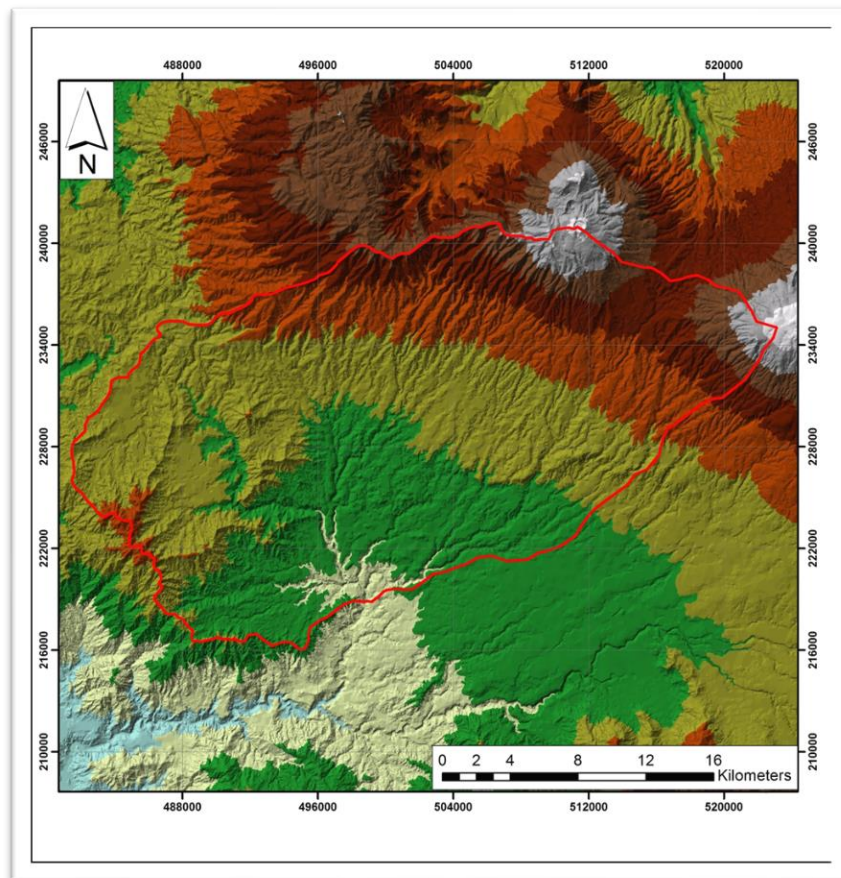




**DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y GESTIÓN HÍDRICA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN**

**Estudio Hidrogeológico para la cuenca del río Grande, Alajuela,
Costa Rica.**

N° SENARA-DIGH-UI-INF-004-2020



ENERO 2020



ELABORADO POR:

Lic. María Magdalena Monge Cordero
Geóloga Unidad de Investigación

REVISADO POR:

Lic. Alonso Alfaro Martínez
Jefe Unidad de Investigación

APROBADO POR:

M.Sc. Roberto Ramírez Chavarría
Director Dirección de Investigación y Gestión
Hídrica

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE CUADROS	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación.....	1
1.2 Propósito del informe.....	1
1.3 Objetivo general	1
1.4 Objetivos específicos	1
1.5 Participantes	1
1.6 Ubicación administrativa-geográfica del área de estudio.....	2
1.7 Escala de trabajo	4
1.8 Periodo de análisis.....	4
1.9 Metodología de trabajo.....	4
1.10 Antecedentes	9
1.11 Alcances y limitantes de los estudios hidrogeológicos	10
2. GEOLOGÍA REGIONAL.....	11
2.1 Formaciones Geológicas	11
2.2 Geología Estructural.....	23
2.3 Morfometría de la subcuenca del Río Grande	24
3. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL	26
3.1 Cuencas hidrográficas de la zona de estudio.....	26
3.2 Clima, estaciones meteorológicas.....	27
3.3 Evapotranspiración.....	32
4. HIDROGEOLOGÍA.....	34
4.1 Pozos y manantiales reportados en las bases de datos, y red de monitoreo.	34
4.2 Programa de perforación exploratoria.....	36
4.3 Estudios de suelos, textura, porosidad capacidad de campo, punto de marchitez.....	40
4.4 Pruebas de infiltración.....	45
4.5 Geofísica	46
4.6 Modelo Hidrogeológico.....	104

4.6.1	Microcuenca de Río Grande.....	110
4.6.2	Microcuenca de Río Cacao.....	114
4.6.3	Microcuenca de Río Colorado, Río Rosales y otros	115
4.6.4	Microcuenca de Río Poás.....	116
5.	HIDROGEOQUÍMICA E ISÓTOPOS	121
6.	USO DE SUELO	152
6.1	Uso de la tierra 2005.....	152
6.2	Uso de la tierra 2012.....	156
6.3	Descripción del uso de la tierra en la subcuenca del río Grande 2005 y 2012	159
6.4	Divergencias de uso de la tierra	160
7.	BALANCE HÍDRICO	162
7.1	Balace de humedad de suelos	162
7.2	Estimación de la extracción y la descarga, caudal utilizable	167
8.	MAPA DE VULNERABILIDAD	169
10.	MAPA DE AMENAZAS	175
11.	CONCLUSIONES.....	176
12.	RECOMENDACIONES	179
13.	BIBLIOGRAFÍA.....	180
14.	ANEXOS.....	185

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Ubicación general de la cuenca del Río Grande.....	3
Figura 1.2: Cantones que abarca la cuenca del Río Grande.	4
Figura 2.1: Mapa geológico de la subcuenca del río Grande. Digitalizó: Paola Alvarado Piedra.13	
Figura 2.2: Columna estratigráfica de la Hoja Naranjo, Tomado de: Huapaya & Rojas (2012). 14	
Figura 2.3: Morfometría de la subcuenca del río Grande.	25
Figura 3.1: Microcuencas en la subcuenca de Río Grande y Áreas silvestres protegidas.	26
Figura 3.2: Estaciones meteorológicas dentro de la subcuenca de Río Grande.	27
Figura 3.3: Comportamiento de la precipitación en la subcuenca de Río Grande.	29
Figura 3.4: Polígonos de Thiessen a partir de las 14 estaciones meteorológicas.	29
Figura 3.5: Temperaturas para la estación meteorológica de Fraijanes.	30
Figura 3.6: Temperaturas para la estación meteorológica de la UCR Occidente.	31
Figura 3.7: Temperaturas para la estación meteorológica de La Argentina.	31
Figura 3.8: Polígonos de Thiessen a partir de las 8 estaciones meteorológicas con información de temperatura.	32
Figura 4.1: Pozos registrados en la subcuenca de Río Grande y alrededores.	34
Figura 4.2: Manantiales registradas en la Base de Datos del SENARA.....	35
Figura 4.3: Piezómetros elaborados por SENARA.	36
Figura 4.4: Mapa de ubicación de los sitios muestreados para análisis de suelos.....	41
Figura 4.5: Ubicación de pruebas de infiltración.....	45
Figura 4.6: Ubicación de los Sondeos eléctricos verticales.....	48
Figura 4.7: Desplazamiento de la retícula en el Mapa Geológico de la Hoja Naranjo, Huapaya & Rojas (2012).	50
Figura 4.8: Ubicación del SEV1 y los pozos más cercanos en el Mapa Geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).....	53
Figura 4.9: Interpretación geoelectrica del SEV 1.....	54
Figura 4.10: Correlación geológica SEV1.....	54
Figura 4.11: Ubicación del SEV2 y el pozo NA-520 en el Mapa Geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).....	55
Figura 4.12: Interpretación geoelectrica del SEV 2.....	56
Figura 4.13: Correlación geológica SEV2.....	57
Figura 4.14: Ubicación del SEV 3 y pozo NA-686, al suroeste del sondeo, en el Mapa Geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).....	58
Figura 4.15: Interpretación geoelectrica del SEV3.....	59
Figura 4.16: Correlación geológica SEV3.....	60
Figura 4.17: Ubicación del SEV 4 y pozos cercanos en el Mapa Geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).....	61
Figura 4.18: Interpretación geoelectrica del SEV4.....	61
Figura 4.19: Correlación geológica SEV4.....	62
Figura 4.20: Ubicación del SEV 5 y pozos cercanos en el Mapa Geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).....	63

