



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

ECG Escuela centroamericana de
Geología



Diagnósticos hidrogeológicos de la subcuenca de
Andamojo-Pinilla y el cantón de Nandayure, Guanacaste.

INFORME FINAL

Investigadora responsable: Ingrid Vargas Azofeifa

Junio, 2018



Créditos

- Coordinación y compilación

Geol.-Hidrog. Ingrid Vargas Azofeifa

- Geología, muestreo de rocas y aguas

Geól. Paola Alvarado Piedra

Geól. Marlen Brenes Jara

Geól. Nazareth Torres Jiménez

Quim. Jairo García Céspedes (apoyo en el primar muestreo de aguas)

- Digitalización de mapas

Geól. Paola Alvarado Piedra (compilación y diseño de los mapas)

Geól. Marlen Brenes Jara

Geól. Nazareth Torres Jiménez

- Muestreo de suelos y pruebas de infiltración

Geól. Ricardo Granados Vargas

- Geofísica

Geól.-Geof. Mario Arias Salguero (Investigador responsable)

Geól. José Daniel López Oviedo (trabajo de campo)

Luigi Sojo y Gerardo Chaves (asistentes)

Ricardo Pastrana (técnico)

- Asistente del proyecto 113-B5-169

Anthony Valverde (compilación de resultados de los laboratorios)

Contenido

1. Introducción	1
1.1 Objetivo del proyecto.....	1
1.2 Alcance del informe.....	1
1.3 Metodología de trabajo.....	1
1.4 Ubicación geográfica.....	3
1.5 Clima y vegetación	6
2. Resultados.....	9
2.1 Geología.....	9
2.2 Análisis químicos en rocas	37
2.3 Suelos y pruebas de infiltración	42
2.4 Geofísica	44
2.5 Hidrogeología.....	47
2.5.1 Trabajos previos	47
2.5.2 Correlación de pozos	54
2.5.3 Perfiles hidrogeológicos	54
2.5.4 Redes de flujo.....	65
2.5.5 Propuesta red de monitoreo de niveles de agua	69
2.6 Hidrogeoquímica	72
2.7 Resumen de la información disponible	78
3. Recomendaciones	83
4. Bibliografía.....	84
Anexo A Datos meteorológicos.....	88
Anexo B Mapas de Afloramientos.....	98
Anexo C Análisis químico de rocas.....	101
Anexo D Análisis físico de suelos.....	124
Anexo E Análisis químico de suelos.....	135
Anexo F Pruebas de Infiltración.....	160
Anexo G Estudio de Geofísica.....	250
Anexo H Resumen de los pozos (SENARA).....	375
Anexo I Red de monitoreo.....	411

Anexo J Análisis químicos de aguas.....	419
---	-----

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca San Francisco-Pinilla y Andamojo.....	3
Figura 2 Ubicación geográfica del cantón de Nandayure, Guanacaste	4
Figura 3 Ubicación de las estaciones meteorológicas cercanas a las zonas de estudio. ...	7
Figura 4. Mapa geológico San Francisco – Pinilla y Andamojo	13
Figura 5. Mapa geológico del cantón de Nandayure	14
Figura 6 Sistema de fallas de las subcuencas de Andamojo y San Francisco-Pinilla (mapa tomado y modificado de Montero & Denyer, 2011).	34
Figura 7 Sistema de fallas en el cantón de Nandayure. Tomado de Montero & Denyer (2011).	35
Figura 8 Mapa de ubicación de los puntos de muestreos subcuenca San Francisco-Pinilla y Andamojo, Guanacaste.....	40
Figura 9 Mapa de ubicación de los puntos de muestreo cantón de Nandayure, Guanacaste.	41
Figura 10 Mapa de pruebas de infiltración y muestras de suelo de Rodríguez (2009).	43
Figura 11 Distribución de los SEVs, pozos con información litológica y líneas de perfil en las subcuencas de San Francisco-Pinilla, Santa Cruz, Guanacaste.	45
Figura 12 Distribución de los SEVs, pozos con información litológica y líneas de perfil en el cantón de Nandayure.....	46
Figura 13 Parte de mapa hidrogeológico de la Península de Nicoya, sector San Francisco-Pinilla, Andamojo. Tomado de SENARA (1992).....	47
Figura 14 Parte de mapa hidrogeológico de la Península de Nicoya, sector Nandayure. Tomado de SENARA (1992).	48
Figura 15 Mapa hidrogeológico de la cuenca San Francisco-Pinilla según Rodríguez (2009).	50
Figura 16 Mapa de vulnerabilidad a la contaminación y fuentes potenciales de contaminación en la cuenca San Francisco-Pinilla, según Rodríguez (2009).	51
Figura 17 Mapa de zonificación acuífera en la cuenca del río San Francisco-Pinilla según Rodríguez (2009). Ver detalle en cuadro 5	52
Figura 18 Perfiles hidrogeológicos de la subcuenca San Francisco-Pinilla, Santa Cruz, Guanacaste.	56

Figura 19 Perfiles hidrogeológicos de la subcuenca Andamojo, Santa Cruz, Guanacaste.	58
Figura 20 Perfiles hidrogeológicos de la zona noreste del cantón de Nandayure, Guanacaste.	61
Figura 21 Perfiles hidrogeológicos H-H' e I-I' de la zona sur del cantón de Nandayure, Guanacaste.	63
Figura 22 Perfiles hidrogeológicos H-H' e I-I' de la zona sur del cantón de Nandayure, Guanacaste.	64
Figura 23 Red de flujo del agua subterránea para las subcuencas de San Francisco-Pinilla y Andamojo, cantón de Santa Cruz, Guanacaste.....	67
Figura 24 Red de flujo del agua subterránea el cantón de Nandayure, Guanacaste.	68
Figura 25 Red de monitoreo propuesta para medir niveles del agua en pozos en las subcuencas de San Francisco-Pinilla, Santa Cruz, Guanacaste.	70
Figura 26 Red de monitoreo propuesta para medir niveles de agua en pozos en el cantón de Nandayure, Guanacaste	71
Figura 27 Mapa de disponibilidad de información hidrogeológica para las subcuencas San Francisco-Pinilla y Andamojo, Santa Cruz, Guanacaste.	81
Figura 28 Mapa de disponibilidad de información hidrogeológica en el cantón de Nandayure, Guanacaste.	82

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Datos poblacionales de los distritos en los que se realiza este trabajo.....	5
Cuadro 2 Lista de las ASADAS y ubicación de los pozos utilizados para el abastecimiento en las zonas de estudio	5
Cuadro 3 Estaciones meteorológicas en los alrededores de las zonas de estudio*.	8
Cuadro 4 Resumen de los resultados de los análisis químicos mediante la técnica de difracción de rayos X.....	37
Cuadro 5 Características de las categorías de zonificación hidrogeológica. Tomado de Rodríguez (2009).	52
Cuadro 6 Resultados generados en este trabajo	78
Cuadro 7 Tipo de información disponible por zona de estudio	80

Índice de Gráficos

Gráfico 1 Precipitación promedio mensual para las estaciones meteorológicas de los alrededores de las zonas de estudio.....	8
Gráfico 2 Temperaturas promedio, máximas y mínimas registradas en el Estación San José-Pinilla.	9
Gráfico 3 Distribución porcentual de las unidades geológicas en las subcuencas de San Francisco-Pinilla y Andamojo.....	10
Gráfico 4 Distribución porcentual de las unidades geológicas en el cantón de Nandayure.	11
Gráfico 5 Parámetros de campo medidos en agua de los pozos muestreados	73
Gráfico 6 Conductividad eléctrica de las muestras de agua de pozo	74
Gráfico 7 Diagrama de Piper para las muestras de agua subterránea de las zonas de estudio.....	75
Gráfico 8 Diagrama de Scholler para las muestras de agua subterránea de las zonas de estudio.....	75
Gráfico 9 Bicarbonatos versus calcio	76
Gráfico 10 Bicarbonatos versus sulfatos	76
Gráfico 11 Bicarbonatos versus cationes	77

Índice de fotos

Foto 1. Basaltos del complejo de Nicoya	16
Foto 2. Estratos centimétricos y decimétricos de areniscas finas a medias ligeramente calcáreas de la Formación Sabana Grande.	20
Foto 3. Afloramientos asociados a la Formación Nambí.	24
Foto 4. Formación Cóbano..	28
Foto 5. Depósito de playa arenosa, Playa Bejuco, Cantón de Nandayure	29
Foto 6. Depósitos aluviales localizados en los sectores de Santa Cruz Nandayure..	30
Foto 7. Manglar ubicado en Puerto San Pablo en el cantón de Nandayure	31
Foto 8. Pozos de la red de monitoreo.	69
Foto 9. Pozo utilizado como basurero en Paraíso, cuenca del río Andamojo.....	70
Foto 10. Pozos muestreados	72

1. Introducción

Los Diagnósticos hidrogeológicos de la subcuenca de Andamojo-Pinilla y el cantón de Nandayure, Guanacaste, se realizan en el marco del Convenio de Cooperación Específico entre el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA) y la Universidad de Costa Rica, (R CONV 065 2017); corresponden con una actividad de investigación del proyecto titulado "Investigaciones en acuíferos seleccionados de Costa Rica", inscrito en la Vicerrectoría de Investigación con el código 113-B5-169.

1.1 Objetivo del proyecto

Realizar un diagnóstico de las condiciones hidrogeológicas de las subcuencas Pinilla-Andamojo y el cantón de Nandayure, Guanacaste como insumo para estudios específicos del recurso hídrico.

1.2 Alcance del informe

En este informe se presentan los resultados obtenidos de la recopilación y generación de datos de campo y laboratorio en los temas de geología, hidrogeología, datos climáticos, revisión de expedientes de pozos, muestreo de suelos, rocas y aguas subterráneas en las subcuencas Pinilla-Andamojo y el cantón de Nandayure Guanacaste. Se identifican y clasifican las zonas de mayor y menor información geológica e hidrogeológica, y se brindan recomendaciones para trabajos futuros. Este estudio no solo recoge la información disponible, sino también genera información, por lo que trasciende el carácter de diagnóstico.

1.3 Metodología de trabajo

Para desarrollar los diagnósticos se siguió la siguiente metodología de trabajo:

Fase I: se realizó un inventario y análisis de información existente de carácter geológico hidrogeológico, químico, disponible en bases de datos electrónicas del SIBDI, la biblioteca de Geología, el Instituto Meteorológico Nacional, Dirección de Aguas del MINAE, Área de Investigación y gestión hídrica del SENARA y el Departamento de pozos del AyA. Además, se prepararon los mapas cartográficos base y se realizaron visitas de reconocimiento de las zonas para planificar el trabajo de campo.

Fase II: recolección de datos de campo y análisis de laboratorio. Se inició el levantamiento de los afloramientos de la zona para comprobar la geología de trabajos previos, a partir de dicha información se integraron los mapas geológicos a escala 1:50 000. Se usó como base el trabajo de Denyer et al, (2014) y se hicieron modificaciones en donde se requirió.

Se realizaron 36 pruebas de infiltración usando el método de doble anillo y en cada uno de estos sitios se recolectó una muestra del suelo para realizar análisis de textura, determinar la densidad aparente, capacidad de campo y punto de marchitez, y análisis químicos completos de suelos; las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de suelos y foliares del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), en la Universidad de Costa Rica. Se recolectaron 55 muestras de agua de pozos, los cuales fueron seleccionados para obtener información acerca de los parámetros físico-químicos del agua subterránea y la concentración de los iones mayores: calcio, sodio, potasio, magnesio, cloruros, sulfatos y bicarbonatos, nitratos, y algunos metales seleccionados entre otros elementos, así como parámetros de campo. Además, se tomaron duplicados cada diez muestras para el control de calidad de los resultados del laboratorio. Los análisis de aguas se realizaron en el CIA y en Aqylasa.

Se muestrearon 19 afloramientos para realizar análisis de difracción de rayos X e identificar la composición mineralógica de dichas rocas.

Se revisaron los registros de pozos de la Base de Datos del SENARA para obtener información relevante, que incluye: coordenadas del pozo, litología, profundidad del pozo, profundidad del agua, ubicación de la rejilla, caudal, etc.

Los trabajos geofísica e interpretación de los datos fueron realizados por el M.Sc. Mario Arias Salguero y su equipo de colaboradores del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas durante el mes de diciembre, 2017 y enero del 2018. Se realizaron 38 sondeos eléctricos con el objetivo determinar las distintas capas que conforman el subsuelo y la profundidad del agua subterránea en sitios específicos de las zonas de estudio.

Fase III: se integró la información recopilada y generada con la cual se identificaron las zonas en donde existen vacíos de información y se brindan recomendaciones.

1.4 Ubicación geográfica

Las zonas de estudio se ubican en los cantones de Santa Cruz y Nandayure, en la provincia de Guanacaste, en las subcuencas de los ríos: Andamojo, San Francisco-Pinilla, en Santa Cruz y en Nandayure las subcuencas: Santa Rita, Nandayure, queb. Urita-Estero Thiel, Canjelito, Bejuco, queb. Carmonal, Islita, Corozalito, queb. Seca, Ciego, Estero Coyote-Río Jabillo, queb. Milagro, queb. Playa Coyote, queb. Playa Caletas- queb. Nando, queb. Cana. Y parte de las subcuencas de: Ora, Blanco, Morote, San Pedro, Juan de León y Bongo las cuales drenan hacia el Océano Pacífico. Las Figuras 1 y 2 muestran las ubicaciones de las subcuencas de San Francisco-Pinilla, Andamojo y Nandayure respectivamente. Las zonas se localiza en las siguientes hojas topográficas: Matambú, Berrugate, Cerro Azul, Venado, Puerto Coyote y Río Ario, Diriá, Marbella y Villareal, escala 1:50 000, editadas por el IGN.

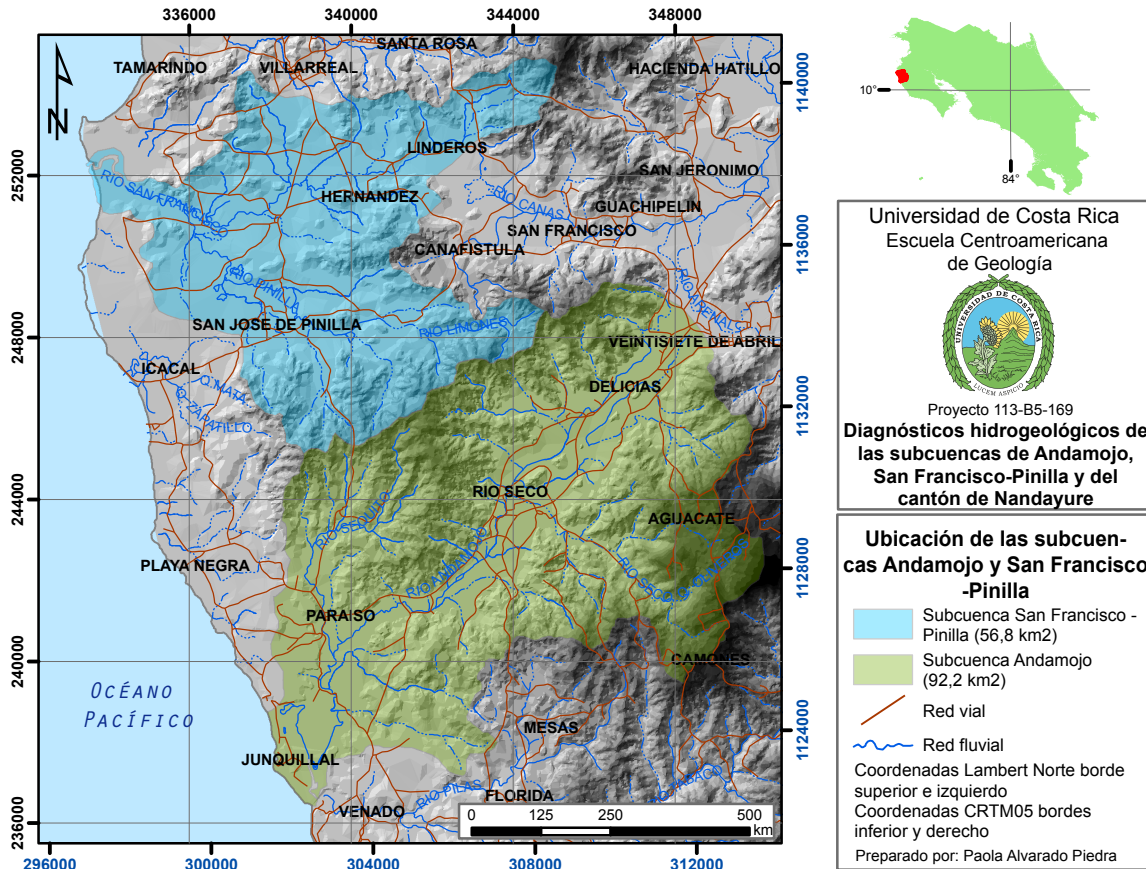


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca San Francisco-Pinilla y Andamojo.

La subcuenca San Francisco-Pinilla tiene un área de 56,8 Km², la subcuenca Andamojo el área es 92,2 Km² y el cantón de Nandayure tiene un área de 568,6 Km².

Algunos datos de las poblaciones de las zonas se resumen en el Cuadro 1. A pesar de que el cantón de Nandayure tiene una mayor área que el cantón de Santa Cruz, la densidad de población del cantón de Santa Cruz es mayor.

Cuadro 1 Datos poblacionales de los distritos en los que se realiza este trabajo

Distrito	Cantón	Población	Hombres	Mujeres
Veintisiete de Abril	Santa Cruz	7048	3544	3504
Tamarindo	Santa Cruz	6375	3257	3118
Carmona	Nandayure	2486	1227	1259
Santa Rita	Nandayure	1446	711	735
Zapotal	Nandayure	1215	636	579
San Pablo	Nandayure	2207	1123	1084
Porvenir	Nandayure	741	395	346
Bejuco	Nandayure	3026	1577	1449

Fuente: INEC, 2011

El cantón de Santa Cruz tiene el crecimiento de 2,7 % anual, por lo que se sitúa en los siete cantones del país con mayores índices de crecimiento a nivel nacional (INEC, 2011), lo cual incide en un aumento en la demanda de recursos, dentro de los cuales se incluye el agua.

Durante el trabajo de campo se identificaron ASADAS las cuales tienen sus propias fuentes de abastecimiento, las cuales con frecuencia son pozos y en menor cantidad manantiales. El Cuadro 2 muestra una lista del nombre de las ASADAS identificadas durante el trabajo de campo en el sector del cantón de Santa Cruz en donde se localiza el proyecto y en el cantón de Nandayure.

Cuadro 2 Lista de las ASADAS y ubicación de los pozos utilizados para el abastecimiento en las zonas de estudio

Nombre de la Asada	Coord. Este	Coord. Norte	Localidad
ASADA Colonia del Valle	389949	207328	Nandayure
ASADA San Francisco de Coyote	400176	198848	Nandayure
ASADA Quebrada Nando	401713	195058	Nandayure

ASADA Jabillos	403765	207215	Nandayure
ASADA Javilla	394089	200195	Nandayure
ASADA Bejuco	390546	203239	Nandayure
ASADA Pilas de Bejuco (Quebrada Seca)	388432	204545	Nandayure
ASADA Corozalito	386104	204910	Nandayure
ASADA San Pedro	381592	210075	Nandayure
ASADA Morote	398044	226620	Nandayure
ASADA La Roxana	396818	226959	Nandayure
ASADA Cacao	395256	226019	Nandayure
ASADA San Pablo	400287	223178	Nandayure
ASADA Pavones	403482	220196	Nandayure
ASADA Puerto San Pablo	402648	224696	Nandayure
ASADA Isla Chira	401689	224149	Nandayure
ASADA Pilas de Canjel	402679	216751	Nandayure
ASADA Cerro Azul (Bella Vista)	395798	215126	Nandayure
ASADA Moravia (Zapote)	405889	202536	Nandayure
Acueducto Municipal Carmona	398802	219849	Nandayure
ASADA Paraíso-Junquillal	339576	241096	Santa Cruz
ASADA Río Seco	343744	244152	Santa Cruz
ASADA Hernández	340739	252058	Santa Cruz
ASADA Malinche	338045	250902	Santa Cruz
ASADA Cebadilla	340823	248458	Santa Cruz
ASADA San José de Pinilla	337719	249180	Santa Cruz
ASADA Guapote	347622	246396	Santa Cruz

1.5 Clima y vegetación

El clima en las zonas de estudio es tropical lluvioso y seco con una pronunciada estación seca que va desde diciembre hasta marzo.

Según Herrera, 1985: en Gómez, 1985, el clima del cantón de Nandayure varía entre subhúmedo húmedo a subhúmedo seco. En la zona costera del Océano Pacífico es subhúmedo húmedo muy caliente, con una estación seca muy larga (>70 días con déficit de agua), mientras que en las zonas de mayor elevación, donde existen cerros de elevaciones inferiores a 600 m.s.n.m. en el interior de la Península, tienen un clima húmedo, muy caliente; y en la costa del Golfo de Nicoya el clima es subhúmedo seco, muy caliente, con un período de exceso moderado de agua.

En las subcuencas de Andamojo y San Francisco-Pinilla muestran una condición similar al área anterior, en la costa pacífica es subhúmedo húmedo muy caliente, con una estación seca muy larga (>70 días con déficit de agua), mientras que en las zonas de mayor elevación, el clima es húmedo, muy caliente (Herrera, 1985: en Gómez, 1985).

Con respecto a la presencia de estaciones meteorológicas en las zonas de estudio se debe resaltar que solo existe la estación San José Pinilla en la cuenca del mismo nombre, las demás estaciones: Recinto Santa Cruz UCR, Dulce Nombre, Nicoya y Barco Quebradero-Garza, Nosara, se encuentran fuera de las áreas de interés (Figura 3).

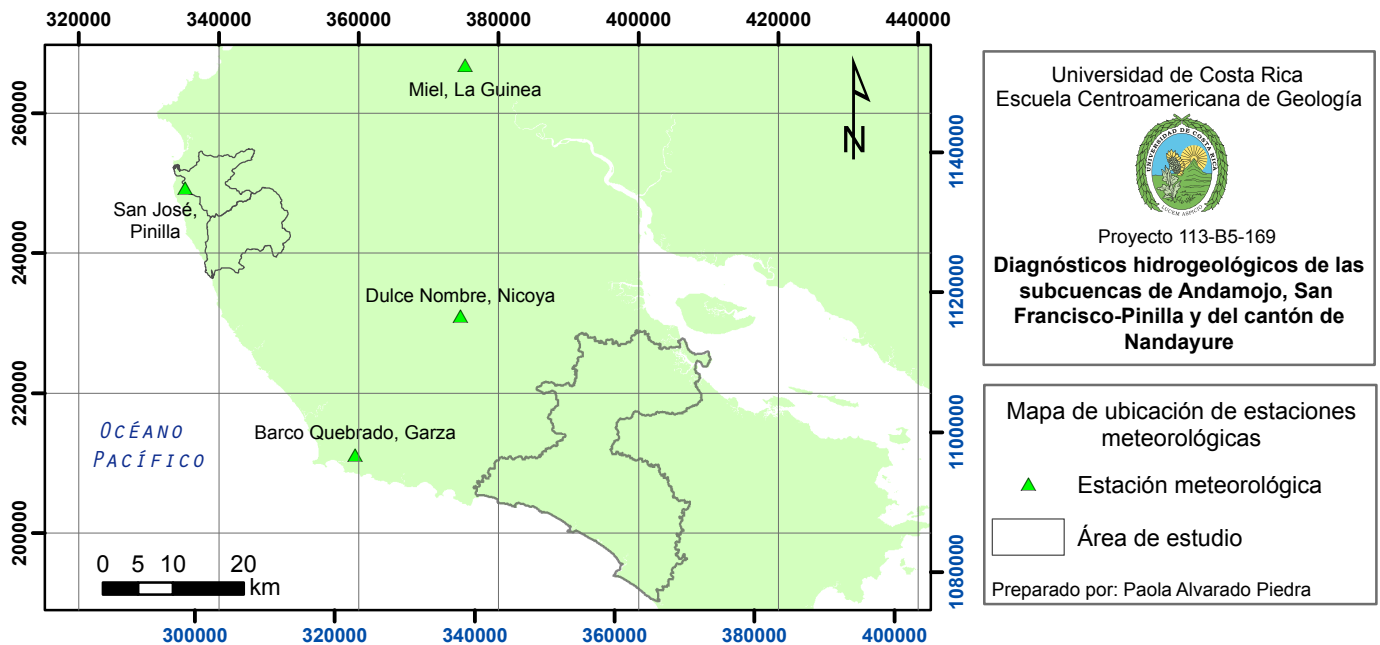


Figura 3 Ubicación de las estaciones meteorológicas cercanas a las zonas de estudio.

Tal y como se desprende del Cuadro 3, el registro histórico de las estaciones es muy corto, la estación San José de Pinilla es la que tiene un registro un poco más amplio de datos, desde abril del 2004 a octubre del 2017, las otras estaciones tienen datos para un período entre dos y cuatro años (Anexo A).

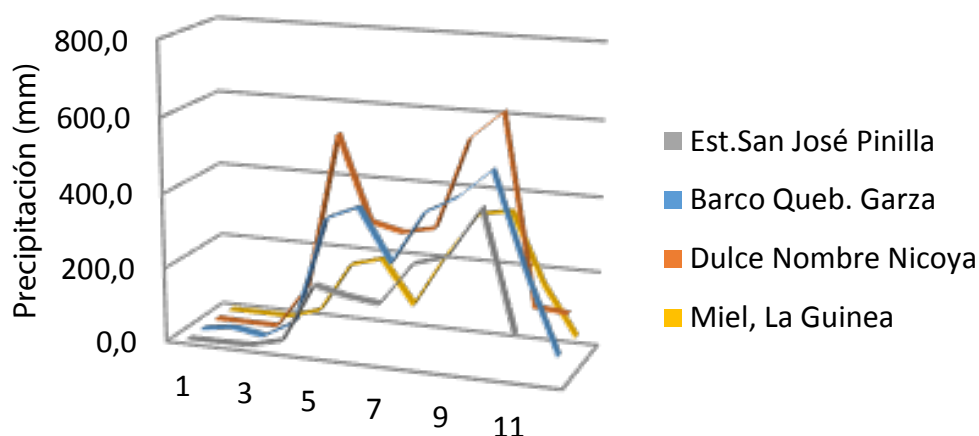
El Gráfico 1 muestra la distribución anual de la lluvia en las zonas de estudio, se observa que hay una época sin lluvia entre diciembre y marzo correspondiente al período de verano; en general las precipitaciones inician entre abril y mayo, los meses más lluviosos son mayo, setiembre y octubre; se observa un descenso en las lluvias entre los meses de julio y agosto, conocido como “veranillo de San Juan”. Localmente hay variaciones en la cantidad de lluvia registrada mensualmente.

Cuadro 3 Estaciones meteorológicas en los alrededores de las zonas de estudio*.

Número	Nombre	Latitud N	Longitud O	Altitud (msnm)	Período de registro
72149	San José, Pinilla	10° 15' 36"	85° 50' 16"	15	Ab.2004-Oct.2017
72167	Barco Quebrado, Garza	09° 54' 57,77"	85° 36' 52,36"	24	May.2013-Oct.2017
72183	Dulce Nombre, Nicoya	10° 05' 45,8"	85° 28' 42,2"	210	May.2016-Oct.2017
74067	Miel, La Guinea	10° 25' 9,8"	85° 28' 24,37"	87	Ab.2013-2017

Fuente: datos suministrados por el Instituto Meteorológico Nacional, 2017.

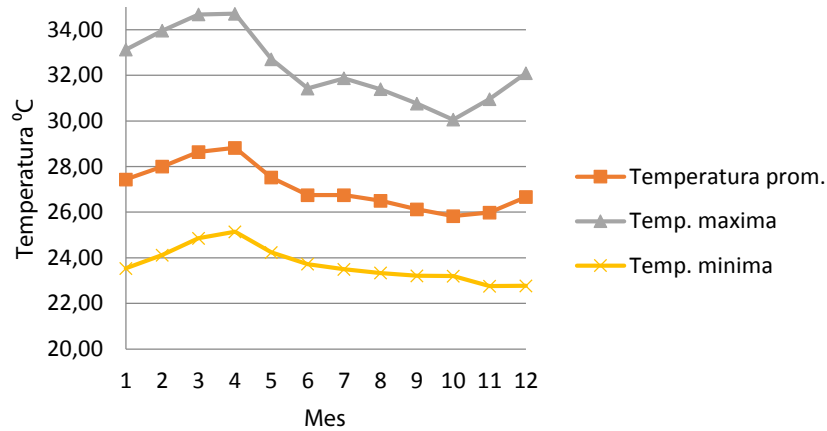
Gráfico 1 Precipitación promedio mensual para las estaciones meteorológicas de los alrededores de las zonas de estudio.



Fuente: elaboración propia, a partir de datos suministrados por el Instituto Meteorológico Nacional, 2017.

El Gráfico 2 muestra la variación anual de las temperaturas promedio, máximas y mínimas para la estación San José-Pinilla, la cual tiene el período de registro mayor. Se observa que las temperaturas promedio varían entre 25°C y 30°C, la temperatura mínima varía entre 19°C y 25°C y la máxima entre 30°C y 35°C.

Gráfico 2 Temperaturas promedio, máximas y mínimas registradas en el Estación San José-Pinilla.



Fuente: elaboración propia, a partir de datos suministrados por el Instituto Meteorológico Nacional, 2017.

En cuanto a la vegetación existente, se tienen dos tipos predominantes en todas las zonas de estudio: bosques deciduos de bajura en las zonas de menor elevación, con parches de bosque siempreverde estacional de bajura en las zonas que bordean la costa Pacífica. En la zona noreste del cantón de Nandayure existe una franja costera de manglares y pantanos y hacia el continente predominan la vegetación arbustiva con parches de vegetación sabanoide (Gómez, 1985).

2. Resultados

Los resultados del diagnóstico se enmarcan en los siguientes temas: geología, geofísica, hidrogeología e hidrogeoquímica; se identifican las zonas en donde existe poca información y se brindan recomendaciones para futuros estudios.

