas se realizaron con el fin de calcular la infiltración del suelo y realizar un balance hídrico para obtener la cantidad potencial de agua que puede contribuir a recargar las diferentes unidades hidrogeológicas de la zona. Los ensayos se realizaron en superficie ya que la finalidad del mismo es simular la infiltración por lluvia, para ser utilizada en el balance hídrico de suelos aplicando la metodología de Schosinsky (2006).

Los resultados se procesaron por medio de un sistema de información geográfica, utilizando como criterios de interpolación geomorfología e interpretación profesional. El resumen de los resultados y su distribución se pueden apreciar en el cuadro 15, así como en la figura 56.

Para el área de estudio las mayores infiltraciones se dan en la planicie costera debido a los suelos franco arenosos, mientras que las más bajan ocurren en los alrededores de los ríos Tigre y Nuevo.

La tasa de infiltración de suelo se determina mediante la aplicación de un ensayo de campo mediante la prueba de anillos.

Para la interpolación de los dato obtenidos en las pruebas de infiltración se optó por una interpretación basada en el criterio profesional y utilizando como base la geomorfología de la zona, aplicando lo que se conoce como geopedología. La geopedología se refiere a las relaciones entre geomorfología y pedología, con énfasis en la contribución de la primera a la segunda. Es un enfoque dirigido al levantamiento de suelos, combinando criterios geomorfológicos y pedológicos, para establecer unidades de mapeo y analizar la distribución de los suelos en el paisaje. La geomorfología provee los contornos de las unidades de mapeo (el conteniente), mientras que la pedología suministra los componentes taxonómicos de las unidades de mapeo (el contenido) (Zinck, 2012).

Con base en este principio se delimitaron zonas que con características geomorfológicas similares, (principalmente basándose en la pendiente y tipo de drenaje) y a dichas zonas se les adjudicó el valor de la muestra de suelo más cercana. Con base en la metodología anteriormente expuesta también se realizaron los mapas de textura de suelo, infiltración del suelo (figura 57), punto de marchitez, densidad aparente y capacidad de campo.

Para el área de estudio se establecieron 8 zonas que se describen en el cuadro 16 y se muestra en la Figura 58, cuando en una zona hay varias muestras de suelo e infiltración se procedió a promediar los datos, como en la zona 7.

Cuadro 15: Datos de la capacidad de infiltración y el coeficiente de infiltración debido a la textura del suelo, para el área de estudio.

Código de la muestra	Longitud	Latitud	Elevación (m)	Infiltración campo (cm/min)	fc (mm/d)	Kfc	Infiltración de campo (cm/h)
IPJ - 01	613907	50622	33	0,52	7488	1	31,20
IPJ - 02	615321	52780	17	0,43	6192	1	25,80
IPJ - 03	614087	55784	2	0,02	288	0,745	1,20
IPJ - 04	611261	53678	112	0,10	1440	0,997	6,00
IPJ - 05	612243	56709	28	0,16	2304	1	9,60
IPJ - 06	610278	55082	111	0,03	432	0,831	1,80
IPJ - 07	611087	58183	27	0,03	432	0,831	1,80
IPJ - 08	609814	57205	19	0,01	144	0,582	0,60
IPJ - 09	602337	56822	ND	0,03	432	0,831	1,80
IPJ - 10	610103	59284	25	0,01	144	0,582	0,60

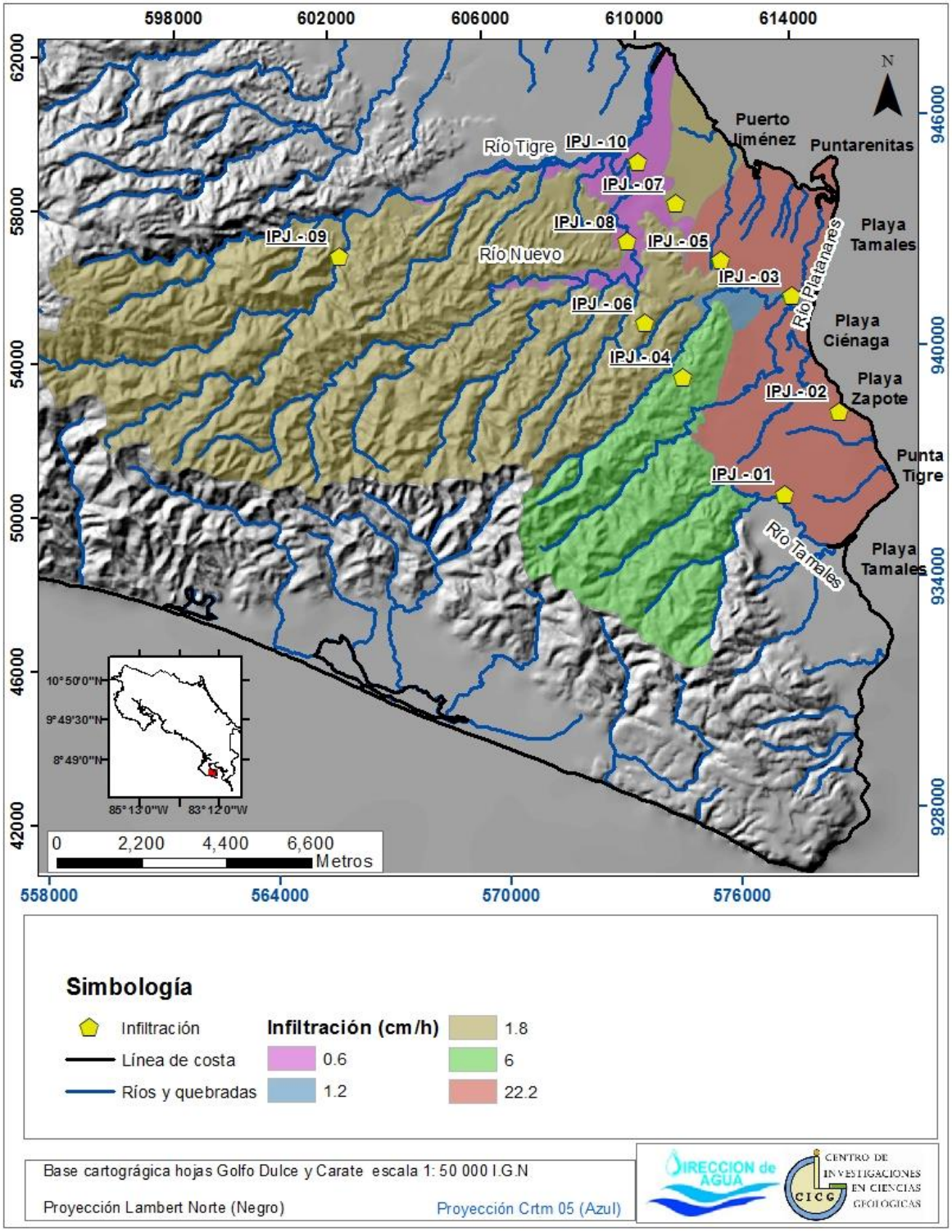


Figura 56: Mapa de la infiltración del suelo del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 16: Datos de los parámetros que describen la categorización de las zonas geopodológicas para el área de estudio.

Código	Uso suelo	Prof. raíces	Textura suelo	CC	PM	D.apar. g/cm³	D.real g/cm³	Kfc	Muestras
Zgeop 1	Bosque	500	FAL	37,45	21,33	1,09	2,11	0,997	IPJ - 04
Zgeop 2	Bosque	2000	FA a	31,73	20,49	1,16	2,24	0,831	IPJ - 09
Zgeop 3	Pastos	50	FAL	38,94	20,63	1,11	2,13	0,582	IPJ - 08
Zgeop 4	Pastos	300	FA	38,25	21,46	1,08	2,09	0,582	IPJ - 10
Zgeop 5	Pastos	50	FAL	38,01	21,09	1,09	2,07	0,831	IPJ - 07
Zgeop 6	Pastos	50	Fa	22,65	16,57	1,22	2,34	0,745	IPJ - 03
Zgeop 7	Cultivos	2000	Fa	21,2	15,4	1,23	2,31	1	IPJ - 01, IPJ - 02 y IPJ - 04
	Pastos	50	Fa	21,2	15,4	1,23	2,31	1	IPJ - 01, IPJ - 02 y IPJ - 05
Zgeop 8	Bosque	500	FAL	37,98	20,84	1,11	2,09	0,831	IPJ - 06

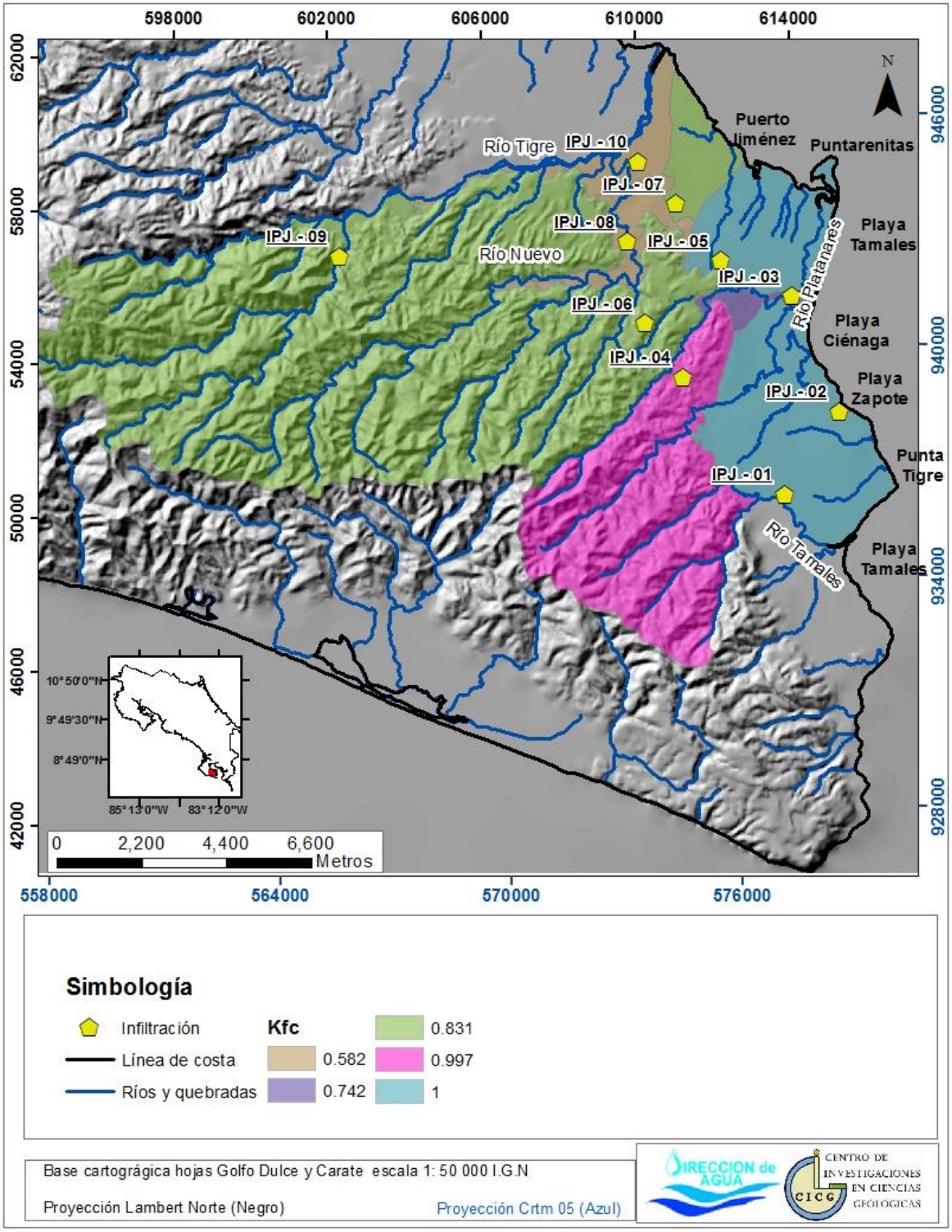


Figura 57: Mapa de distribución de la infiltración con sus respectivos valores de Kfc para la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