Figura 4.21: Interpretación geoeléctrica del SEV5	63
Figura 4.22: Correlación geológica SEV5	64
Figura 4.23: Ubicación del SEV 6 y pozos cercanos en el Mapa Geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).	65
Figura 4.24: Interpretación geoeléctrica del SEV6	66
Figura 4.25: Correlación geológica SEV6	67
Figura 4.26: Ubicación del SEV 7 y pozos cercanos en el Mapa Geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).	67
Figura 4.27: Interpretación geoeléctrica del SEV7	68
Figura 4.28: Correlación geológica SEV7	69
Figura 4.29: Ubicación del SEV 8 y pozos cercanos en el Mapa Geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).	70
Figura 4.30: Interpretación geoeléctrica del SEV8	71
Figura 4.31: Correlación geológica SEV8	71
Figura 4.32: Ubicación del SEV 9 y pozos cercanos en el Mapa Geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).	72
Figura 4.33: Interpretación geoeléctrica del SEV9	73
Figura 4.34: Correlación geológica SEV9	73
Figura 4.35: Ubicación del sondeo 10 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).	74
Figura 4.36: Interpretación geoeléctrica del SEV10	75
Figura 4.37: Correlación geológica SEV10	76
Figura 4.38: Ubicación del SEV11 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).	76
Figura 4.39: Interpretación geoeléctrica del SEV 11	77
Figura 4.40: Correlación geológica del SEV11	77
Figura 4.41: Ubicación del SEV 12 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).	78
Figura 4.42: Interpretación geoeléctrica del SEV 12	79
Figura 4.43: Correlación geológica del SEV12	79
Figura 4.44: Ubicación del SEV 13 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).	80
Figura 4.45: Interpretación geoeléctrica del SEV 13	81
Figura 4.46: Correlación geológica del SEV13	81
Figura 4.47: Ubicación del SEV 14 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).	82
Figura 4.48: Interpretación geoeléctrica del SEV 14	83
Figura 4.49: Correlación geológica del SEV14	83
Figura 4.50: Ubicación de sondeo 15, piezómetro PSRG 6 y pozos cercanos (Huapaya & Rojas, 2012).	84
Figura 4.51: Interpretación geoeléctrica del SEV 15	85
Figura 4.52: Correlación geológica del SEV15	85

Figura 4.53: Ubicación del SEV 16 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).....	86
Figura 4.54: Interpretación geoelectrica del SEV 16	86
Figura 4.55: Correlación geológica del SEV16	87
Figura 4.56: Ubicación del SEV 17 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).....	87
Figura 4.57: Interpretación geoelectrica del SEV 17	88
Figura 4.58: Correlación geológica del SEV17	88
Figura 4.59: Ubicación del SEV RIOGRAN 1 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).....	89
Figura 4.60: Interpretación geoelectrica del SEV RIOGRAN1. “Capas Geofísicas”: 7 Valores en Ωm Línea punteada delimita las capas.....	90
Figura 4.61: Correlación geológica del SEV RIOGRAN1.....	90
Figura 4.62: Ubicación del SEV RIOGRAN 2 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).....	91
Figura 4.63: Interpretación geoelectrica del SEV RIOGRAN2	92
Figura 4.64: Correlación geológica del SEV RIOGRAN2. Valores en Ωm Línea punteada delimita las capas.....	92
Figura 4.65: Ubicación del SEV RIOGRAN 3 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).....	93
Figura 4.66: Interpretación geoelectrica del SEV RIOGRAN3. Valores en Ωm Línea punteada delimita las capas.	94
Figura 4.67: Correlación geológica del SEV RIOGRAN3.....	94
Figura 4.68: Ubicación del SEV RIOGRAN 4 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).....	95
Figura 4.69: Interpretación geoelectrica del SEV RIOGRAN4. Valores en Ωm Línea punteada delimita las capas	96
Figura 4.70: Correlación geológica del SEV RIOGRAN4.....	96
Figura 4.71: Ubicación del SEV RIOGRAN 5 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).....	97
Figura 4.72: Interpretación geoelectrica del SEV RIOGRAN5. Valores en Ωm Línea punteada delimita las capas	98
Figura 4.73: Correlación geológica del SEV RIOGRAN5.....	98
Figura 4.74: Ubicación del SEV RIOGRAN 6 en el mapa geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).....	99
Figura 4.75: Interpretación geoelectrica del SEV RIOGRAND6. Valores en Ωm Línea punteada delimita las capas	100
Figura 4.76: Correlación geológica del SEV RIOGRAND6.	100
Figura 4.77: Ubicación del SEV RIOGRAN 7 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).....	101
Figura 4.78: Interpretación geoelectrica del SEV RIOGRAN7. Valores en Ωm Línea punteada delimita las capas	102
Figura 4.79: Correlación geológica del SEV RIOGRAN7.....	102

Figura 4.80: Ubicación del SEV RIOGRAN 8 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).....	103
Figura 4.81: Interpretación geoelectrica del SEV RIOGRAN8. Valores en Ωm Línea punteada delimita las capas	104
Figura 4.82: Correlación geológica del SEV RIOGRAN8.....	104
Figura 4.83: Modelo hidrogeológico conceptual de la subcuenca del río Grande, Alajuela	106
Figura 4.84: Mapa de equipotenciales en el área de estudio.....	106
Figura 4.85: Ubicación de los perfiles hidrogeológicos en la subcuenca del río Grande.....	108
Figura 4.86: Perfil A-A'-A''-A'''	109
Figura 4.87: División del área de estudio en microcuencas.....	110
Figura 4.88: Perfil geológico en la zona de San Ramón	111
Figura 4.89: Perfil geológico en la zona de Palmares.....	113
Figura 4.90: Parte del perfil E-A'-A''-E' en Palmares (Anexo D) (Simbología en la figura 4.85).113	
Figura 4.91: Parte de perfil B-B' en Atenas (Anexo D) (Simbología en la figura 4.85).....	115
Figura 4.92: Parte de perfil B-B' en Atenas (Anexo D) (Simbología en la figura 4.85).....	116
Figura 4.93: Perfil D-D' en la zona de Naranjo, Sarchí y Grecia (Simbología en la figura 4.93).	118
Figura 4.94: Parte de perfil A-A'-A''-A''' en la zona de Naranjo, Sarchí y Grecia	118
Figura 4.95: Perfil C-C' en la zona de Poás. (Simbología en la figura 4.92).....	120
Figura 5.1: Total de los iones vs conductividad para las muestras del acuífero del Rio Grande	123
Figura 5.2: Mn vs Fetot para las muestras del acuífero del Rio Grande	123
Figura 5.3: Temperatura vs conductividad para las muestras del acuífero del Rio Grande	124
Figura 5.4: Altitud del punto de muestreo vs temperatura para las muestras del acuífero del Rio Grande.....	124
Figura 5.5: Diagrama de Piper para las aguas de las formaciones del oeste de la subcuenca del Río Grande.....	126
Figura 5.6: Diagrama de Piper para las aguas de las formaciones del este de la subcuenca del Río Grande.....	127
Figura 5.7: Concentración en calcio en los varios puntos de muestreo para los 2 a 5 campañas de muestreo.	128
Figura 5.8: Concentración en nitrato en los varios puntos de muestreo para los 2 a 5 campañas de muestreo.....	128
Figura 5.9: Ca vs bicarbonatos para las muestras del acuífero del Rio Grande	129
Figura 5.10: Sulfato vs calcio para las muestras del acuífero del Río Grande	130
Figura 5.11: Sulfato vs cloruro para las muestras del acuífero del Río Grande	131
Figura 5.12: Ca, Mg, Na y K vs cloruro para las muestras del acuífero del Río Grande.....	132
Figura 5.13: Suma de los cationes vs bicarbonatos para las muestras del acuífero del Río Grande	133
Figura 5.14: Na/Cl vs Ca/Cl para las muestras del acuífero del Río Grande.....	134
Figura 5.15: Ca/Cl, Na/Cl, Mg/Cl, SO ₄ /Cl vs cloruros para las muestras del acuífero del Río Grande	134