2.1 Geología

Las rocas de la península de Nicoya son de las más estudiadas del país, existen gran cantidad de trabajos que involucran diferentes aspectos relacionados con su cartografía. Denyer et al. (2014) realiza una síntesis de estos datos y junto con nuevos datos propone un marco estratigráfico y tectónico de esta región, dicho trabajo está constituido por 21 mapas geológicos, de los cuales se utilizó, como base para este estudio, una parte de la geología de las hojas: Diría, Villareal, Marbella, Matambú, Berrugate, Venado, Cerro Azul, Puerto Coyote y Rio Ario. Se realizaron varias giras de campo para comprobación de la

geología local, por lo que los mapas base fueron modificados. En el Anexo B se incluyen los afloramientos de las zonas de estudio.

En el sector de Santa Cruz afloran lavas basálticas, radiolaritas e intrusivos relacionados con el Complejo de Nicoya de edad Cretácico-Jurásico, se encuentran también depósitos sedimentarios del Cuaternario. Mientras que en el cantón de Nandayure afloran lavas e intrusivos del Complejo de Nicoya, sobreyace a esta unidad la cobertura sedimentaria de edad Cretácico Superior-Paleógeno que corresponden con las formaciones: Loma Chumico, Sabana Grande, Berrugate, Nambí, Piedras Blancas y Curú, finalmente sobre estos, se encuentran también depósitos sedimentarios del Cuaternario. La distribución porcentual de las unidades se muestra en los Gráficos 3 y 4, se observa una predominancia de los basaltos del Complejo de Nicoya y segundo lugar de los depósitos aluviales tanto en Santa Cruz como en Nandayure.

Gráfico 3 Distribución porcentual de las unidades geológicas en las subcuencas de San Francisco-Pinilla y Andamojo.

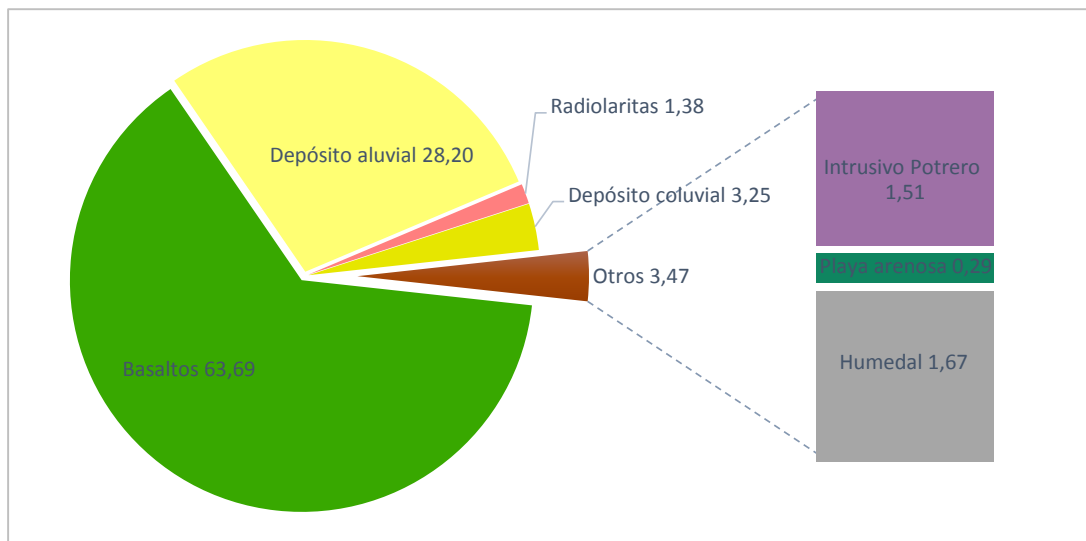
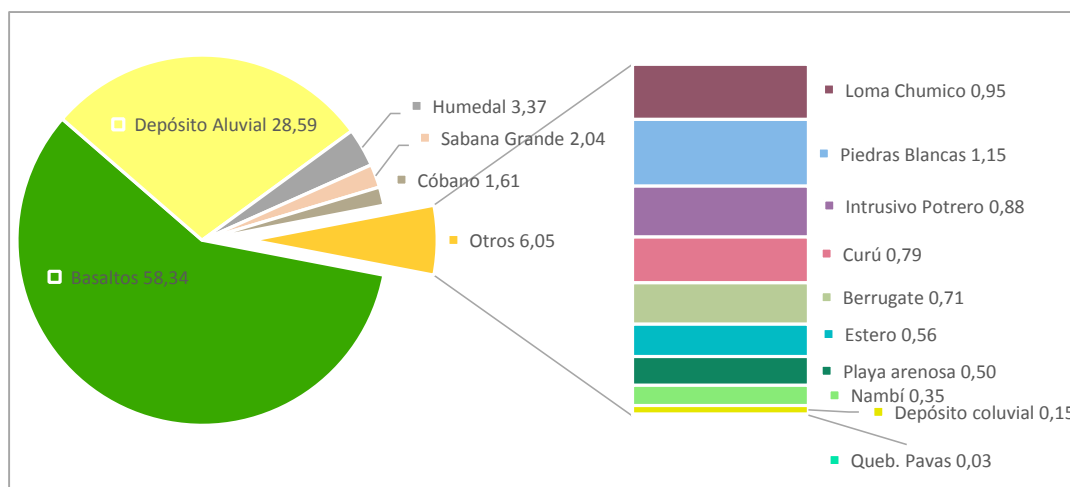


Gráfico 4 Distribución porcentual de las unidades geológicas en el cantón de Nandayure.



A continuación se realiza una descripción de dichas unidades, en las que se incluyen algunas observaciones de campo propias de las zonas de estudio, así como aspectos regionales realizados por diversos autores. La distribución espacial de las unidades geológicas en Nandayure se observa en las Figuras 4 y 5.

Complejo de Nicoya

Después que Dengo (1962) se refiere en forma general a las rocas más antiguas que afloran extensamente en toda la Península de Nicoya, se utiliza el nombre de Complejo de Nicoya para describir esta unidad geológica, redefinida por Kuijpers (1979). Denyer et al., (2014) describe dicha unidad como un secuencia de afinidad oceánica, compuesta por rocas ígneas, tanto volcánicas como intrusivas, radiolaritas conformando el basamento regional, y son parte de la una secuencia ígnea que constituyen el CLIP (*Caribbean large Igneous Province*), el cual fue el evento magmático que abarcó la región Caribe, como resultado de la influencia de un punto caliente.

De forma general, Tournon (1984) y Wildberg (1984) describen la composición de esta unidad como una secuencia de afinidad oceánica de basaltos toleíticos (compuestos por plagioclasa tipo labradorita, augita e hipersteno) afíricos, en una matriz afanítica, masivos y en almohadillas, diques, brechas de hialoclastita, gabros, ferrogabros, picritas y plagiogranitos, incluyendo granófiros con hedembergita y ferrodolerita con fayalita. En

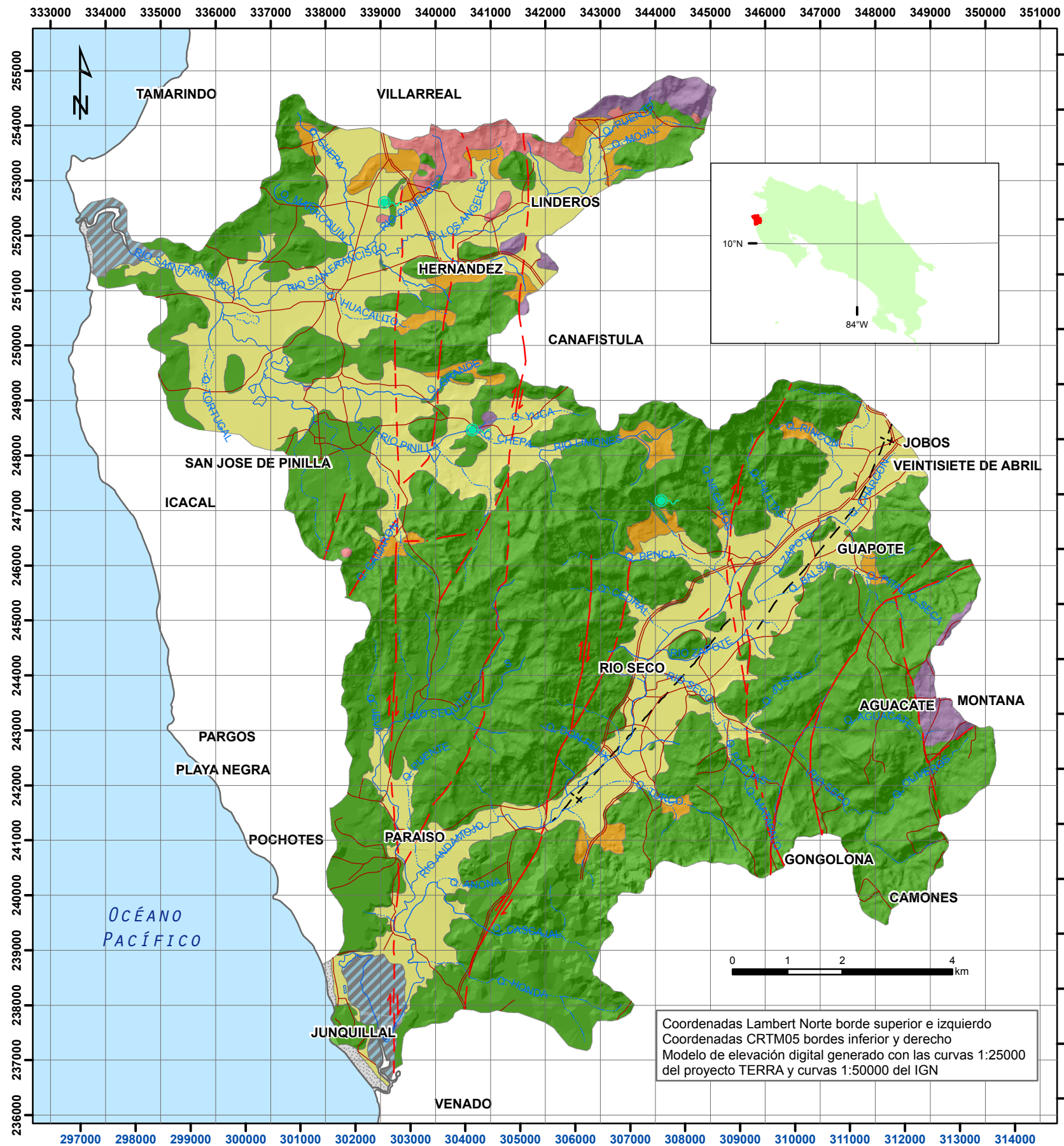
esta secuencia se encuentran radiolaritas asociadas, que fueron depositadas en el fondo oceánico, pedernales, producto de acción hidrotermal y recirculación de sílice.

Flores (2003) describe las rocas asociadas a esta unidad: basaltos masivos y en almohadillas alterados e intensamente fracturadas por vetas de calcedonia; intrusivos, diques y stocks de gabros y diabasas; lavas komatíticas enriquecidas en olivinos; brechas hialoclásticas, de almohadillas, volcaniclásticas y aglomerados volcánicos y pedernales con mineralizaciones de manganeso.

Kuijpers (1979) reporta un espesor total mínimo de 490 m, Flores (2003) no descarta mayores espesores, Denyer & Arias (1991) mencionan 1500 m mínimo de espesor aflorante.

Con respecto a la edad geológica, Tournon & Alvarado (1997) presenta microfauna del Cenomaniano – Turoniano; Sinton et al. (1997) reporta edades con $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de Turoniano a Coniciano Inferior en los basaltos y diabasas, y Campaniano Inferior basal en gabros y plagiogranitos. Alvarado et al. (1997) asigna Turoniano a dataciones radiométricas de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en lavas komatíticas de Tortugal. Hauff et al. (1999) con dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en basalto en almohadilla de Playa Tambor obtiene Cenomaniano Inferior y en un plagiogranito de Potrero Coniciano/Santoniano. Hoernle et al. (2004) presentan edades Berriasiano – Hauteriviano en basaltos. Denyer & Gazel (2009) restringen a las rocas oceánicas más antiguas que el Campaniano Inferior – Santoniano.

Esta unidad está sobreyacida inconformemente por las formaciones Loma Chumico, Sabana Grande, Berrugate, Barbudal, Piedras Blancas y Curú. La base de la Formación Chumico muestra un contacto concordante con las brechas asociadas al Complejo de Nicoya.



Universidad de Costa Rica
Escuela Centroamericana de Geología

Proyecto 113-B5-169
Diagnósticos hidrogeológicos de las subcuencas de Andamojo, San Francisco-Pinilla y del cantón de Nandayure

Mapa geológico de las cuencas San Francisco- Pinilla y Andamojo

- Depósito de arcilla y limo (humedal)
- Depósito aluvial
- Depósito de playa arenosa
- Depósitos coluviales
- Intrusivo potrero
- Complejo de Nicoya (radiolaritas)
- Complejo de Nicoya (basaltos)
- Falla neotectónica (Mioceno Superior o más joven)
- Falla neotectónica sugerida (Mioceno Superior o más joven)
- Falla neotectónica cubierta (Mioceno Superior o más joven)
- Falla paleotectónica cubierta
- Manantiales
- Red fluvial
- Red vial

Geología basada en Denyer et al. (2013) modificada con trabajo de campo

Preparado por: Paola Alvarado Piedra y Marlen Brenes

Figura 4. Mapa geológico San Francisco – Pinilla y Andamojo

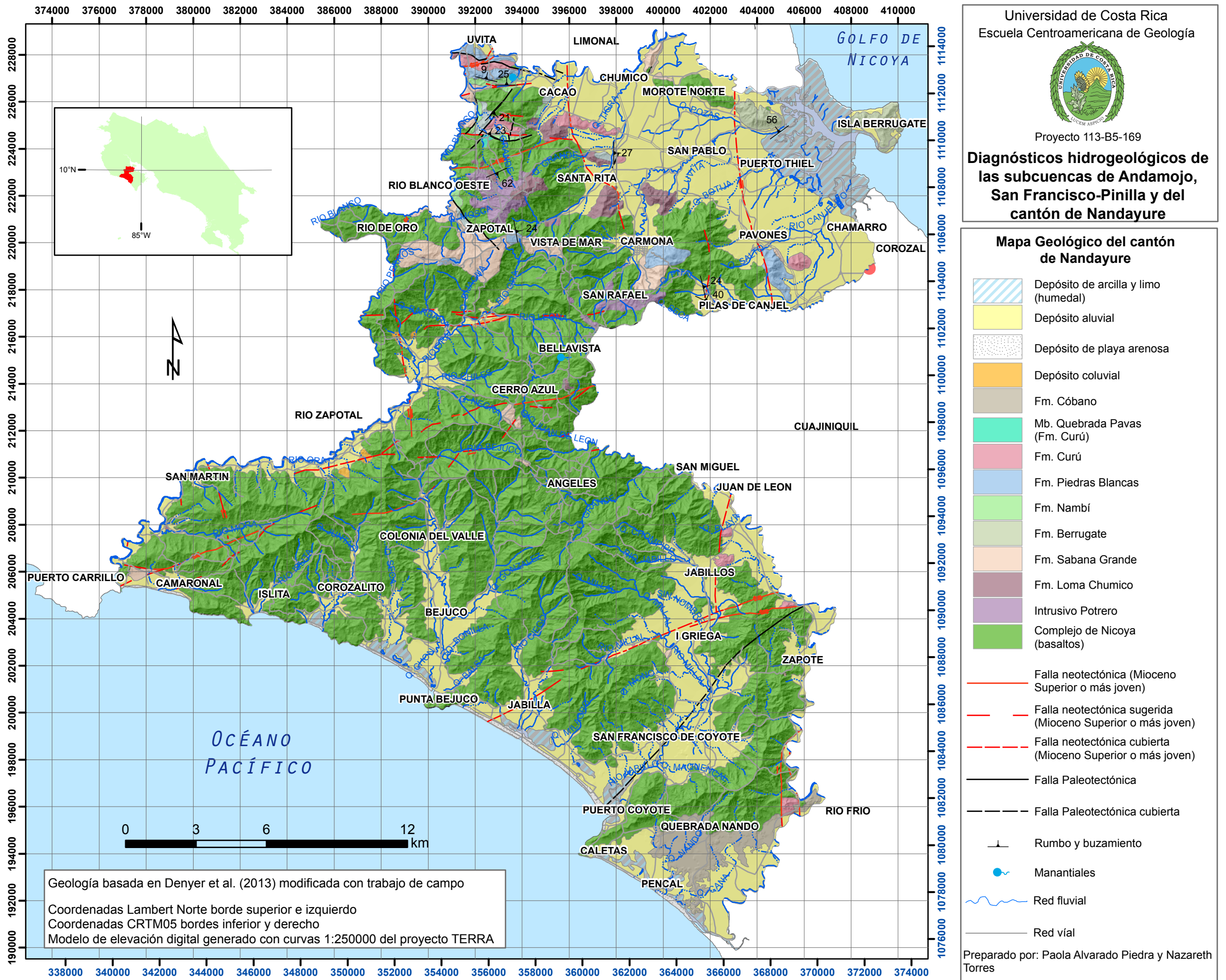


Figura 5. Mapa geológico del cantón de Nandayure

- **Basaltos**

Los basaltos están ampliamente distribuidos en ambas zonas de estudio y constituyen el basamento local, cubren 94,9 km² en el sector de Santa Cruz y 331,5 km² en Nandayure, lo que significa 64% y 58% del total de las áreas respectivamente. Se trata de lavas basálticas color gris oscuro a gris claro cuando se encuentran sanas y gris-verdoso a café claro en superficie de meteorización (en todas las áreas) con fracturas rellenas de vetas que no reaccionan al HCl (10%). Los afloramientos normalmente son flujos masivos, sin embargo, también se encontraron con estructuras de almohadilla en algunos cortes de carretera en la cuenca de Andamojo y en el camino Carmona-San Rafael, entre otras localidades (Foto 1 E).

Generalmente se encuentran altamente meteorizados e intensamente fracturados en diversas direcciones (Foto 1 B), debido a los esfuerzos tectónicos a los que han sido sometidos. Si bien estas fracturas se encuentran rellenas (por zeolita, minerales silíceos y calcita en menor cantidad), también permiten el almacenamiento y flujo de agua subterránea, tal y como lo evidencian algunos manantiales fueron identificados sobre estas rocas en ambas zonas de estudio, su ubicación se puede observar en las Figuras 4 y 5.

Dentro de los basaltos también se encuentran zonas alteradas hidrotermalmente (Foto 1 C); es común encontrar bloques silíceos los cuales se deben, según Denyer et al. (2014), a la desmovilización termal del sílice y manganeso a partir de las mineralizaciones de manganeso en las radiolaritas. Las mejores exposiciones de los basaltos, en la zona de Pinilla, se encuentran sobre la carretera Paraíso-San José de Pinilla, en las cercanías de la divisoria de las cuencas de los ríos Andamojo y Pinilla donde también es posible observar roca relativamente sana en los núcleos de algunas almohadillas.

En el cantón de Nandayure, los basaltos del Complejo de Nicoya cubren la mayor parte del área, principalmente las zonas montañosas; se pueden encontrar con aspecto masivo y con forma de almohadilla (Foto 1). Las mejores exposiciones de esta unidad en el cantón se pueden observar en los cortes de carretera camino a Cerro Azul cercano a Maicillal y Maquencal (Foto 1 E), en las puntas costeras rocosas como Punta Islita (Foto 1 F), Punta Camaronal y Punta Bejuco; así como en los acantilados como el de Islita. Además tienen la exposición más sana en las plataformas costeras como en Corozalito.



Foto 1. Basaltos del complejo de Nicoya (Santa Cruz y Nandayure). A) Lavas en almohadilla del Complejo de Nicoya, en la cuenca del río Andamojo (343985/241478); B) Basaltos del Complejo de Nicoya con fracturas rellenas de vetas en Nandayure (383197/204240); C) Alteración hidrotermal dentro de los basaltos del Complejo de Nicoya, en cuenca del río Pinilla (247129/339797); D) Basaltos en almohadillas del Complejo de Nicoya en el cantón de Nandayure (382400/203779); E) Afloramiento de aspecto masivo en una quebrada cercana a Maquencal (389167/210338); F) Plataforma rocosa de basaltos en Punta Islita, Nandayure (382445/203724)

- **Radiolaritas**

Estas afloran únicamente en la cuenca de los ríos San Francisco-Pinilla, principalmente al NNE de la misma, cubren un área de 2 km², lo que representa un 1,4 % en el sector de Santa Cruz. Las rocas observadas son de color rojo a café-rojizo, en general los afloramientos encontrados son bastante pequeños y muy meteorizados, es posible observar zonas y muchos bloques silíceos, los cuales se deben a la recristalización de los radiolarios que se transforman transicionalmente en pedernales y son propios de procesos diagenéticos avanzados en condiciones termometamórficas Gursky & Gursky (1988).

Denyer et al. (2014) describe esta subunidad como rocas sedimentarias de grano fino a muy fino, de origen pelágico, estratificadas en estratos milimétricos a centimétricos. Generalmente se observan replegadas en pliegues cerrados hasta isoclinales, siendo los tipo *chevron* muy frecuentes, dando a estas rocas un aspecto caótico.

Denyer & Baumgartner (2006) separan dos secuencias básicas de radiolaritas que se distinguen por su contenido mineral: Las radiolaritas manganesíferas (de edad Jurásico medio al Cretácico Superior) y las Ferro-radiolaritas (del Cretácico Superior).

En Punta Conchal, Astorga & Campos (2010) describen una sucesión de 40 m de espesor de radiolaritas estratificadas localmente con nódulos de manganeso, que presentan pequeños ciclos de estratificación delgada y 30 - 40 millones de años de sedimentación marina.

- **Intrusivo Potrero**

Este aflora en todas la zonas de estudio, cubriendo 2,3 km² en Santa Cruz y 5 km² en Nandayure (1,5 % y 0,9 % respectivamente), en dónde se observaron gabros de color gris a gris-oscuro. En el sector de Santa Cruz se encuentran buenas exposiciones a lo largo de la Quebrada Yuca, mientras que en Nandayure al Norte de Zapotal se encuentran afloramientos bastante sanos, también en los alrededores de San Rafael, al Sur de la Ciudad de Carmona, en esta zona la roca presenta una textura fina, similar a la de los basaltos pero porfírica, con apariencia arenosa cuando se encuentran meteorizados. Cabe resaltar que a causa de la tormenta Nate, los caminos que comunicaban hacia el

intrusivo en la cuenca Andamojo, fueron destruidos para ese momento, es por esto que no se pudo llegar hasta el sitio.

Dengo (1962) describe la presencia de doleritas e intrusiones de gabro, Tournon (1984) describe tanto los intrusivos como las doleritas haciendo referencia a los diques con megacristales de plagioclasa. Denyer & Arias (1993) definen formalmente esta unidad como Intrusivo Potrero.

Este intrusivo está compuesto por gabros, doleritas y en menor grado plagiogranitos. Los gabros (hasta microgabros o diabasas) son macroscópicamente de coloración oscura, de una textura porfirítica, rica en minerales máficos con acumulaciones esferoidales de piroxenos (Denyer & Arias, 1993). Relacionados con estos intrusivos se presentan diques de doleritas con nódulos de anortositas (Tournon, 1984) caracterizados por un aumento del diámetro de los cristales de las paredes hacia el centro.

No se presenta una localidad tipo, sin embargo al N de playa Potrero, alrededores del pueblo de Tempate y en los acantilados de Morro o Cabo Velas son afloramientos representativos de esta unidad (Denyer et al., 2014).

Según Denyer & Arias (1993) la edad de los intrusivos se restringe entre Cenomaniano y el Campaniano (90 millones de años). Dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dan edades que varían entre 84 a 83 millones de años (Santoniano) (Sinton et al., 1997).

Esta unidad intruye los basaltos y radiolaritas del Complejo de Nicoya. En Herradura se han encontrado diques de dolerita, similares a los *leopard dikes*. El Intrusivo Potrero es parte del grupo magmático del Complejo de Nicoya, que en su conjunto muestran un *Plateau* de tierras raras, con una misma fuente mantélica (Denyer & Baumgartner, 2006; Denyer & Gazel, 2009). Los diques tipo leopard son típicos de cratones del Arcaico, donde se relacionan con intrusiones generadas en puntos calientes y dorsales asísmicas (Phinney & Morrison, 1988).

Formación Loma Chumico

Designada formalmente por Astorga (1990) y redefinida como una unidad diferenciable del Complejo de Nicoya por Flores (2003) debido a su importancia sedimentológica, paleoambiental y cronoestratigráfica.

De las zonas en estudio afloran únicamente en Nandayure, cubriendo un área de 5,4 km² (0,9 %), al norte-noroeste de Carmona, norte de Chumino y al noreste de Cerro azul donde se observaron estratos centimétricos de lutitas silíceas color negro y blanco-amarillento. La mejor exposición de esta unidad se encontró al norte de Chumino, a unos 500 m fuera del área de estudio, lo que corresponde con la localidad tipo de la formación descrita por Astorga (1990), según Flores (2003) esta se trata de la parte superior de la formación.

Flores (2003) mide espesores máximos de 90 m, mientras que Astorga (1987) describe un espesor de 600 m con base en perforaciones.

De acuerdo con Denyer et al. (2014) corresponde con una secuencia de 5-10 m, compuesta por:

- Brechas con clastos centimétricos a milimétricos de fragmentos de basaltos en una matriz arenosa o hialoclastítica.
- Areniscas gruesas basálticas y areniscas finas grises.
- Lutitas finas silíceas y bituminosas.

Según Astorga (1987) su origen está asociado a una sedimentación pelágica, biogénica silícea, en la cual se desarrollaron relativamente cortos, cíclicos períodos de sedimentación bajo ambiente anóxico. Lo cual ocasionalmente es interrumpido por la llegada de corrientes de turbidez de baja concentración o depositación pelágica por floculación de polco tefrítico, que se desarrolló bajo un piso oceánico levantado y posiblemente engrosado por el efecto de una amplia actividad volcánica submarina contemporánea (Astorga, 1990).

De acuerdo con Flores (2003) está sobreyacida discordantemente por las formaciones Sabana Grande, Piedras Blancas y Curú.

Formación Sabana Grande

Dengo (1962) la define formalmente indicando que se compone por ftanitas y calizas silíceas. Astorga (1987) la describe como una depositación pelágica que ocasionalmente es interrumpida por el aporte de material terrígeno a través de corrientes de turbidez de baja concentración y de material tefrítico (cenizas).

Cubre un área de 11,6 km² en el cantón de Nandayure, lo que representa 2% de su área total. Se observaron estratos tabulares centimétricos y decimétricos de areniscas finas a medias ligeramente calcáreas, de color gris claro a rojizas (Foto 2 A y B).



Foto 2. Estratos centimétricos y decimétricos de areniscas finas a medias ligeramente calcáreas de la Formación Sabana Grande. A) 224772/392973 B) 217887/401907

Astorga (1987) basándose en la litología, rango de tiempo de su sedimentación y posición estratigráfica relativa divide este sistema en 3 diferentes unidades de depósitos pelágicos (2 unidades basales con sedimentos silíceos y 1 superior con sedimentos carbonatados):

- *Unidad Silíceo Inferior*: Pelitas silíceas, bituminosas y tobáceas alternantes. Sobreyace inconformemente los basaltos del Complejo de Nicoya, con un espesor de 600 m y edad de Cretácico Inferior (Albiano) a Santoniano Inferior. Sedimentación bajo ambientes anóxicos interrumpidos por la llegada de corrientes de turbidez de baja concentración.
- *Unidad Silíceo Superior*: Pelitas silíceas con intercalaciones de pelitas tobáceas, arcillas brechosas, arenas turbidíticas y en menor proporción pelitas bituminosas. Sobreyace inconformemente el Complejo de Nicoya. Espesor variable de pocos

metros hasta 50 m. Su edad es de Campaniano inferior. Sedimentación de origen pelágica.

- *Unidad Carbonatada*: Calcilitas (margas y cretas) intercaladas con areniscas turbidíticas y pelitas tobáceas. Espesor variable desde decenas de metros hasta más de 800 m. Período de sedimentación de Campaniano Inferior/Media a Maastrichtiano.

Por su parte, Flores (2003) describe esta unidad como sedimentos pelágicos, hemipelágicos y turbidíticos del pre-Campaniano, que se encuentran ampliamente distribuidos en la península de Nicoya. Flores (2003) detalla la secuencia de la base al techo por: Lutitas silíceas, Lutitas verdes cafés y verde grisáceas silíceas, Lutitas verdes grisáceas y cafés calcáreas, calcilitas parcialmente silicificadas (calizas silíceas), Intercalaciones decimétricas a centimétricas de areniscas medias y finas calcáreas.

La localidad tipo, Astorga (1987) la considera en el área de los alrededores del poblado de Sabana Grande al NW de Nicoya y Flores (2003) propone el cerro Jesús ubicado en el extremo Sur de la fila con el mismo nombre. El espesor observado es de 180 m aproximadamente en el sector Norte de los cerros de la Rejoya Oscura y 250 m al Norte del Cerro Obispo (hoja Matambú).

Esta Formación sobreyace inconformemente a basaltos, intrusivos y brechas del Complejo de Nicoya, con contactos discordantes erosivos por fallas. Está sobreyacida discordantemente por sedimentos de la Formación Nambí, Formación Piedras Blancas y la Formación Curú (Flores, 2003).

Formación Berrugate

Corresponde con sedimentos de composición epiclástica y volcaniclástica, que anteriormente se asociaron tanto a la Formación Sabana Grande, como a la Formación Loma Chumico (Flores, 2003).

En la zona de estudio cubren un área de 4,05 km² (0,7%) en el extremo noreste de Nandayure, únicamente se observaron en los cerros de Puerto San Pablo, compuestos por lutitas silíceas color verdoso, sin embargo los afloramientos se encuentran bastante meteorizados. De acuerdo con Denyer et al. 2014 también afloran en la isla Berrugate, donde se encuentra su estratotipo, con hipoestratotipos en la isla Venado, isla Caballo,

cercanías de Guastomatal de Nicoya y el flanco suroeste del cerro Barbudal (Flores, 2003; Flores et al., 2003; Denyer et al., 2014).