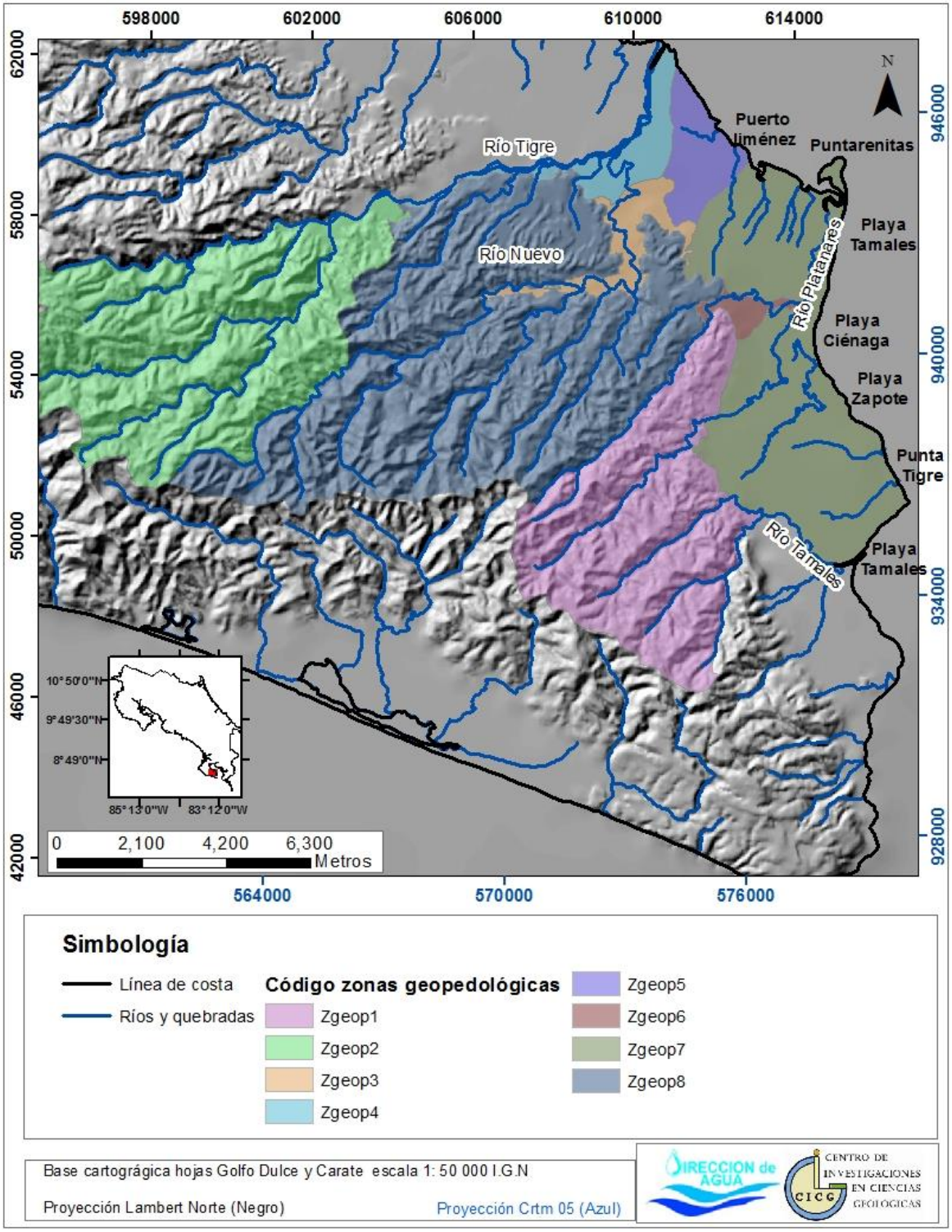


Figura 58: Mapa de zonas geopodológicas para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

7.1.1.5. Parámetros del suelo

Mediante la observación de campo, se determinó que la génesis de los suelos en el sector montañoso es producto de la meteorización de los materiales sedimentarios pertenecientes al Grupo Charco Azul, a excepción de un sector montañoso en la parte alta del Río Tigre, donde el suelo es producto de la meteorización de los basaltos del Complejo Osa. La planicie costera cuenta con suelos arenoso producto de materiales recientes tal y como lo reporta Zamora (2007).

La distribución de los puntos de muestreo se realizó en función a las posibilidades reales de acceso a las propiedades y a la presencia de fuentes de agua cercana para utilizarlas en los ensayos de infiltración.

El análisis textural de los suelos por medio del laboratorio, se ha realizado con base en los criterios del departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA), la figura 59 muestra los resultados obtenidos según su distribución espacial.

Para el área de estudio se identificaron cuatro tipos de suelo, franco arcilloso (FA), franco arcilloso limoso (FAL), franco arcillosos arenoso (FAa) y franco arenoso (Fa). Los suelos franco arcillosos se encuentran en la margen del Río Tigre en la parte baja de la cuenca, mientras que en la parte alta de la cuenca, asociados al Complejo Osa, se encuentran los suelos franco arcillo arenoso. Los suelos franco arcillo limosos constituyen la mayor parte del sector montañoso y un segmento de la planicie costera, mientras que el resto de la planicie costera corresponde con suelos franco arenosos.

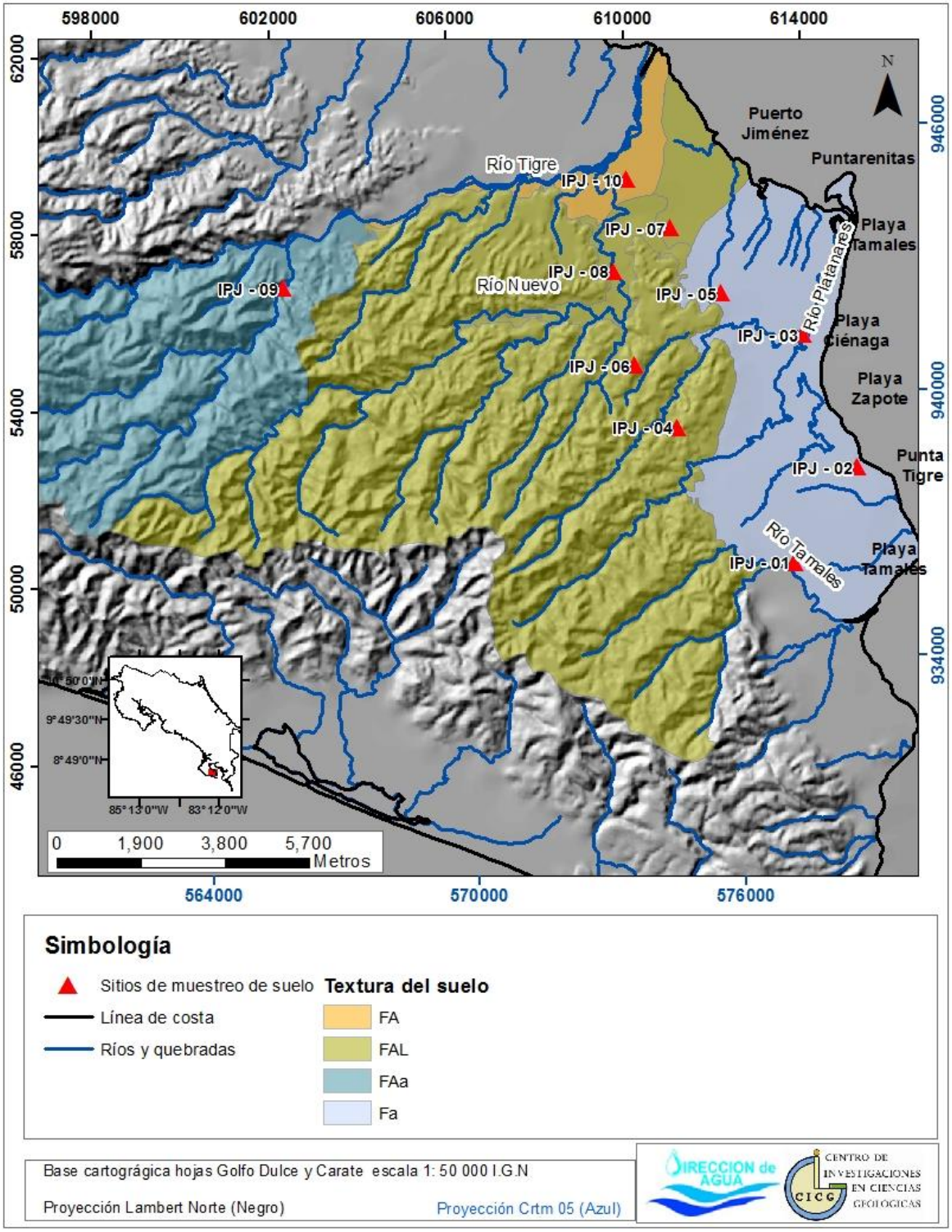


Figura 59: Mapa de la textura del suelo para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

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:

$$Ch = (HS – PM – CC) / (CC – PM)$$

Donde:

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

Las figuras 60, 61 y 62 muestran la variación espacial calculada de la capacidad de campo, punto de marchitez y densidad aparente, para el área de estudio, mediante muestreos y ensayos de laboratorio, e interpoladas por medio del criterio profesional con base en geomorfología.

De esta manera se puede decir que los valores de capacidad de campo varían entre 21,2 y 38,94 y los de punto de marchitez varían entre 15,4 y 21,46. Siendo los suelos francos arenosos los más de menores valores mientras que los suelos francos arcillosos los de mayor valor.

Por su parte, la densidad aparente varía entre 1,23 y 1,08, al contrario que con los anteriores parámetros, los suelos arenosos son más densos que los arcillosos.

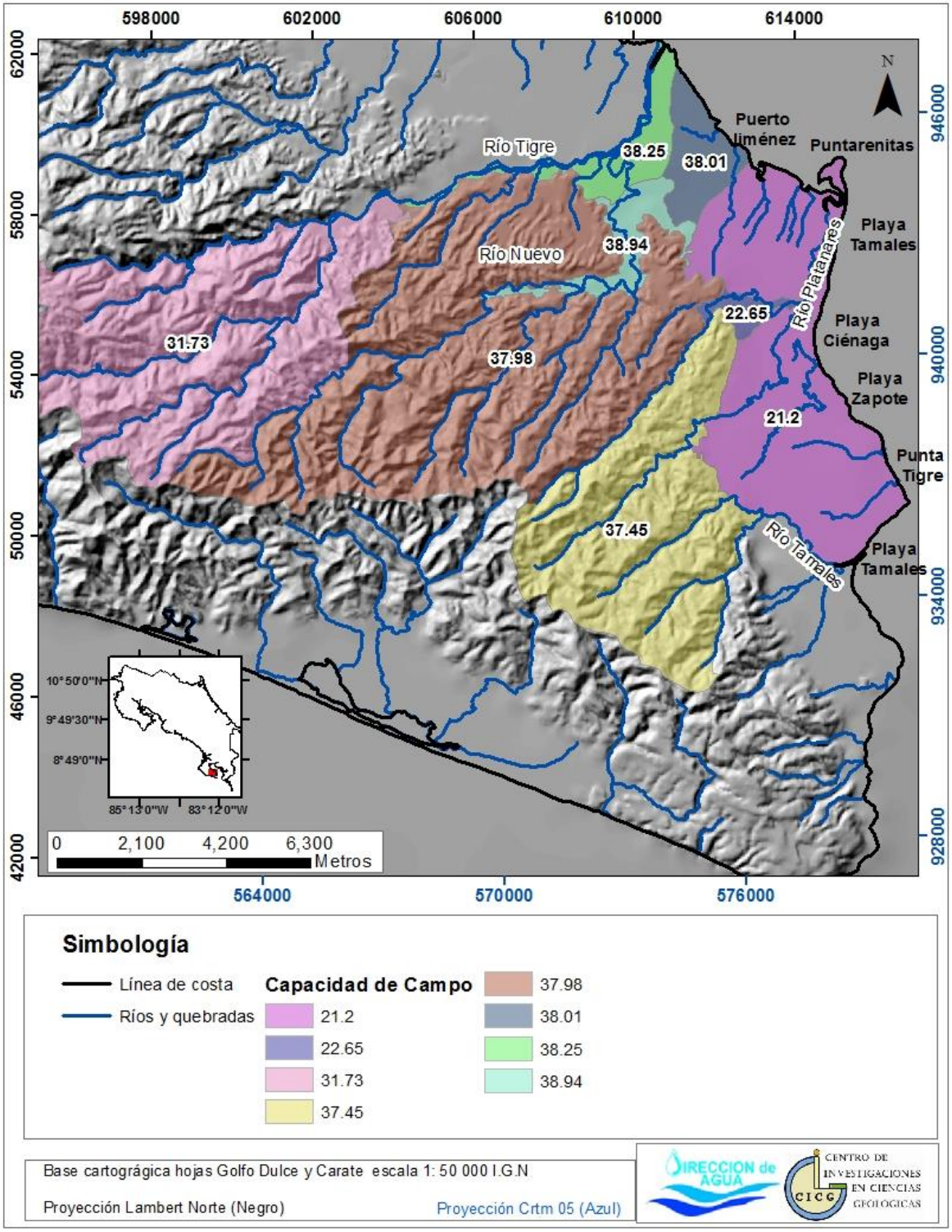


Figura 60: Mapa de la distribución espacial de la capacidad de campo (CC) en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