Figura 5.16: Comparación de los resultados de los análisis de $\delta^{18}O$ y δ^2H realizados por dos laboratorios para los mismos puntos de muestreo a diferentes épocas del año.....	136
Figura 5.17: Resultados de los análisis de $\delta^{18}O$ y δ^2H realizados en 2014 – La LML proviene de Lachniet and Patterson (2002).	137
Figura 5.18: Comparación de los resultados de los análisis de $\delta^{18}O$ y δ^2H de las dos últimas campañas de muestreo para los manantiales, ríos, pozos y laguna.	138
Figura 5.19: Comparación de los resultados de los análisis de $\delta^{18}O$ de la tercera y de la cuarta campaña de muestreo.....	138
Figura 5.20: Altitud vs $\delta^{18}O$ para las muestras de las dos últimas campañas de muestreo para los manantiales, ríos, pozos y laguna.....	140
Figura 5.21: Exceso en deuterio en las muestras en función de la longitud.	141
Figura 5.22: Contenido en tritio de la precipitación de las estaciones localizadas cerca de Costa Rica (datos del GNIP/IAEA).	142
Figura 5.23: Comparación del contenido en 3H en las aguas subterráneas del acuífero Río Grande con la crónica de las precipitaciones reconstruida para Costa Rica (línea azul). Solamente el valor máximo (1,6 TU) y mínimo (0,5 TU) de 3H medido en las aguas subterráneas estas indicadas (cuadros rojos). Las dos líneas de decrecimiento del 3H están también indicadas (magenta y verde).	143
Figura 5.24: Valores de ^{14}C y $\delta^{13}C$ vs HCO_3 para cinco muestras de la subcuenca de Río Grande	144
Figura 5.25: Actividad ^{14}C vs $\delta^{13}C$ para cinco muestras de la subcuenca de Río Grande.....	145
Figura 5.26: Actividad ^{14}C vs 3H para cinco muestras de la subcuenca de Río Grande (límite de cuantificación del tritio indicada)	146
Figura 5.27: Cl vs nitratos para las muestras del acuífero del Río Grande	149
Figura 5.28: Concentraciones de $\delta^{15}N$ vs nitratos para las muestras del acuífero del Río Grande.	150
Figura 5.29: Concentraciones de $\delta^{15}N$ vs $\delta^{18}O$ de nitratos para las muestras del acuífero del Río Grande.....	150
Figura 6.1: Uso de la tierra subcuenca río Grande 2005	155
Figura 6.2: Mapa de uso de la tierra subcuenca río Grande 2005.....	156
Figura 6.3: Uso de la tierra subcuenca río Grande 2012	158
Figura 6.4: Mapa de uso de la tierra subcuenca río Grande 2012.....	159
Figura 6.5: Cambios en el uso de la tierra subcuenca río Grande 2005-2012.	160
Figura 7.1: Ubicación de los polígonos para el Balance Hídrico de Suelos.	165
Figura 7.2: Clasificación de la recarga potencial.....	166
Figura 8.1: Diagrama del método de GOD para determinar vulnerabilidad.....	170
Figura 8.2: Parámetro G: Confinamiento hidráulico.....	171
Figura 8.3: Parámetro O: Ocurrencia del sustrato suprayacente.	172
Figura 8.4: Parámetro D: Distancia al nivel de agua subterránea o al techo del acuífero.	173
Figura 8.5: Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos.	174
Figura 10.1: Mapa de amenazas en la subcuenca de Río Grande para el año 2016.....	175

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1: Microcuencas en la zona de estudio	26
Cuadro 3.2: Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.....	28
Cuadro 3.3: Resultados de ETP calculados en el estudio	33
Cuadro 4.1: Piezómetro No. 1, BA-929.....	37
Cuadro 4.2: Piezómetro No. 2, BA-930.....	37
Cuadro 4.3: Piezómetro No. 3, BA-931.....	37
Cuadro 4.4: Piezómetro No. 4, NA-969.....	37
Cuadro 4.5: Piezómetro No. 5, NA-971.....	38
Cuadro 4.6: Piezómetro No. 6, NA-970.....	38
Cuadro 4.7: Piezómetro No. 7, NA-972.....	38
Cuadro 4.8: Piezómetro No. 8, NA-973.....	38
Cuadro 4.9: Piezómetro No. 9, NA-995.....	39
Cuadro 4.10: Piezómetro No. 10, NA-991.....	39
Cuadro 4.11: Piezómetro No. 11, NA-976.....	39
Cuadro 4.12: Piezómetro No. 12, NA-982.....	40
Cuadro 4.13: Piezómetro No. 13, RG-938.....	40
Cuadro 4.14: Resumen de las características físicas y químicas de los suelos* en la subcuenca del río Grande, Alajuela.....	43
Cuadro 4.15: Clasificación de la tasa de conductividad hidráulica según USDA (1990).....	45
Cuadro 4.16: Ubicación de las pruebas de Infiltración realizadas en la subcuenca del río Grande, Alajuela.....	47
Cuadro 4.17: Detalle de los sondeos eléctricos realizados en la subcuenca del río Grande, Alajuela.....	49
Cuadro 5.1: Puntos de muestreo de aguas, subcuenca del río Grande, Alajuela	122
Cuadro 6.1: Hectáreas plantadas de café, en subcuenca río Grande.....	153
Cuadro 6.2: Uso de la tierra subcuenca río Grande 2005.....	154
Cuadro 6.3: Uso de la tierra subcuenca río Grande 2012.....	157
Cuadro 6.4: Divergencias de uso subcuenca río Grande 2005.....	161
Cuadro 6.5: Divergencias de uso subcuenca río Grande 2012.....	161
Cuadro 7.1: Datos necesarios para la metodología de Schosinsky (2006).....	162
Cuadro 7.2: Datos de profundidad de raíces.....	163
Cuadro 7.3: Datos de pendientes y Kp.....	163
Cuadro 7.4: Datos de vegetación y Kv.....	164
Cuadro 7.5: Datos de recarga potencial obtenidas en el área de estudio.....	165
Cuadro 7.6: Rangos para clasificación de la recarga.....	166
Cuadro 7.7: Variables para la estimación de caudal de extracción por pozo según uso reportado (SENARA, 2006).....	167
Cuadro 7.8: Caudales según el uso del agua.....	168
Cuadro 7.9: Datos para estimación de caudal disponible.....	168
Cuadro 8.1: Datos de parámetro G.....	171

Cuadro 8.2: Datos de parámetro O	172
Cuadro 8.3: Datos de parámetro D	173

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

Actualmente en el Valle Central se presenta un crecimiento de la población y de la industria, y por consiguiente, un crecimiento en la demanda de servicios públicos, entre ellos, el abastecimiento de agua potable. Este desarrollo está alcanzando la parte occidental del Valle Central, siendo un área con pocos estudios en materia de disponibilidad y riesgo de contaminación del recurso hídrico, y al mismo tiempo, una importante fuente de abastecimiento de agua de la población.

Considerando la importancia de los acuíferos Poás, Barva y Colima, se deben conocer aspectos como las áreas de recarga y su regulación, la vulnerabilidad a la contaminación, zonas de protección de manantiales y pozos, información con la cual no se cuenta en este momento.

1.2 Propósito del informe

Este informe tiene como fin el dar a conocer las condiciones hidrogeológicas en la parte occidental del Valle Central, determinar la vulnerabilidad y la recarga potencial de los acuíferos en esta zona, y poder dar recomendaciones para el manejo del recurso hídrico en la subcuenca.

1.3 Objetivo general

Realizar un estudio hidrogeológico de los acuíferos en la subcuenca del Río Grande, Alajuela.

1.4 Objetivos específicos

- Realizar un modelo hidrogeológico conceptual a partir de la información geológica, hidrogeológica, hidrogeoquímica e isotópica de la zona.
- Determinar la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación de los acuíferos en la zona de estudio.
- Estimar la recarga y la disponibilidad de agua en la subcuenca de Río Grande, a partir del cálculo de Balance Hídrico de Suelos.
- Definir las zonas de protección de pozos y manantiales dentro de la subcuenca.

1.5 Participantes

Este proyecto formó parte de la iniciativa nacional COS/07/004 impulsada por el Organismo Internacional de Energía Atómica, realizada en forma conjunta entre el

SENARA y la Universidad de Costa Rica, a través de la Escuela Centroamericana de Geología (ECG) y el Centro de Investigaciones en Contaminación Ambiental (CICA) vía Convenio de Cooperación, además se firmó la Carta de entendimiento entre ambas instituciones para cubrir parcialmente los costos del proyecto (R-CONV-035-2014). El modelo hidrogeológico conceptual fue desarrollado por la ECG a partir de la información recolectada entre las 2 instituciones, y el balance hídrico, la estimación de la disponibilidad hídrica y la vulnerabilidad a la contaminación fueron desarrollados por el SENARA de acuerdo con lo establecido en la carta de entendimiento firmada entre la Universidad de Costa Rica y el SENARA.