De acuerdo con Flores et al. (2003) esta unidad está compuesta de base a techo por:

- 10 a 30 m de brechas basálticas, areniscas gruesas a medias de color gris a verde, en estratos métricos a centimétricos e intercalaciones centimétricas de areniscas finas y lutitas silíceas con horizontes bituminosos. Microscópicamente son brechas y wackas líticas, lodolitas bituminosas y lodolitas silíceas.
- 10 a 20 m de intercalaciones centimétricas de areniscas silíceas a decamétricas de areniscas silíceas medias de color verde, areniscas silíceas finas, verdes y grises y lutitas silíceas verdes a cafés. Microscópicamente son lodolitas micríticas, lodolitas tobáceas e ignimbritas submarinas.
- 10 a 20 m de intercalaciones centimétricas a decimétricas de areniscas calcáreas finas verdes con lutitas calcáreas gris verdosas, que en general presentan laminaciones paralela y cruzada. Microscópicamente son lodolitas micríticas y wackas arcósicas.
- La secuencia termina con 10 a 20 m de lutitas calcáreas gris verdosas, lutitas calcárea grises con laminaciones paralela y cruzada, y lutitas calcáreas parcialmente silicificadas (calizas silíceas blancas), que microscópicamente corresponden con lodolitas micríticas.

El espesor máximo observado es de 170 m al SE de los cerros San Pablo (Denyer et al., 2014). Según Flores (2003) la presencia de sedimentos volcanoclásticos evidencian estructuras volcánicas sub-aéreas pre-campanianas, Calvo (1998) también menciona que las rocas piroclásticas retrabajadas, asociadas a la Fm. Berrugate, presentan una composición riódacítica, cuyo origen se vincula con productos volcánicos procedentes de erupciones plinianas sub-aéreas o marinas someras, lo cual evidencia el vulcanismo explosivo de arco de islas.

Sobreyace inconformemente a los basaltos del Complejo de Nicoya, a nivel regional se encuentra sobreyacida de manera discordante por la Formación Puerto Carrillo; mientras localmente se ubica contactos no muy claros, con las formaciones Curú y Barbudal (Denyer et al., 2014). Flores (2003) propone una edad de Cenomaniano Superior al Turoniano Inferior, basado en observaciones de faunas de radiolarios.

Formación Nambí

Aflora al noroeste del cantón de Nandayure, cubriendo un área de 2 km², lo que representa solamente 0,3 % del cantón. A lo largo de la quebrada Calosa, al sur de Uvita, se encontraron depósitos turbidíticos compuestos por lutitas calcáreas a areniscas finas y medias carbonatadas color gris claro y gris oscuro a rojizo (Foto 3), los estratos son centimétricos, en este sector normalmente no superan los 20 cm, también se encontraron travertinos asociados. Además se encuentran fracturados y son atravesados por fallas sinestrales de rumbo este-oeste a las cuales se encontró asociado un manantial en la quebrada Calosa (Coordenada 227049/393755).

Dengo (1962) la considera parte de la Formación Rivas; Schmidt-Effing (1980) menciona calizas turbidíticas silicificadas con macroforaminíferos en área de Sabana Grande y Nambí; Astorga (1987) asocia estas rocas como parte de las turbiditas de la Formación Curú. Flores (2003) la define como sedimentos turbidíticos carbonatados que se intercala entre los sedimentos pelágicos y hemipelágicos de las Formaciones Sabana Grande y Piedras. Este autor compone esta unidad por tres subunidades:

- *Subunidad Inferior*: Compuesta por brecha basáltica con matriz arenosa que mediante gradación positiva y meteorización esferoidal pasan a areniscas masivas medias a gruesas con lentes brechosos. Esta subunidad se compone además de areniscas finas gris oscuro con laminaciones paralela y cruzada de lutitas cafés. Presenta múltiples estructuras de carga y fragmentos de *Inoceramus*
- *Subunidad Intermedia*: Compuesta por Intercalaciones de areniscas finas negras y café rojizas con lutitas café rojizas calcáreas (calcilutitas parcialmente silicificadas) que se presentan muy compactadas; y además de intercalaciones decimétricas a centimétricas de areniscas medias y gruesas grises carbonatadas masivas y de alta compactación.
- *Subunidad Superior*: Compuesta por intercalaciones decimétricas de areniscas gruesas y calcarenitas grises caracterizadas por presentar fragmentos de rudistas, gasterópodos y bivalvos; e intercalaciones centimétricas de areniscas medias y finas con algunos estratos de lutitas cafés calcáreas con laminaciones paralela y cruzada.



Foto 3. Afloramientos asociados a la Formación Nambí. A) Depósitos turbidíticos (226926/393622), B) y C) Travertinos (226790/393190).

Flores (2003) propone dos localidades tipo según las subunidades, para la parte inferior las vueltas de Nambí en la hoja Diríá; para la subunidad intermedia se propone el cauce del río Blanco en la hoja Matambú y en la subunidad superior la entrada principal de nambí en la hoja Diríá se reconoce como localidad tipo.

Mediante el *Inoceramus* procedente de la parte inferior de la unidad se asigna una edad Coniaciano Inferior. La parte superior presenta microfauna del Campaniano datada como Campaniano Superior terminal. Por lo tanto, la edad asignada es Coniaciano al Campaniano Superior (Flores, 2003).

Según su relación estratigráfica sobreyace inconformemente a los basaltos del Complejo de Nicoya. Su contacto inferior con la Formación Sabana grande es discordante (Flores, 2003). Está sobreyacida concordantemente por la Formación Piedras Blancas y discordantemente por la Formación Curú (Denyer et al. (2014).

Formación Piedras Blancas

Anteriormente esta unidad era reconocida como caliza de la Formación Rivas (Dengo, 1962), Unidad Cuajiniquil (Protti, 1981), Formación Caliza Pelágica Golfito (Baumgartner et al, 1984) y Miembro Lutita Calcárea Punta Blanca de la Formación Sabana Grande (Astorga, 1987).

Esta formación aflora únicamente en el cantón de Nandayure, donde cubre un área de 6,5 km², lo que representa 1,15 % del área total del cantón. Se encuentra al sur de Uvita, al este de Carmona y al sur de Pavones, en estas zonas se observaron lutitas carbonatadas color rojizo con intercalaciones de areniscas finas a medias.

Según Flores (2003) la unidad está compuesta por calcilutitas blancuzcas y rojizas con intercalaciones de areniscas medias a finas rojas, grises-carbonatadas y ligeramente silíceas. El mismo autor define esta Formación con sedimentos hemipelágicos ricos en globotruncanas del Cretácico Superior que representa un horizonte correlacionable a nivel mundial producto de uno de los Eventos Oceánicos Óxicos (OOEs) (Hu et al., 2005), ocurrido en el mar de Thetys. De la Base al techo Flores (2003) señala la siguiente secuencia: intercalaciones de areniscas medias a final rojas carbonatadas, intercalación centimétrica de calcilutitas rojas, intercalación centimétrica a decimétricas de calcilutitas blancas y areniscas gruesas a medias grises. La localidad tipo según Flores (2003) es un corte de carretera entre los poblados de Uvita y Guaria en la hoja Matambú.

Se asigna como edad al Campaniano Superior terminal hasta el Maastrichtiano Inferior basal (Robaszynski & Caron, 1995). Esta Formación sobreyace inconformemente a las rocas asociadas al Complejo de Nicoya, discordantemente a los sedimentos de la Formación Sabana Grande por medio de un contacto erosivo (Denyer et al., 2014). El contacto con los sedimentos turbidíticos de la parte superior de la Formación Nambí es transicional (Flores, 2003). Además es sobreyacida discordantemente por el Miembro Quebrada pavas de la Formación Curú con un contacto erosivo (Flores et al., 2003).

Formación Curú

Abarca un área de 4,5 km² (0,8 %) en el sector de Nandayure, en la zona suroeste (Al Sur del Triunfo) se observa paquetes decimétricos de areniscas y lutitas que alternan espesores, color gris a café claro en superficie sana y café verdoso su pátina de meteorización. Los paquetes se encuentran bien seleccionados, presentan además fracturas rellenas de material que si reacciona al HCl; en un cierto sector las rocas presentan laminaciones de color negro de 5 – 10 mm aproximadamente.

Llamada anteriormente Rivas (Zoppis Bracci & Del Giudice, 1958, Dengo, 1962. Lundberg, 1982. Rivier, 1983), redefinida por Astorga (1987) como Formación Curú de manera estratigráfica como sedimentos que consisten en mezclas de arenas y lodos de variable porcentaje y en menor proporción gravas. Lo divide en tres tipos de depósitos sedimentarios principales: A) Los depósitos de turbiditas de planos de cuenca los cuales están conformados por alternancias rítmicas de areniscas y lutitas de estratificación muy delgada a media y por intercalaciones irregulares y ocasionales de turbiditas arenosas de estratificación gruesa.; B) Depósitos de complejos lobulares referidos a la depositación de flujos turbulentos (arenosos) de alta concentración y divididos en dos tipos básicos de depósitos (los depósitos de lóbulos de areniscas y los depósitos de turbiditas interlóbulo) y C) Los depósitos canalizados progradantes relacionados a series de facies de grano grueso, que son generados por la depositación de flujos turbulentos de gravas, arenas y lodos en alta concentración que sobrepasan al área de desembocadura del cañón submarino y progradan como canales de distribución.

La composición Astorga (1987) la describe como mezcla de arena y lodo en proporciones variables y algo de gravas caracterizado por la abundancia de feldespatos, magnetita y de minerales ferromagnesianos y la carencia de cuarzo; hacia el techo la composición cambia paulatinamente de basáltica a andesítica. Se presentan 5 facies: 1. Flujos turbulentos lodo-arenosos; 2. Flujos turbulentos arenosos; 3. Flujos turbidíticos retrabajados; 4. Flujos turbulentos gravosos y 5. Flujos de escombros. Flores (2003) detalla la composición de esta formación de la base al techo por Areniscas medias a gruesas, grises con lentes de conglomerados; intercalaciones centimétricas de lutitas calcáreas; intercalaciones centimétricas de lutitas cafés y areniscas finas gris verdosas; conglomerados y calcarenitas e intercalación decimétricas de areniscas medias gris cafés. Esta secuencia se encuentra en localidades cerca de San Juan (Hoja Matambú) y frente al cementerio de Copal (hoja Matambú)

La localidad tipo se presenta en los acantilados de Punta Curú en la hoja Tambor (Astorga 1987), y en la base del cerro Arena en la hoja Talolinga (Flores, 2003).

Esta formación presenta un espesor promedio según Astorga (1987) de 1500 m (mínimos de 600-800 m, máximos de 2500 m) con una edad de Maastrichtiano Medio /Superior a paleoceno Superior basal.

Esta Formación sobreyace discordantemente a las Formaciones Loma Chumico, Nambí y Piedras Blancas con contactos erosivos y tectónicos; y está sobreyacida concordantemente por la Formación Descartes y discordantemente por la Formación Barra Honda (Flores, 2003).

- **Miembro Quebrada Pavas**

La define Flores (2003) refiriéndose a ella como la base de la Formación Curú, caracterizada por un evento corto de alta erosión producto de un levantamiento general de la cuenca durante el Maastrichtiano Superior. Corresponde con una secuencia de 20 a 50 m compuesta por estratos métricos a centimétricos de areniscas medias a gruesas de color gris con lentes de conglomerados compuestos por clastos redondeados de basaltos, pedernales, radiolaritas, lutitas silíceas y clastos angulares de calcilutitas rosadas y blancas. Esta unidad se caracteriza por presentar laminación paralela planar continua y mega estratificación cruzada.

La localidad tipo Flores (2003) y Flores et al. (2003) la propone en el curso bajo de la Quebrada Pavas, cerca del poblado de Tacanis con un espesor observable de 50 m. Dentro del área se presenta en las hojas Matambú.

Esta unidad sobreyace discordantemente a los sedimentos de la Formación Piedras Blancas con contacto erosivo; y está sobreyacida concordantemente por las intercalaciones centimétricas de lutitas color café de la Formación Curú (Flores, 2003).

Formación Cóbano

Propuesta por Denyer et al. (2014) para designar los sedimentos de origen continental que afloran al W-NW del poblado de Cóbano, su localidad tipo se encuentra en los cortes

de camino, entre las localidades de Cóbano y San Ramón, en las riberas de los ríos Cóbano y Panica.

Compuesta principalmente por depósitos de abanicos aluviales y terrazas conformados por conglomerados, con clastos volcánicos del Complejo de Nicoya, pedernales rojos y amarillos, en una matriz arenosa o arcillosa de colores rojizos (Denyer et al., 2014). Según los mismos autores su origen se debe a un fuerte proceso de erosión y peneplanización, así como al levantamiento de la región, que favoreció la depositación de materiales gruesos y la alteración y denudación de las rocas preexistentes del Complejo de Nicoya y de la cobertura sedimentaria del Paleógeno; posiblemente acaecieron durante el final del Plioceno e inicios del Pleistoceno.

En el área de estudio cubre al menos 9,1 km² (1,6%), ubicado al Sur de Nandayure principalmente. Se encuentra una estratificación sedimentaria (Foto 4). En la parte superior de 1,20 m de espesor areniscas finas a medias, sobre un espesor de 30 cm de areniscas calcáreas gruesas a muy gruesa bien seleccionada con clastos de color blanco y negro y de color crema subangulosos en una matriz arenosa color gris en un 75%. Presenta además laminaciones paralelas. Por debajo de esta arenisca se encuentra conglomerado calcáreo pobremente seleccionado, con clastos de color blanco y café-rojizo subangulosos, clastos color gris y crema subredondeadas. Presenta pátina de meteorización de 1 mm de grosor.



Foto 4. Formación Cóbano. A) En la parte superior areniscas finas a medias, parte inferior areniscas gruesas, ubicadas en Playa Caletas (397231/ 193897). B) Estrato de Conglomerado ubicado en Playa Caletas (397231/ 193897).

Depósito de Playa Arenosa

De acuerdo con Denyer et al. (2014) afloran a lo largo de toda la costa en la Península de Nicoya, según los autores su contacto fue difícil de trazar y se diferenciaron en la medida de lo posible de los aluviones, en varias ocasiones solo se dejó una franja de unos 100 m de arenas costeras en el límite litoral (Foto 5). Esta unidad abarca un 0,4 km² en el sector de Santa Cruz y 2,8 km² en Nandayure (2,3 %, 0,5 % respectivamente).



Foto 5. Depósito de playa arenosa, Playa Bejuco, Cantón de Nandayure

Depósito Aluvial

Se localiza en las partes bajas de ambas cuencas, en la cuenca Andamojo se deposita a lo largo de toda la cuenca con una dirección NE-SW y en la cuenca San Francisco-Pinilla está distribuido por toda el área, en conjunto abarcan unos 42 Km² (28%), ubicado en la Figura 4. En el cantón de Nandayure contiene aluvión en 162,5 km² (28,6 %) depositado en las zonas planas del cantón (Figura 5).

Son capas que tienen un espesor apreciable de 50 cm hasta 3 metros. En el sector de Santa Cruz generalmente es un aluvión fino, con clastos subangulares a subredondeados, en su mayoría milimétricos a centimétricos (6 cm), principalmente de composición basáltica (30%), en la zona de San Francisco-Pinilla al menos un 5% corresponde con clastos de pedernales y posiblemente radiolaritas, todo esto en una matriz areno-limosa con arena en aproximadamente un 60%. (Foto 6).

En la zona Noreste de Nandayure el aluvión es granulometría variada, pero en general la matriz es limo-arcillosa, los clastos son de composición basáltica y sedimentaria.



Foto 6. Depósitos aluviales localizados en los sectores de Santa Cruz Nandayure. En la imagen A y C se observan depósitos aluviales localizados en la cuenca Andamajo (localidad de Río Seco), y en D un depósito aluvial de grano fino en la base y en la cima presenta una gradación positiva, ubicado en la quebrada Grande de la cuenca San Francisco – Pinilla. D) Depósito aluvial ubicado en la Quebrada Arenosa (395088/201899) y E) Depósito aluvial ubicado cerca del Río Ciego (394546/203300), ambos en el cantón de Nandayure.

Depósito coluvial

Abarca un área de 4,5 km² (3,5 %) para el sector de Santa Cruz y 0,85 km² (0,1%) en el cantón de Nandayure.

Herrera (1980) la describe la unidad coluvio - aluvial como gravas sub-redondeadas a redondeadas y poca arcilla; estratigráficamente en superficie se encuentran limos y arcillas. Subyaciendo se encuentra una capa de grava y arena envueltas en una matriz limosa-arcillosa; se le atribuye una edad Cuaternario.

El espesor de la unidad es de 35 m en la zona de Veintisiete de abril, de 25 m en las cercanías de Río Seco, el espesor medio es de 15 m, y el origen de esta, según Herrera (1980) se asocia a un valle por falla que es rellenado por estos materiales.

Depósito de arcilla y limo (humedales)

Abarca 2,5 km² en Santa Cruz (1,7 %) y 19,17 km² en Nandayure (3,37 %). Se encuentran tanto en el área de Santa Cruz como de Nandayure. De acuerdo con Denyer et al., (2014) los terrenos pantanosos fueron cartografiados aunque en la actualidad algunos se encuentren secos debido a la posible acción humana, sin embargo, son evidentes en fotos aéreas y mapas de hace algunos años. En las zonas costeras sobresalen además los esteros y zonas con alguna influencia salina, lo que corresponde con marismas (Foto 7).



Foto 7. Manglar ubicado en Puerto San Pablo en el cantón de Nandayure

Geología estructural

Debido principalmente a su edad, origen, historia geológica y posición geotectónica, la península de Nicoya es una de las regiones más afectadas y controladas por procesos tectónicos en Costa Rica (Denyer et al., 2014). Montero & Denyer (2011) estudian el arreglo de fallas neotectónicas en la península y reconocen dos dominios estructurales, el primero de ellos tipo translacional al N, localizado en la región central-NW de la península, este es representado por fallas principales de dominio dextral N-S y fallas sinestrales de rumbo ENE a inversas NW, estas fallas inversas son limitadas por fallas dextrales (Montero & Denyer, 2011). El segundo dominio se localiza al S de la península incluye fallas de desplazamiento de rumbo dextrales de rumbo N-S y sinestrales ENE (Montero & Denyer 2011). Los autores explican el primer dominio mediante un modelo de transrotación.

Estos patrones de fallas se pueden observar en los mapas de Denyer et al. (2014) que son la base para el presente estudio, ambas áreas se encuentran dentro del primer dominio definido por los autores.

Rasgos estructurales Santa Cruz

En las cuencas ubicadas en el cantón de Santa Cruz se observan fallas de desplazamiento dextral con rumbo N-S, las cuales atraviesan el área desde el sector de Junquillal hasta el extremo Norte de la cuenca del río San Francisco (Figura 6). En la cuenca del río Andamojo se observan además dextrales con rumbo SW-NE que corresponden con el sistema de fallas Los Chanchos, el cual limita un dominio de movimiento predominantemente dextral de rumbo N a NNE de acuerdo con Montero & Denyer (2011), al SE de este, existe un subdominio translacional extensivo, representado por la falla Arado, que se encuentra en el límite Este de la cuenca de Andamojo (Denyer et al., 2014). En la misma cuenca se encuentra también la falla paleotectónica Limones – Cañas (Figura 6), ambos sistemas son descritos a continuación:

Falla limones-Cañas

Su longitud en el área de estudio es de unos 9,5 Km, abarca desde Veintisiete de Abril hasta las inmediaciones de Paraíso (Figura 4).

Montero & Denyer (2011) le atribuyen el origen de esta falla al Cerro Azul, que es una superficie de erosión formada cerca del nivel del mar durante un periodo de estabilidad, y que fue levantada en forma discontinua y diferenciada, lo que llevó a su erosión y fragmentación en seis bloques principales (Finca Carrera Buena, Montaña, Esperanza, San Isidro, Cerro Azul y Once Estrellas). Además afirman que la deformación frágil se concentró en el sector NW de la superficie con el desarrollo de dos fallas principales con componente normal de levantamiento relativo en el lado SE denominada falla limones-Cañas y Montaña, estas separan a los bloques de Carrera Buena y al último bloque Esperanza (Figura 6).

En los primeros estudios sobre la falla Limones-Cañas, se interpretó como neotectónica, sin embargo nuevos datos parecen indicar que no es así; en las hojas Villareal y Diríá el trazo de rumbo NE, está cortado por el fallamiento N-S dextral, que se describirá más adelante (Denyer et al., 2014). La longitud total de la falla es de 15 Km y el bloque SE sube con respecto al NW (Denyer et al., 2014).

Sistema de falla Los Chanchos

Este sistema de fallas afloran en la mayor parte de la subcuenca de Andamojo, con un rumbo preferencial hacia el NE (Figura 6). Es un sistema de fallas dextral, que al cruzar el río Limones, se subdivide en dos trazas, la traza W tiene rumbo NNE, lo cual le da a la falla una componente normal, tal y como se observa en varios escarpes alineados y facetados al W. La traza E de rumbo NE, tiene un escarpe principal facetado al NW, del lado N del bloque Montaña de la superficie Cerro Azul. Este relevo transtensivo de la falla los Chanchos, se denomina Veintisiete de Abril, tal y como se observa en la Figura 6 (Denyer & Montero, 2011).

Falla Carmona

La falla Carmona, de rumbo N-S, se caracteriza por un trazo lineal, sin embargo al cruzar las zonas aluviales, esteros y la zona de inundación del río Tempisque, su trazo pierde expresión, siendo inferido (Montero & Denyer, 2011). Del lado S del río Tempisque, sugiere provocar desvíos derechos, al igual que al S al cruzar el cerro Copal, estos indicadores geomórficos sugieren un movimiento derecho en esta falla (Figura 7).

La falla continúa con dos relevos a la izquierda, del lado E de la localidad de Carmona, al relevo localizado más al E y de mayor longitud se le denomina falla Juan de León, esta corta las estribaciones E de la fila Balsa, mostrando morfologías bien conservadas, tales como son abanicos desplazados, entre otros, al S parece terminar contra la falla Cedro (Montero & Denyer, 2011).

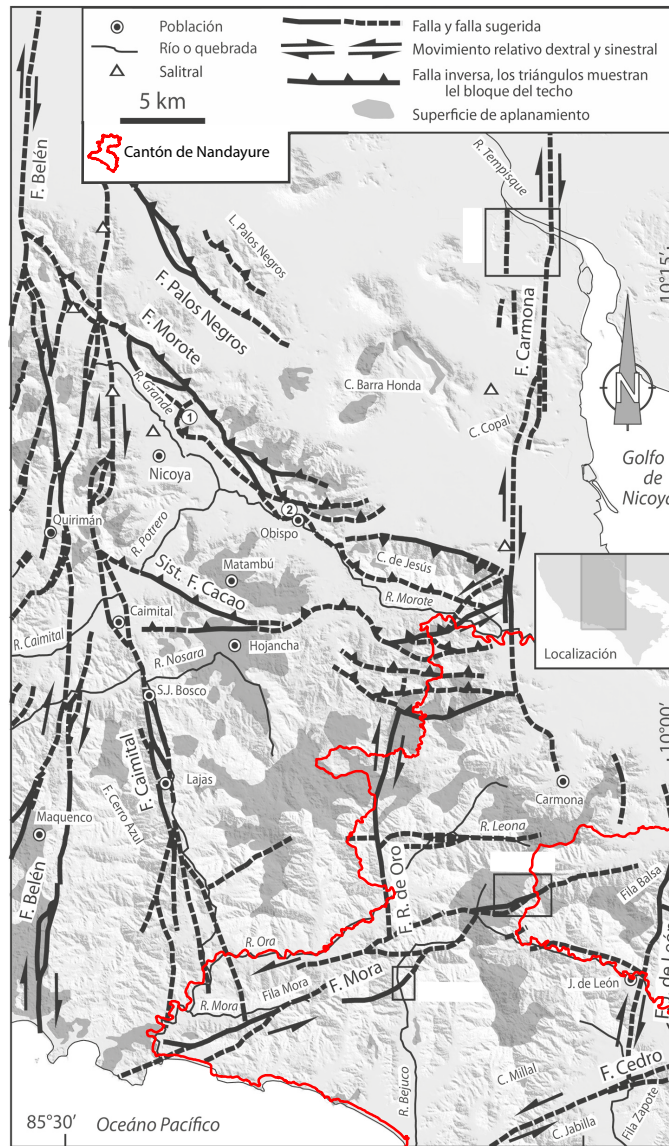


Figura 7 Sistema de fallas en el cantón de Nandayure. Tomado de Montero & Denyer (2011).

Falla Río de Oro

La falla Río de Oro localizada al W de Carmona, tiene un rumbo N-S y una expresión morfotectónica bastante prominente, al N termina contra una serie de fallas E-W y al S sugiere terminar contra la falla Mora, aunque no se descarta que continúe más al S (Montero & Denyer, 2011). De acuerdo con los mismos autores esta falla muestra desvíos derechos en filas y quebradas, los cuales son más evidentes al N del río Ora.

Falla Cedro

Dengo (1962) y luego Montero & Denyer (2011) determinan que es una falla sinistral. Se inicia al W cerca de playa San Miguel en la costa Pacífica y se extiende hasta playa San Lorenza, en el lado oriental. La traza N del lomo de falla, se evidencia por un prominente escarpe facetado al N, el cual se observa al cruzar la fila Zapote y sobre la margen izquierda del río Blanco.

Falla Caimital

Montero & Denyer (2011) determinan que tiene desplazamiento dextral con un rumbo NNW y longitud de aproximadamente 35km, el tramo central de la falla es muy similar a una falla cartografiada por Dengo (1962). Al N, puede continuarse hasta terminar del lado E de la falla Belén y al S termina contra la falla Mora.

2.2 Análisis químicos en rocas

Se realizaron con el objetivo de conocer la composición química de algunas unidades geológicas representativas de las zonas de estudio, en total se recolectaron 19 muestras de roca, distribuidos tal y como se muestra en las Figuras 8 y 9. Los análisis se llevaron a cabo en la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), mediante la técnica analítica de difracción de rayos X. Los resultados completos se presentan en el Anexo C, el Cuadro 4 resume los minerales encontrados en cada muestra de polvo de roca, como se observa se trata principalmente de aluminosilicatos de calcio y sodio lo cual era esperado tomando en cuenta que las rocas de la zona están asociadas con procesos magmáticos y aunque también están presentes rocas sedimentarias, los sedimentos a partir de los cuales se constituyeron dichas rocas son volcánoclasticos. Además están presentes carbonatos y otros minerales particulares los cuales se asocian con procesos de hidrotermalismo por la presencia de fallas, es importante indicar que la técnica de difracción de rayos X es cualitativa, por lo que nos indica cuales minerales están presentes, en caso de que se quiera cuantificar la abundancia se recomienda realizar otro tipo de análisis por ejemplo, fluorescencia de rayos X, para determinar la composición elemental de las rocas se deben realizar análisis mediante técnicas tales con IPC o absorción atómica, lo cual se recomienda para estudios futuros.

Cuadro 4 Resumen de los resultados de los análisis químicos mediante la técnica de difracción de rayos X.