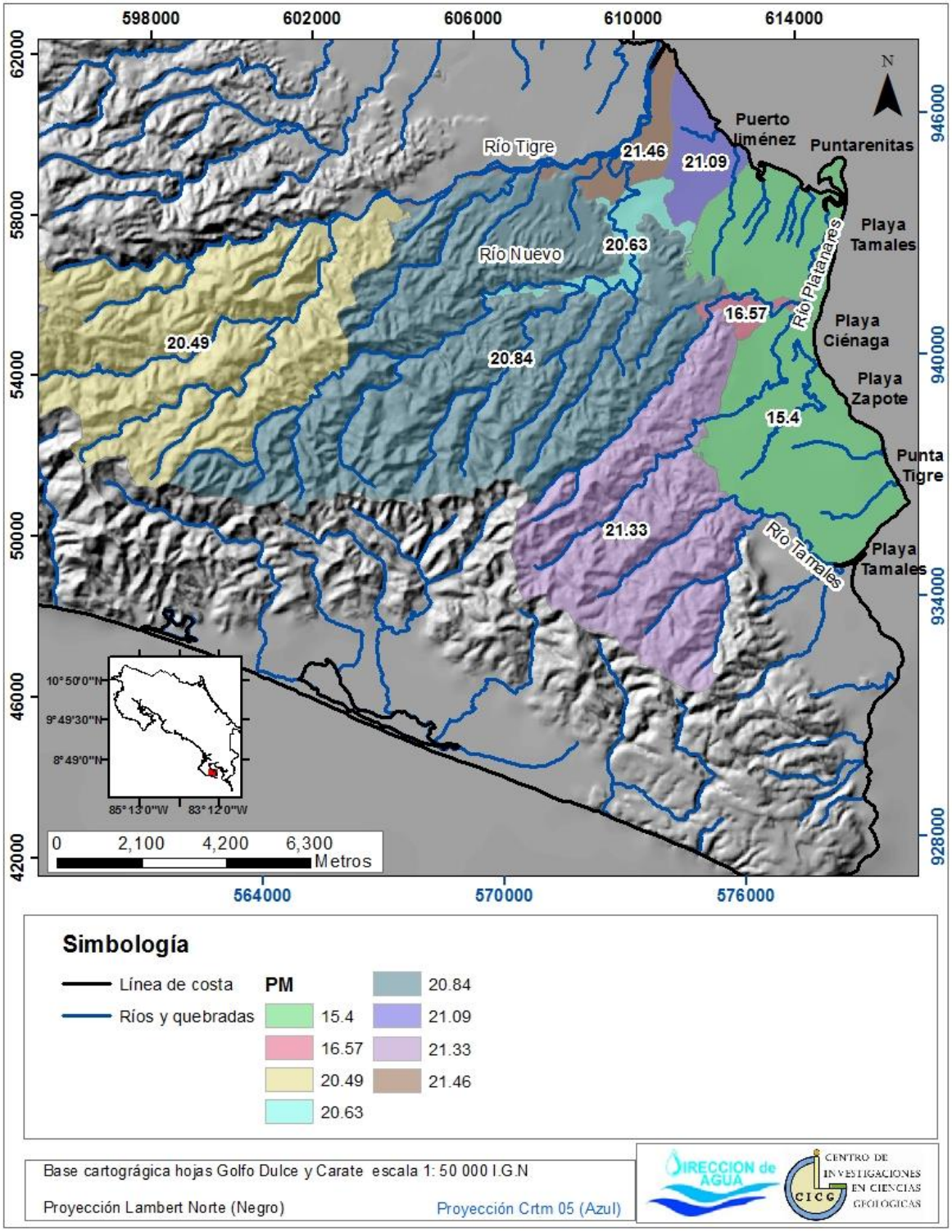


Figura 61: Mapa de distribución del punto de marchitez (PM) en el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

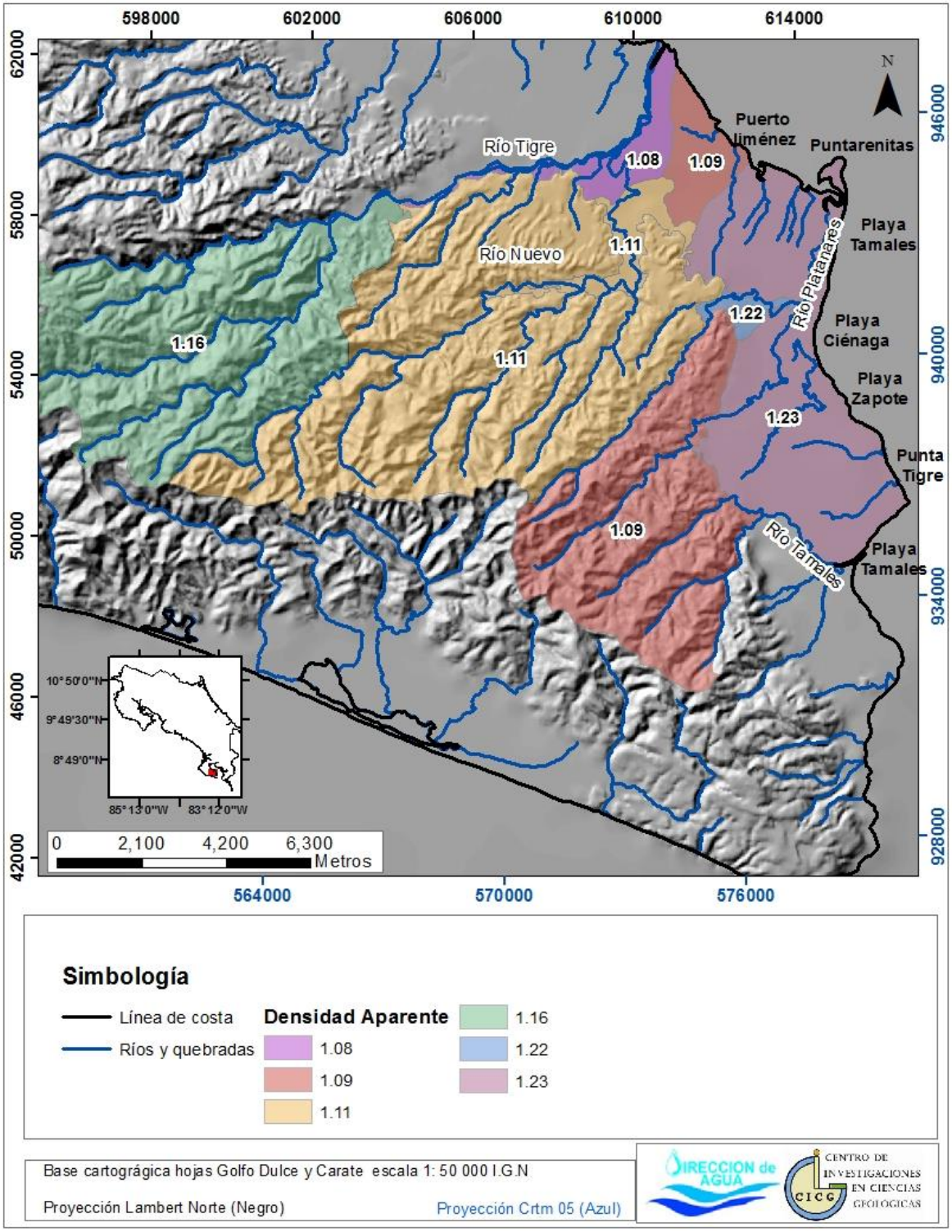


Figura 62: Mapa de distribución de la densidad aparente (DA) para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

7.1.1.6. 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:

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

Donde:

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).

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

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 la estación meteorológica Finca El Patio.

7.1.2. Zonas del balance hídrico de la zona

Para aplicar un balance hídrico de suelos es necesario que se den una serie de condiciones específicas de una zona de estudio, sin embargo la aplicación de un balance implica definir zonas o áreas específicas que a la vez sean únicas en todo el cantón, lo cual deriva no en un balance regional sino en varios balances, conforme más diferenciado esté el área en función a sus características hidrológicas. En este caso, se tomaron en cuenta cuatro factores: la precipitación, la pendiente, el uso de suelo y la capacidad de infiltración de los suelos. Se obtuvo un total de 42 zonas para el área de estudio, sin contar las áreas NA, donde no hay recarga porque se trata de la zona urbana o cuerpos de agua como estero y lagos, las mismas se muestran en la figura 63.

Una vez analizados cada uno de los componentes del balance mediante un análisis en sistemas de información geográfica, se determinan las distintas zonas del balance las cuales presentan características específicas para el área de estudio, tal y como se expusieron previamente en el Cuadro 17: Resultados del balance hídrico, utilizando la metodología de Schosinsky (2006), para el área de estudio.