Coordinación Nacional:

Geólogo M.Sc. Roberto Ramírez Chavarría, SENARA

Coordinación Técnica:

Hidrogeología:

Geóloga Licda. María Magdalena Monge, Coordinación Técnica General del Proyecto (SENARA).

Geóloga M.Sc. Ingrid Vargas Azofeifa (Hidrogeología y geología) Universidad de Costa Rica.

Geofísica:

Geólogo Ricardo Granados

Geofísico-Geólogo German Leandro

Geólogo M.Sc. Héctor Enrique Zúñiga Mora

Calidad del Agua:

B.Q., Q. Johan Molina Delgado (Coordinador técnico del CICA)

Lic., Q. Víctor Arias, Laboratorio de Calidad de Aguas, CICA

Ing. Agr. Melvin Alpízar Marín, Unidad de Muestreo, CICA

Colaboradores OIEA:

PhD. Lawrence Gourcy, Consultora OIEA.

PhD. José Corcho, Consultor OIEA.

PhD. Luis Toro, Oficial Técnico del OIEA.

1.6 Ubicación administrativa-geográfica del área de estudio

La subcuenca del río Grande se ubica al oeste de la Gran Área Metropolitana, en las hojas cartográficas Naranjo, Río Grande, Barva, Poás, Quesada y Miramar, escala 1:50 000 del Instituto Geográfico Nacional.

Esta subcuenca abarca parte de los cantones de San Ramón, Palmares, Naranjo, Valverde Vega, Atenas, Alajuela, Grecia y Poás, de la provincia de Alajuela; y parte de los cantones de Barva y Santa Bárbara, de la provincia de Heredia. Tiene un área de

634,4 km² y está delimitada entre las coordenadas 481 000-524 000 E y 216 000-242 000 N, proyección Lambert Norte (fig. 1.1 y 1.2).

Los ríos más importantes que recorren la subcuenca son: Grande, Colorado, Cacao, Pilas, Zapote, Trojas, Sarchí, Rosales, Poás e Itiquís.

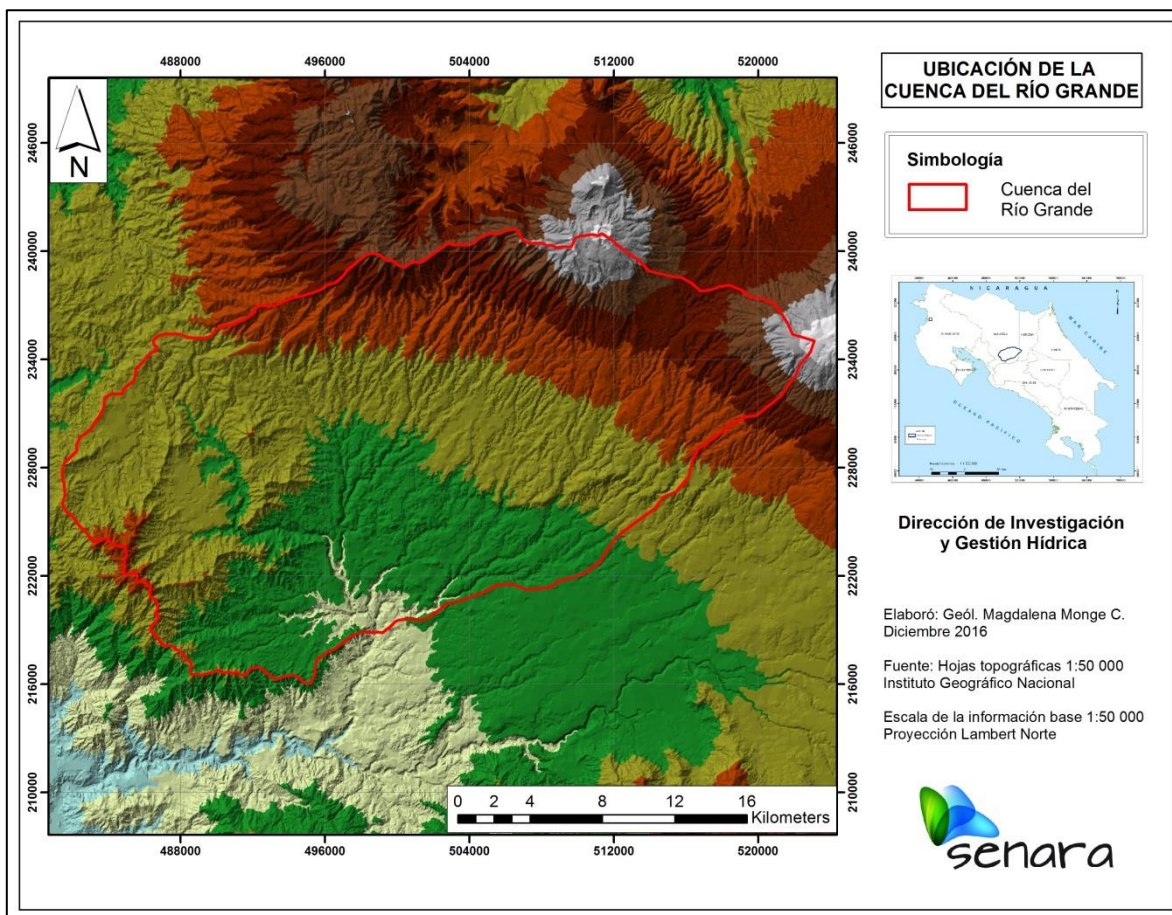


Figura 1.1: Ubicación general de la cuenca del Río Grande.

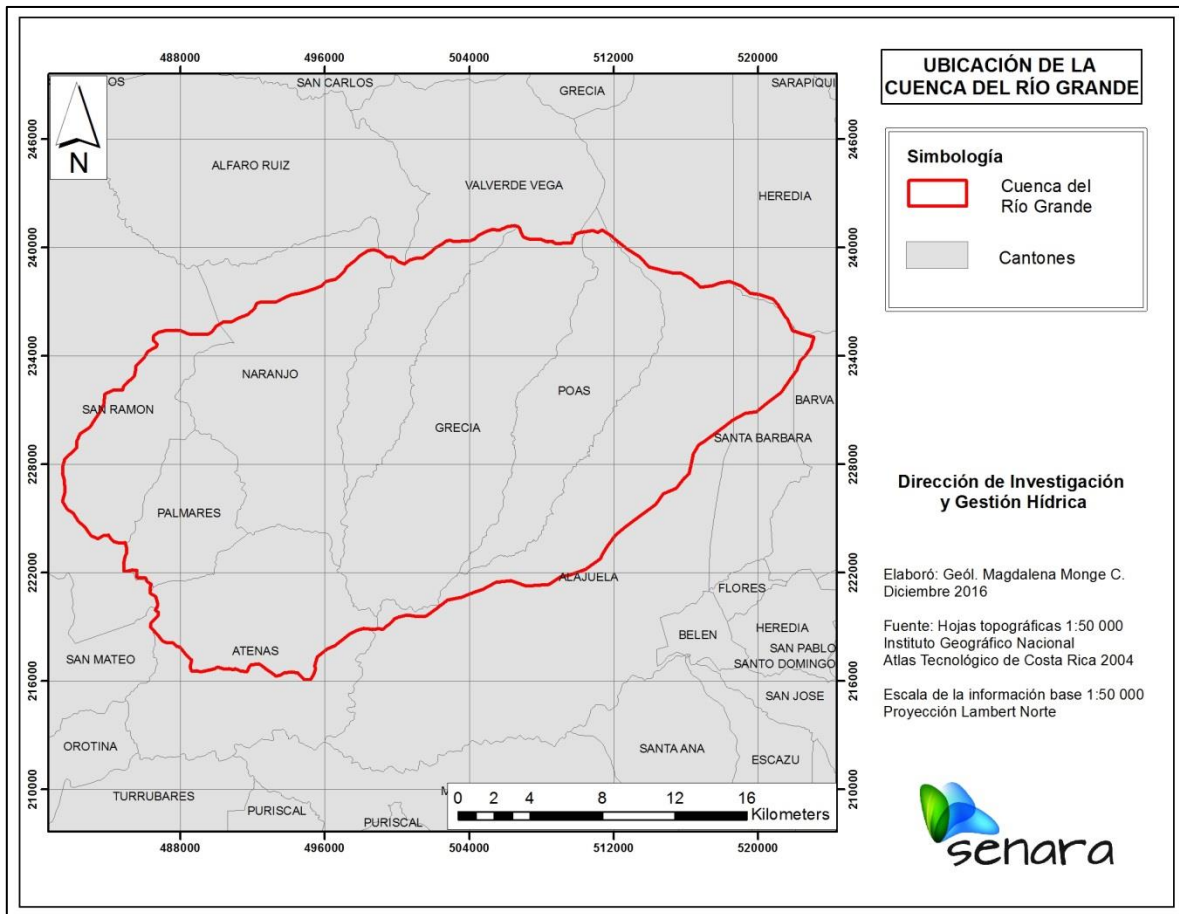


Figura 1.2: Cantones que abarca la cuenca del Río Grande.