Muestra	Coord. Este (Lambert CR-Norte)	Coord. Norte (Lambert CR-Norte)	Litología	Formación	Minerales DRX
1R-6,12-NanN	393225	226795	Arenisca fina calcárea	Nambí	Carbonato de calcio, augita, analcina, aluminosilicato de sodio y calcio, aluminosilicato hidratado de calcio, bencenosulfato de calcio
2R-20,2-NanN	397562	217124	Gabro	Intrusivo Potrero	Andesina, diópsido, aluminosilicato de calcio y sodio, bitonita, bencenosulfanato de

					potasio, cloruro de tántalo, óxido de niobio
3R-6,12-NanN	392546	227486	Arenisca volcánica	Curú	Sílice, carbonato de calcio, anortita, heulandita, hidróxido hidratado, aluminosilicato de sodio, calcio y hierro
7R-21,2-NanN	392742	227077	Lutita calcárea	Piedras Blancas	Calcita, sílice, sulfuro de arsénico y cobre, cloruro de calcio
11R-7,12-NanN	394119	222352	Lutita silicea	Loma Chumico	Cuarzo, óxido de silicio, óxido de titanio
15R-23,2-NanN	402101	217558	Arenisca fina ligeramente calcárea	Sabana Grande	Oxido de silicio, aluminosilicato de sodio y calcio, heulandita, aluminosilicato de sodio, calcio y hierro, aluminosilicato de titanio, calcio, sodio, magnesio y hierro
16R-8,12-NanN	401907	217887	Arenisca media ligeramente calcárea	Sabana Grande	Oxido de silicio, anortita, clinoptilota, augita, aluminosilicato de sodio-calcio y hierro, aluminosilicato de magnesio
41R-16,2-SC	343852	254311	Basalto	Complejo de Nicoya	Hidróxido de silicio, aluminio y calcio, tonsonita, silicato hidratado de aluminio y calcio, sulfato de plomo, fosfato de calcio, magnesio e hierro
38R-15,2-SC	340932	248605	Gabro	Intrusivo Potrero	Silicato hidratado de aluminio y sodio, augita, tonsonita, aluminosilicato de calcio y sodio, aluminio silicato de magnesio, aluminosilicato hidratado de calcio
4R-13,12-SC	339836	243908	Basalto	Complejo de Nicoya	Anortita, augita, aluminosilicato de sodio y calcio, silicato de calcio, magnesio y hierro, silicato hidratado de calcio y aluminio, silicato de sodio,
6R-13,12-SC	343565	244295	Basalto	Complejo de Nicoya	Analcima, augita, tonsonita, montmorillonita, sílice
21-R12,2-SC	345955	247294	Basalto	Complejo	Augita, aluminosilicato

				de Nicoya	hidratado de sodio y calcio y estroncio, albita, aluminosilicato hidratado de calcio, aluminosilicato de manganeso, sodio, calcio, titanio, hierro y magnesio
10R-13,02-NanS	381175	207724	Basalto	Complejo de Nicoya	Anortita, kanoita, aluminosilicato de calcio y sodio, silicato de calcio y magnesio, hidroxisilicato de hierro y magnesio
18R-14,02-NanS	387559	204915	Basalto	Complejo de Nicoya	Aluminosilicato de calcio y sodio, óxido de magnesio y hierro, sílica, augita, hidróxido silicato hidratado de magnesio y titanio
27R-15,02-NanS	402621	206977	Lutita	Curú	Calcita, óxido de silicio, silicato de calcio y aluminio, sílice, aluminio silicato hidratado de calcio
29R-16,02-NanS	398340	195068	Basalto	Complejo de Nicoya	Alumino silicato de sodio y calcio, augita, silicato de calcio, magnesio y hierro, andesina, silicato hidratado de calcio, hidróxido de sílice, calcio y aluminio
30R-16,02-NanS	397231	193897	Conglomerado	Cóbano	Oxido de silicio, carbonato de calcio y magnesio, aluminosilicato de calcio y sodio, andesina, albita
30R-16,02-NanSa	397231	193897	Conglomerado	Cóbano	Oxido de silicio, carbonato de calcio y magnesio, cloruro de potasio, aluminosilicato de calcio y sodio, aluminosilicato hidratado de sodio, silicato de calcio y magnesio
31R-16,02-NanS	405313	195697	Lutita	Curú	Calcita, óxido de silicio, óxido de molibdeno y antimonio

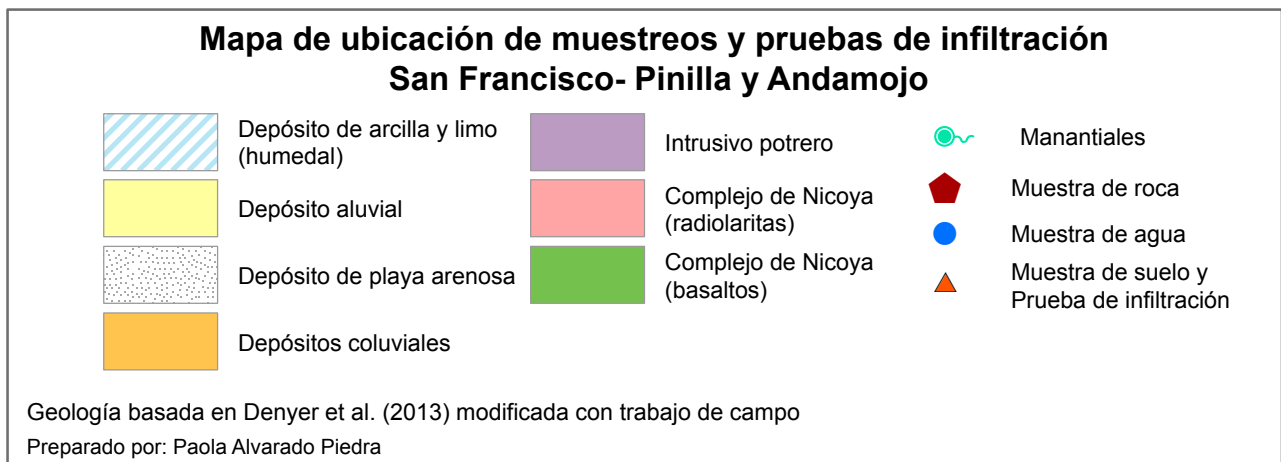
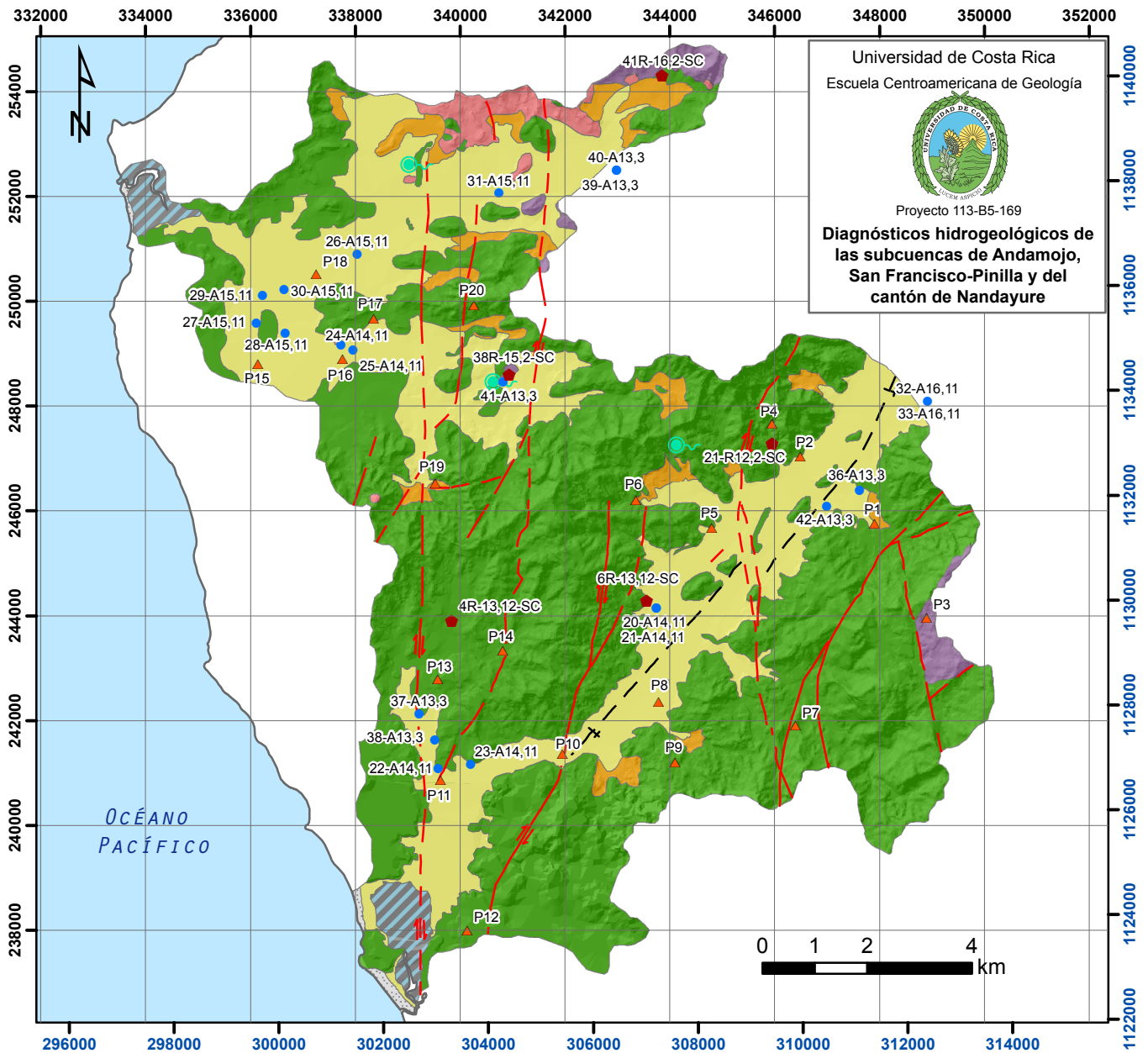


Figura 8 Mapa de ubicación de los puntos de muestras subcuenca San Francisco-Pinilla y Andamojo, Guanacaste.

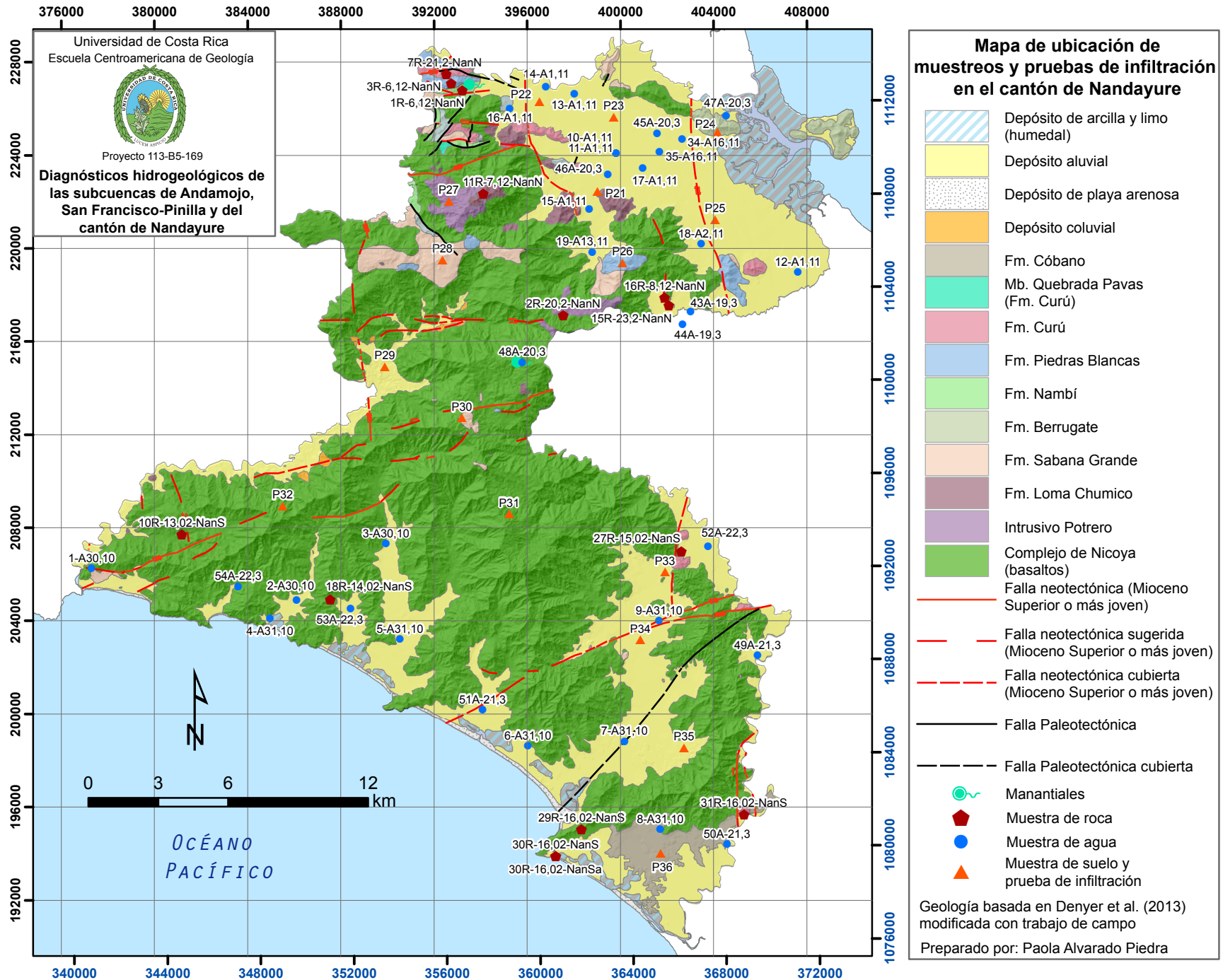


Figura 9 Mapa de ubicación de los puntos de muestreo cantón de Nandayure, Guanacaste.

2.3 Suelos y pruebas de infiltración

2.3.1 Análisis físicos de suelos

Se recolectaron 36 muestras de suelos para determinar la textura, la densidad aparente, la capacidad de campo y el punto de marchitez con el objetivo de tener información de campo para estudios futuros enfocados en la estimación de la recarga acuífera potencial en las zonas de interés. La distribución de los sitios se muestra en las Figuras 8 y 9. Las muestras de suelo fueron analizadas en los laboratorios del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) y se presentan en el Anexo D. El trabajo de recolección de muestras fue realizado por el Geól. Ricardo Granados.

Rodríguez (2009) realizó también análisis de 16 muestras suelos, estos incluyen: capacidad de campo, punto de marchitez, porosidad, densidad y granulometría (los datos se incluyen en el Anexo D) en el sector de San Fransisco-Pinilla, la Figura 10 muestra la ubicación de los mismos.

2.3.2 Análisis químicos de suelos

Los parámetros químicos que se midieron son: acidez, Ca, Mg, K, P, Cu, Fe, Zn, Mn, pH, conductividad eléctrica, carbón orgánico, nitrógeno total, C/N, CIC + bases. Dichos análisis se realizaron en el Laboratorio de Suelos y Foliare del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA). Los resultados se presentan en el Anexo E.

2.3.3 Pruebas de infiltración

El Geól. Ricardo Granados realizó 36 pruebas de infiltración y su respectiva interpretación, el método utilizado es el de doble anillo en los mismos lugares en donde se recolectaron muestras de suelo (Figuras 8 y 9). De igual manera Rodríguez (2009) realizó 17 pruebas de infiltración en los lugares donde recolectó muestras de suelo (Figura 10).

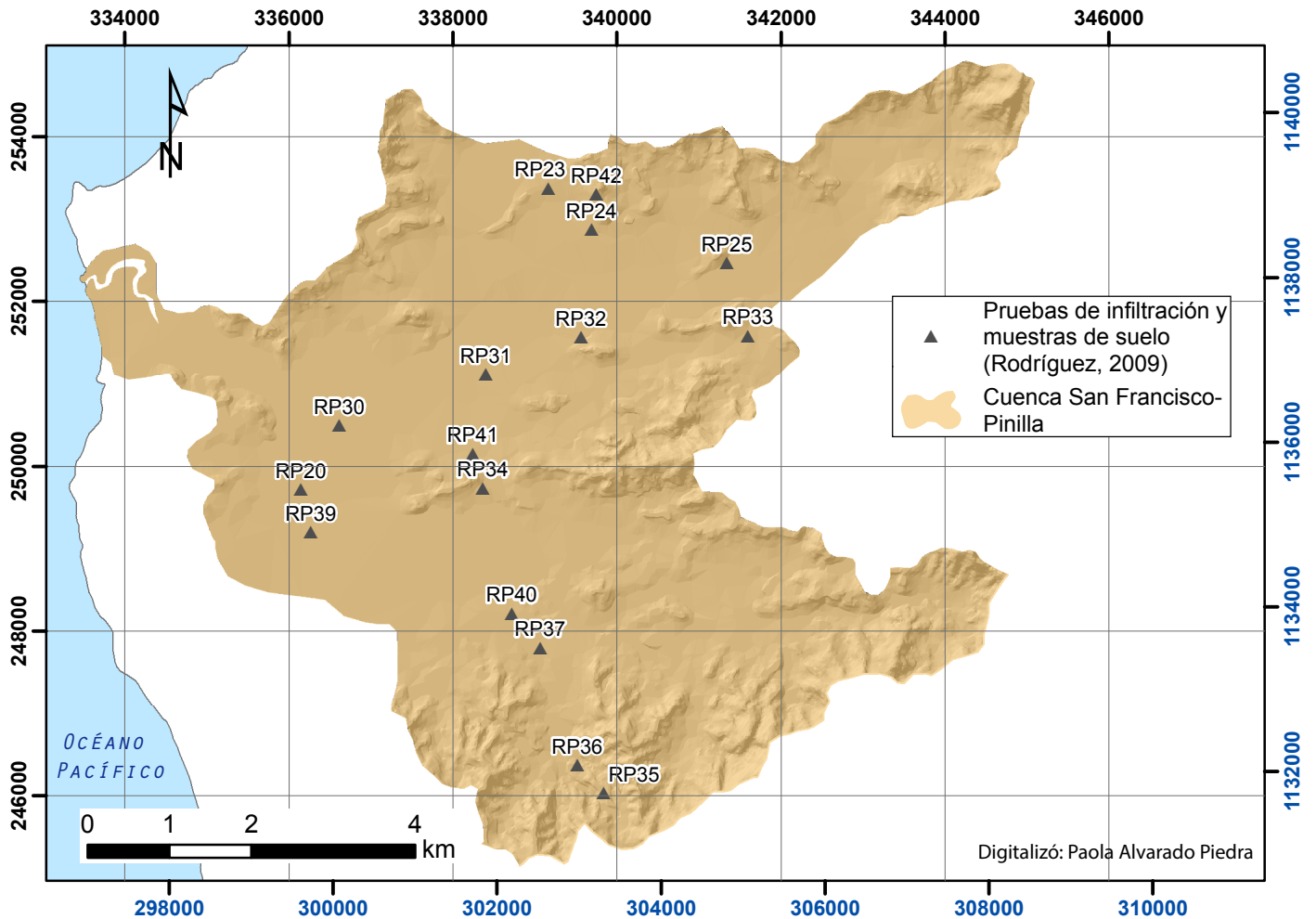


Figura 10 Mapa de pruebas de infiltración y muestras de suelo de Rodríguez (2009).

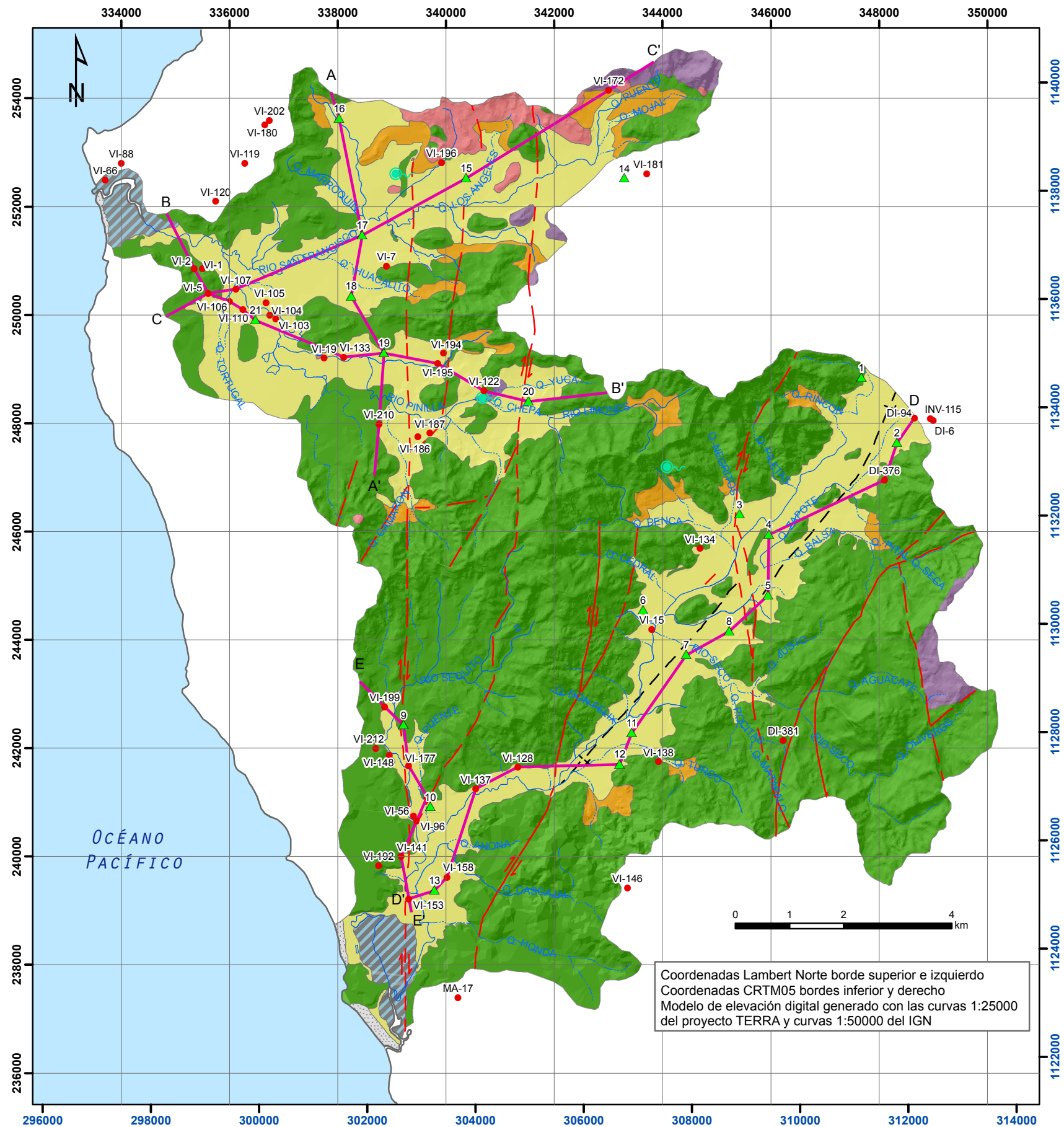
Los principales resultados de las pruebas de infiltración realizadas y los detalles se adjuntan en el Anexo F, los valores obtenidos son bajos, lo cual tiene relación en parte con la textura de los suelos, los cuales son en su mayoría son franco arcillosos hasta franco arenosos, y también con el hecho de que las pruebas se realizaron entre los meses de noviembre y diciembre, después de la tormenta Nate que afectó fuertemente la zona de Guanacaste a finales del 2017, lo cual saturó los suelos, ya que inclusive en los suelos franco arenosos, además en algunos casos se encuentran compactados por el uso para la ganadería.

2.4 Geofísica

Los trabajos de geofísica fueron realizados por el M.Sc. Mario Arias y su equipo de colaboradores del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, CICG, y las actividades realizadas incluyen:

- Se realizaron 38 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) distribuidos en los tres sitios de interés (Figuras 11 y 12)
- Interpretación de los SEV, tomando en consideración la información geológica-hidrogeológica disponible.
- Realización de 2 perfiles geoelectricos de correlación en cada uno de los tres sitios de interés.
- Redacción del informe respectivo.

La longitud total de los SEV fue de hasta 400m, equivalente a una abertura de $AB/2$ máxima de 200m, permitiendo una profundidad de investigación teórica de 50 m. La ubicación de los SEV, se dio según el espacio en el sitio, así como de la información geológica e hidrogeológica disponible que permita su correlación. La elaboración del estudio constó dos etapas. En la primera fue de trabajo de campo e incluyó la ubicación y realización de los SEV, la segunda etapa incluyó la interpretación de cada SEV en un programa especializado, así como la realización de perfiles de correlación geoelectrica con la información de pozos disponibles, y redacción del informe respectivo. Los resultados de los SEVs y su respectiva interpretación se adjuntan en el Anexo G.



Universidad de Costa Rica
 Escuela Centroamericana de Geología

Proyecto 113-B5-169

Diagnósticos hidrogeológicos de las subcuencas de Andamojo, San Francisco-Pinilla y del cantón de Nandayure

Mapa de ubicación de pozos y SEVs cuencas San Francisco- Pinilla y Andamojo

- Depósito de arcilla y limo (humedal)
- Depósito aluvial
- Depósito de playa arenosa
- Depósitos coluviales
- Intrusivo potrero
- Complejo de Nicoya (radiolaritas)
- Complejo de Nicoya (basaltos)
- Falla neotectónica (Mioceno Superior o más joven)
- Falla neotectónica sugerida (Mioceno Superior o más joven)
- Falla neotectónica cubierta (Mioceno Superior o más joven)
- Falla paleotectónica cubierta
- Manantiales
- SEVs
- Pozos con información litológica
- Líneas de perfiles hidrogeológicos
- Red fluvial

Figura 11 Distribución de los SEVs, pozos con información litológica y líneas de perfil en las subcuencas de San Francisco-Pinilla, Santa Cruz, Guanacaste.

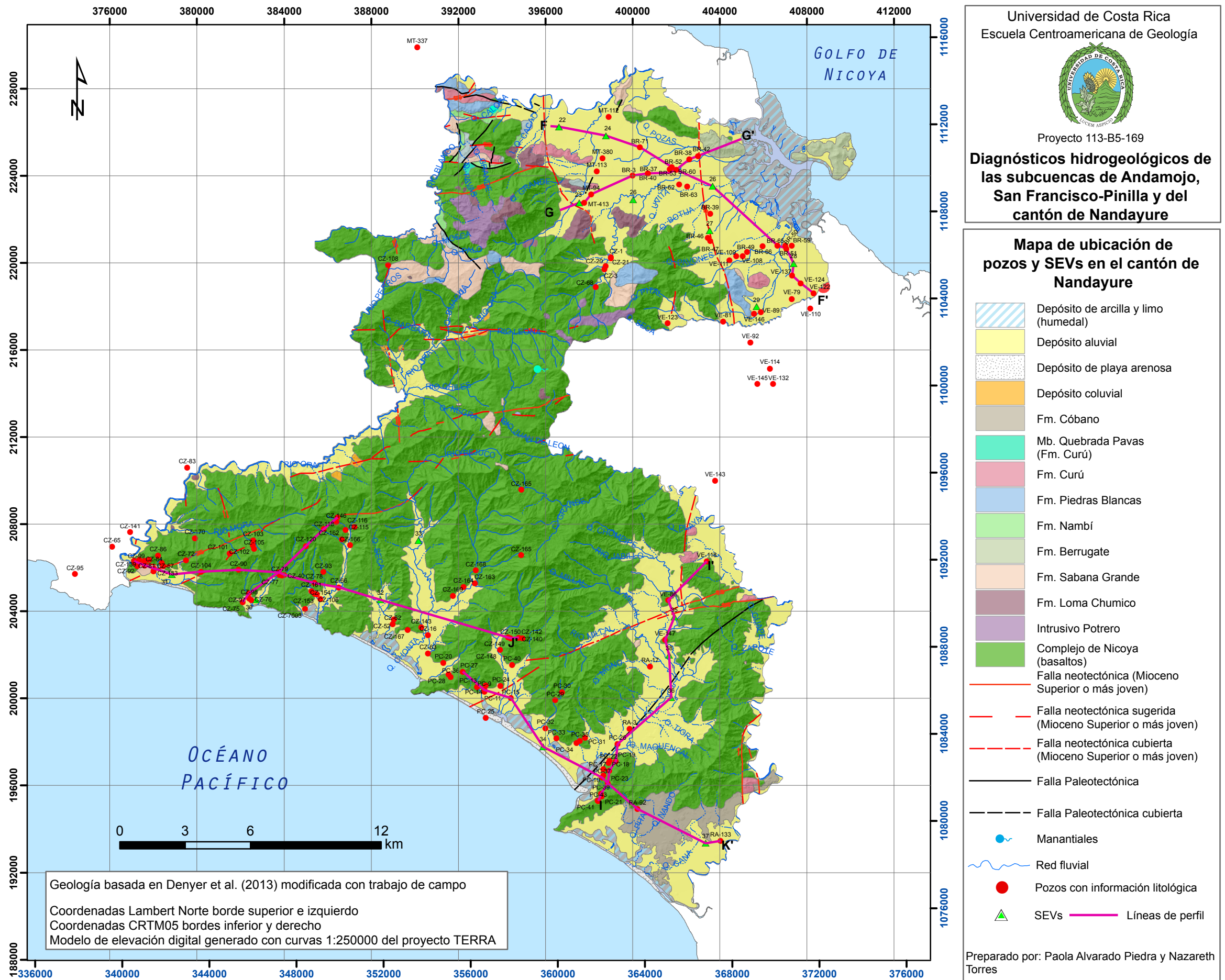


Figura 12 Distribución de los SEVs, pozos con información litológica y líneas de perfil en el cantón de Nandayure.

2.5 Hidrogeología

2.5.1 Trabajos previos

En las zonas de interés se han realizado algunos estudios relacionados con las aguas subterráneas. SENARA (1992) elaboró un Mapa hidrogeológico de la Península de Nicoya, de acuerdo a este existen varias unidades hidrogeológicas en los sectores de Santa Cruz y Nandayure (Figura 13 y 14) según la información del mapa estas son:

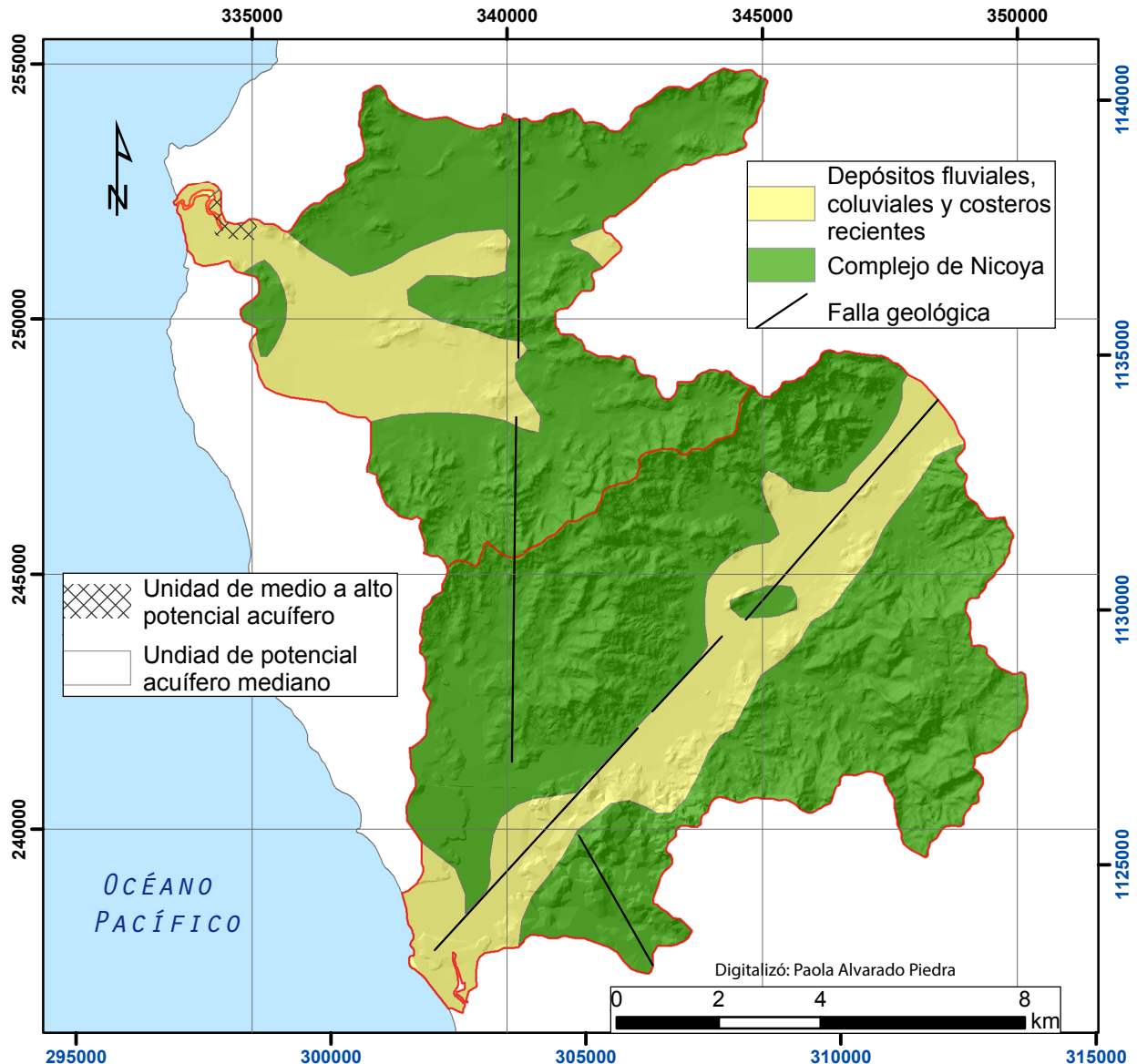


Figura 13 Parte de mapa hidrogeológico de la Península de Nicoya, sector San Francisco-Pinilla, Andamojo. Tomado de SENARA (1992).