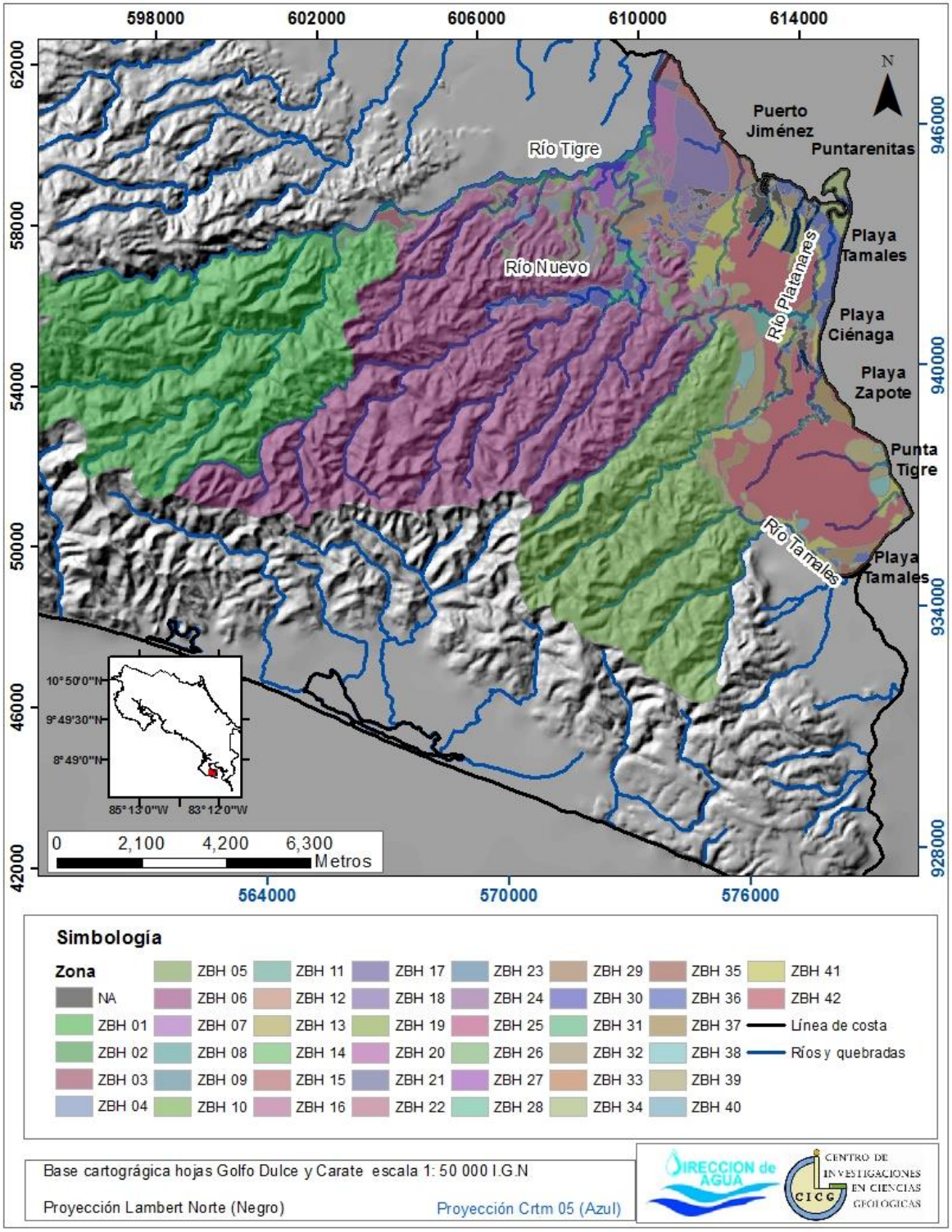


Figura 63: Mapa de distribución de las zonas definidas del balance hídrico para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

7.2. Resultados

La recarga potencial anual del área de estudio obtenida mediante el balance hídrico de suelos de Schosinsky (2006) varía entre 984, 51 a 1874, 75 mm. De acuerdo con el mapa de recarga potencial mostrado en la figura 64 y en el cuadro 17 se pueden afirmar tres categorías de recarga. Las recargas bajas varían entre 984,51 a 1450 mm y están distribuidas en la llanura fluvial del río Nuevo y en la parte baja y alta de la subcuenca del río Tigre, asociadas a suelos más arcillosos. La parte intermedia se extiende en los alrededores del centro de Puerto Jiménez y el sector montañoso (entre 1451 a 1650 mm). Mientras que la mayor infiltración ocurre en la planicie costera, con los suelos más arenosos.

Sobre el porcentaje de precipitación que recarga, la figura 65 muestra que el porcentaje varía entre 20 y 46,57 %. Los mayores porcentajes se sitúan en la parte montañosa sur y la planicie costera.

El balance hídrico nos permite conocer la recarga potencial por áreas en mm. Sabemos que:

$$1\ mm = \frac{1\ L}{m^2}$$

Entonces si convertimos los datos de recarga a potencial m. Tenemos que:

$$1\ mm = \frac{1\ L}{m^2}\ x\ \frac{1\ m^3}{1000\ L} = 1\ x\ 10^{-3}\ m$$

Entonces al multiplicar la recarga potencial en mm por $1\ x\ 10^{-3}\ m$, se obtiene la recarga en metros. Y para calcular la recarga en metros cúbicos debemos multiplicar este valor por el área en metros cuadrados.

De esta manera para toda el área de estudio se tiene una recarga potencial de 221 126 465,07 m3. De los cuales 153 931 198, 27 m3 (69,61% de la recarga de toda el área de estudio) corresponden al sector montañoso, que recargan acuíferos colgados del Grupo Charco Azul (no objeto de estudio en esta investigación) y 67 195 266, 81 m3 (30,39% de la recarga de toda el área de estudio) recargan el acuífero aluvial costero dentro del área de estudio.

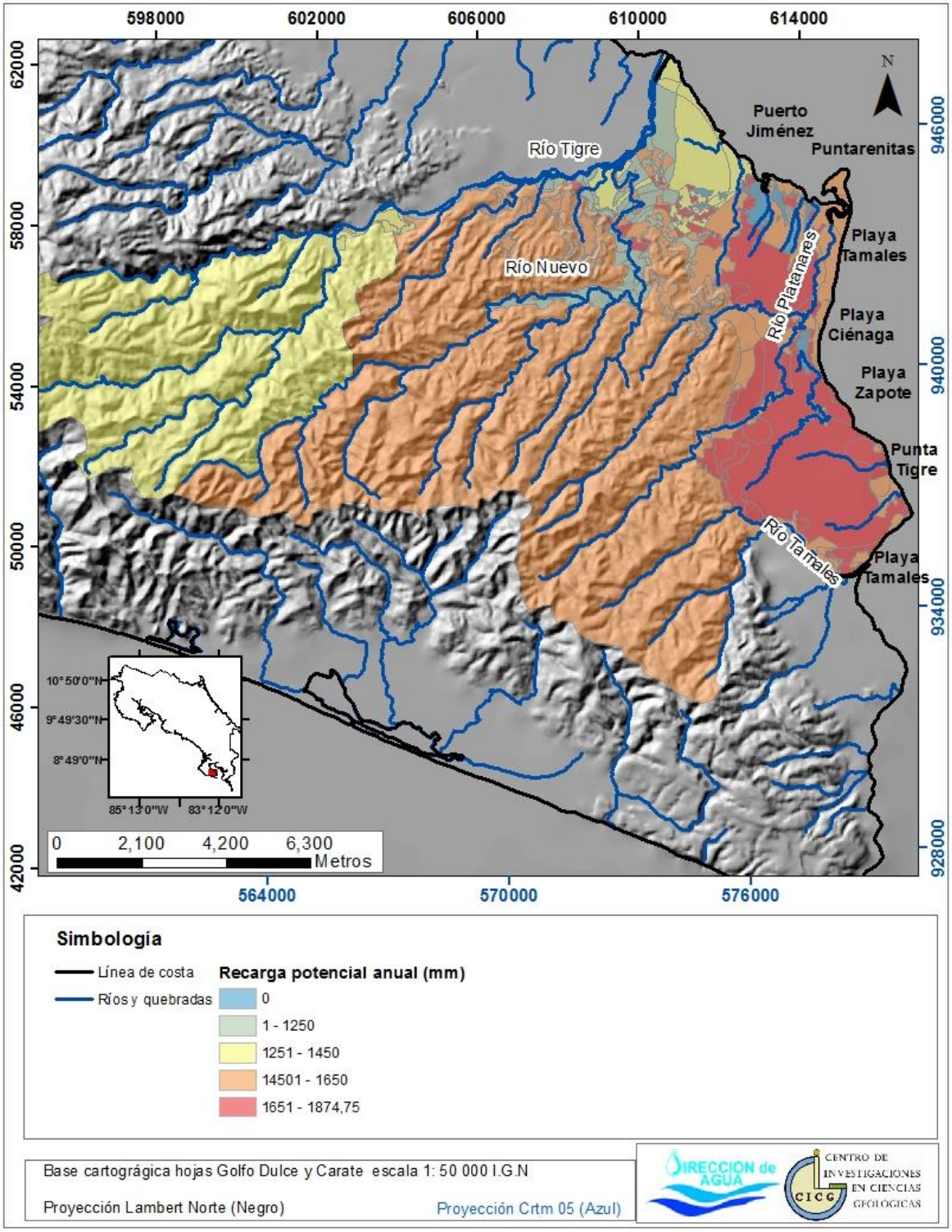


Figura 64: Mapa de recarga potencial anual en cada zona utilizada en el balance hídrico de suelos para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 17: Resultados del balance hídrico, utilizando la metodología de Schosinsky (2006), para el área de estudio.

Código de zonificación	Precipitación Anual	Textura	Infiltración promedio (mm/d)	CC	PM	Da	Kp	Uso Suelo	Kv	Prof. Raíz	Recarga potencial anual (mm)	Precipitación que recarga potencialmente (%)
ZBH 01	4025,7	FA a	432	31,73	20,49	1,16	0,06	Bosque	0,2	2000	1403,36	34,86
ZBH 02	4025,7	FA a	432	31,73	20,49	1,16	0,1	Bosque	0,2	2000	1403,36	34,86
ZBH 03	4025,7	FA a	432	31,73	20,49	1,16	0,15	Bosque	0,2	2000	1403,36	34,86
ZBH 04	4025,7	FAL	432	37,98	20,84	1,11	0,15	Bosque	0,2	500	1499,04	37,24
ZBH 05	4025,7	FAL	432	37,98	20,84	1,11	0,1	Bosque	0,2	500	1499,04	37,24
ZBH 06	4025,7	FAL	432	37,98	20,84	1,11	0,06	Bosque	0,2	500	1499,04	37,24
ZBH 07	4025,7	FAL	432	37,98	20,84	1,11	0,06	Cultivos	0,1	1500	1655,49	41,12
ZBH 08	4025,7	FAL	432	37,98	20,84	1,11	0,1	Cultivos	0,1	1500	1686,57	41,90
ZBH 09	4025,7	FAL	432	37,98	20,84	1,11	0,06	Pastos	0,18	50	1868,80	46,42
ZBH 10	4025,7	FAL	1440	37,45	21,33	1,09	0,06	Bosque	0,2	1500	1647,18	40,92
ZBH 11	4025,7	Fa	288	22,65	16,57	1,22	0,15	Bosque	0,2	1500	1492,41	37,07
ZBH 12	4025,7	Fa	288	22,65	16,57	1,22	0,1	Bosque	0,2	1500	1492,41	37,07
ZBH 13	4025,7	Fa	288	22,65	16,57	1,22	0,2	Bosque	0,2	1500	1492,41	37,07
ZBH 14	4025,7	FAL	432	38,01	21,09	1,09	0,3	Bosque	0,2	1500	1395,35	34,66
ZBH 15	4025,7	FAL	432	38,01	21,09	1,09	0,2	Bosque	0,2	1500	1395,35	34,66
ZBH 16	4025,7	FAL	432	38,01	21,09	1,09	0,2	Pastos	0,18	50	1869,10	46,43
ZBH 17	4025,7	FAL	432	38,01	21,09	1,09	0,15	Pastos	0,18	50	1869,10	46,43
ZBH 18	4025,7	FAL	432	38,01	21,09	1,09	0,15	Bosque	0,2	1500	1395,35	34,66
ZBH 19	4025,7	FA	144	3825	21,46	1,08	0,1	Bosque	0,2	1500	1056,59	26,25
ZBH 20	4025,7	FA	144	38,25	21,46	1,08	0,15	Bosque	0,2	1500	1200,62	29,82