1.7 Escala de trabajo

Se trabajó con las hojas cartográficas 1:50 000 del IGN y con mapas geológicos de la zona a escala 1:50 000.

1.8 Periodo de análisis

El estudio de la subcuenca de Río Grande inició en el año 2012 y se extendió hasta mediados del 2019.

1.9 Metodología de trabajo

El estudio se dividió en 8 etapas, algunas de las cuales se ejecutaron de manera paralela. Estas etapas se explican a continuación:

- Recopilación de información existente

En esta sección se realizó la delimitación del área de estudio, y a partir de esta delimitación se llevó a cabo la búsqueda de información ya existente en la zona. Se recopiló información geológica, análisis de suelos elaborados por otras instituciones y datos de estudios hidrogeológicos realizados dentro de la subcuenca.

- Revisión de bases de datos

Se llevó a cabo un escrutinio de la información que se encuentra en la Base de datos de nacientes y pozos del SENARA. Los pozos encontrados fueron separados en los que sí contaban con litología y los que no. Para los que tenían litología también se hizo revisión de datos de pruebas de bombeo. En el caso de nacientes se obtuvo información de la ubicación y caudales de las mismas.

En cuanto a la información climática, los datos de precipitación y de temperatura promedio anuales fueron adquiridos en el Instituto Meteorológico Nacional en el año 2016, para un total de 14 estaciones meteorológicas dentro de la subcuenca.

- Monitoreo de pozos

En el mes de julio del 2012 se iniciaron las labores para realizar un inventario de pozos en la subcuenca, con base en los pozos encontrados en la base de datos de SENARA. En total se encontraron 223 pozos pero no todos tenían las condiciones adecuadas para incorporarlos en la red de monitoreo. Finalmente se utilizaron 153 pozos.

Después de que se realizaron los piezómetros contratados por SENARA, se incorporaron 8 pozos más a la red de monitoreo.

Desde ese mes de julio del 2012 y hasta finales del 2016 se mantuvo el monitoreo de pozos en la subcuenca, realizando mediciones cada 2 meses.

- Definición de sitios a perforar

En esta etapa se hizo una propuesta de 18 piezómetros para perforar dentro de la subcuenca, sin embargo, por razones de presupuesto y permisos otorgados por los propietarios, solamente se pudieron perforar 13 piezómetros.

La ubicación de estos piezómetros fue definida considerando los sitios dentro de la subcuenca donde existía poca información para la definición del modelo hidrogeológico conceptual.

Para los 13 sitios de perforación se contó con la debida aprobación de los propietarios de las fincas.

- Contratación de perforación de piezómetros

Dentro de la subcuenca se realizaron 13 piezómetros, los cuales contaron con el respectivo permiso de perforación emitido por la Dirección de Agua del MINAE, y la bitácora correspondiente del Colegio de Geólogos de Costa Rica.

En esta contratación se hicieron 13 piezómetros mediante el método de rotación con recuperación de núcleos, en un diámetro de 3 pulgadas, armados con tubería de 2 pulgadas.

Durante la perforación se realizaba la descripción de los materiales atravesados, la medición de niveles de agua subterránea y pruebas de Lugeon. Una vez concluida la perforación también se realizaban ensayos de geofísica dentro del pozo, y se tomaban muestras para descripción petrográfica de algunos tramos de roca recuperados.

Luego de realizar los ensayos en los pozos, se llevó a cabo el armado de 8 de ellos (los pozos restantes tuvieron problemas de colapso y no se pudieron armar) con tubería de PVC ciega y ranurada según el diseño propuesto por el geólogo encargado de la perforación. También se procedió a la limpieza del pozo para eliminar residuos de lodos, y la verificación del funcionamiento del pozo mediante una prueba de flujo.

- Contratación de estudios básicos de suelos

En este apartado se elaboró una carta de entendimiento entre la Universidad de Costa Rica y el SENARA, para que la Escuela Centroamericana de Geología realizara los estudios de suelo y geofísica de la subcuenca, en el marco del proyecto # COS7004 del OIEA.

El SENARA se encargó de tomar las muestras de suelos, 51 en total, y se entregaron en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) y en el Laboratorio de Geotecnia de la Escuela de Geología, ambos de la UCR.

El personal de la Escuela Centroamericana de Geología se encargó de realizar las pruebas de infiltración mediante el método de doble anillo, y de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's) en toda el área de la subcuenca.

Como punto adicional, también se trabajó con la Escuela de Geología y el Centro de Investigaciones en Contaminación Ambiental (CICA) para realizar muestreos de agua

en pozos, nacientes y ríos de la subcuenca, para determinar la caracterización química e isotópica del agua.

- Análisis de la información

En este punto se inicia con el análisis de la información recopilada de la bibliografía, de bases de datos, de los laboratorios y tomada en el campo a lo largo de los 7 años en que se ha desarrollado el proyecto.

La Escuela Centroamericana de Geología realiza un modelo hidrogeológico conceptual a partir de los pozos en las bases de datos, la geología encontrada en la zona y los pozos perforados por SENARA, en el marco del proyecto # COS7004.

La metodología de trabajo empleada por la UCR fue:

Fase I: Inventario y análisis de información existente de carácter geológico, geotécnico, hidrogeológico, químico e isotópico. Además se prepararon los mapas cartográficos base.

Fase II: Recolección de datos de campo y análisis de laboratorio. Se visitaron afloramientos de la zona para comprobar la geología en trabajos previos de campanas geológicas, y trabajos publicados como el de Huapaya & Rojas (2012) y Ruiz et al (2010) los cuales se usaron como base y se completaron las zonas en donde no existían datos, principalmente en la zona este y norte de la zona de estudio, a partir de dicha información se integró el mapa geológico a escala 1:50 000. Se contó con apoyo de la geóloga Magdalena Monge para realizar tres visitas a la zona norte del área de estudio.

Se revisaron los registros de pozos de la Base de Datos del SENARA para obtener información litológica relevante y combinarla con la información de la geología superficial, a partir de estos datos se construyeron 5 perfiles hidrogeológicos tratando de abarcar la mayor parte del área de estudio.

Los trabajos geofísica e interpretación de los datos fueron realizados por Geól. Ricardo Granados, Geofísico German Leandro, el M.Sc. Héctor Enrique Zúñiga Mora realizó inicialmente 8 sondeos eléctricos en la zona y posteriormente los Geólogos Ricardo Granados y German Leandro realizaron 17 sondeos más para un total de 25 SEVs, y su respectiva interpretación; estos sondeos se realizaron con el objetivo determinar las distintas capas que conforman el subsuelo y la profundidad del agua subterránea en sitios específicos del área de estudio.

Se recopilaron los datos geotécnicos existentes en la zona y con base en la distribución se realizó una nueva campaña de muestreo de suelos por parte del personal del SENARA, en total 51 muestras nuevas fueron analizadas según parámetros geotécnicos y químicos. Los análisis se efectuaron en los siguientes laboratorios: los análisis físico-mecánicos de los suelos se realizaron en el Laboratorio de Geomecánica de la Escuela Centroamericana de Geología y en el Laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) se realizaron determinaciones de dos puntos de retención de agua (capacidad de campo y punto de marchitez) y el Laboratorio de Suelos y Foliare del CIA realizó análisis químicos de los suelos, todos estos laboratorios pertenecen a la Universidad de Costa Rica.