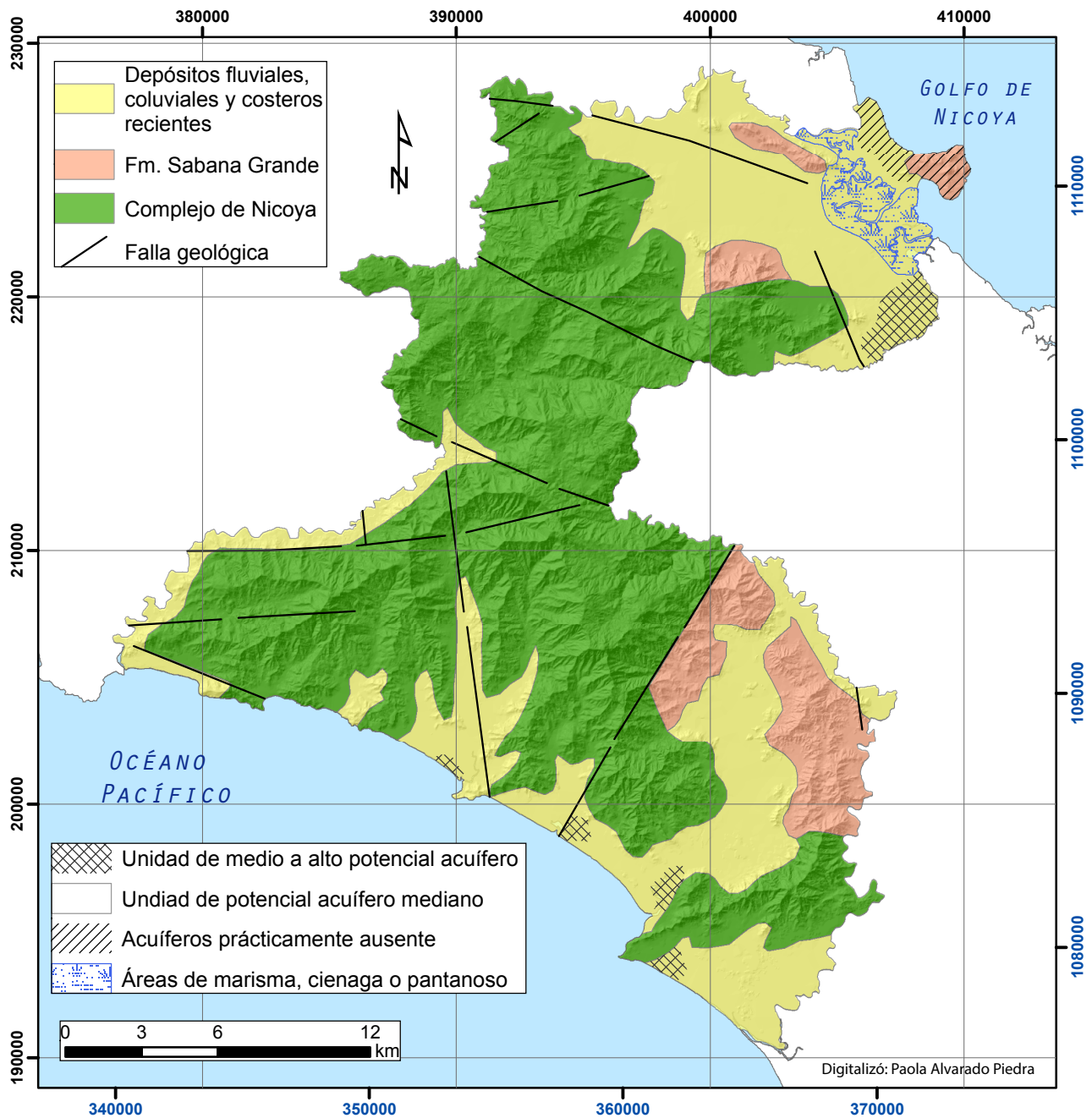


Figura 14 Parte de mapa hidrogeológico de la Península de Nicoya, sector Nandayure. Tomado de SENARA (1992).

- 1- Unidad de potencial acuífero mediano: Son acuíferos locales limitados en capas delgadas o lentes arenosos libres y/o confinados. Incluyen también acuíferos profundos de difícil explotación debido a la gran profundidad de los niveles de agua. Consisten de sedimentos clásticos no consolidados. Permeabilidad baja. Calidad química del agua generalmente buena. Caudales probables $1 < Q < 20$.

- 2- Unidad de medio a alto potencial acuífero: Son acuíferos continuos, generalmente de extensión regional a regional limitada libre y/o confinados. Están constituidos por sedimentos clásticos no consolidados y consolidados. Permeabilidad media, calidad química de las aguas generalmente buena. Cauda probable $20 < Q < 45$ l/s.
- 3- Áreas de marisma, ciénaga o pantanoso, de importancia hidrogeológica relativa muy pequeña o nula.

→ **Cuenca San Francisco-Pinilla**

Rodríguez (2009) realizó para SENARA un diagnóstico vulnerabilidad en distintos acuíferos aluviales y costeros del cantón de Santa Cruz, entre ellos el de Pinilla. De acuerdo con este estudio en la cuenca del río San Francisco-Pinilla existen dos unidades hidrogeológicas, estas son: acuíferos en rocas fracturadas, con flujo fisural predominante y acuíferos porosos, formados en aluviones y coluvios, generalmente subyacidos por acuíferos fisurales, la distribución de estas unidades se puede observar en la Figura 15. En dicho trabajo, se generaron también líneas equipotenciales para conocer la posición de los niveles de agua, con base en información de pozos de SENARA y una campaña de medición de niveles estáticos realizada en 2008 y con base en análisis físico-químicos de aguas de los pozos en la base de datos de SENARA y la medición de la conductividad eléctrica en varios pozos se identificaron áreas con evidencias de intrusión salina, como se observa en la Figura 15.

Para el análisis de la vulnerabilidad Rodríguez (2009) utilizó la metodología G.O.D. propuesta por Foster et al. (2002) la cual considera los siguientes aspectos:

- G (*groundwater occurrence*): relacionada con el grado de confinamiento del acuífero.
- O (*overall aquifers class*): relacionada con el tipo de material de cobertura.
- D (*depth*): corresponde con la profundidad del nivel estático.

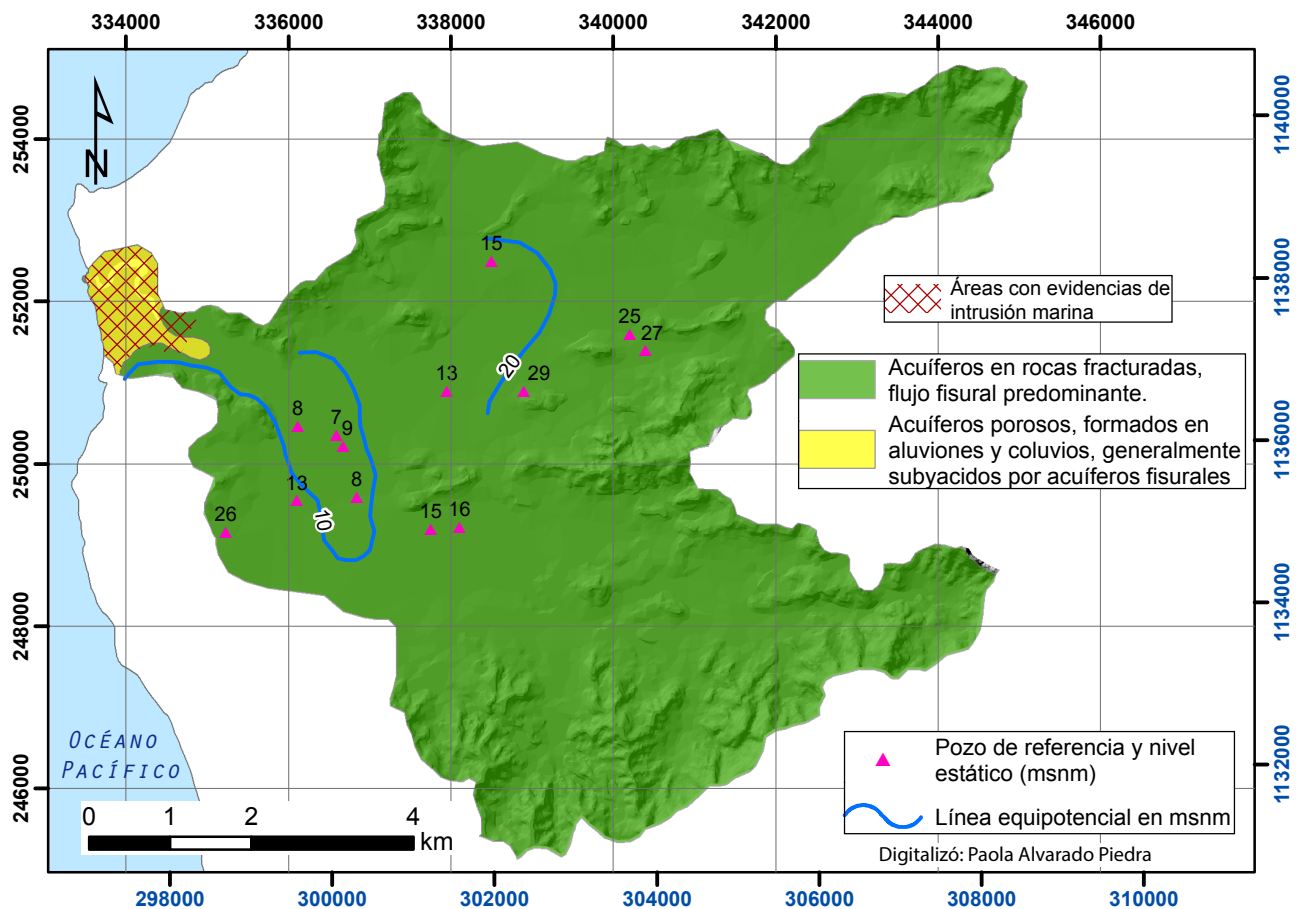


Figura 15 Mapa hidrogeológico de la cuenca San Francisco-Pinilla según Rodríguez (2009).

La información base para la elaboración del mapa se basó en los datos técnicos de pozos registrados en SENARA, el mapa resultante se puede observar en la figura 16. Rodríguez (2009) enfatiza que este mapa debe tenerse en cuenta que la precisión del mismo será mayor será cuanto más densa y confiable sea la información básica, en este caso la mayoría de la información se concentra en las zonas más cercanas a la costa, mientras que los sectores montañosos no cuentan con pozos que den referencias completas o simplemente no existen, lo que hace necesario la extrapolación de la información. Las fuentes potenciales de contaminación identificadas en el mapa corresponden con centros de población que han crecido de manera natural y algunos desarrollos turísticos que de dan e manera acelerada, estos no incluyen viviendas aisladas (Rodríguez, 2009).

Finalmente Rodríguez (2009) realizó una zonificación acuífera con base en la clasificación de la capacidad de infiltración (o permeabilidad) de los suelos y la vulnerabilidad a la contaminación. Para elaborar dicha zonificación el autor definió tres categorías de

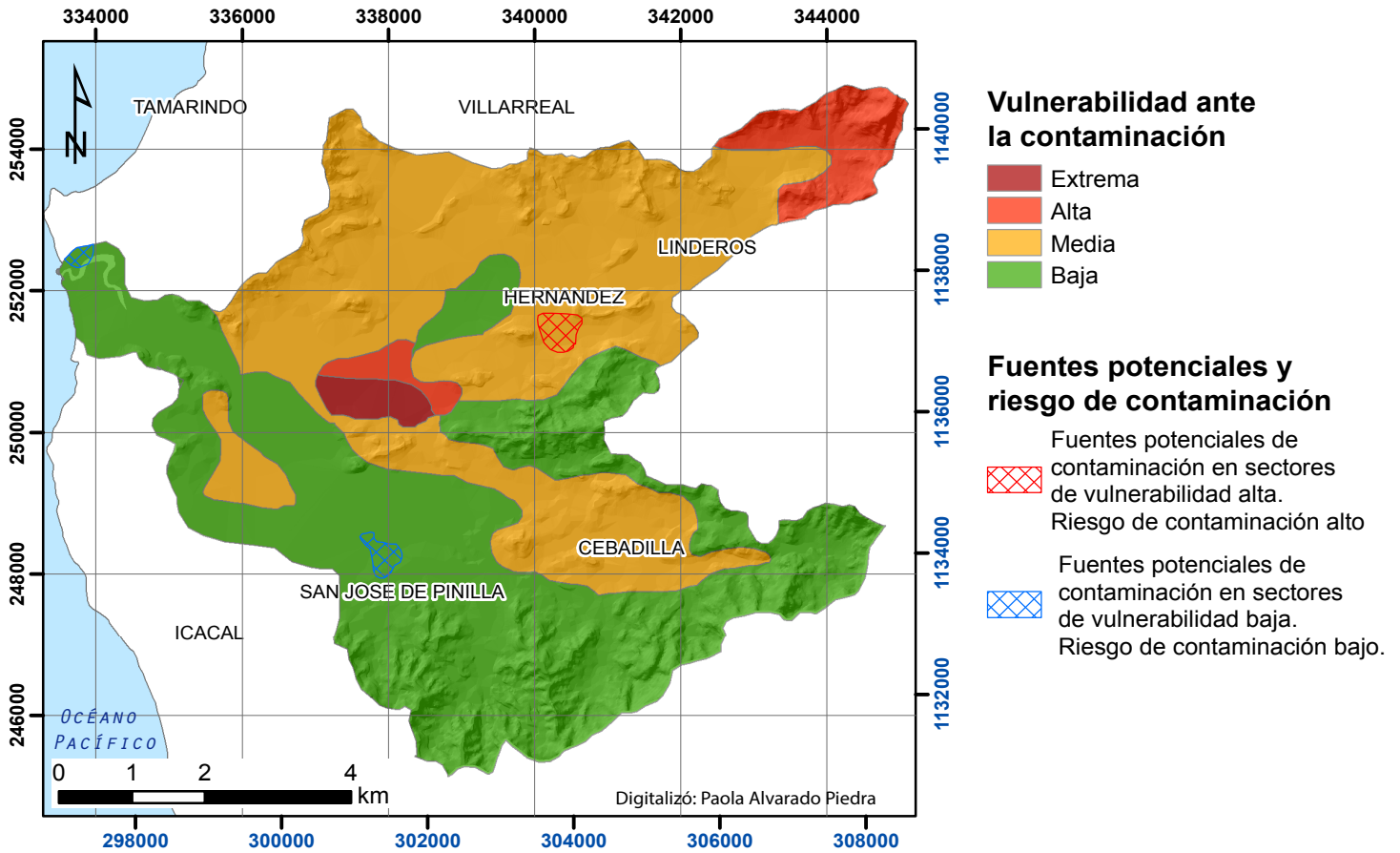


Figura 16 Mapa de vulnerabilidad a la contaminación y fuentes potenciales de contaminación en la cuenca San Francisco-Pinilla, según Rodríguez (2009).

permeabilidad: baja (0-0,5 m/d), media (0,5-2 m/d) y alta mayor a 2 m/d) (datos de infiltración se encuentran en anexo F) este mapa se sobrepuso al mapa de vulnerabilidad (Figura 16) y se construyó el mapa de zonificación acuífera, los resultados obtenidos por Rodríguez (2009) en la cuenca del río San Francisco-Pinilla se pueden observar en la Figura 17, los detalles de las categorías de zonificación se observan en el cuadro 7.

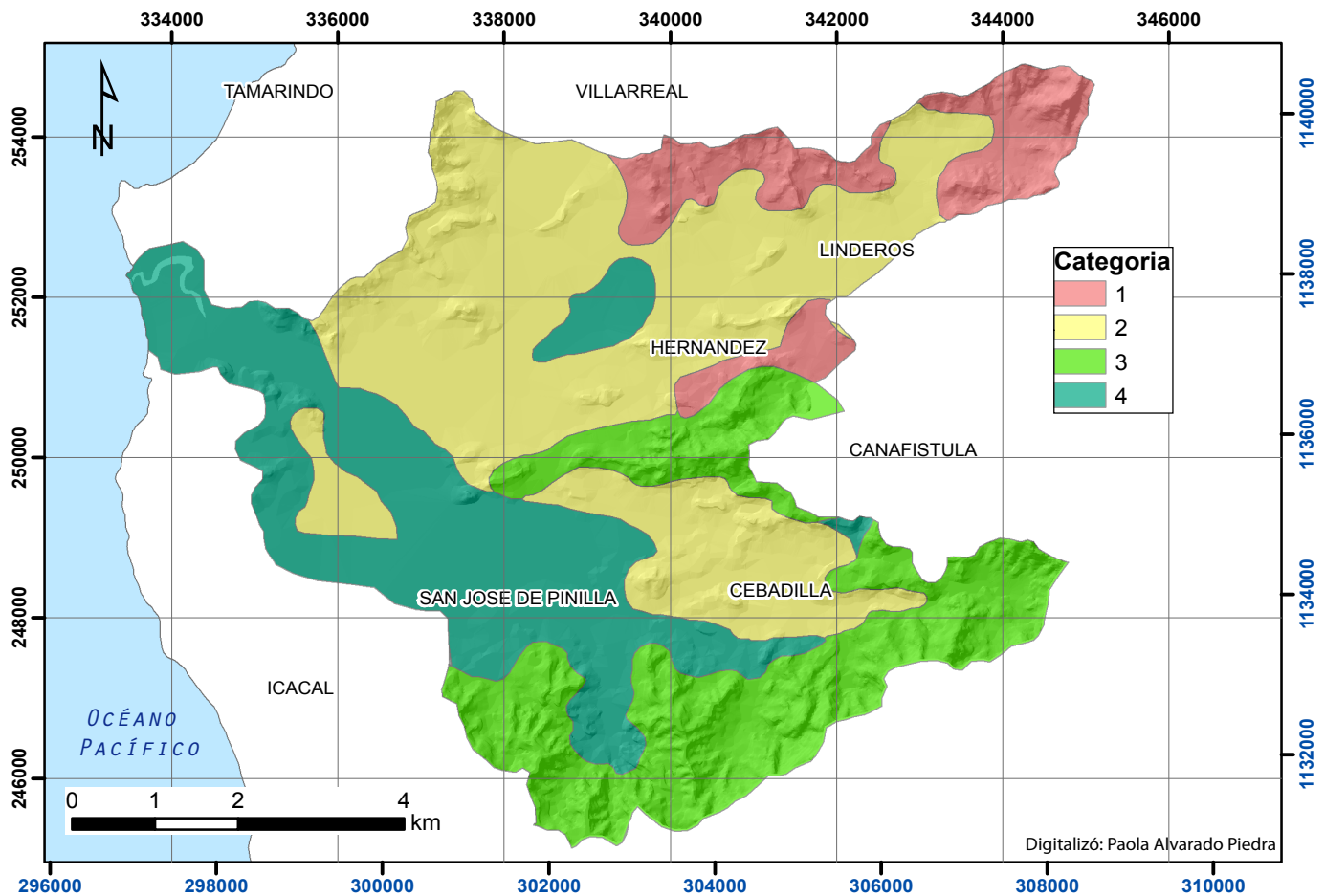


Figura 17 Mapa de zonificación acuífera en la cuenca del río San Francisco-Pinilla según Rodríguez (2009). Ver detalle en cuadro 5

Cuadro 5 Características de las categorías de zonificación hidrogeológica. Tomado de Rodríguez (2009).

Categoría	Observaciones
1	Alta vulnerabilidad y alta permeabilidad superficial. Preferiblemente desarrollo forestal, con limitada impermeabilización del terreno y limitado vertido de fluidos potencialmente contaminantes de todo tipo.
2	Alta vulnerabilidad y baja permeabilidad superficial. El efecto de la impermeabilización del terreno no es tan importante como el vertido de fluidos potencialmente contaminantes de todo tipo.
3	Baja vulnerabilidad y alta permeabilidad. Áreas de recarga donde el impacto de la impermeabilización del terreno es el factor más importante. Debe evitarse el vertido de fluidos potencialmente contaminantes persistentes
4	Sectores de baja vulnerabilidad y baja capacidad de infiltración. En principio, el desarrollo no tendría gran impacto en la cantidad ni en la calidad del agua subterránea.

→ **Cuenca de Andamojo**

Herrera (1980) describe el acuífero de la cuenca Andamojo como libre, aluvional, constituido por inter-estratificaciones arcilla, arena y grava con algunos sectores de confinamiento, espesor varía entre 15 y 35 m.

Un estudio de Rodríguez (2010) afirma que existen acuíferos en el horizonte superior de los basaltos, así como también en la parte aluvional, sin embargo los principales acuíferos, se dan en esta última unidad, donde se reportan caudales máximos en pozos de 11 l/s, mientras que en el acuífero que se forma en los basaltos, se restringe al horizonte superior alterado y meteorizado, donde se reportan caudales entre 1 y 3 l/s.

En general, Rodríguez (2010) indica que los niveles de agua subterránea se encuentran en el rango de un metro y hasta los 45 metros, aumentado la profundidad hacia las partes montañosas.

Rodríguez (2010) realiza el cálculo de la recarga potencial usando el método de Penman-Grindley, con lo cual determina que el volumen promedio de la recarga anual es de $30.67 \times 10^6 m^3$.

Mora (1978) clasifica las aguas como bicarbonático-cálcico-magnésicas, mientras que Herrera (1980), clasifica las aguas como Bicarbonatado-cálcicas.

Por otra parte Rodríguez (2010) realiza análisis bacteriológico y físico químicos; a tres pozos de la zona, que dan como resultado parámetros dentro de las normas de potabilidad, a excepción de un pozo excavado que es susceptible a la contaminación por la cercanía con un tanque séptico y derrames de aguas en las inmediaciones.

→ **Cantón de Nandayure**

En el cantón de Nandayure se cuenta con el mapa hidrogeológico de SENARA (1992) descrito anteriormente y existen 2 estudios más en áreas muy localizadas del cantón.

Protti (1981) realizó un estudio con fines hidrogeológicos en el sector noreste de la Península de Nicoya, limitados por las poblaciones de Jicaral de Puntarenas y Santa Rita de Nandayure. De acuerdo con este trabajo las principales formaciones acuíferas de esta

región están representadas por cauces fluviales antiguos cuya localización fue determinada por métodos geoelectricos (Protti, 1981), el autor propone es establecimiento de una zona de no explotación de aguas subterráneas, debido al alto riesgo de contaminación por aguas saladas.

Vargas (2013) realiza un modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca baja del río Ora, el cual cubre una pequeña parte del sector sureste del cantón. En este estudio se definen dos niveles de aguas en la zona, uno en los aluviones en las partes bajas en los que hay recarga directa por infiltración y otro en rocas volcánicas (basaltos) que se recarga por percolación a través de las fracturas de la roca. Además Vargas (2013) estima una recarga neta potencial de 827,58 mm/año, lo que representa un 32% del total de precipitaciones.

2.5.2 Correlación de pozos

Se revisaron 198 expedientes de los pozos existentes en el registro del SENARA, los resultados se resumen en el Anexo H. A partir de la revisión de los informes de perforación se observa que las profundidades los pozos no superan en su mayoría los 50 metros, solo 59 pozos de todos los expedientes tiene profundidades mayores.

2.5.3 Perfiles hidrogeológicos

Con base en los mapas geológicos, las descripciones litológicas de pozos de la base de datos de SENARA y los SEVs se realizaron al menos dos perfiles hidrogeológicos para cada zona de estudio, estos se describen a continuación.

2.5.3.1 Zona subcuenca San Francisco-Pinilla

Se construyeron 3 perfiles hidrogeológicos, A-A', B -B' y C -C' con longitudes de 7,3 km, 9,5 km y 10,2 km respectivamente, el rumbo de los mismos se puede observar en la Figura 11 y los datos para su elaboración se encuentra en los Anexos H y G.

Como se puede observar en los perfiles (Figura 18), el basamento está compuesto por basaltos del Complejo de Nicoya, el cual es intruido por el Intrusivo Potrero al noreste y sureste de la cuenca en estudio, es espesor máximo de basaltos que se describe en los pozos es de 120 m hacia el sector de San José de Pinilla (perfil A). Estos normalmente se encuentran aflorando en sectores montañosos, pero también se encuentran en zonas planas y como pequeños cerros sobresaliendo de la planicie aluvial.

De acuerdo con la descripción de los pozos, normalmente la parte superior de los basaltos presenta un horizonte fracturado y meteorizado cuyo espesor va desde unos pocos metros hasta alrededor de 29 m, tal como se observa en el perfil B. Según la información geofísica algunos sectores se encontraron capas de resistividad moderada entre o sobre los basaltos, esta se asoció con sectores fracturados, meteorizados o con más contenido de arcilla o arena lo cual podría implicar la presencia de un nivel de agua, como se puede observar en los tres perfiles (el detalle de los SEVs se encuentra en el Anexo G).

Sobreyaciendo los basaltos se encuentran radiolaritas del Complejo de Nicoya, estas se encuentran hacia el noreste de la cuenca (perfil C-C') y también se correlacionó con una capa de resistividad alta en el SEV 18 (perfil A-A') basado en observaciones de campo.

La unidad más superficial observada en los perfiles corresponde con los depósitos aluviales, estos están constituidos por arenas finas a gruesas, limos y arcillas. Debido a la escala vertical de los perfiles y que no todas las descripciones son muy detalladas se decidió dividir esta unidad únicamente en arenas y arcillas y limos. En general los espesores mínimos se observan en el sector Sur de perfil A-A' y sureste de B-B', donde se encuentran espesores entre 2 y 9 m con un promedio de 5 m de arenas principalmente, esto se ubica hacia el Sur-Sureste del área, es decir la parte alta-media de la cuenca del río Pinilla.

Mientras tanto mayores espesores de aluvión se observan a lo largo del perfil C-C', el cual es casi paralelo al río San Francisco (Figura 11), donde los espesores tienen en promedio

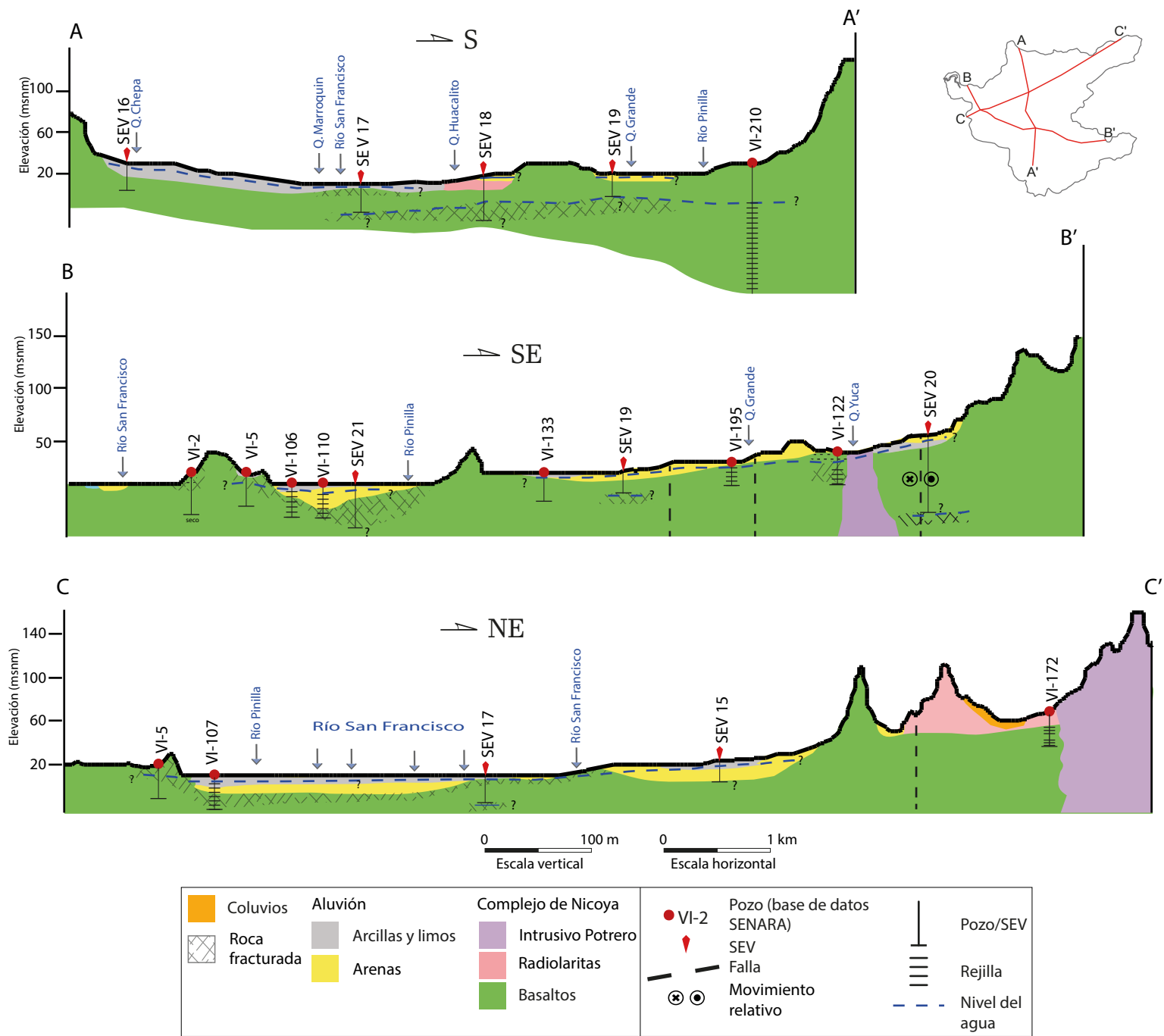


Figura 18 Perfiles hidrogeológicos de la subcuenca San Francisco-Pinilla, Santa Cruz, Guanacaste.