ZBH 21	4025,7	FA	144	38,25	21,46	1,08	0,2	Bosque	0,2	1500	1344,65	33,40
ZBH 22	4025,7	FA	144	38,25	21,46	1,08	0,3	Bosque	0,2	1500	1397,64	34,72
ZBH 23	4025,7	FA	144	38,25	21,46	1,08	0,2	Pastos	0,18	300	1698,80	42,20
ZBH 24	4025,7	FA	144	38,25	21,46	1,08	0,15	Pastos	0,18	300	1543,88	38,35
ZBH 25	4025,7	FA	144	38,25	21,46	1,08	0,1	Cultivos	0,1	1500	995,62	24,73
ZBH 26	4025,7	FA	144	38,25	21,46	1,08	0,15	Cultivos	0,1	1500	1152,16	28,62
ZBH 27	4025,7	FA	144	38,25	21,46	1,08	0,2	Cultivos	0,1	1500	1310,59	32,56
ZBH 28	4025,7	FAL	144	38,94	20,63	1,11	0,15	Cultivos	0,1	1500	1137,24	28,25
ZBH 29	4025,7	FAL	144	38,94	20,63	1,11	0,1	Cultivos	0,1	1500	984,51	24,46
ZBH 30	4025,7	FAL	144	38,94	20,63	1,11	0,1	Bosque	0,2	1500	1044,23	25,94
ZBH 31	4025,7	FAL	144	38,94	20,63	1,11	0,15	Bosque	0,2	1500	1185,92	29,46
ZBH 32	4025,7	FAL	144	38,94	20,63	1,11	0,15	Pastos	0,18	50	1654,78	41,11
ZBH 33	4025,7	FAL	144	38,94	20,63	1,11	0,1	Pastos	0,18	50	1486,89	36,93
ZBH 34	4025,7	Fa	5328	21,2	15,4	1,23	0,3	Bosque	0,2	1500	1495,76	37,16
ZBH 35	4025,7	Fa	5328	21,2	15,4	1,23	0,3	Pastos	0,18	50	1874,75	46,57
ZBH 36	4025,7	Fa	5328	21,2	15,4	1,23	0,2	Bosque	0,2	1500	1495,76	37,16
ZBH 37	4025,7	Fa	5328	21,2	15,4	1,23	0,2	Pastos	0,18	50	1874,75	46,57
ZBH 38	4025,7	Fa	5328	21,2	15,4	1,23	0,1	Bosque	0,2	1500	1495,76	37,16
ZBH 39	4025,7	Fa	5328	21,2	15,4	1,23	0,1	Pastos	0,18	50	1874,75	46,57
ZBH 40	4025,7	Fa	5328	21,2	15,4	1,23	0,15	Cultivos	0,1	2000	1760,34	43,73
ZBH 41	4025,7	Fa	5328	21,2	15,4	1,23	0,15	Bosque	0,2	1500	1495,76	37,16
ZBH 42	4025,7	Fa	5328	21,2	15,4	1,23	015	Pastos	0,18	50	1874,75	46,57

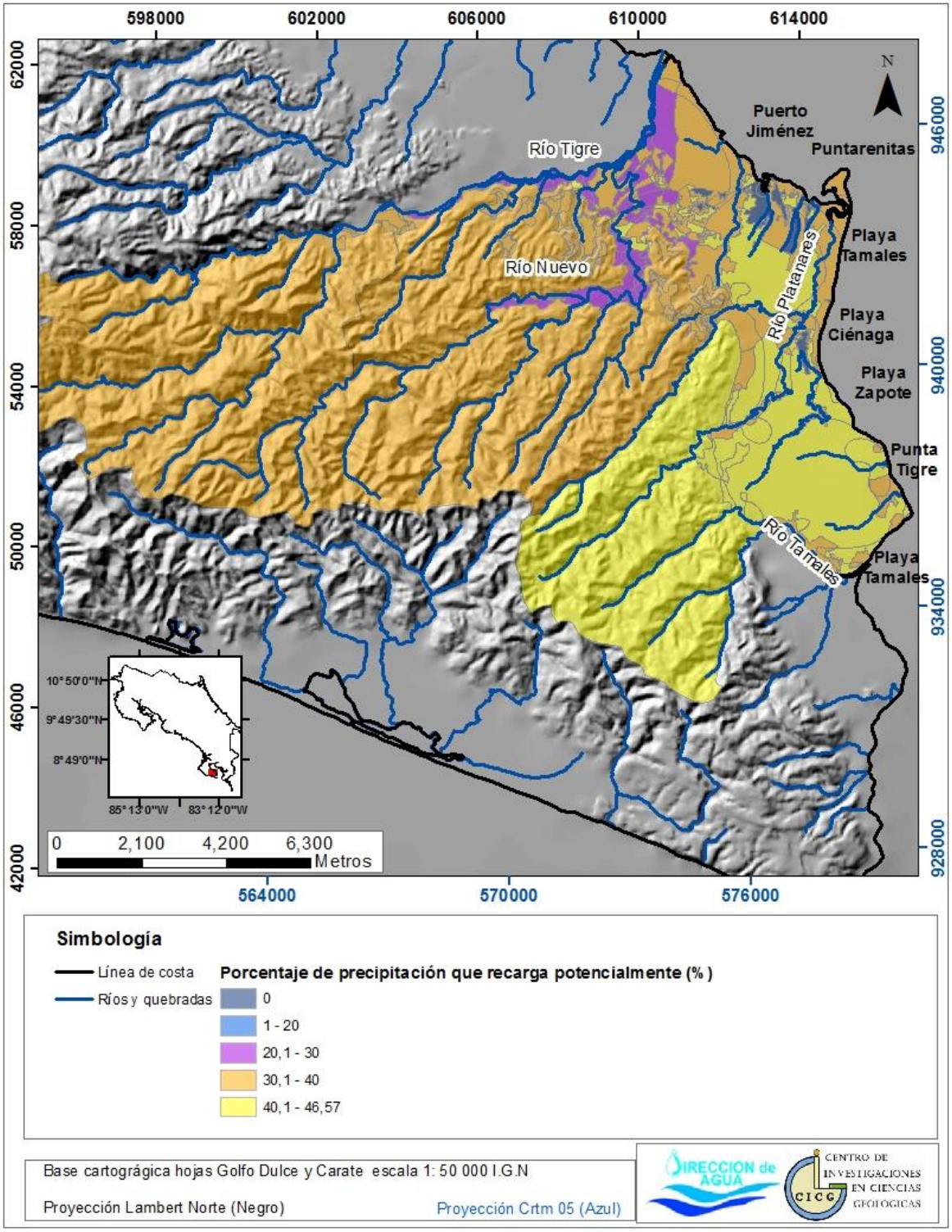


Figura 65: Mapa de porcentaje de recarga potencial anual en cada zona utilizada en el balance hídrico de suelos para el área de estudio. Fuente Elaboración propia.

8. PROTECCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

8.1. Concepto de vulnerabilidad hidrogeológica

Este apartado es un aporte del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas a proyecto, pues no estaba contemplado dentro de los términos de referencia pactados.

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, se considera que 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.

Valoración de la vulnerabilidad hidrogeológica

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.

8.2. Uso de los mapas de vulnerabilidad hidrogeológica

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.

8.3. La 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 para la descripción de la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación.

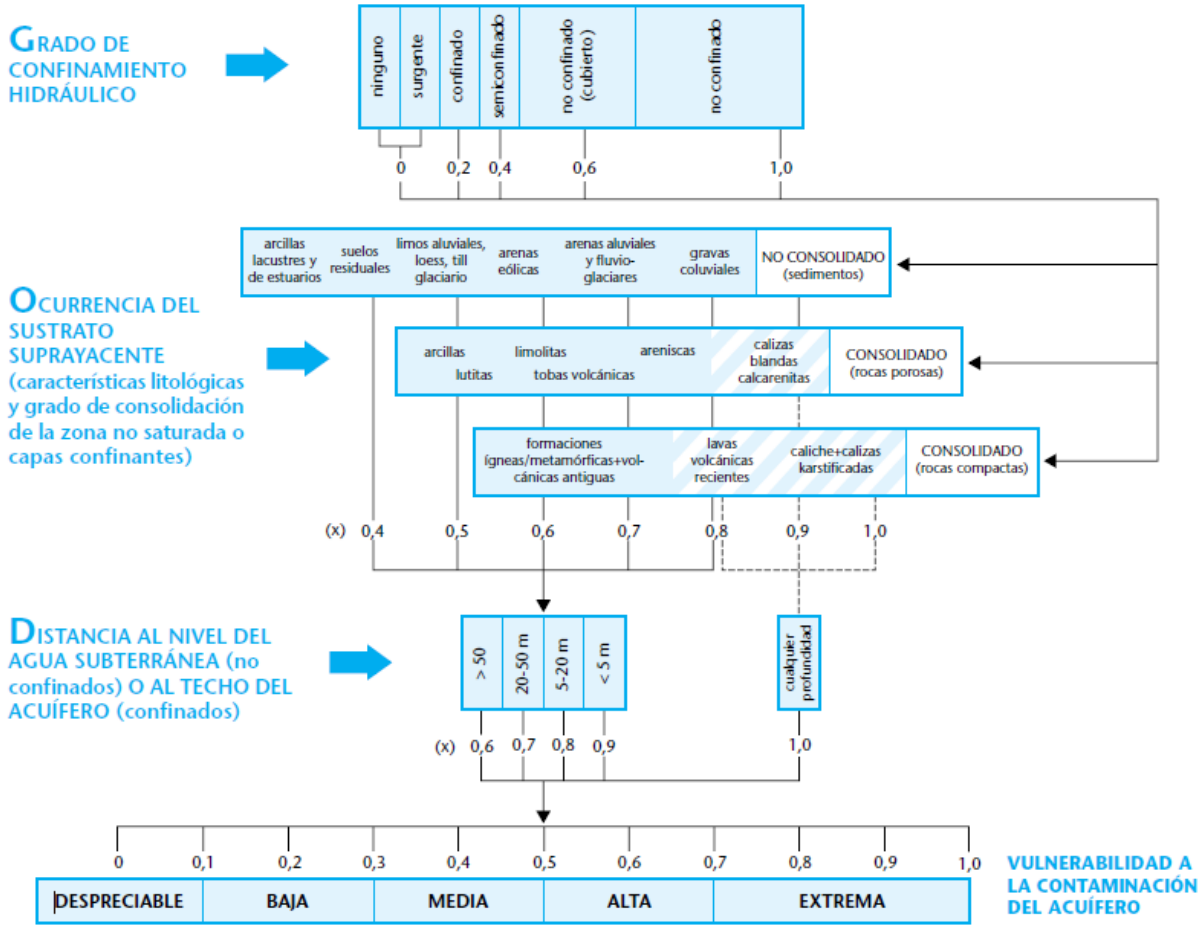


Figura 66: Diagrama para determinar la vulnerabilidad con la metodología GOD. Fuente: Foster et al. (2002).

8.4. Determinación de la vulnerabilidad hidrogeológica para la Unidad Hidrogeológica Puerto Jiménez

A partir del modelo conceptual hidrogeológico se procedió a calcular el índice de vulnerabilidad utilizando la metodología GOD. El acuífero aluvial en estudio presenta un confinamiento hidraúlico de tipo libre con una profundidad del agua a partir de los 0,5 m, cubierto solamente por un suelo arenoso color gris, el cálculo utilizando la metodología GOD se muestra en el cuadro 18 y figura 67.