Se realizaron 4 muestreos de agua subterránea en una red de pozos definida por el SENARA. Personal del CICA realizó los muestreos de agua con el apoyo del personal del SENARA y la Escuela de Geología, los análisis químicos se realizaron en el CICA, y los análisis de isótopos estables de las dos primeras campañas de muestreo se realizaron en el CICA y las muestras de las últimas dos campañas de muestreo se enviaron al Laboratorio de Hidrología Isotópica del OIEA en Viena, ya que el analizador de isótopos estables se dañó. Además se recolectaron muestras para análisis de carbono 14 y nitrógeno 15 para los últimos dos muestreos, los análisis se realizaron en laboratorios contratados por el OIEA debido a que en el país no se cuenta con ese servicio. El procesamiento de los datos hidrogeoquímicos fue realizada por la Dra. Lawrence Gourcy y el Dr. José Corcho, con el apoyo de la M.Sc. Ingrid Vargas, además se recibieron recomendaciones por parte del Dr. Luis Toro del OIEA.

Fase III: Análisis de la información generada. Con base en la información de campo de geología, información de pozos, geofísica, de suelos e hidrogeoquímica se propone un modelo conceptual para la zona de estudio el cual muestra la distribución espacial de las distintas unidades geológicas e hidrogeológicas de la cuenca del Río Grande.

Gracias al apoyo de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica mediante el proyecto 113-B2-515, se contó con una asistente, la señorita Paola Alvarado Piedra, quien digitalizó las figuras y ayudó en la recopilación y tabulación de los datos de los pozos.

Se efectúa la estimación de la recarga mediante el método de Balance Hídrico de Suelos, y considerando los pozos registrados en la base de datos del SENARA, así como los manantiales registrados, se estima la disponibilidad de agua en los acuíferos de esta región.

- Documentos finales

En esta etapa se redacta el informe final del estudio, integrando el análisis de la información realizada previamente.

Una vez integrada toda la información, se realizan recomendaciones para el buen manejo del recurso hídrico en la zona.

1.10 Antecedentes

Denyer y Arias (1991) elaboran el mapa geológico de la hoja Río Grande, a escala 1:50 000.

En el 2001, el Hidrogeólogo José William Pérez realiza el estudio llamado “Hidrogeología del área oeste del Valle Central, San José-Costa Rica”, a partir del cual se elabora el mapa de vulnerabilidad del cantón de Poás. Según el acuerdo 3303, en sesión extraordinaria de la Junta Directiva del SENARA No.239-06 del 26 de setiembre del 2006, se aprueba la Matriz de Criterios de Uso del Suelo según la Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos para la Protección del Recurso Hídrico, misma que utiliza el mapa de vulnerabilidad de Poás.

En el año 2007 se realiza el Estudio Hidrogeológico Integral en el sector occidental del cantón de Grecia, por medio de FUNDEVI y la Escuela de Geología de la Universidad de Costa Rica. En este proyecto se determina la geología de la zona, se caracterizan los suelos, se elabora un modelo hidrogeológico conceptual, y se elaboran los mapas de vulnerabilidad y recarga del cantón.

Rojas (2012) elabora la tesis de licenciatura en la zona de Palmares, San Ramón y Naranjo, con el objetivo de definir la relación entre el lacustre de Palmares y las Formaciones Alto Palomo y Tiribí, y estudiar la deformación de la subcuenca lacustre. Como parte de esta tesis, se elaboró de forma paralela el mapa geológico de la hoja Naranjo por parte de Huapaya y Rojas (2012).

En el 2014 la Municipalidad de Barva contrata la elaboración del mapa de vulnerabilidad hidrogeológica, atendiendo lo establecido en el Voto de la Sala Constitucional, N° 12109-2008, donde es obligación de las municipalidades elaborar este tipo de documento. Este mapa abarca 1,5 km² del presente estudio, y se define esta área como Área Silvestre Protegida.

1.11 Alcances y limitantes de los estudios hidrogeológicos

El presente estudio tiene como finalidad obtener el modelo conceptual hidrogeológico de la subcuenca del río Grande, así como los mapas de vulnerabilidad intrínseca del acuífero, la estimación de la recarga potencial y del caudal utilizable.

Como parte del modelo conceptual, se realizaron muestreos de agua subterránea para realizar una caracterización química e isotópica, en el marco del proyecto con el OIEA.

Las principales limitantes se enumeran a continuación:

1. No se contó con información de pozos en toda la zona de estudio, principalmente en las zonas altas de la subcuenca, lo que ocasionó que no se pudieran elaborar mapas de vulnerabilidad completos.
2. La profundidad de los pozos utilizados no es suficiente para poder ensayar y conocer la totalidad del acuífero.
3. Debido a que los pozos y manantiales no presentaban información completa de caudales, uso y régimen de bombeo, y tampoco se obtuvo la información de concesiones de la Dirección de Agua del MINAE, se tuvieron que asumir algunos datos para elaborar el cálculo de caudal utilizable.
4. En el análisis de vulnerabilidad hidrogeológica no se contó con pruebas de conductividad hidráulica (k) para todo el espesor de la zona no saturada, por lo que el parámetro G se asignó a partir de las descripciones de la litología en la zona no saturada.

2. GEOLOGÍA REGIONAL

Ingrid Vargas Azofoifa

2.1 Formaciones Geológicas

Primeramente se realizó una la compilación de los trabajos de geología publicados en la zona hasta la fecha, posteriormente se realizaron visitas a la zona de comprobación de la geología local y luego se integraron todos los datos usando un sistema de información geográfica. Se mantuvieron los nombres usados previamente en la literatura para mayor claridad.

En general se puede decir que las rocas que existen en la zona son de origen volcánico, asociadas con la actividad del arco volcánico de Costa Rica durante el Neógeno y con el vulcanismo de la Cordillera Volcánica Central desarrollada durante el Pleistoceno. La Fig. 2.1 muestra las unidades geológicas de la zona de estudio, las cuales utilizan los nombres usados por Huapaya & Rojas (2012) y Ruiz et al (2010). A continuación se describen las rocas que afloran en la zona.

2.1.1 Grupo Aguacate

Romanes (1912 en Castillo, 1969) describe al complejo volcánico de los Montes del Aguacate o Serie del Aguacate como rocas andesíticas con vesículas rellenas de estructuras esferolíticas. Según Castillo (1969) estas rocas afloran al sur del Valle de Tabarcia, al oeste de la Fila Diamante en el flanco oeste de los cerros de Turrúcares y al oeste del río Grande en las Hojas Abra y Río Grande. El nombre de Grupo Aguacate fue propuesto por Madrigal (1970).

De acuerdo con Rodríguez (1976), las rocas presentes en el sector Sur de Palmares corresponden con lavas de composición basáltica-andesítica, además de brechas con fragmentos de diferentes tamaños. Estas afloran en el sector de los Cerros de Pata de Gallo.

Las rocas del Grupo Aguacate han sido estudiadas debido a las mineralizaciones de oro, explotadas desde el siglo XIX (Tournon & Alvarado 1997). Kussmaul (1980) relaciona las lavas andesíticas del río Aranjuez con el Complejo Aguacate, y describe alteración hidrotermal tipo propilítica evidenciada por la presencia de: clorita, carbonatos, sílice, epidota, sericita y pirita.

Denyer & Arias (1991) proponen dividir el Grupo Aguacate en la Formación La Cruz y la Formación Grifo Alto. La Fm. La Cruz está compuesta por coladas de basalto y leucobasalto con espesores entre 20 – 30 m; en la zona de estudio de este trabajo,

aflora al este de la Hoja Río Grande. Es la unidad inferior, estas rocas se meteorizan simulando pseudoclastos en una matriz arenosa parda, es frecuente encontrar ceolitas y menos frecuente calcita (ibid). Se pueden encontrar tobas intercaladas de colores rojos y violáceos con estratificación centimétrica (ibid). De acuerdo con los autores mencionados, la Formación Grifo Alto es la unidad superior de este grupo y está compuesta por lavas andesíticas, ignimbritas y flujos piroclásticos que contienen bloques lávicos y escoráceos en una matriz lodosa (ibid).

De acuerdo con Villegas (1994), las lavas son basaltos con olivino y augita, negros, con poca alteración visible y brechas volcanoclásticas de color rojizas a grises, con clastos lávicos subredondeados a subangulares de igual coloración en diámetros máximos de 40 a 50 cm, las mismas pueden verse aflorando en las cimas de los Cerros San Isidro y Piedra Grande.

Fajardo (1994) describe lavas traquibasálticas que afloran principalmente en el Cerro Espíritu Santo.

Tristán (1994) y Alvarado (1994), menciona que las rocas de la formación Grifo Alto, asociadas al Grupo Aguacate están constituidas por una serie de rocas volcánicas andesíticas y piroclásticas, agrega que su contacto inferior corresponde con una discordancia angular con la Formación La Cruz.