17 m, compuestos por una capa de alrededor de 7 m de arcillas y limos y 10 m de arenas, sin embargo este espesor disminuye considerablemente en el SEV 17 (perfil C-C'). El pozo VI-110 es el que describe mayor espesor de aluvión con 22 m en total.

Los pozos normalmente captan el aluvión y en algunas ocasiones los basaltos, estos describen niveles de agua someros, que varían, en general, entre 2 m y 8m con 4 m de promedio, algunos pozos en el sector Oeste del área (por ejemplo el VI-2, perfil B-B') fueron perforados sobre basaltos y resultaron secos. Los niveles más profundos, están relacionados con los sectores más fracturados o meteorizados del Complejo de Nicoya como se explicó anteriormente, el pozo VI-210 también reporta un nivel estático de 21 m. Es importante mencionar que algunos pozos ubicados en Hacienda Pinilla tiene mediciones de nivel para un mismo pozo en varios meses del año, estos muestran variaciones de hasta 7 m (ver detalles en Anexo H).

2.5.3.2 Zona subcuenca Andamojo

En la cuenca de Andamojo se elaboraron 2 perfiles hidrogeológicos, el perfil D-D' tiene una dirección NE-SW y una longitud de 14,4 km. Mientras que el perfil E-E' se ubica al Sur de la cuenca Andamojo, tiene una dirección noroeste – sureste y una longitud de 4,8 km (Figura 11).

Se identifican tres unidades, la primera coincide con los basaltos del Complejo de Nicoya, según la información de la base de datos de SENARA los describen como basaltos color gris masivos, con algunos sectores de alteración y fracturación en la parte superior. El espesor máximo que se determinó para esta unidad fue de 85 m, las inmediaciones de Veintisiete de Abril, tal y como se observa en la Figura 19 (perfil D-D'), el espesor mínimo es de 27 metros y se ubica entre los poblados de Paraíso y Junquillal, específicamente 200 m al noreste de Quebrada Turco (Figura 11), el espesor promedio es de 55,4 m aproximadamente.

La segunda unidad corresponde con el aluvión, está conformada por arcillas y limos, arenas y gravas. De forma general lo describen como arcillas color café a rojizo, en ocasiones con algo de arena y limos, capas de arena con clastos y bloques de lavas basálticas color marrón y negro. Su espesor máximo determinado es de 34,8 m y se localiza en Paraíso, específicamente 200 m de la Quebrada turco (Figura 11), tal y como

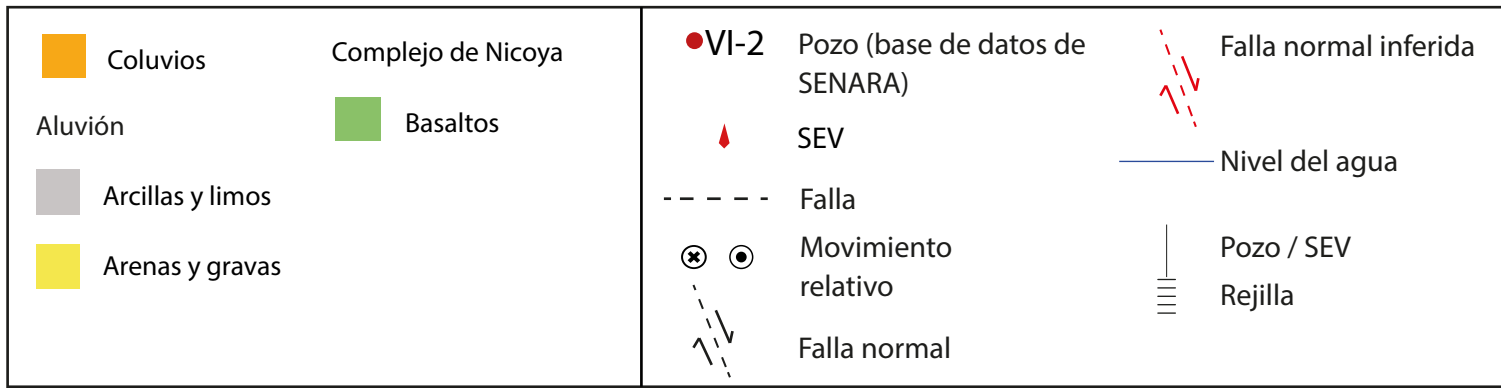
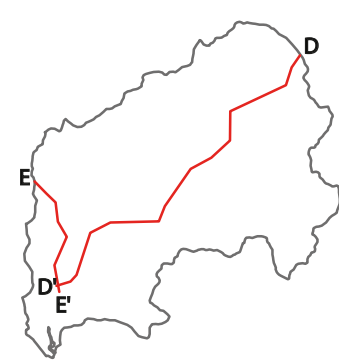
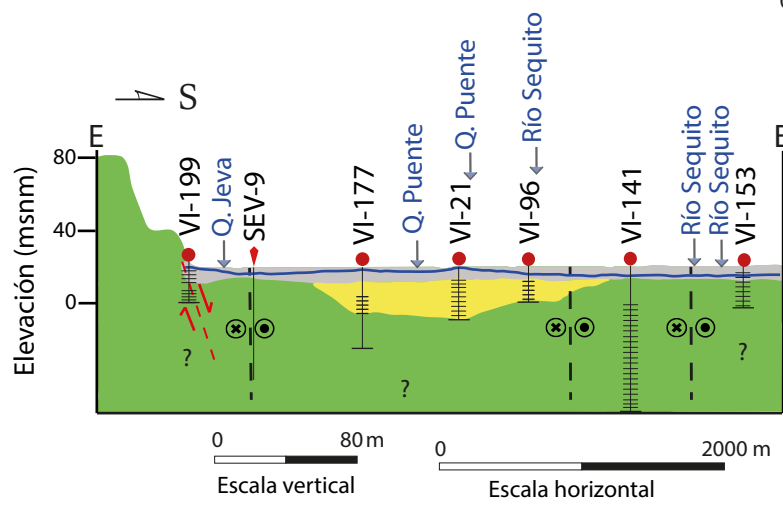
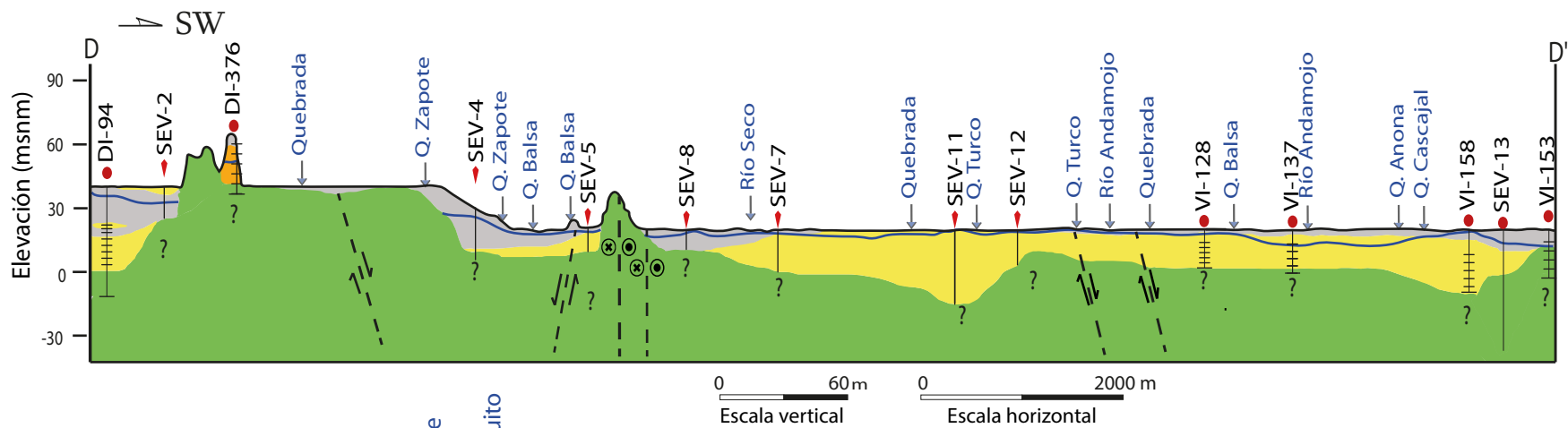


Figura 19 Perfiles hidrogeológicos de la subcuenca Andamojo, Santa Cruz, Guanacaste.

se observa en el perfil D-D', el espesor mínimo es de 6,8 m y se sitúa en la misma localidad, a 1,5 km al noreste de playa Junquillal (Figura 11), en las cercanías del río Sequito, tal y como se puede observar en el perfil E-E' (Figura 19). El espesor promedio de esta unidad es de 16 metros.

Es importante recalcar que la correlación del pozo DI-194 se hizo a partir del SEV-2, además de tomar en cuenta el contexto, es por eso que se interpreta como una sucesión conformada en la parte superior por arcillas, limos y arenas y en la parte inferior basaltos del Complejo de Nicoya, específicamente para ese pozo.

En el perfil E-E' se puede observar que la profundidad del agua subterránea es variable a lo largo de la cuenca entre 0,15 m.b.n.s. (reporte del pozo VI-158) hasta los 9 m.b.n.m. (pozo VI-153), para un nivel medio de 4,3 m.b.n.s., tal nivel se ubica en la capa de limos y arcillas.

Durante las giras de campo se ubicó un manantial, con la guía del propietario de la finca, en las coordenadas: 344021 E / 247143 N (Figura 11), el mismo se encuentra captado actualmente, no fue posible medir el caudal ya que se encontraba tapado, y la captación no cuenta con una llave de salida, esta lleva el agua directamente a la vivienda, no se observó el tipo de roca, sin embargo a 1 m aproximadamente se localiza una quebrada, donde afloran lavas basálticas.

En los pozos DI-196 y VI-56 se detecta una variación en los niveles del agua, lo que da indicios de que el acuífero ubicado en la zona aluvial de la cuenca Andamojo, puede tener algunos sectores de confinamiento.

2.5.3.3 Sector Nandayure noreste

En el sector noreste de Nandayure se construyeron 2 perfiles hidrogeológicos, F-F' y G-G' los cuales tiene longitudes de 15,2 km y 9,1 km respectivamente, su rumbo se puede observar en la Figura 12.

En esta zona del cantón de Nandayure el basamento local está constituido por basaltos del Complejo de Nicoya, los cuales son sobreyacidos por rocas sedimentarias del cretácico superior – paleógeno y los depósitos cuaternarios. En los perfiles realizados este basamento únicamente se logró ubicar en el extremo sureste del perfil F-F' con la

descripción del pozo VE-124 el cual lo reporta a una profundidad de 19 m y en el extremo suroeste del perfil G-G' donde el pozo ME-413 indica una profundidad del mismo a 9 m (Figura 20). De los 8 SEVs en la zona, únicamente dos muestran un aumento en la resistividad en su última capa (SEV 22 y SEV24), por lo que podrían relacionarse con el basamento alterado, pero debido a la localización de los sondeos estos se correlacionan con la Formación Curú debido a su cercanía en el mapa geológico y su dirección de buzamiento perpendicular a la línea de perfil, sin embargo estas capas podrían estar siendo confundidas con capas de arenas o gravas (ver más detalles en Anexo G).

En el perfil G-G' los pozos BR-3, BR-37 y BR-40 describen rocas sedimentarias las cuales, debido también a la cercanía en el mapa geológico, se correlacionan con la Formación Loma Chumico, el espesor máximo lo reporta el pozo BR-3 con 23 m. En el mismo perfil hacia el noreste se encuentra la formación Berrugate, ningún pozo ni SEV se correlaciona con la misma, su ubicación se debe a que aflora en superficie de acuerdo con el mapa geológico.

Sobreyaciendo las unidades anteriores se encuentran los depósitos aluviales los cuales están constituidos por materiales de granulometría heterogénea, sin embargo según la descripción de los pozos hay una predominancia de materiales arcillo-limosos. Al igual que en los perfiles anteriores el aluvión fue dividido en arenas y arcillas y limos debido a la calidad de las descripciones litológicas de los pozos, pues no todas cuentan con un buen detalle. Las mayores profundidades del aluvión se encuentran en la zona central del depósito, donde los pozos y sondeos describen hasta 60 m de aluvión sin lograr llegar al basamento, sin embargo algunos pozos que no se encuentran en la línea de perfil pero se encuentran en la zona central del aluvión, por ejemplo BR-39 (Figura 11) describe 59 m de espesor de material aluvial.

Con base en el mapa geológico se trazaron tres fallas que cortarían la secuencia aluvial, en el perfil F-F' esta corresponde con la falla Juan de León, la misma falla corta el perfil G-G' en el extremo noreste, mientras que la falla Carmona corta el perfil G-G' en su extremo suroeste, ambas fallas son dextrales, podrían realizarse SEVs o piezómetros a ambos lados de las falla para determinar si hay alguna influencia de estas en el aumento de la zona aluvial. La falla entre los pozos BR-3 y BR-37 es inferida con base en el aumento del espesor de la Formación Loma Chumico en el pozo BR-3.

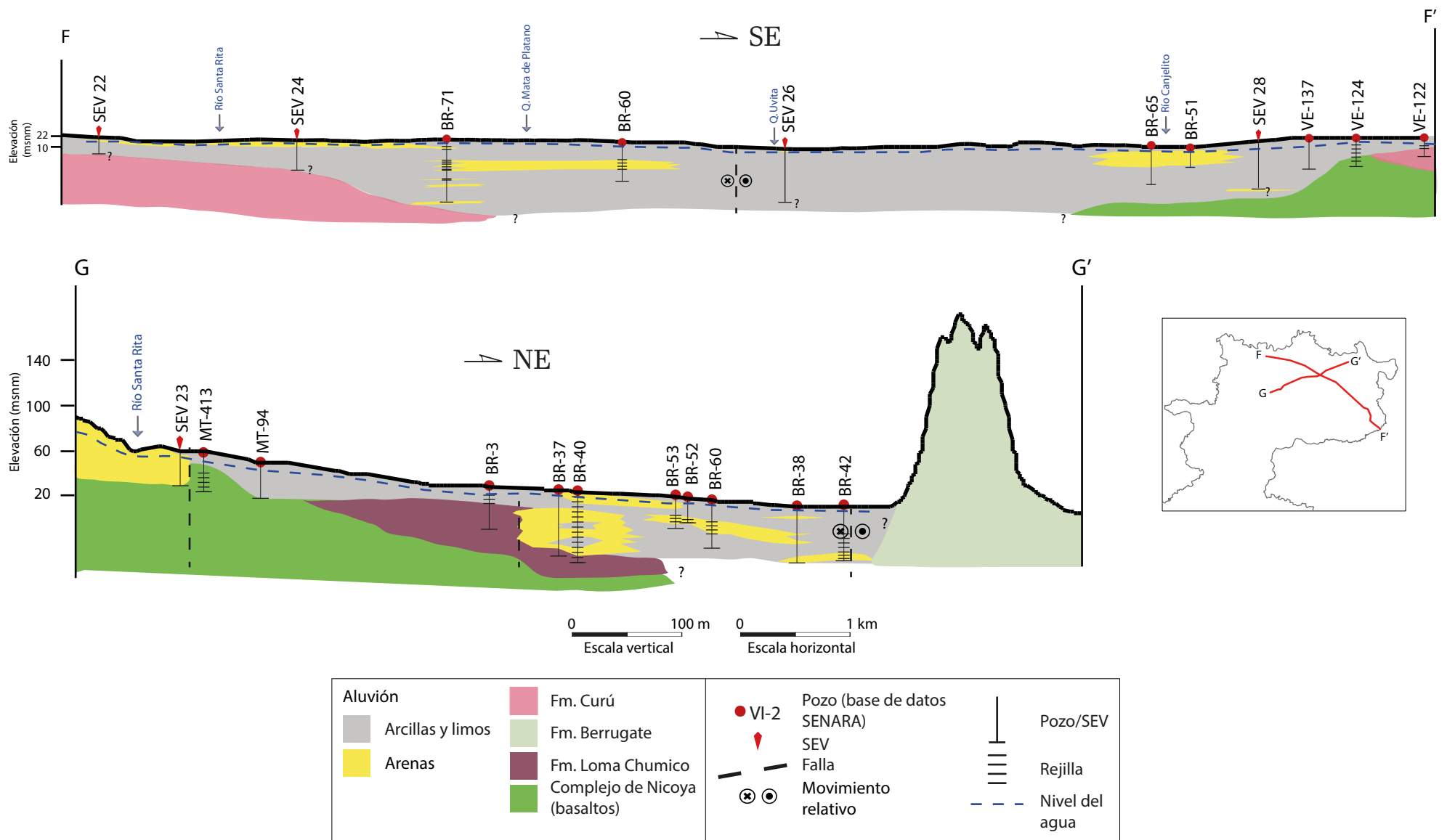


Figura 20 Perfiles hidrogeol3gicos de la zona noreste del cant3n de Nandayure, Guanacaste.

El nivel del agua es somero, normalmente los pozos describen la profundidad de este entre 2 m y 7 m.

2.5.3.4 Sector Nandayure suroeste

En esta zona se realizaron 4 perfiles, estos son el H-H', I-I', J-J' y K-K' y tienen una longitud aproximada de 5,8 km, 13,2 km, 18,2 km y 14,7 km respectivamente, la ubicación de estos se puede observar en la Figura 12.

Como se observa en los perfiles H – H' e I – I' (Figura 21) muestran la presencia del Complejo de Nicoya en su mayoría, al ser una zona levantada tectónicamente, los mayores espesores que se observan son en las zonas altas. Para el caso del perfil H – H' se puede observar la unidad de depósitos aluviales que rondan los 50 m de espesor. Hacia la parte noreste sobre los basaltos se acumula un pequeño espesor de 40 m de arcillas, esto podría asociarse a la falla de desplazamiento de rumbo presentada; en algunos casos, estas arcillas sobreyacen basaltos meteorizados. El nivel freático se encuentra a diferentes profundidades, posiblemente alojado en las fracturas que caracterizan estos basaltos.

En el perfil I – I', en la parte suroeste (Figura 21) se presenta la depositación de los abanicos aluviales de la Formación Cóbano; el cual podría deberse al levantamiento tectónico de los basaltos del Complejo de Nicoya en cerros de hasta 150 m de altura. Se muestra además una capa de basaltos meteorizados de la parte central del perfil (40 m), sobreyacida por 20 m de los depósitos aluviales presentes en el sitio. El nivel freático principalmente en las arenas de las zonas planas, caracterizado como depósitos aluviales.

En el Perfil J – J' se observa principalmente la predominancia de los basaltos del Complejo de Nicoya (Figura 22), además de los levantamientos típicos de esta zona, formando cerros de hasta 250 m de altura; en las partes planas se alojan los depósitos aluviales donde se observa que en algunos pozos los niveles freáticos se localizan en esta capa de arenas (espesor de 15 m).

Para el perfil K – K' en la parte al sureste se observa la depositación de la Formación Cóbano, resultado de una fuerte erosión y levantamiento de las rocas de Complejo de Nicoya. No se conoce el espesor real de esta formación, sin embargo puede rondar los 70 – 100 m según lo que se observa en el perfil (Figura 22). El nivel freático se aloja en las arenas de los depósitos aluviales (que tiene espesor de 10 m).

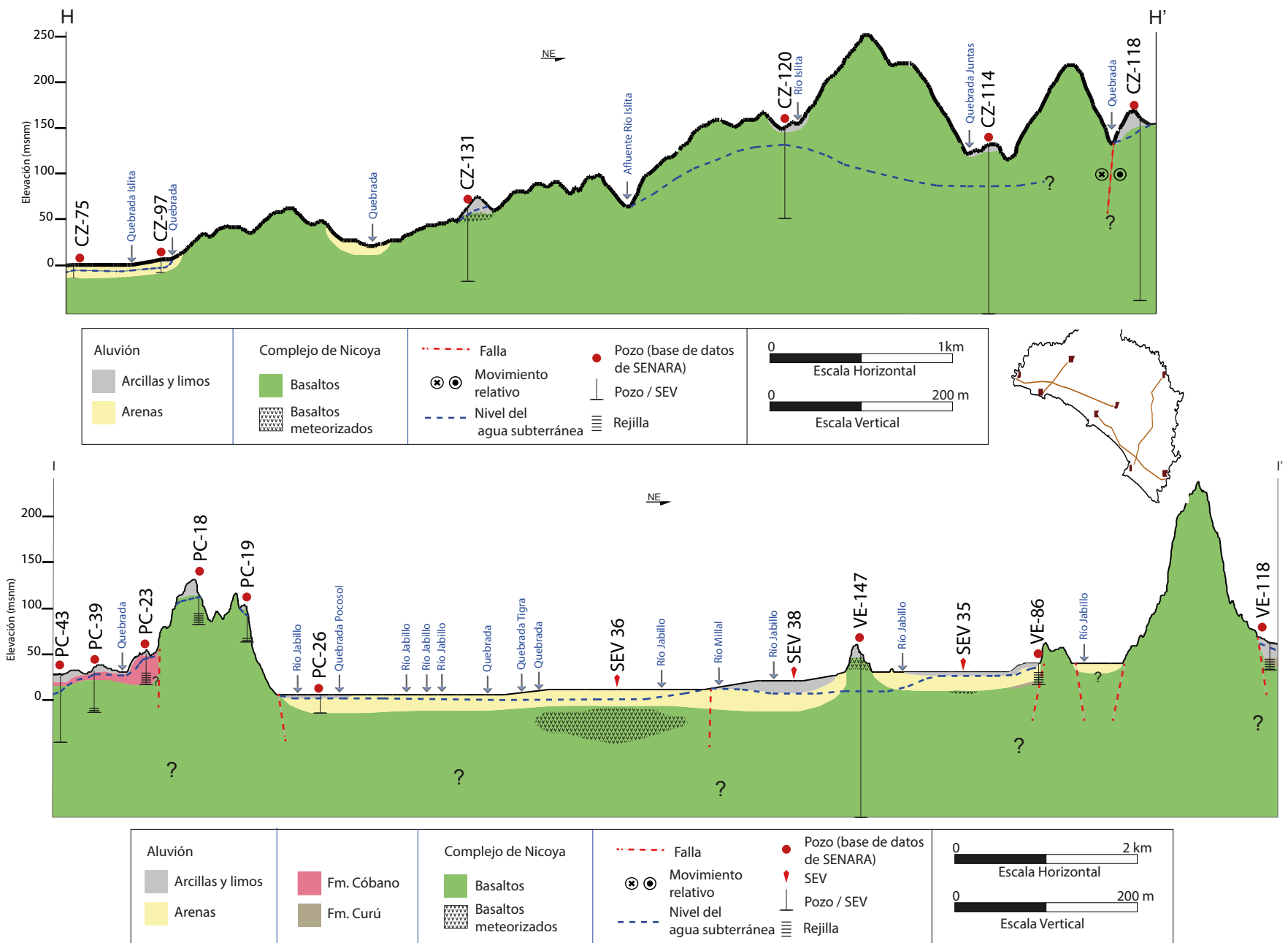


Figura 21 Perfiles hidrogeol3gicos H-H' e I -I' de la zona sur del cant3n de Nandayure, Guanacaste.

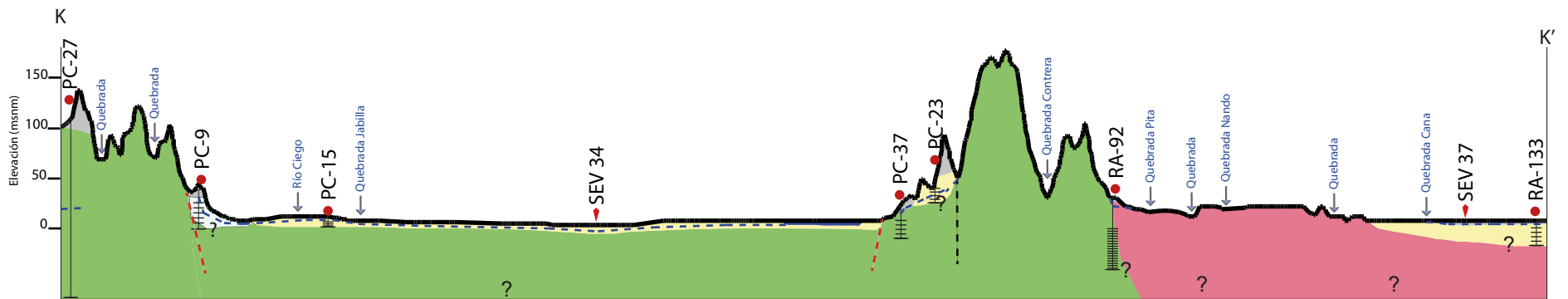
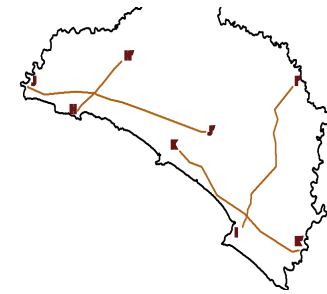
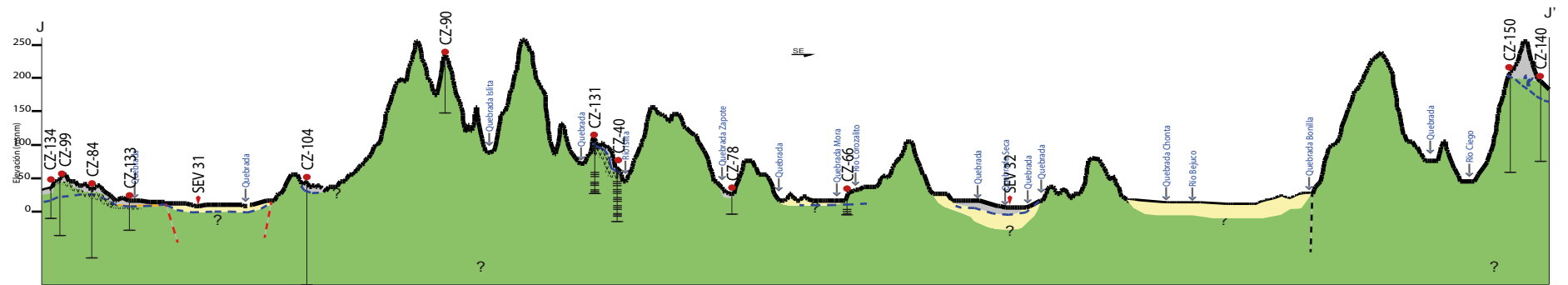


Figura 22 Perfiles hidrogeol3gicos H-H' e I-I' de la zona sur del cant3n de Nandayure, Guanacaste.

2.5.4 Redes de flujo

Con base en los datos de los pozos de SENARA y la geología en superficie se construyó la red de flujo del agua subterránea de las zonas de estudio. Puesto que la mayoría de la información se concentra en las zonas aluviales las equipotenciales se restringieron a esta unidad, es decir para la elaboración de las mismas se utilizaron pozos que captaran los aluviones. La interpolación de los datos fue realizada en el software Surfer, mediante el método *Kriging*.

En el sector de Nandayure las equipotenciales se realizaron cada 2 m (Figura 23). Para el caso de la cuenca San Francisco-Pinilla la elevación agua sobre el nivel del mar se encuentra entre 38 m y 6 m, en general la dirección del flujo es oeste-noroeste y el gradiente hidráulico promedio se calculó en 0,017 (1,7%), los valores menores se encuentran al Oeste de la cuenca, en las áreas más planas donde disminuye casi a 0.

En la cuenca del río Andamojo la red de flujo se trabajó en dos partes, sector norte y el sector sur. A partir de las equipotenciales generadas se determinó que para el sector norte de la cuenca, que abarca desde Veintisiete de Abril hasta la parte de media de la cuenca, el flujo del agua tiene una dirección hacia el suroeste, en Paraíso centro y Junquillal el flujo presenta una dirección sureste preferencialmente. Para el sector Norte de Paraíso la dirección del agua fluctúa hacia el noroeste, posiblemente afectada por el sistema de fallas dextral que atraviesa la zona. Se determina también que el gradiente hidráulico es mayor en el sector Sur de la cuenca y disminuye hacia el Norte de la misma (Figura 23).

Como se muestra en la Figura 24, en el cantón de Nandayure las isopiezas se realizaron cada 5 m, en la zona noreste del cantón de Nandayure el flujo es hacia el noreste, es decir hacia el Golfo de Nicoya. El gradiente es homogéneo en la zona central donde se calculó en 0,037 (3,7 %), el promedio del sector es 0,018 (1,8 %), los valores disminuyen hacia la costa, al noreste.

En la zona sur del cantón la dirección del flujo subterráneo se da hacia las zonas costeras del área suroeste y en el valle más grande en donde está el río Jabillo es hacia el sureste; esto debido a varios factores, uno de ellos es la gravedad, pues las zonas hacia el noroeste son montañosas, donde podría alojarse agua entre las fracturas de los basaltos del Complejo de Nicoya, que pueden ser transportadas a los aluviones en las

zonas planas. Estos sitios son los de mayor captación del agua subterránea; y donde además se tiene la mayor información de pozos.