Cuadro 18: Cálculo del índice de vulnerabilidad hidrogeológica para la Unidad Hidrogeológica Puerto Jiménez

Parámetro	Unidad Hidrogeológica Puerto Jiménez
Grado de confinamiento Hidráulico	Libre no cubierto
Valor	1
Ocurrencia del sustrato suprayacente	Suelo arenosos color gris
Valor	0,55
Distancia al agua (m)	< 5m
Valor	0,9
Índice de vulnerabilidad	0,495
Valoración	Vulnerabilidad Moderada

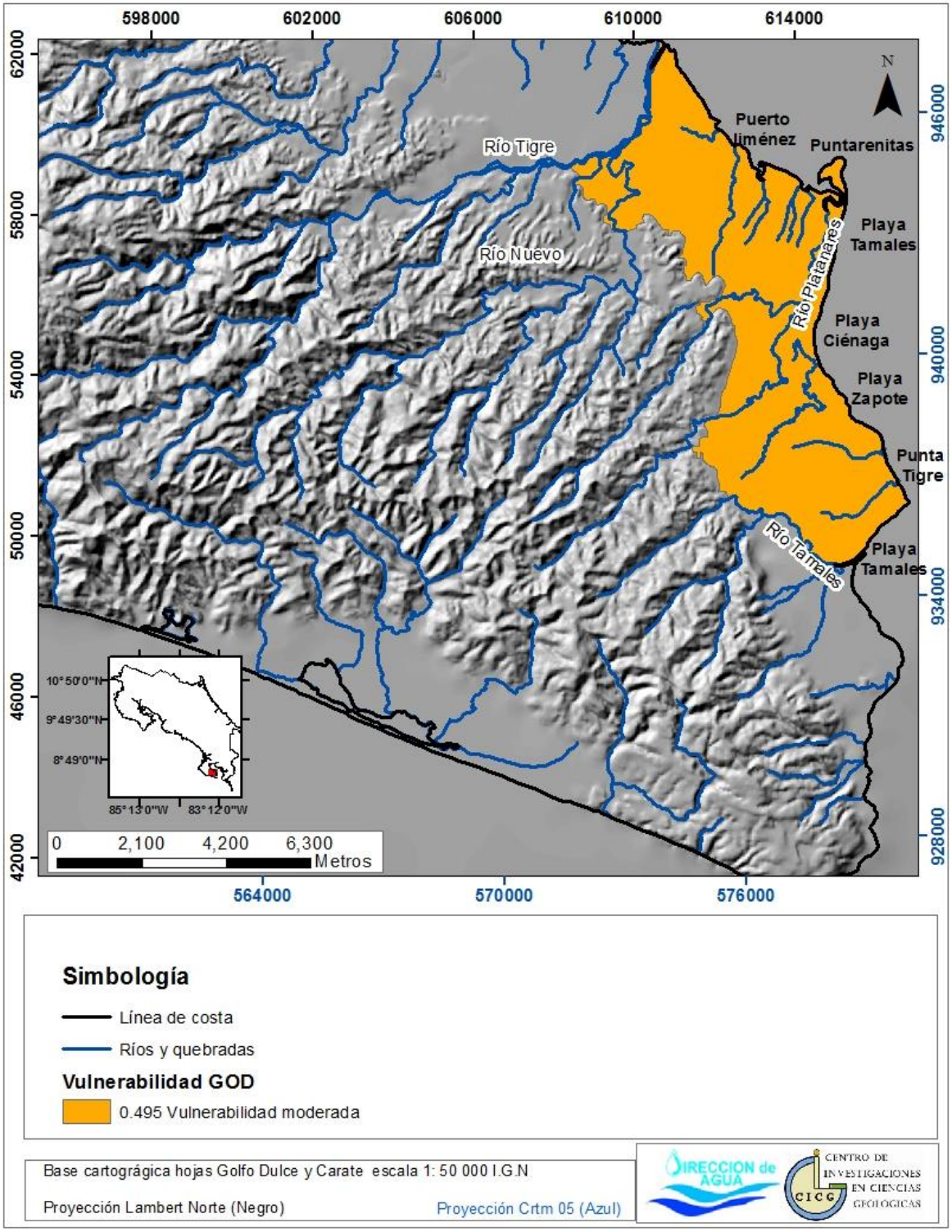


Figura 67: Mapa de vulnerabilidad hidrogeológica para el área de estudio, utilizando la metodología GOD. Fuente: Elaboración propia.

8.5 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; entre otros.

Los principales objetivos de una estrategia 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.

En el caso de Puerto Jiménez es necesario considerar los siguientes factores:

- La gran cantidad de pozos artesanales (no cuentan con rejilla ni con la infraestructura adecuada para el monitoreo de calidad del agua) y privados (cuyos propietarios no fueron siempre anuentes a colaborar).
- Al vacío de información en la margen derecha del río Tigre, alrededores de la desembocadura del río Platanares y en el sector norte del río Tamales.
- A que la zona de estudio al ser cercana al mar y presentar varios esteros es vulnerable a la contaminación salina.
- Y a que se contabilizaron al menos cuatro hoteles cercanos o dentro de la zona marítima terrestre abastecidos por varios pozos a los cuales no siempre hubo acceso y no se encuentran registrados en el SENARA.

Se propone construir una red de monitoreo de pozos con los siguientes objetivos:

- Delimitar las equipotenciales y líneas de flujo dentro del área de estudio.
- Mantener una red de monitoreo permanente, con la infraestructura adecuada, que permita a los funcionarios de la Dirección de Aguas acceder cuando se requiera y ejecutar un programa de monitoreo de niveles, cantidad y calidad de agua del subterránea en el acuífero aluvial somero.
- Estudiar y monitorear la calidad del agua subterránea en el centro poblacional de Puerto Jiménez, debido al posible riesgo de contaminación salina (*sensu estricto*) por parte de los estuarios, así como contaminación por aguas negras o residuales del centro poblacional que no cuenta con una red de alcantarillado ni planta de tratamiento.

La red de monitoreo propuesta (figura 68) cuenta con 26 pozos, de los cuales se pretende que cuenten con recuperación de núcleos de perforación al menos 13 pozos (Cuadro 19). Como el estudio va dirigido a estudiar el acuífero aluvial somero, la profundidad de las perforaciones debe ser hasta llegar a las intercalaciones de la formación Peñita.

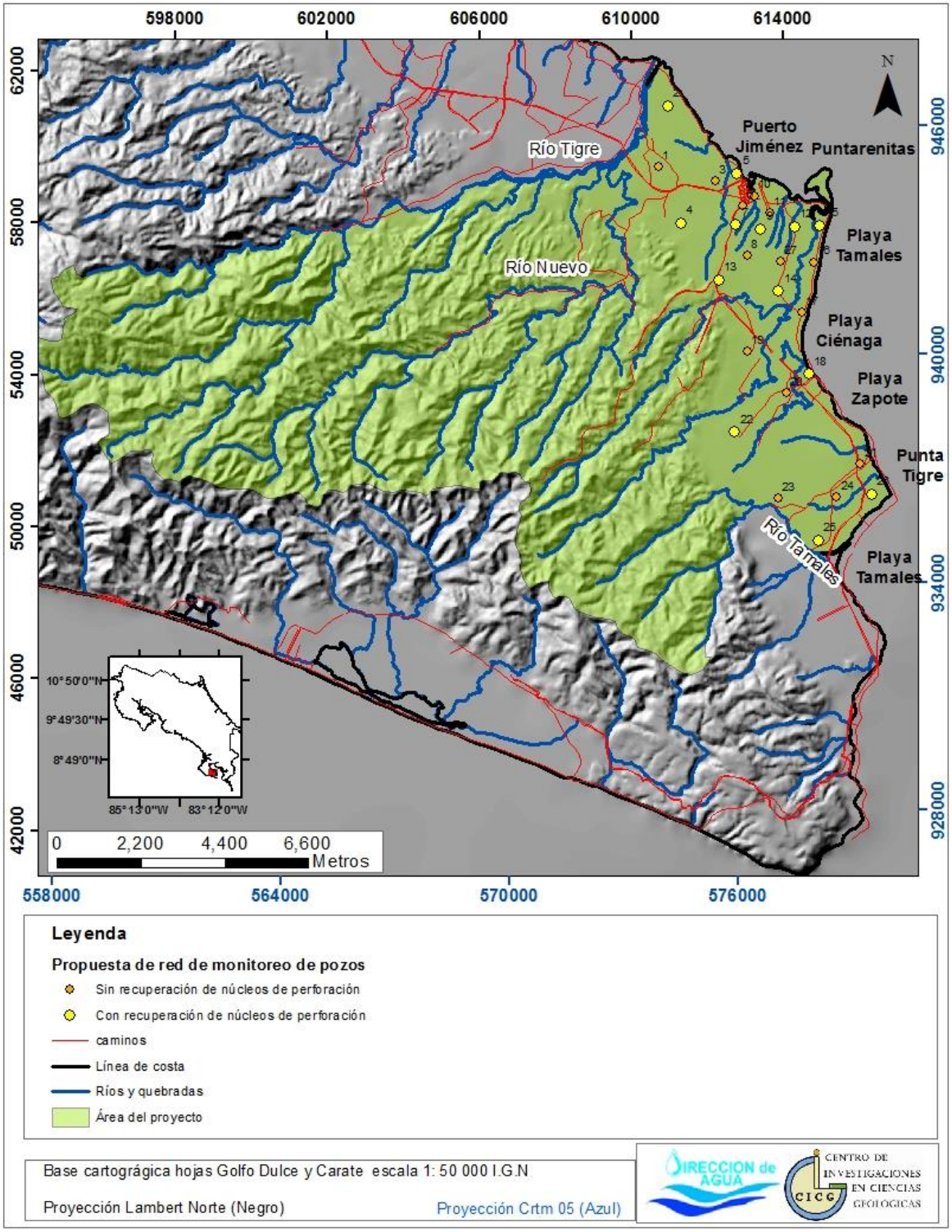


Figura 68: Propuesta de la red de monitoreo de pozos para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 19: Sitios propuestos para la perforación de piezómetros que sirvan para la red de monitoreo del agua subterránea del acuífero aluvial.

Número de pozo	Requiere recuperación de núcleo	Longitud Lambert N	Latitud Lambert N	Localidad
1	No	610723,48	59467,86	Noreste de Río Nuevo
2	Si	610964,67	61055,71	Este de la desembocadura del Río Tigre
3	No	612210,83	59085,97	Oeste de poblado de Puerto Jiménez
4	Si	611306,36	57980,51	Oeste de la Quebrada Ignacia
5	Si	612781,57	59283,55	Norte de poblado de Puerto Jiménez
6	No	612927,09	58423,65	Sur de poblado de Puerto Jiménez
7	Si	612760,40	57928,88	Por el Centro de Cuido de Persona Adulta Mayor de Puerto Jiménez
8	No	613064,67	57112,64	Norte del Río Corozal
9	Si	613405,99	57819,87	Entre Quebrada Cacao y Estero Pueblo Nuevo
10	No	613255,17	58694,06	Puerto Jiménez
11	No	613659,99	58241,62	Aeropuerto
12	Si	614302,92	57880,99	Este de Estero Conte
27	No	613925,72	56971,35	Sur de Estero Conte
13	Si	612313,37	56483,64	Cerca de la intersección entre la carretera y el Río Corozal
14	Si	613887,44	56185,31	Norte del Río Corozal y Oeste del Río Platanares
15	Si	614974,31	57913,86	Desembocadura del Río Platanares
16	No	614810,26	56950,78	Playa Tamales
17	No	614487,47	55632,09	Playa Ciénaga
18	Si	614677,97	54003,31	Entre Playa Ciénaga y Playa Zapote
19	No	613061,89	54594,00	Norte del Río Platanares
20	No	614080,54	53509,20	Oeste de Quebrada Ciénaga
21	No	616038,46	51643,89	Entre Quebrada Colorada y Quebrada Tigre
22	Si	612731,16	52477,33	Entre Río Platanares y Quebrada Ciéaga
23	No	613868,87	50744,30	Norte de Río Tamales
24	No	615416,69	50757,53	Norte de Quebrada Tigre
25	Si	614927,21	49633,05	Desembocadura del Río Tamales
26	Si	616329,50	50836,91	Punta Tigre

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.

Los parámetros que se pueden medir en el laboratorio en función del presupuesto del proyecto son: contenido bacteriológico, conductividad eléctrica, sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos suspendidos, alcalinidad parcial, alcalinidad total, dureza total, dureza de carbonatos, dureza de no carbonatos, calcio, magnesio, cloruros, sulfatos, sílice, amonio, hierro total, fósforo, cianuro, plomo, mercurio, bromuros, sodio, fluoruros y nitratos. Como mínimo es imperativo que se midan los parámetros establecidos en los niveles N_1 y N_2 del Reglamento de Calidad de Agua vigente.

Dependiendo de los objetivos, características y costos del programa de monitoreo los parámetros físicos se deberían medir cada mes. Si esto no fuera posible por los costos, al menos es indispensable realizar un monitorio de los parámetros dos veces al año. Una a mediados de la época lluviosa (alrededor de octubre) y otra a mediados de la época seca (marzo).