En la zona de estudio incluye lavas basálticas y andesítico-basálticas, brechas, aglomerados, Ignimbritas ácidas, tobas y sedimentos vulcanoclásticos subordinados (Huapaya & Rojas, 2012).

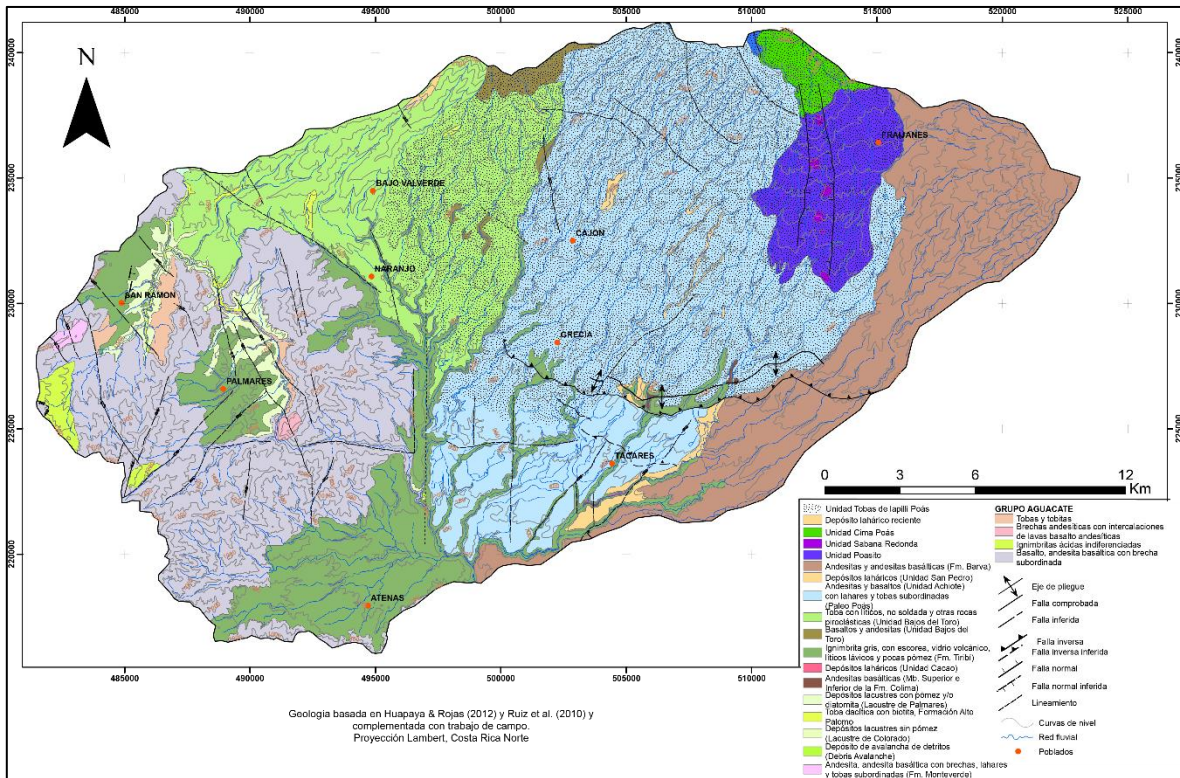


Figura 2.1: Mapa geológico de la subcuenca del río Grande. Digitalizó: Paola Alvarado Piedra.

En la zona de estudio de este trabajo, esta unidad aflora en el área oeste y sur de la Hoja Río Grande, y algunos puntos aislados en el centro y oeste de la Hoja Abra, cubre un 19% del área de estudio. Estas rocas constituyen el basamento en la zona oeste del área de estudio tal (Fig.2.2); su extensión hacia el este no se conoce con precisión ya que en general los pozos no alcanzan profundidades superiores a los 80 metros, en el sector noreste estas rocas son cubiertas por las rocas de la Unidad Bajos del Toro – Viejo, mientras que en la zona sureste del área de estudio, están sobreyacidas por la Formación Colima. Estas rocas por lo general están muy meteorizadas y en algunos sectores como al suroeste del área de estudio, están alteradas hidrotermalmente.

2.1.2 Formación Monteverde

Sobreyace rocas del Grupo Aguacate, cubre un área de 12000 km², y es considerada la mayor erupción andesítica fisural conocida del Cuaternario Inferior, (Gillot et al, 1994).

Žáček, et al (2012) describen para la Hoja Miramar, lavas andesíticas hasta andesita-basálticas no alteradas, en menor cantidad hay rocas piroclásticas (brechas y tobas) y localmente importante son los depósitos de lavas.

Según Mixa et al (2011) estas lavas no están alteradas hidrotermalmente y no tienen mineralizaciones, o metamorfismo de contacto, ni patrones estructurales similares a los de las vulcanitas del Grupo Aguacate.

Según Alvarado & Gans (2012) estas lavas se asocian con el inicio del Neo-Arco del país (2,1 – 1,1 Ma). Huapaya & Rojas (2012) ubican esta formación en el extremo oeste de la Hoja Naranja, escala 1:50 000.

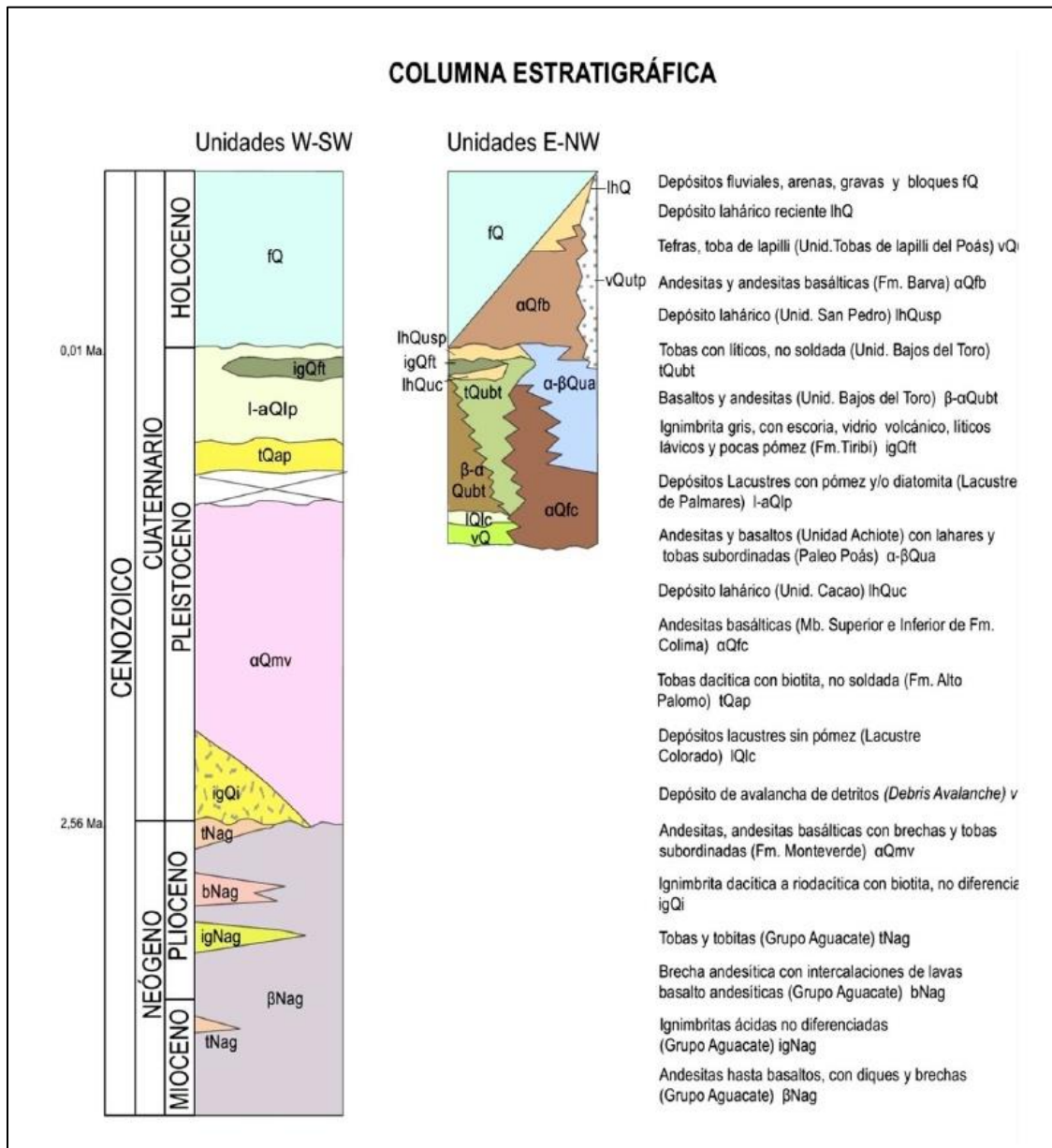


Figura 2.2: Columna estratigráfica de la Hoja Naranja, Tomado de: Huapaya & Rojas (2012).