De los datos de los pozos, la información geofísica y geológica se concluye que en la zonas de estudio los acuíferos son someros, se localizan principalmente en los depósitos aluviales y coluviales, la profundidad del agua subterránea está a menos de 10 metros en general y en casos aislados se ubica a mayor profundidad; las rocas del Complejo de Nicoya pueden contener agua, si tienen porosidad secundaria por fracturas, sin embargo una limitante de este estudio es que existen pocos pozos en dichas rocas, además de que son muy pocas las pruebas de bombeo disponibles, por lo que no se tienen los parámetros hidráulicos de los acuíferos someros.

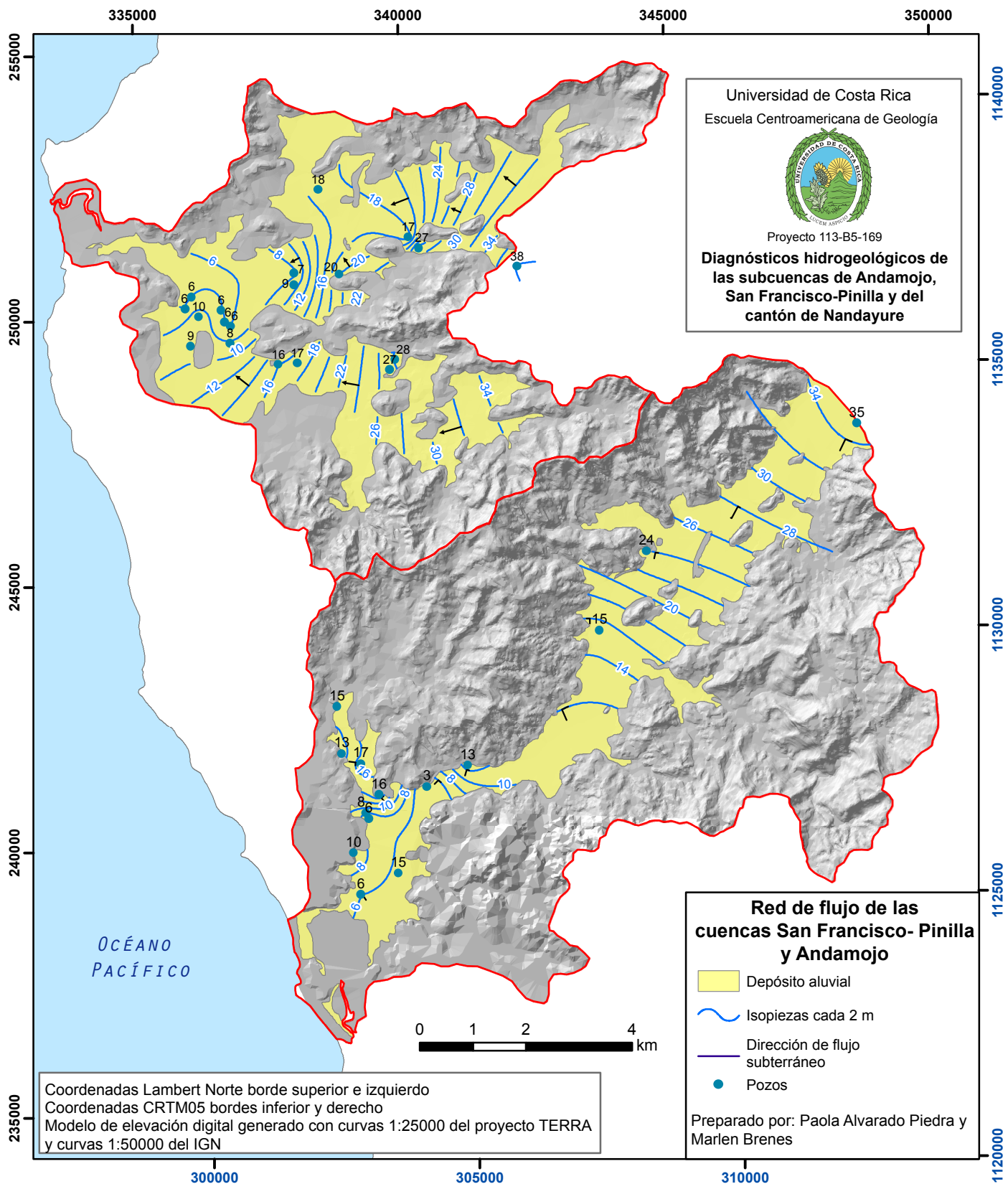


Figura 23 Red de flujo del agua subterránea para las subcuencas de San Francisco-Pinilla y Andamojo, cantón de Santa Cruz, Guanacaste.

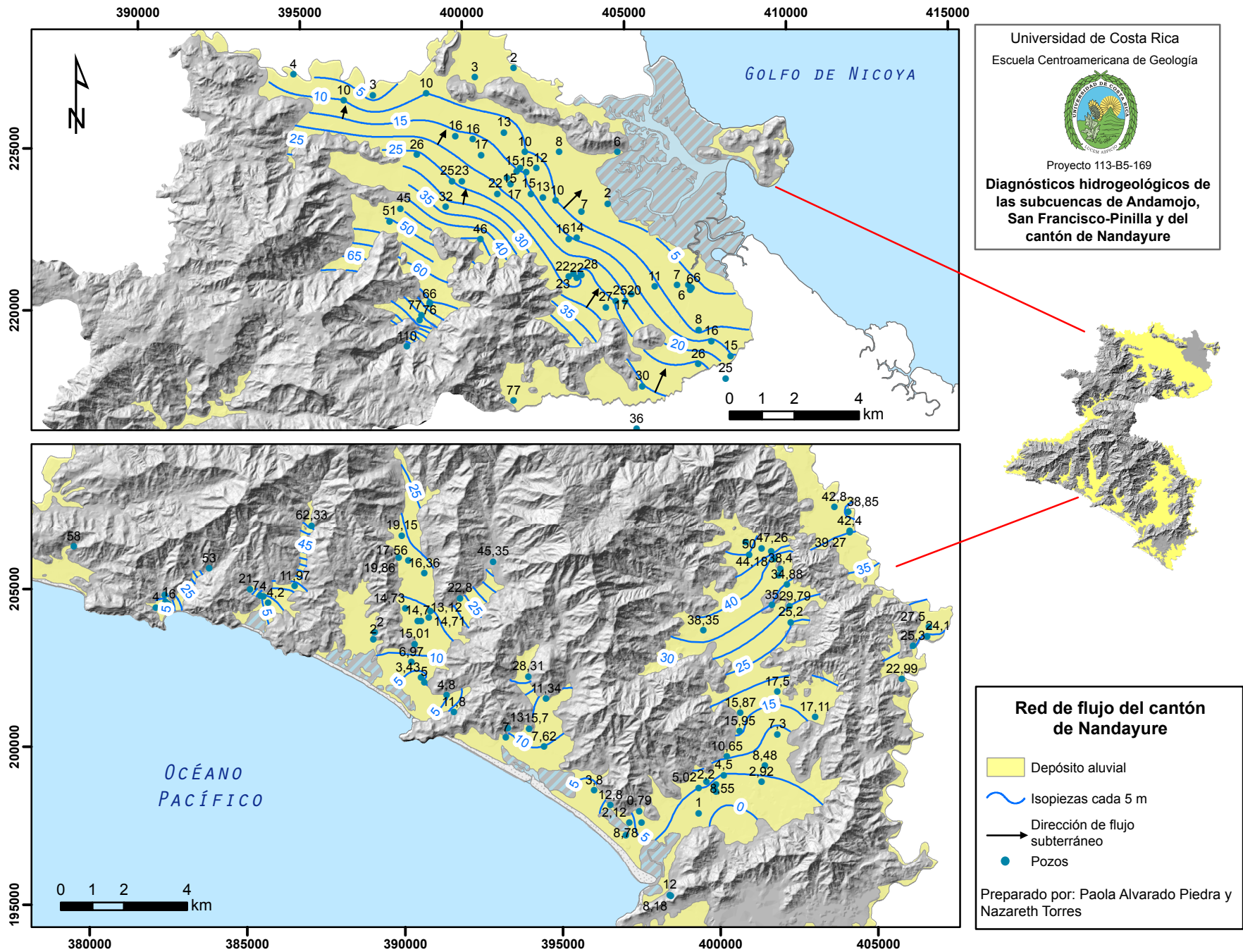


Figura 24 Red de flujo del agua subterránea el cantón de Nandayure, Guanacaste.

2.5.5 Propuesta red de monitoreo de niveles de agua

A partir del trabajo de campo se proponen sitios para el monitoreo de niveles de agua en las zonas de estudio, en la Foto 8 se pueden observar algunos de los pozos propuestos. La distribución de los sitios se presenta en las Figuras 25 y 26; se puede consultar información de detalle de cada sitio en el Anexo I. Para las zonas San Francisco-Pinilla y Andamojo se proponen 29 pozos, mientras que para el cantón de Nandayure 24 sitios.



Foto 8 Pozos de la red de monitoreo: A. Pozo Rodera #3, ASADA Malinche, Santa Cruz (335985/247927); B. Pozo privado en la localidad de Camaronal, Nandayure (379410/205422); C. Pozo privado en la localidad de Pilas de Canjel, Nandayure (403885/217229).

Es importante mencionar que históricamente en las comunidades de las zonas de estudio se construyeron pozos excavados para cubrir las necesidades básicas, sin embargo debido a que ya existen acueductos inclusive en las comunidades pequeñas, hoy en día los pozos excavados en su mayoría ya no se usan, solo algunos para riego durante la época seca, para consumo prácticamente no se usan; lamentablemente con frecuencia

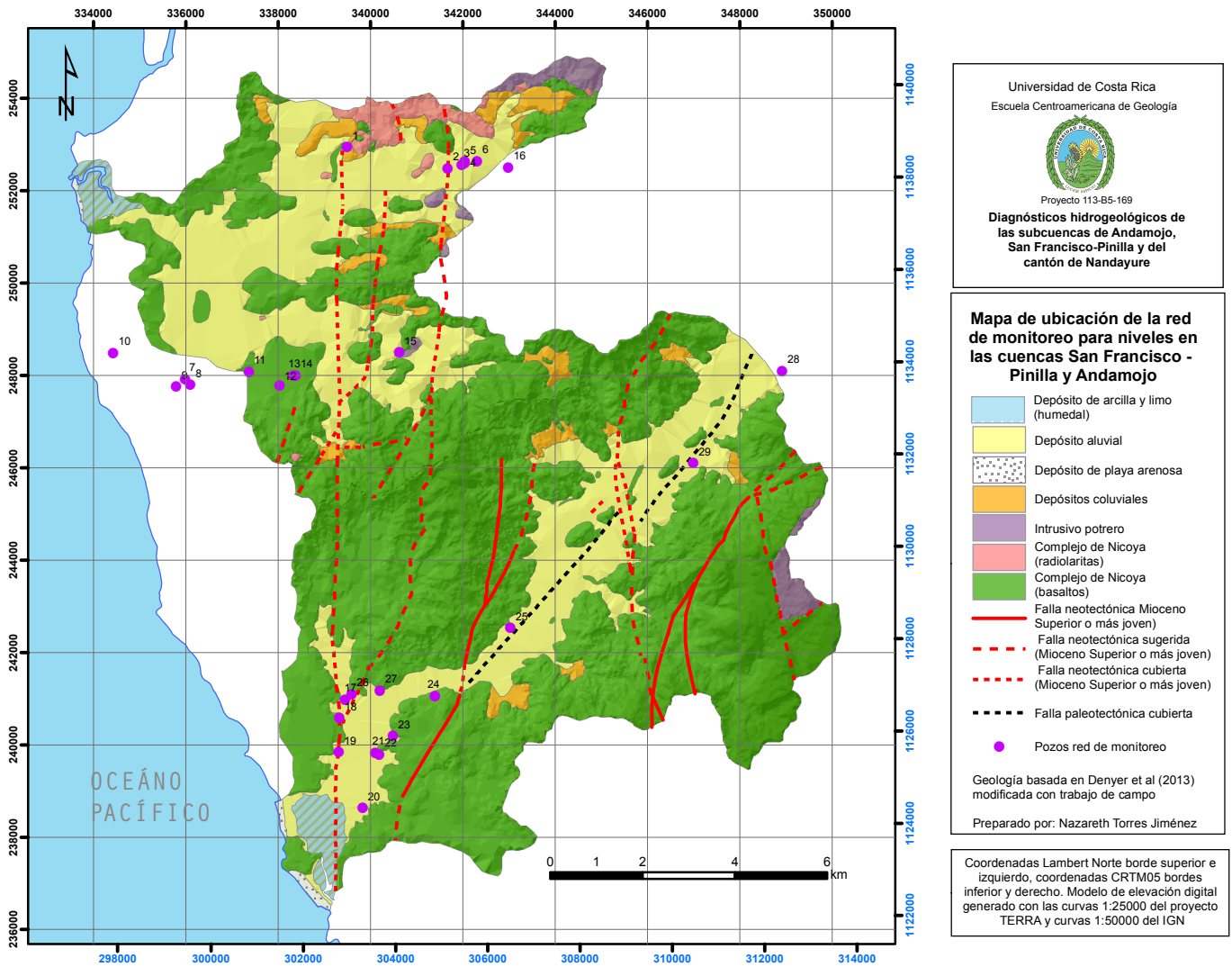


Figura 25 Red de monitoreo propuesta para medir niveles del agua en pozos en las subcuencas de San Francisco-Pinilla, Santa Cruz, Guanacaste.

los pozos abandonados son utilizados como basureros (Foto 9) lo cual puede estar afectando la calidad del agua puntualmente.



Foto 9 Pozo utilizado como basurero en Paraíso, cuenca del río Andamojo (340487/240193).

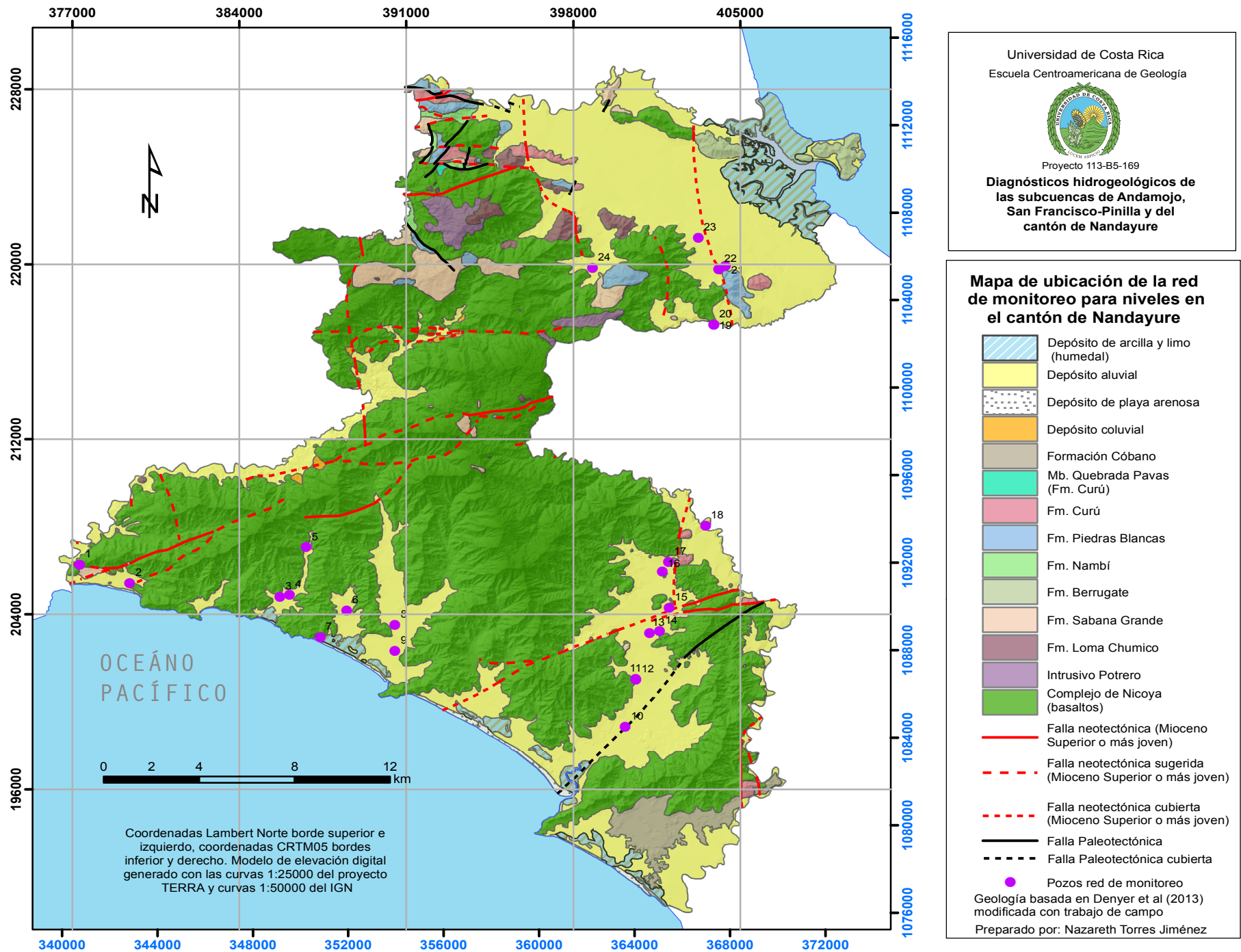


Figura 26 Red de monitoreo propuesta para medir niveles de agua en pozos en el cantón de Nandayure, Guanacaste

2.6 Hidrogeoquímica

Se recolectaron 55 muestras de agua de pozos distribuidos tal y como se muestra en las Figuras 8 y 9, además para el control de la calidad de los resultados se tomaron duplicados cada 10 muestras, los cuales fueron codificados y enviados para sus respectivos análisis a los laboratorios, los resultados indican que los análisis tienen un error aceptable (menor al 15%). La foto 10 muestra algunos de los pozos muestreados.

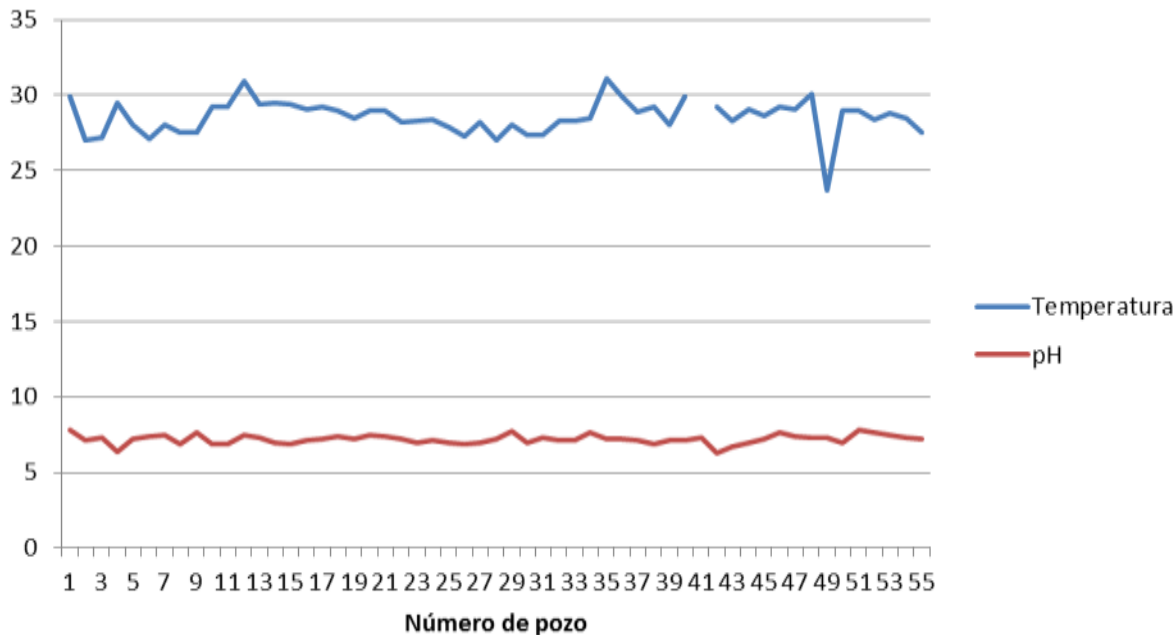


Foto 10 Pozos muestreados: A. Pozo Colegio Técnico Profesional de Nandayure (398662/221681), B. Pozo del AyA de la localidad de 27 de abril en Santa Cruz (348915/248098), C. Pozo ASADA localidad Corozalito, Nandayure (386104/204910), D. Pozo privado en la localidad de Javilla (396032/198653)

Los parámetros analizados para las aguas muestreadas son los siguientes: Ca, Mg, Na, K, HCO_3 , Cl, SO_4 , SiO_2 , F, Al, As, Cd, Pb, Ni, NO_3 y parámetros de campo tales como: conductividad eléctrica, pH, temperatura, alcalinidad y oxígeno disuelto. Los resultados se presentan en el Anexo J.

Los resultados obtenidos tanto en el campo como en el laboratorio se adjuntan en el Anexo J, se observa que temperatura varía entre 27 y 31,1 °C tal y como se muestra en el Gráfico 5, el pH varía entre 5,6 y 7,8.

Gráfico 5 Parámetros de campo medidos en agua de los pozos muestreados



Fuente: muestreo de aguas realizado en este estudio

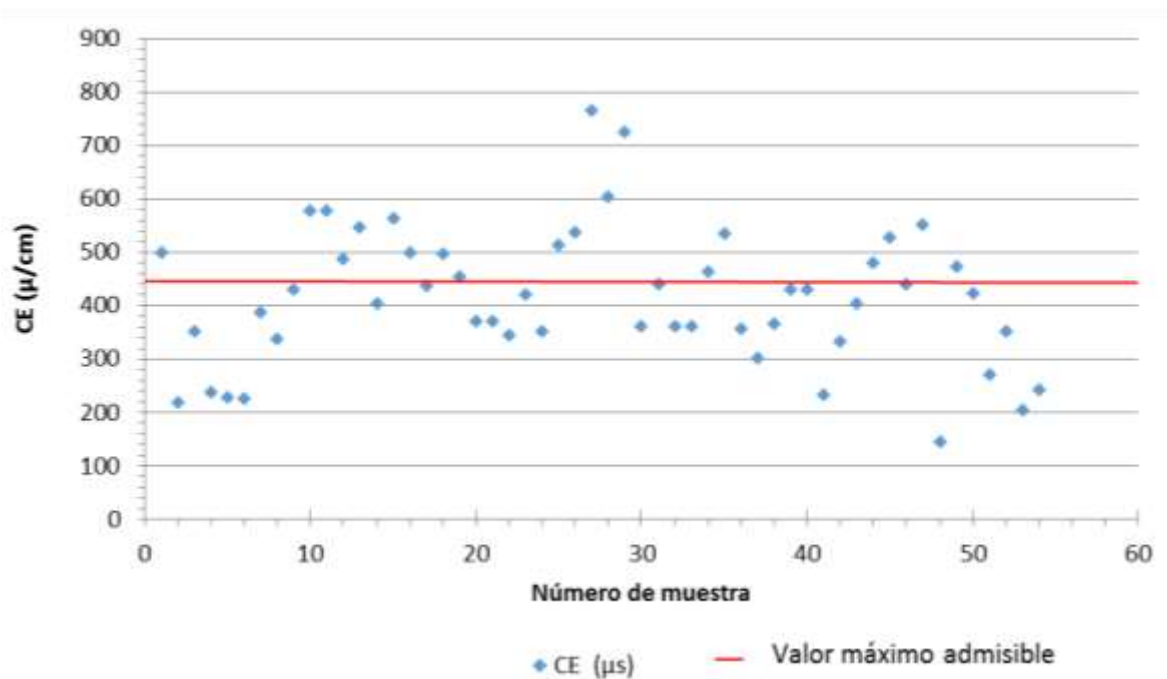
Tal y como se muestra en el Gráfico 6, la conductividad eléctrica medida en el campo varía entre 150 $\mu\text{/cm}$ y 800 $\mu\text{/cm}$, según el Reglamento de Agua Potable (2015), el valor alerta es de 400 $\mu\text{/cm}$ de esta forma se determina que al menos 20 pozos exceden este valor.

Los valores de sólidos totales disueltos varían entre 138 y 795 mg/L, el valor más alto se localiza en la Subcuenca de Andamojo en el pozo 23 de la ASADA de Paraíso.

A partir del análisis del Gráfico 7 se concluye que las muestras de agua se clasifican como bicarbonatadas cálcicas, además el Gráfico 8 compara las concentraciones de los iones mayores, donde es evidente la predominancia del bicarbonato y calcio los cuales indican que son aguas meteóricas.

Las muestras 7 y 29 del Gráfico 7 contienen concentraciones mayores de sodio que las demás muestras, razón por la cual se separan del grupo, la muestra 7 si es bicarbonatada cálcica y la muestra 29 es bicarbonatada sódica, dicha muestra se encuentra en el margen río Jabillo la cual puede estar influenciada por contaminación puntual.

Gráfico 6 Conductividad eléctrica de las muestras de agua de pozo



Fuente: muestreo de aguas realizado en este estudio

La correlación entre el bicarbonato y el calcio se muestra en el Gráfico 9, los resultados indican que las aguas son meteóricas las cuales han tenido poca interacción con el entorno geológico. Las concentraciones de sulfatos varían entre 1,04 y 71 mg/L, y los valores más altos se reportan para los pozos 27, 28 y 29, los cuales se localizan en la zona de Hacienda Pinilla en Santa Cruz, Guanacaste. En el Gráfico 10 se muestra que existe una correlación positiva entre los sulfatos y calcio lo que muestra que ambos iones llegan al agua subterránea a partir de la disolución de minerales presentes en las rocas, principalmente silicatos y carbonatos.

Gráfico 7 Diagrama de Piper para las muestras de agua subterránea de las zonas de estudio.

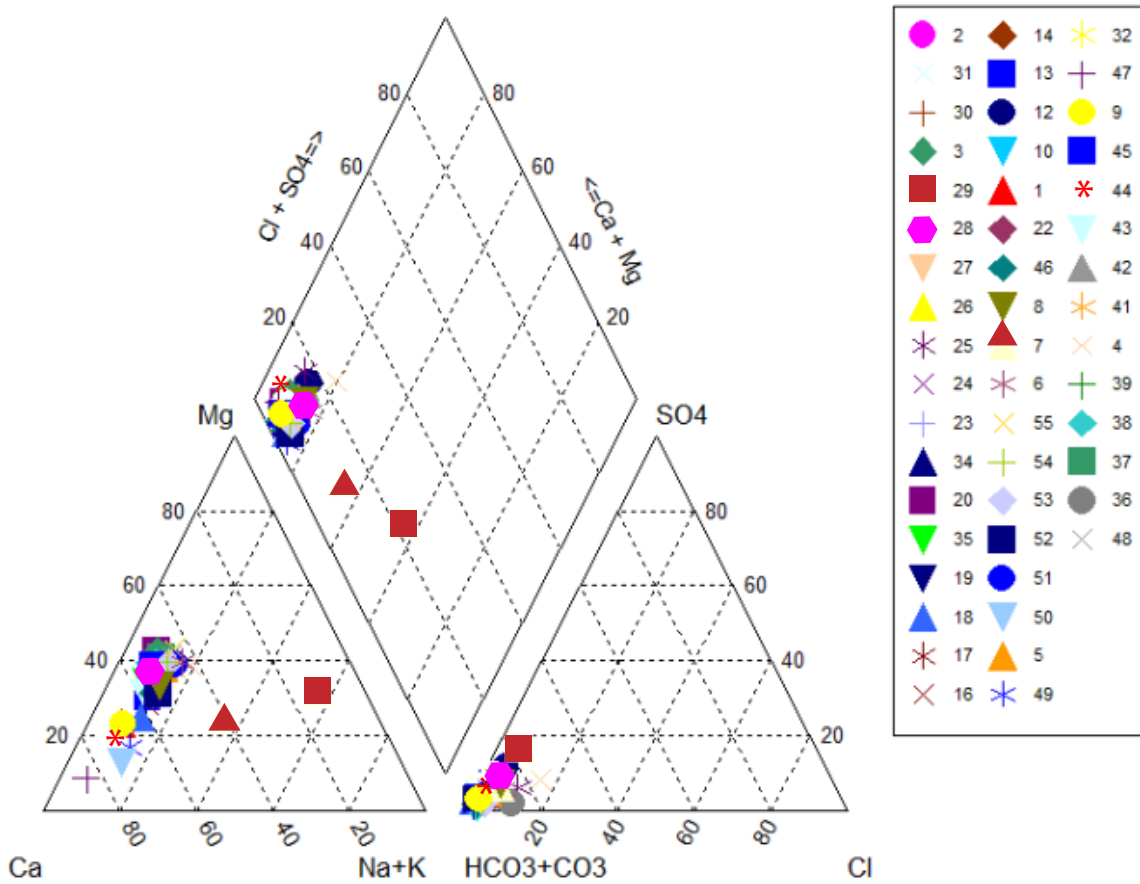


Gráfico 8 Diagrama de Scholler para las muestras de agua subterránea de las zonas de estudio.