Los parámetros de calidad de agua, a no ser que se detecte algún indicio de contaminación existente (en cuyo caso se debería muestrear y analizar cada mes), es factible tomar las muestras para el análisis trimestralmente.

Con respecto a los pozos ubicados en la zona aluvial, se recomienda realizar dos mediciones, una en marea alta y la otra en marea baja, con el fin de determinar si existen cambios en los parámetros de conductividad, temperatura y nivel del agua, que indiquen una influencia directa del océano o una posible variación en la salinidad.

Lógicamente si en algún momento se observa un cambio en los patrones que se consideren línea base, se recomienda que los muestreos se realicen con mayor frecuencia. Así mismo; si se identificada una fuente real de contaminación, se debe aumentar el periodo de muestreo e incluso ampliar la gama de parámetros analizados.

9. CONCLUSIONES

Contexto regional

La zona de estudio se sitúa en la Península de Osa y corresponde con el área definida entre los ríos Tigre y Tamales hasta las divisorias de agua del sector montañoso. En total la zona de estudio tiene una extensión de 173,64 km^2.

El régimen hidrológico del área de estudio está definido por la estación meteorológica Finca El Patio, el periodo lluvioso abarca los meses entre mayo y noviembre, siendo octubre el de mayor precipitación alcanzando los 741,5 mm. La época seca transcurre entre diciembre y abril, siendo febrero el de menor precipitación con 56,8 mm. La cantidad de días con lluvia varían entre 10 a 29. Las temperaturas máximas alcanzan los 33,8°C y las mínimas los 22,22 °C. Mientras que la humedad es siempre superior al 80%.

El área de estudio está conformada por tres subcuencas, descritas a continuación: subcuenca del Río Tigre situada al Norte del área de estudio, tiene una extensión de 104 Km^2, y constituye el 59,9% del área de estudio. El patrón de drenaje (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) de la subcuenca es subdendrítico en la parte alta y media, y es meándrico y entrelazado en la parte baja de la subcuenca. La subcuenca Río Platanares se ubica en la parte central del área de estudio e incluye el poblado de Puerto Jiménez, abarca un área de 47, 8 Km^2 que corresponde con un 27,5% del área de estudio. El patrón de drenaje es paralelo subdendrítico. La subcuenca del Río Tamales dentro del área de estudio involucra solamente la margen izquierda de dicho río, se extiende 21,97 Km^2 lo que corresponde con un 12,63% del área del proyecto. El patrón de drenaje es de tipo pinado y presenta una dirección suroeste – noreste, desembocando paralelamente a la línea de costa.

Geomorfológicamente el área de estudio se divide en Manglares, Playa, Planicie Costera, Llanura fluvial, laderas denudacionales de pendientes altas y colinas denudacionales de pendientes bajas. En la planicie costera, cercanías de los manglares y la llanura fluvial, es donde se encuentra el acuífero costero de Puerto Jiménez.

Contexto geológico

En el área de estudio afloran el Complejo Acresional Osa – Caño, el Grupo Charco Azul (propiamente la Formación Peñita) y el Grupo Puerto Jiménez. En el presente estudio, el acuífero de Puerto Jiménez se correlacionó con el Grupo Puerto Jiménez, cuyo basamento sería las intercalaciones del Grupo Charco Azul según detallan los SEV realizados. Dentro de estas intercalaciones sedimentarias se identificó otro

acuífero según lo revela la información de los pozos GD – 8 y GD – 9. Durante el estudio hidrogeológico del acuífero aluvial, no se identificó relación alguna con el Complejo Acresional Osa – Caño.

Prospección geofísica

Se realizaron nueve Sondeos Eléctricos Verticales en los alrededores del centro de Puerto Jiménez con la finalidad de detallar el modelo conceptual hidrogeológico. En las gráficas de datos de campo se pudo denotar que los puntos finales de las curvas no tenían una forma continua sino que presentaban una anomalía, esta se interpretó como la secuencia de areniscas y lutitas del Grupo Charco Azul, y se justifica debido a que los espesores de las capas son muy pequeños y los contrastes de resistividad muy alta. De esta manera, con la gráfica inicial se pudo establecer la profundidad en cada SEV a la cual afloraba el Grupo Charco Azul, que se consideró el basamento hasta el cual alcanzó la profundidad de oscultación.

Posteriormente, a las gráficas de los SEV se editaron los puntos que correspondían a la anomalía para su procesamiento en el software y se trabajaron con modelos geoeléctricos de 3 y 4 capas. Los SEV se calibraron con la información litológica reportada en los pozos, así las cosas se pudo establecer la siguiente sucesión de capas geoeléctricas:

- Capa de suelo arenoso color gris, con un espesor entre 0,5 a 3 m y una resistividad de 95 a 270 Ω m.
- Capa de arena de playa con un espesor de 2,3 m y una resistividad de 2,2 Ω m.
- Capa de suelo arcilloso con un espesor de 10 a 22,5 m y una resistividad de 10 a 22,5 Ω m.
- Capa de grava seca con un espesor de 3,25 a 9 m y una resistividad de 68 a 1 000 Ω m.
- Capa de arena seca con un espesor de 2 a 22 m y una resistividad de 100 a 280 Ω m.
- Capa de arenas, no consolidadas, de granulometría media a gruesa y saturadas (acuífero superior), con un espesor entre 5 y 19,5 m y una resistividad entre 14 y 45 Ω m.
- Capa de arenas, no consolidadas, de granulometría fina y saturadas (acuífero inferior), con un espesor entre 2,5 y 10,5 m y una resistividad entre 1 y 8 Ω m.
- Capa de Arenisca con un espesor de 9,7 m y una resistividad de 125 Ω m.
- Intercalaciones de areniscas y lutitas que afloran a partir de los 6,5 a 30 m.

Modelo hidrogeológico conceptual

A partir del registro institucional se identificaron 16 pozos perforados, además se mapearon 104 pozos de tipo artesanal. Además dentro del sector de estudio se mapearon 2 nacientes.

Se define por primera vez el modelo conceptual de la zona aluvial, por medio de la Unidad Hidrogeológica Puerto Jiménez, que se caracteriza como un acuífero aluvial con un espesor que varía entre los 5 y 30 m. La profundidad del agua puede aparecer a partir de los 0,5 m de profundidad. Se considera un acuífero libre y está compuesto por dos capas de arenas no consolidadas de diferentes granulometrías pero puede contener lentes arenosos o bien paleocanales de gravas que no almacenan agua siempre. En algunos tramos de los ríos Corozal y Tamales ellos reciben agua del acuífero, mientras que en un sector del río Nuevo, este recarga al acuífero. La dirección de flujo es perpendicular a la línea de costa en el centro de Puerto Jiménez y hacia Playa Platanares y Playa Ciénaga parece haber un cambio leve de dirección de flujo que desemboca hacia la línea de costa. Mientras que al Sur del área de estudio se puede observar que el flujo de agua subterránea se orienta hacia la desembocadura del Río Tamales.

Estratigráficamente, la Unidad Hidrogeológica Puerto Jiménez se correlaciona con el Grupo Puerto Jiménez, edad Reciente. El grado de confinamiento hidraúlico es tipo libre, aunque dentro del Grupo Puerto Jiménez pueda presentarse capas de gravas correlacionables con paleocanales y algunos lentes o cuñas de arenas que no almacenan agua. Se reportan en los informes de pozos un coeficiente de almacenamiento de 0,10 y varios valores de transmisibilidad variable entre 7 y 283 m^2/d.

Determinación de la recarga potencial

Para desarrollar el balance hídrico de suelos de Schosinsky (2006) se establecieron 42 zonas en función de la pendiente, uso de suelo, textura e infiltración. Los resultados indican una recarga potencial entre 984, 51 y 1874, 75 mm, que se traduce entre un 20 y 46,57 % de la precipitación. La recarga parece estar más influenciada por la textura e infiltración del suelo que por las otras variables, reflejando que el sector con mayor recarga potencial se correlaciona con la planicie costera al este del área de estudio, mientras que las recargas más bajas están asociadas a las llanuras de los ríos Tigre y Nuevo.

La recarga potencial total ha sido estimada en 221 126 465,07 m^3. De los cuales 153 931 198, 27 m^3 (69,61% de la recarga) corresponden al sector montañoso, que recargan acuíferos colgados del Grupo Charco Azul y 67 195 266, 81 m^3 (30,39% de la recarga total) recargan el acuífero aluvial costero dentro del área de estudio.

Protección del recurso hídrico

Mediante la metodología GOD se establece que la vulnerabilidad intrínseca de la Unidad Hidrogeológica Puerto Jiménez es moderada. No obstante hay que tener en cuenta que la presencia de pozos artesanales sin los adecuados sellos sanitarios así como otras medidas de protección, sumado a la ausencia de una adecuada canalización de aguas negras, suponen un riesgo mayor en los centros poblacionales.

Sobre la gestión de la oferta y la demanda en el acuífero, se debe tener en cuenta que la oferta del recurso hídrico solo está contemplada por el AyA en los alrededores del centro de Puerto Jiménez, y no hay red de distribución en los sectores de Tamales y Platanares. Particularmente, Platanares es donde se está desarrollando la mayor expansión hotelera, y su demanda no está siendo registrada por ninguna institución. Además hay casas habitacionales que no están teniendo acceso a agua potable y se expone su salud y disminuye su calidad de vida. También hay un sector al norte del poblado Puerto Jiménez el cual se abastece por la ASADA de Sándalo, que se ubica más al Norte y fuera del área de estudio. Sobre esta ASADA se nos reportaron muchas quejas durante el inventario de pozos, señalando que en ocasiones el agua llega tan sucia que ni para realizar las labores domésticas es apropiada, razón por la que algunas personas utilizan el agua de sus pozos.

En Puerto Jiménez, es necesario considerar los siguientes factores: La gran cantidad de pozos artesanales (no cuentan con rejilla ni con la infraestructura adecuada para el monitoreo de calidad del agua) y privados (cuyos propietarios no estuvieron siempre anuentes a colaborar). El vacío de información en la margen derecha del río Tigre, alrededores de la desembocadura del río Platanares y en el sector norte del río Tamales. El hecho de que la zona de estudio al ser cercana al mar y presentar varios esteros es vulnerable a la contaminación salina. Y que se contabilizaron al menos cuatro hoteles cercanos o dentro de la zona marítima terrestre abastecidos por varios pozos a los cuales no siempre hubo acceso y no se encuentran registrados en el SENARA. Es necesario establecer una propia red de monitoreo que cuente con al menos 26 pozos distribuidos en toda el área, de los cuales se pretende que cuenten con recuperación de núcleos de perforación al menos 13 pozos. Como el estudio va dirigido a estudiar el acuífero aluvial somero, la profundidad de las perforaciones debe ser hasta llegar a las intercalaciones de la formación Peñita.

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, limitaciones en el régimen de extracción de los pozos para la cuantificación de la demanda.

10. RECOMENDACIONES

Es necesario establecer un programa de monitoreo de las características climáticas dentro de la zona, esto incluye el establecimiento de una estación meteorológica que permita medir los parámetros climáticos. Esta información base es indispensable para mejorar el conocimiento sobre la recarga potencial, el efecto estacional del clima sobre el caudal de los manantiales, así como el efecto en las variaciones de los niveles estáticos en los pozos.

Para el balance hídrico se recomienda actualizarlo, por lo menos cada 5 años, o cada vez que se cuente con un mapa de uso de suelo actualizado con el fin de determinar variaciones en la recarga potencial producto de la variación del uso de suelo.

Desde la perspectiva de la gestión del territorio es muy importante realizar un estudio geológico detallado de la zona, que investigue a mayor detalle la estratigrafía local y la tectónica imperante, pues sería un insumo muy importante al Ordenamiento Ambiental del Territorio si se abordan los componentes relacionados con recursos minerales y amenazas geológicas.

Se recomiendo realizar los trámites correspondientes ante los propietarios para el cierre de los pozos excavados que se encuentren en estado de abandono o que no cuentan con una infraestructura adecuada, esto con el fin de evitar sectores que favorezcan el proceso de contaminación de la Unidad Hidrogeológica Puerto Jiménez.

Es necesario proteger los sectores montañosos de procesos de deforestación que puedan generar problemas de contaminación y erosión que puedan afectar (en calidad y cantidad el agua) a la Unidad Hidrogeológica Puerto Jiménez. Los sectores montañosos presentan una fuerte pendiente que no favorece ni la ganadería ni a grandes proyectos inmobiliarios, por lo que es importante velar por que cada proyecto que se genere en la zona presente un estudio getécnico-geológico-hidrogeológico a detalle. El uso del suelo este condiciona mucho la recarga de agua a los acuíferos de la zona (69 %), 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.

Es imperativo regular construcciones en sectores planos donde el nivel de agua subterránea en época lluviosa tienda a salir en superficie o se encuentre a una profundidad menor a 0,5 m. Además se debe velar por evitar construcciones que generen la presencia de aguas negras que caigan de forma directa sobre el cauce de los ríos.

Es importante señalar que en el área de estudio, solo dos de los pozos inventariados captan el agua subterránea asociada con las rocas sedimentarias de la formación Peñita (Grupo Charco Azul), acuífero que se encuentra sobreyaciendo al acuífero aluvial objeto de este estudio (Unidad Hidrogeológica Puerto Jiménez). Es necesario realizar una cuantificación de la disponibilidad del recurso hídrico del acuífero albergado en rocas sedimentario así como evaluar su calidad en toda su extensión y un registro detallado de su demanda. Sin embargo; para ellos es requerido un programa de perforación exploratoria que capte este nivel de agua subterránea.

Se recomienda la aplicación de la matríz de criterios de uso del suelo, según vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos para la protección del recurso hídrico realizada por el SENARA (2006), y que es de aplicación en todas las zonas del país donde se cuente con mapas de vulnerabilidad

En las zonas de vulnerabilidad hidrogeológica media o moderada, las actividades de desarrollo urbanístico se pueden permitir siempre que se cumpla con un diseño apropiado para la eliminación de las excretas y se regule la densidad de población en función de las características del sitio, así como el tamaño y área de impermeabilización de los lotes. Las actividades ganaderas se pueden permitir siempre que se utilicen agroquímicos de muy baja toxicidad, persistencia y movilidad., se debe contar con plan de manejo de los remanentes y aguas, sería conveniente que las fincas sean orgánicas o conservacionistas, el uso de biodigestores, lombricultura y sistemas de tratamiento de aguas residuales, reforestación y protección de nacientes de acuerdo con la legislación, recuperación de áreas degradadas, diseño y mantenimiento de caminos y evacuación de aguas y diseño y protección de taludes. Las actividades agrícolas se deben regular tomando en consideración la utilización de agroquímicos de muy baja toxicidad, persistencia y movilidad. Debe contar con un plan de manejo de suelos de acuerdo al decreto 23214-MAG-MIRENEM. Se debe dar un manejo y tratamiento de los efluentes. La actividad debe contar con una certificación de buenas prácticas agrícolas.

Para generar una protección efectiva del recurso hídrico es necesario la evaluación detallada de las fuentes potenciales de contaminación (puntuales y difusas), así como la estimación del riesgo hidrogeológico.

Es imperativo establecer una red de monitoreo de la calidad del agua subterránea en la Unidad Hidrogeológica Puerto Jiménez, tal y como se expuso en el apartado correspondiente.

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 transversales a los estuarios y línea de la costa para tratar de evidenciar el efecto de la contaminación o intrusión salina (según sea el caso).

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

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 acuífero aluvial de Puerto Jiménez, comprendido entre el río Tigre y Tamales, Golfito, Puntarenas: Plan de Trabajo Inicial. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Univ. de Costa Rica (Informe Interno), 18 págs.

ARIAS M.E. 2015 Estudio Hidrogeológico del acuífero aluvial de Puerto Jiménez, comprendido entre el río Tigre y Tamales, Golfito, Puntarenas. Informe de Avance. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Univ. de Costa Rica (Informe Interno), 27 págs.

ARIAS M.E. 2015 Estudio Hidrogeológico del acuífero aluvial de Puerto Jiménez, comprendido entre el río Tigre y Tamales, Golfito, Puntarenas: Informe de Campo. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Univ. de Costa Rica (Informe Interno), 109 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.

BARRITT, S. & BERRANGÉ J.P., 1987: Interpretation of a gravity survey of the Osa Peninsula and environs, southern Costa Rica. – Overseas Geology and Mineral Resources, 64: 1 - 19.

BUCHS, D. & BAUMGARTNER, P., 2007: Comment on “From seamount accretion to tectonic erosion: Formation of Osa Mélange and the effects of Cocos Ridge subduction in souther Costa Rica” by Vannucchi et al. – Tectonics, 6 (TC3009): 1 – 8.

BERRANGÉ, J.P. & THORPE, R.S., 1988: The geology, geochemistry and emplacement of the Cretaceous – Tertiary ophiolitic Nicoya Complex of the Osa Peninsula, southern Costa Rica. – Tectonophysics, 147: 193 – 220.

BERRANGÉ, J.P., 1989: The Osa Group: An auriferous Pliocene sedimentary unit from the Osa Península, Southern Costa Rica. – Rev. Geol. De Amer. Central, 10: 67 – 93.

BERGOEING, J.P., 1978: Geomorfología litoral de Puerto Jiménez. – Inf. Sem. IGN, 1978: 23 – 26.

COATES, A.G., JACKSON, J.B., COLLINS, L.S., CRONIN, T.M., DOWSETT, H.J., BYBELL, L.M., JUNG, P. & OBANDO, J.A., 1992: Closure of the Isthmus of Panamá: The near – shore marine record of Costa Rica and western Panamá. – Geol. Soc. Amer. Bull., 104: 814 – 828.

CORRIGAN, J.D., 1986: Geology of the Burica Peninsula, Panamá – Costa Rica: Neotectonics implications for the southern middle America convergent margin. – 152 págs- Univ. de Texas, Austin [Tesis MSc.].

DENYER, P., MONTERO, W. & ALVARADO, G.E., 2009: Atlas tectónico de Costa Rica. – 55 págs. Editorial Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

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.].-

DI MARCO, G., 1994: Les terrains accrétés du sud du Costa Rica: Evolution tectonostatigraphique de la marge occidentales de la plaque Caraibe – 191 págs. Université de Lausanne, Paris [Tesis Doc.].

FOSTER, S. 1987: Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy.- Proceedings and Information of International Conference: Vulneability 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.

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, 2015: Reglamento para la calidad de agua potable. Decreto Ejecutivo 38924-S, aprobado el 1 de setiembre del 2015.

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.

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.

OBANDO, J.A., 1986: Sedimentología y Tectónica del Cretácico y Paleógeno de la Región de Golfito, Península de Burica y Península de Osa, Provincia de Puntarenas, Costa Rica. – 233 págs. Univ. De Costa Rica, San José [Tesis Lic.].

QUINTANA C., 2008: Estrategia y métodos de monitoreo de aguas subterráneas. Concepción, Chile, 33 p.

SAK, P.B., FISHER, D.M. & GARDNER, T.W., 2004: Effects of subducting seafloor roughness on upper plate vertical tectonismo: Osa Península, Costa Rica. – Tectonics, 23: TC1017

SALAZAR, L.G., 2000: Geomorfología. – En: Denyer, P. & Kussmaul, S. (eds): Geología de Costa Rica. - Editorial Tecnológica de Costa Rica, 1: 171 – 184.

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.

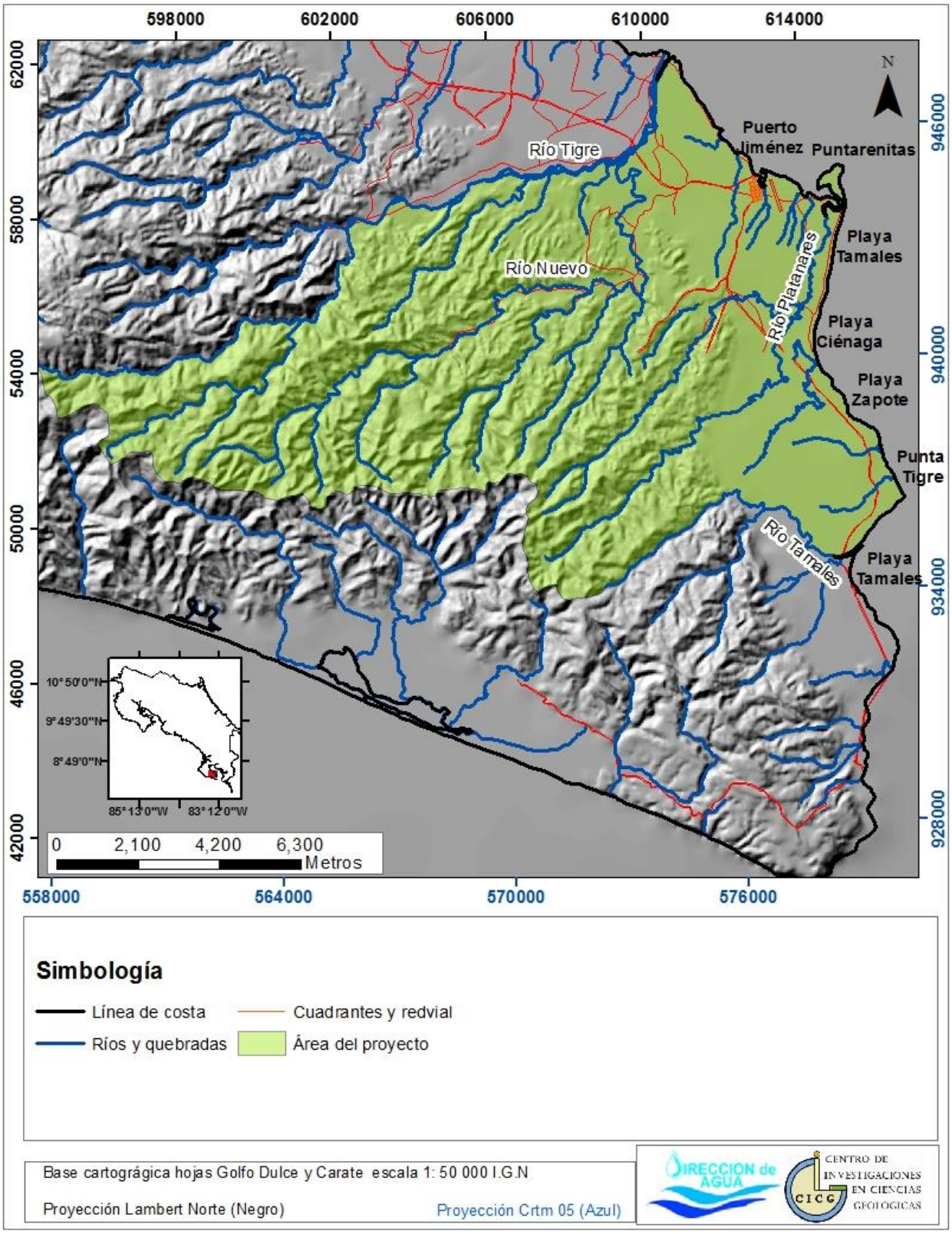
UNESCO, 2006: Evaluación de los recursos hídricos: Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas. Documento Técnico del PHI-LAC N° 4.

ZAMORA, N., 2007: Morfologia costeira, faciologia e geotecnia na regiao de Puerto Jiménez, Costa Rica: Um estudo integrado na análise de potencial de liquefacao e erosao costeira. – 173 págs. Universidade Federal Do Rio Grande Do Dul, Porto Alegre [Tesis MSc.].

ZINCK, J., 2012: Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales.- 123 pgs. ITC, Faculty of Geo-Information. Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands.

Mario Enrique Arias Salguero

Investigador Responsable



Localización del estudio hidrogeológico en Puerto Jiménez.