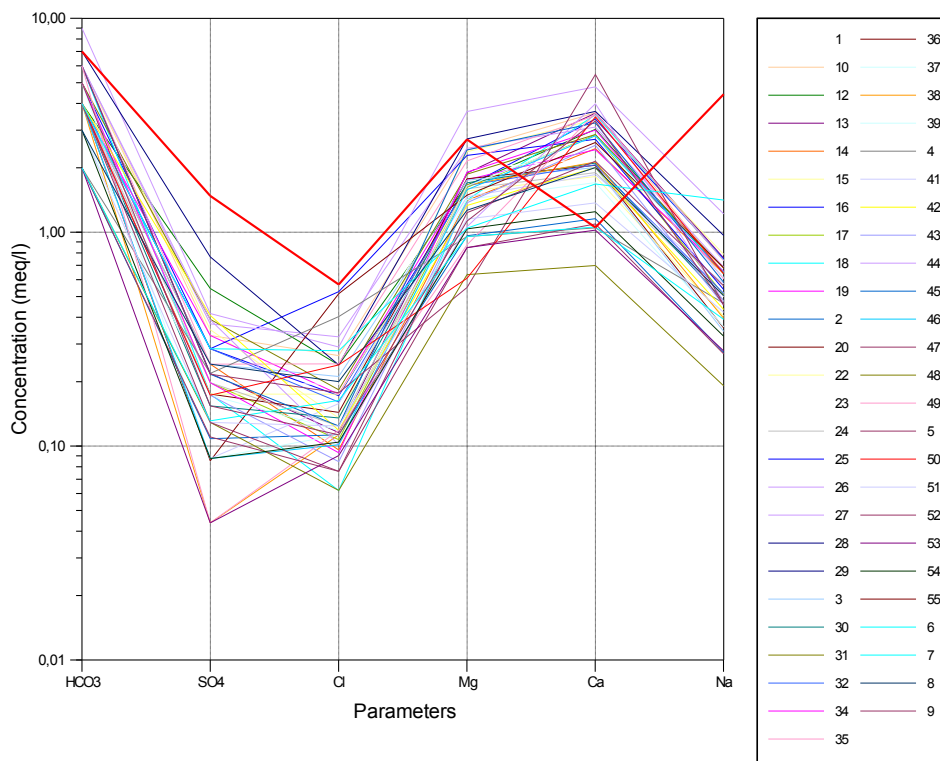
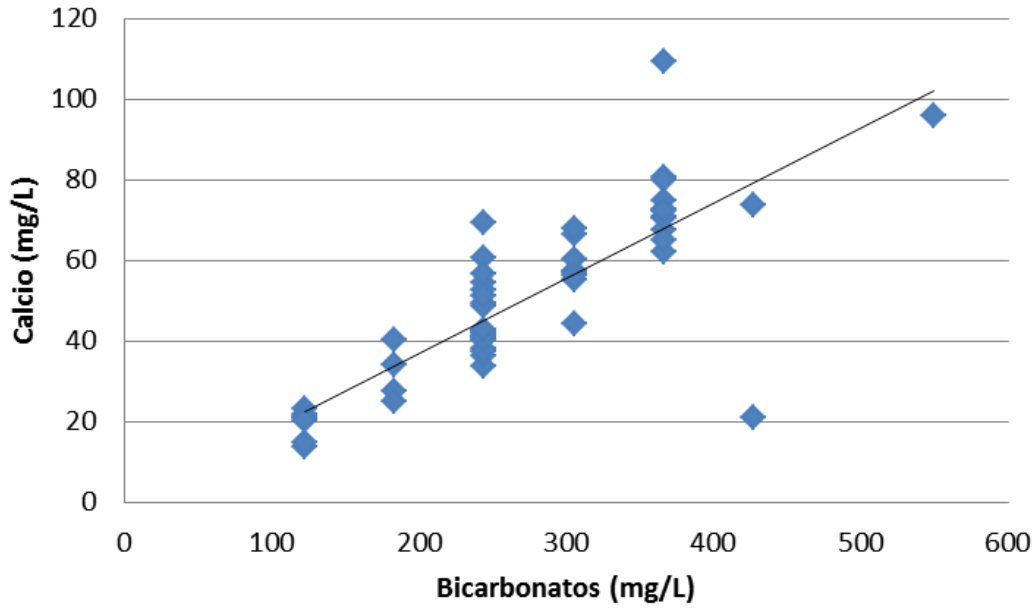
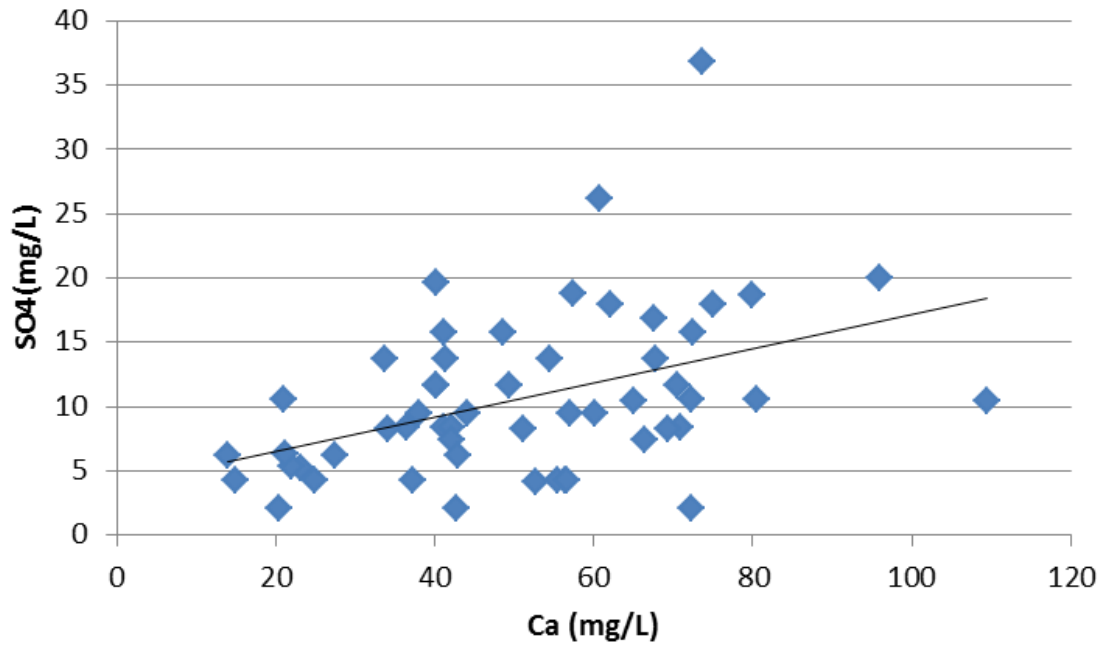


Gráfico 9 Bicarbonatos versus calcio



Fuente: muestreo de aguas realizado en este estudio

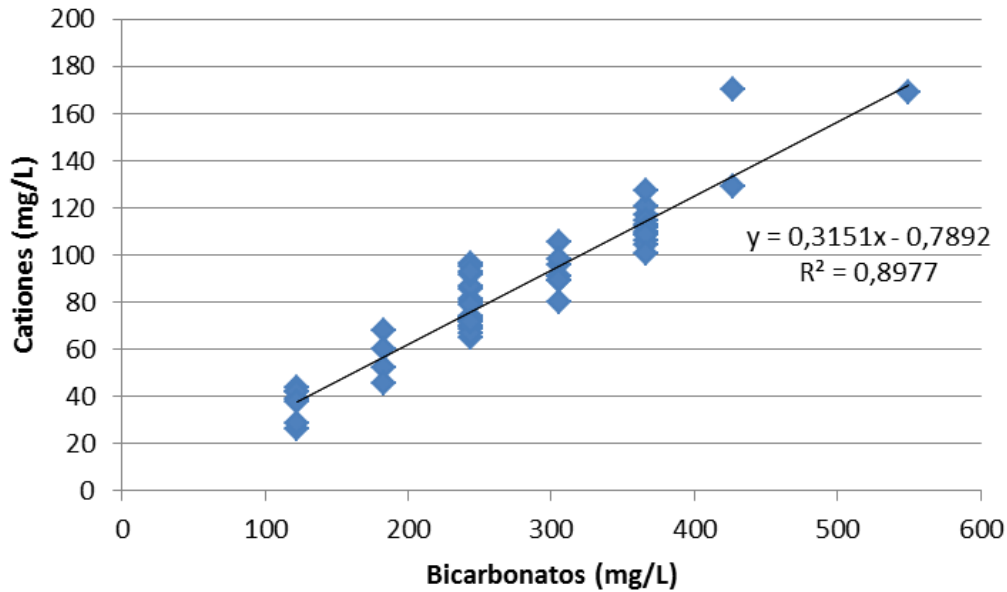
Gráfico 10 Bicarbonatos versus sulfatos



Fuente: muestreo de aguas realizado en este estudio

Las correlaciones positivas mostradas en los gráficos anteriores se confirman en el Gráfico 11, donde se denota que los iones dominantes provienen de la disolución de minerales tales como feldspatos y carbonatos, los cuales regulan la composición química de las aguas.

Gráfico 11 Bicarbonatos versus cationes



Fuente: muestreo de aguas realizado en este estudio

Con respecto a algunos metales detectados, es importante mencionar que la mayoría de la muestras tienen concentraciones muy bajas tal y como se puede constatar en el Anexo J, excepto en 4 muestras correspondientes a los pozos 12, 29, 34 y 35, que tienen valores de As entre 11 y 68 µg/L, los cuales exceden el valor máximo admisible para la normativa nacional (10 µg/L), principalmente el pozo 34 y 35 en los cuales los valores son 58 µg/L y 68 µg/L respectivamente, es importante mencionar que las rejillas de dichos pozos se localizan en sedimentos volcánico-lásticos (Figura 20), y además el agua tiene condiciones anaeróbicas ya que durante el muestreo se midieron concentraciones de oxígeno disuelto muy bajas (<2,5 mg/L), esta condición podría favorecer la liberación del arsénico de la fase sólida y disolverse en el agua. Para los pozos 34 y 35 el cadmio también excede la norma, ya que el valor máximo admisible es de 0,3 µg/L, y se reportan valores de 32 µg/L y 36 µg/L respectivamente, estos valores son anómalos y se deben posiblemente a

contaminación local posiblemente asociada con el uso de suelo agrícola de la zona, ya que se observaron cultivos de melón y arroz en los alrededores, sin embargo sería conveniente tomar más muestras de agua en estos sitios para confirmar los resultados.

2.7 Resumen de la información disponible

El Cuadro 6 resume los productos generados en este trabajo, el cual como se indicó en la sección 1.2 aporta información nueva que no existía anteriormente, por lo que trasciende de ser un diagnóstico, ya que brinda datos en los temas de geología, hidrogeología e hidrogeoquímica, tipos de suelos y valores de infiltración, los cuales se espera que sean de utilidad para estudios más detallados en los cantones de Santa Cruz y Nandayure, Guanacaste.

Cuadro 6 Resultados generados en este trabajo

Tipo de información	Detalle	Utilidad
Recopilación de los trabajos anteriores		Ponderación de la información disponible
Análisis químicos en rocas, DRX (TEC)	19 análisis de rocas	Interpretación hidrogeoquímica
Análisis químicos en aguas (iones mayores, nitratos, trazas, parámetros de campo tales como: conductividad eléctrica, pH, temperatura)	51 análisis de aguas (más cuatro duplicados)	Caracterización hidrogeoquímica de los acuíferos
Compilación de datos climáticos (precipitación, temperatura, brillo solar)	Registro completo de 4 estaciones meteorológicas	Información base para el balance hídrico
Levantamiento y descripción de afloramientos	193 puntos	Actualización de los mapas geológicos existentes
Pruebas de infiltración (método de doble anillo)	36 sitios	Determinación de velocidad de infiltración y conduct. hidráulica

Mapas de afloramientos y mapas geológicos de las zonas de estudio	2 mapas por área, (4 en total)	Base para la elaboración de modelos conceptuales y perfiles hidrogeológicos
Sondeos eléctricos verticales	38 sitios	Base para la elaboración de modelos conceptuales y perfiles hidrogeológicos
Recolección y análisis físicos de muestras de suelos (capacidad de campo, punto de marchitez, densidad aparente, porosidad efectiva, porosidad total, análisis de textura, porcentajes de arcillas y limos)	36	Insumos para el balance hídrico y cálculo de la recarga acuífera
Recolección y análisis químicos de muestras de suelos (sólido químico completo, pH, conductividad eléctrica, carbón orgánico, nitrógeno total, C/N, CIC + bases)	36	
Propuesta de red de monitoreo	53 pozos	Datos base para la calibración de modelos numéricos y establecimiento de distintos escenarios hidrogeológicos
Análisis de la información hidrogeológica		Identificación de zonas con vacíos de información, recomendaciones para estudios futuros

Además partir de la búsqueda de información en distintas instituciones y el trabajo de campo realizado, se identificaron zonas en donde existen varios niveles de información geológica, hidrogeológica disponible, tomando como base dicha información se prepararon las Figuras 27 y 28 donde se muestra que para las tres zonas de estudio, subcuenca San Francisco-Pinilla, subcuenca Andamojo y el cantón de Nandayure existe información cartográfica básica escala 1:25 000 y geológica a la escala 1: 50 000, sin embargo la información hidrogeológica y climática es limitada. La mayor parte de los pozos, pruebas de infiltración y sondeos eléctricos verticales se localizan en las zonas con topografía plana por la cercanía del nivel del agua a la superficie y porque el recurso hídrico en las áreas de mayor elevación es muy limitado (Cuadro 7).

Cuadro 7 Tipo de información disponible por zona de estudio

<i>Cantón de Nandayure</i>	
<i>Tipo de información</i>	<i>Disponibilidad de información</i>
Topografía esc. 1:25 000	Si hay 100%
Geología	Si hay 100%
Pozos con información litológica	Poca
Parámetros hidráulicos	No hay
Pruebas de infiltración	Poca
Pozos de monitoreo	Nula
Muestreo de agua	Poca
Datos geofísicos	Poca
<i>Subcuencas San Francisco-Pinilla y Andamojo, Santa Cruz</i>	
Topografía esc. 1:25 000	Si hay 95%
Geología	Si hay 100%
Pozos con información litológica	Poca
Parámetros hidráulicos	No hay
Pruebas de infiltración	Poca
Pozos de monitoreo	Nula
Muestreo de agua	Poca
Datos geofísicos	Poca

Elaboración propia a partir de la recopilación de datos en las zonas de estudio.

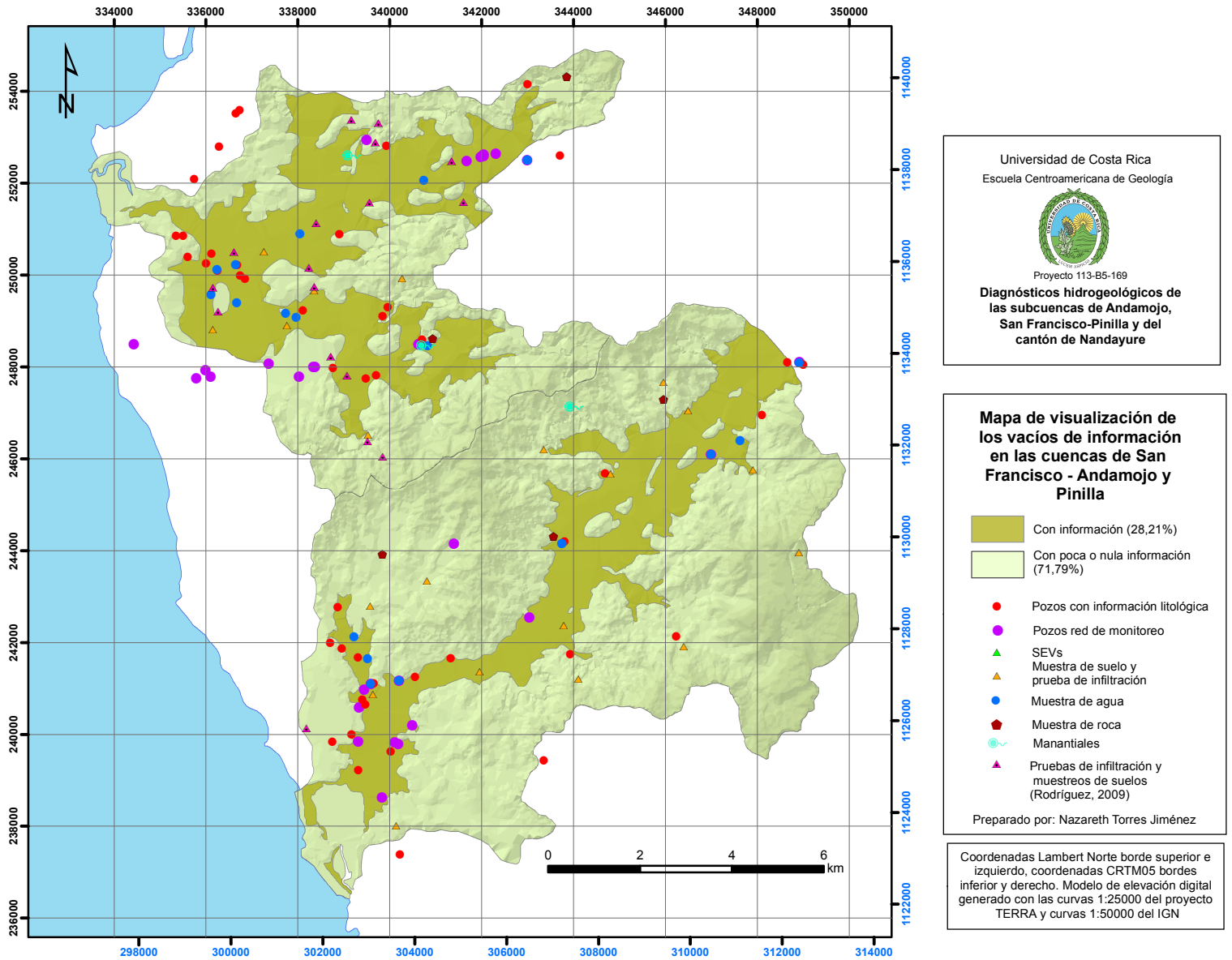


Figura 27 Mapa de disponibilidad de información hidrogeológica para las subcuencas San Francisco-Pinilla y Andamojo, Santa Cruz, Guanacaste.

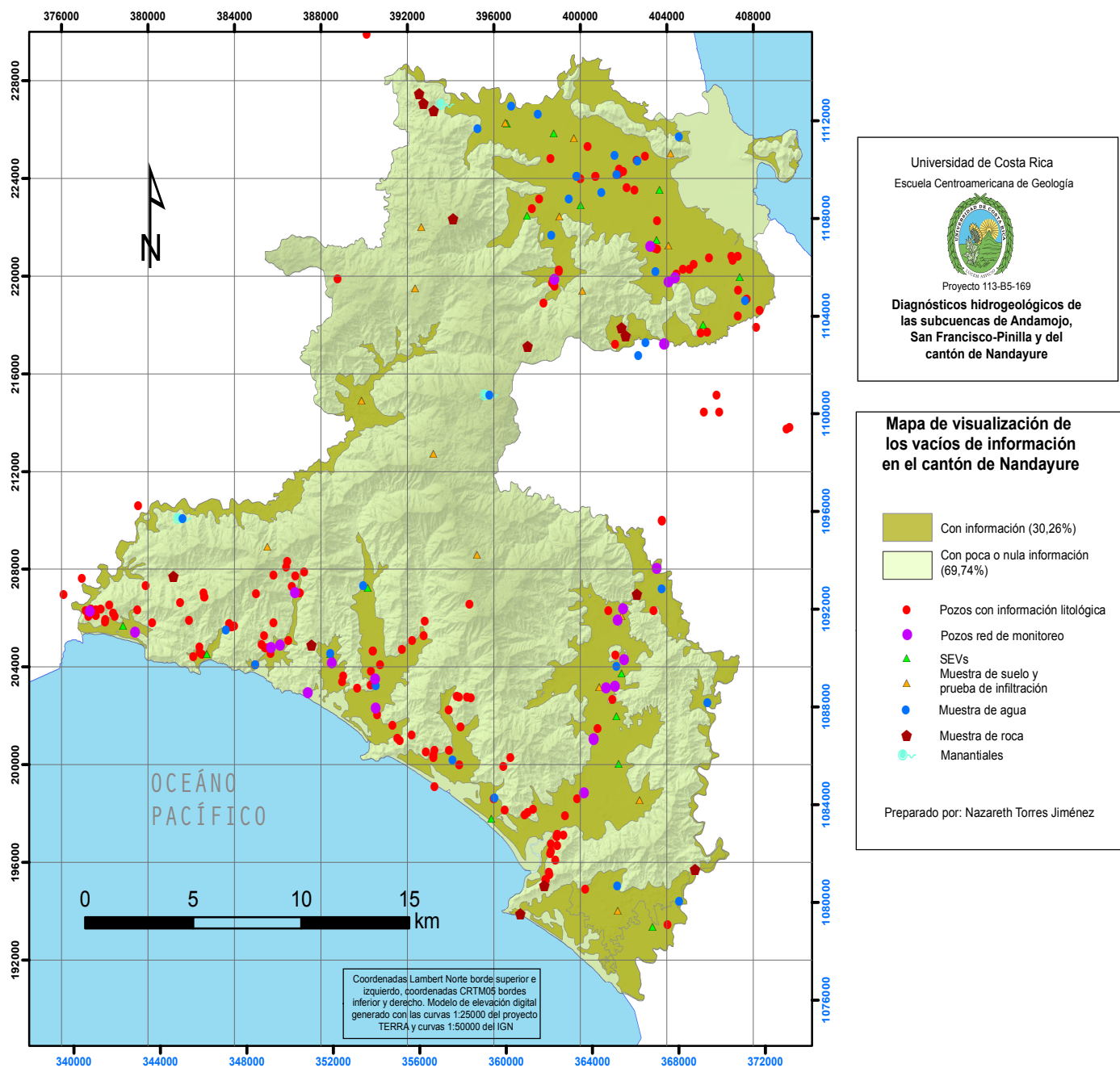


Figura 28 Mapa de disponibilidad de información hidrogeológica en el cantón de Nandayure, Guanacaste.

3. Recomendaciones

- Efectuar un cierre técnico de los pozos en desuso para evitar que se utilicen como botaderos de basura y ruta de ingreso de contaminantes al acuífero superficial.
- Se recomienda alertar a los propietarios de los pozos 12, 29, 34 y 35 para tratar el agua antes de usarla para el consumo humano, además de realizar estudios específicos en los alrededores para determinar con certeza el origen de las concentraciones de arsénico en el agua subterránea de estos pozos.
- Instalar piezómetros en zonas en donde no existen pozos para conocer los espesores de las unidades geológicas, incluir algunos sitios en los basaltos ya que no existe mucha información hidráulica de estas rocas y también para ampliar las redes de monitoreo propuestas.
- Realizar pruebas de bombeo en pozos seleccionados para determinar parámetros hidráulicos de los acuíferos someros.
- Realizar estudios hidrogeológicos en las zonas costeras de las áreas de estudio, ya que se prevé un crecimiento en las actividades turísticas por lo que podría darse un aumento en la construcción de pozos legales e ilegales que pueda comprometer la disponibilidad futura del recurso hídrico subterráneo.
- Realizar mediciones periódicas de niveles de agua al menos dos veces al año (estación seca y estación lluviosa) en las redes de monitoreo propuestas.
- Realizar monitoreo de calidad del agua, que incluya iones mayores, nitratos, coliformes fecales y totales, así como parámetros de campo, tales como: conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, temperatura al menos una vez al año.
- Realizar más pruebas de infiltración en el cantón de Nandayure, y en las subcuencas de San Francisco-Pinilla y Andamojo, en Santa Cruz, Guanacaste.
- Instalar al menos tres estaciones en el cantón de Nandayure, una ubicada en la zona de Carmona, otra al sur del cantón y otra en la zona montañosa ya que no se cuentan con datos en estas áreas.
- Generar información cartográfica escala 1:25 000 para el sector sur de la subcuenca Andamojo en la Hoja Topográfica Marbella.
- Realizar balances hídricos para determinar el potencial hídrico en las zonas de estudio.
- Realizar mapas de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea en las zonas donde existe información suficiente (zonas planas).

4. Bibliografía

- ALVARADO, G.E., DENYER, P. & SINTON, C., 1997: The 89 Ma Tortugal komatiitic suite, Costa Rica: Implications for a common geological origin of the Caribbean and Eastern Pacific region from a mantle plume.-*Geology* 25(5): 439-442.
- ASTORGA, A & CAMPOS, L., 2010: Guía Geoturística del Noroeste de Costa Rica [grabación].- 1Ed, 1 disco compacto.- Universidad de Costa Rica-Vicerrectoría de Acción Social.
- ASTORGA, A., 1987: el Cretácico Superior y el paleógeno de la vertiente pacífica de Nicaragua meridional y Costa Rica septentrional: Origen, evolución y dinámica de las cuencas profundas relacionadas al margen convergente de Centroamerica – 255 págs. Univ. Costa Rica [Tesis Lic]
- ASTORGA, A., 1990: La Formación Loma Chumico (Complejo de Nicoya, Costa Rica) y su relación con la evolución Cretácica del margen oeste de la Paleo-Plateau Caribe.- VII Congreso Geol. Amér. Central. San José: 126.
- BAUMGARTNER-MORA, C., MORA, C., BUTTER-LIN, J., SIGAL, J., GLACON, E., AZÉMA, J. & BOURGOIS, J., 1984: Sedimentación y paleogeografía del Cretácico y Cenozoico del litoral Pacífico de Costa Rica.- *Rev. Geol Amér. Central* (1): 57-136.
- DENGO, G., 1962: Estudio geológico de la región de Guanacaste, Costa Rica.-112 págs. IGN, San José.
- DENYER, P & ARIAS, o., 1991: Estratigrafía de la Región Central de Costa Rica.- *Rev. Geol. Amér. Central*, 12:1-59.
- DENYER, P & ARIAS, o., 1993: Geología del Norte de la Península de Nicoya, costa Rica.- *Rev. Geól. Amér. Central*, 16:69-84.

- DENYER, P & BAUMGARTNER, P.O. 2006: Emplacement of Jurassic – Lower Cretaceous radiolarites of the Nicoya Complex (Costa Rica).-Geologica acta, 4 (1-2): 203-218
- DENYER, P & GAZEL, E., 2009: The Costa Rican Jurassic to Miocene oceanic complexes: Origin tectonics and relations.- JOUR. South Amer. Earth Sci, 28: 429-442
- DENYER, P., AGUILAR, T. & MONTERO, W., 2014: Cartografía geológica de la Península de Nicoya, Costa Rica: Estratigrafía y tectónica.- 207 págs. Editorial UCR, San José.
- FLORES, K., 2003: Propuesta tectonoestratigráfica de la región septentrional del Golfo de Nicoya – 176 págs. Escuela Centroamericana de Geología, UCR [Tesis Lic.]
- FLORES, K., DENYER, P. & AGUILAR, T., 2003^a: Nueva propuesta estratigráfica: geología de las hojas Matambú y talolinga, Guanacaste, Costa Rica.-Rev. Geol. América Central, 28: 131-138
- GURSKY, H.-J. & GURSKY, M., 1988: Thermal alteration of chert in the ophiolite basement of Southern Central America.
- HAUFF, F., HOERNLE, K., BOGAARD V.D., P., ALVARADO,, G.E. & GARBE-SCHÖNBERG., D., 2000: Age and geochemistry of basaltic complexes in western Costa Rica: Contributions to the geotectonic evolution of Central America.- G3<<http://gcubed.magnet.fsu.edu/index.asp>.
- HOERNLE, K., HAUFF, F. & VAN DEN BOOGARD, P., 2004: 70 m.y. history (139-69 Ma) for the caribbean large igneous province.-Geology, 32: 697-700
- HU, X., JANASA, L., WNAG, C., SARTI, M., BAK, K., WAGREICH, M., MICHSLIL, J & SOTAK, J., 2005: Upper Cretaceous oceanic red berds (CORBs) in the Thetys: Ocurrences litofacies, age, and environments.-Cretaceous Research, 28:3-20.
- KUIJPERS, E., 1979: La geología del Complejo ofiolítico de Nicoya.- Inf. Sem. I.G.N. 1979(2):15-75
- LA GACETA., 2015: Reglamento para la calidad del agua potable.- Celebrada el 12 de enero del 2015. No. 38924-S.

- LUNDBERG, N., 1982: Evolution of the slope landward of the Middle America Trench, Nicoya península, Costa Rica.
- PHINNEY, W. C. & MORRISON, D. A., 1988: Tectonic implications of Archean anorthosite occurrences.- Lunar and Planetary Institute Tech. Reporte 88-06: 135-137
- PROTTI, R., 1981: Geología y geofísica con fines hidrogeológicos en la planicie costera Jicaral-Santa Rita, península de Nicoya. – 47 págs + 5 mapas. Univ de Costa Rica, San José [Tesis Lic]
- RIVIER, F., 1983: Síntesis geológica y mapa geológico del área de bajo Tempisque, Guanacaste, Costa Rica.-Inf.Sem. IGN, 1983 (1): 7 – 30
- ROBASZYNSKI F. & CARON, M., 1995: Foraminifères paléozoïques du Crétacé. Commentaire de la zonation Europe-Méditerranée.- Bulletin de la Societe geologique de France, 166 (6): 681-692
- RODRIGUEZ, H., 2009: Diagnósticos de la vulnerabilidad de los acuíferos aluviales y Costeros Brasilito, Pinilla, Avellanas-Junquillal y costeros Sur, en el cantón de Santa Cruz, Guanacaste.-66 págs. SENARA [Inf. interno]
- SCHMIDT-EFFING, R. 1980^a: Rasgos fundamentales de la historia del Complejo de Nicoya (américa central meridional).- Brenesia 18: 231-252
- SINTON, C.W., DUNCAN, R.A. & DENYER, P., 1997: Nicoya Península: A single suite of Caribbean oceanic Plateau magmas.- Jour. Geophys. Research, 102 (B7): 15507-15520.
- TOURNON, J & ALVARADO, G., 1997: Mapa geológico de Costa Rica, folleto explicativo.- 79 págs. Ed.Tecnológica de Costa Rica, Cartago.
- TOURNON, J., 1984: Magnatismes du Mésozoïque à l'actuel en Amérique Centrale: L'exemple de Costa Rica, des ophiolites aux andésites.-335 págs. Univ Pierre et Marie Curie
- VARGAS, C., 2013: Modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca baja del río Ora (Nandayure, Guanacaste).- 120 págs. Univ Costa Rica [Tesis Maestría]

WILDBERG, H., 1984: Der Nicoya-Komplex, Costa Rica, Zentralamerika: Magmatismus and Genese eines polygenetischen Ophiolith – Komplex – es.- Munster. Forsh. Geol. Palaont. 62:1-123.

ZOPPIS, L. & DEL GIUDICE, D., 1958: Geología de las Costas del Pacífico de Nicaragua.- Boletín del servicio Geológico Nacional de Nicaragua, 1958 (2)23-68.