2.1.3 Depósito de avalancha de detritos (Debris Avalanche)

Se trata de una megabrecha que aflora en el Tajo La Pista en Grecia, en el cruce de la autopista Bernardo Soto (coordenadas Lambert 496990/222340; CRTM 460662/1107740) (Rojas, 2012). Está constituida por bloques de lavas andesítica a andesítico-basáltica, algunas vesiculadas, con tamaños desde centimétricos a métricos, en contacto flotante y con muy mala selección; además contiene lentes métricos a decamétricos de tobas consolidadas de tonos amarillentos y grises, que en algunos sectores se presentan falladas y por otro lado, se presentan fragmentos de escorias centimétricas a decimétricas (ibid). El depósito es caótico, con matriz tobácea azul a morado en la parte inferior y café claro en la parte superior (el cambio de tono se debe posiblemente a la meteorización), y se observa un espesor máximo de 45 m (ibid).

2.1.4 Depósitos lacustres sin pómez (Lacustre de Colorado)

Se trata de una secuencia de limos y arenas finas líticas localizadas en el tajo La Pista, en el mismo sitio en donde aflora la megabrecha descrita anteriormente (Rojas, 2012). La base de esta secuencia está constituida por 1,5 m de intercalaciones de limos café a café claro y arenas líticas color gris oscuro y café desde claro a oscuro (ibid). Dicha secuencia está deformada sin-sedimentariamente, ya que se presentan una serie de pliegues y fallas, que podrían ser el resultado de un deslizamiento de material inconsolidado o el reflejo de un movimiento sísmico que deformó estos sedimentos cuando aún se conservaban plásticos; sobreyaciendo esta secuencia, hay 2,5 m de capas horizontales de limos y arenas líticas finas, con laminación paralela milimétrica y estratificación horizontal, de colores desde café claro a café (ibid).

2.1.5 Toba dacítica con biotita (Formación Alto Palomo)

Fue definida por Villegas (1997), está compuesta principalmente por tobas de lapilli pumíticas (ignimbritas) con brechas coignimbríticas de caída o de rezago y oleadas en su base ("ground surges" cineríticos), según Villegas, (2004). Se divide en dos miembros, el inferior conocido como miembro Palomo, está compuesto por tobas de lapilli pumíticos rojos, crema, amarillo y blancos, con mala a muy mala selección y contacto por matriz, se diferencia del miembro superior en que no contiene biotita ni lapilli acrecional (ibid). Este miembro descansa sobre rocas del grupo Aguacate y a su vez es sobreyacido por el miembro Palmitos (ibid).

El miembro Palmitos está compuesto por tobas de lapilli pumítico crema, grises a blancos, con mala a muy mala selección y contacto por matriz, productos de flujos piroclásticos y a diferencia del miembro inferior contiene cristales de biotita y anfíbol.

Subyace al Lacustre de Palmares (ibid). En la zona de estudio aflora en el extremo oeste.

2.1.6 Lacustre de Palmares

Según Dóndoli (1949, 1951) está formado principalmente por capas de cenizas y arenas, con pómez blanca, así como fragmentos de lava y lentes de diatomita en menor porcentaje, según el autor el lago se formó por una represa natural de las lavas provenientes de la Cordillera Volcánica Central, que provocó el represamiento de las aguas. Posteriormente Matthers (1989) propone que su formación está relacionada con el vulcanismo ácido-intermedio el cual provee abundante sílice.

Varias campañas geológicas describen el lacustre entre ellas la de Fajardo (1994), Tristán (1994) y Villegas (1994), además tres tesis de licenciatura se han realizado en la zona, Ramírez (1995), Villegas (1997) y el trabajo más reciente es el de Rojas (2015) el cual realiza un análisis geológico y sedimentológico del depósito.

De acuerdo con Rojas (2012) el Lacustre de Palmares está constituido por 70 m de alternancias de depósitos lacustres de aguas profundas y someras, el cual estuvo conformado por dos lagos, uno al noroeste del centro de San Ramón, denominado lago Los Ángeles (área estimada 3 km²) y otro principal, en el área del centro de Palmares y San Ramón (área estimada 25 km²). La autora destaca dos facies principales, asociación I: enriquecidas en clastos pumíticos y asociación II: enriquecidas en clastos de líticos de lavas. La asociación I, está representada a su vez por las litofacies de gravas, arenas y limos pumíticos, así como diamictopumítico, mientras la asociación II: está representada por gravas, arenas y limos con predominancia de líticos de lavas.

La presencia de restos de megamamíferos y diatomeas indican un ambiente continental (Rojas, 2012). La edad del lacustre es 0,58 - 0,44 Ma hasta menor a 0,32 Ma, con base en las dataciones radiométricas de la Formación Alto Palomo y Tiribí, respectivamente y su origen está asociado con la tectónica de la subcuenca donde se depositaron sedimentos producto de la erosión de la Form. Palomo (ibid).

2.1.7 Formación Colima

Originalmente descrita por Williams (1952 en Denyer & Arias 1991), quien se refirió a estas lavas como andesitas piroxénicas. Fernández (1969) le asigna el nombre de Formación Colima al grupo de lavas que afloran en el cañón del Virilla y que corresponden con las primeras coladas que vinieron de la actividad de la Cordillera Central siguiendo los cañones de los ríos existentes, aflora en los cauces de los ríos Tibás, Virilla y Tiribí. En los cauces de los ríos aflora una colada lávica de coloración

gris, seguida de una escoria rojiza mezclada con una brecha lávica y suelo calcinado, sobreyace una segunda colada de color gris claro y en la parte superior una escoria y brecha lávica (ibid).

Esta formación ha sido ampliamente estudiada mediante perforaciones debido a su potencial para el aprovechamiento del agua subterránea, Echandi (1981) la subdivide en tres miembros: el inferior es el Miembro Belén, el cual está compuesto por lavas andesíticas y andesíticas-basálticas, el Miembro Ignimbritas de Puente de Mulas es el intermedio y se trata de una ignimbrita de color gris oscura, con un núcleo denso en la parte central y hacia la base y el techo cambia a una toba. Finalmente el miembro superior es el Miembro Linda Vista, el cual incluye lavas y brechas lávicas (ibid).

La Fm. Colima hospeda los acuíferos más importantes del Valle Central, Colima Inferior y Colima Superior (SENARA-BGS, 1985), los cuales junto con el acuífero Barva, abastecen gran parte de la población.

Brenes (1995) correlaciona unas lavas andesíticas afíricas y piroxénicas que afloran en el sector de Grecia con la Formación Lavas Intracañón. MORA (1995) describe las lavas del tajo Prendas como andesitas de color gris oscuro azulado con textura afírica con regular presencia de vacuolas y de apariencia blocosa y las correlaciona a su vez con esta formación.

Campos et al. (2005) describen que en el sector de Platanillos y sus alrededores aflora la Formación Lavas Intracañón, principalmente a lo largo del Río Poás. Según Kussmaul (2000) se trata de coladas andesíticas de textura afanítica levemente porfírica (5% a 10% de fenocristales de plagioclasa) de color gris oscuro a verdoso en superficie sana. La matriz presenta vesículas alargadas con dirección de flujo, y generalmente se presenta en lajas. Sobre estas rocas se presenta otro paquete de andesitas afaníticas porfíricas color gris oscuro azulado, con fenocristales en mayor porcentaje (aproximadamente 30%) y menor tamaño de grano (0.5mm); el espesor total de la Formación en el sector es de aproximadamente 25m, y su extensión de 50m (ibid).

Según Kussmaul (1988), estas lavas son producto de efusiones a lo largo de fisuras con dirección NE-SW hasta E-W, paralelo al río Virilla, e indica que la composición química de las lavas es diferente a la de los estratovolcanes de la Cordillera Volcánica Central y que se asemeja a la de la Fm. Tiribí. Pérez et al. (2006) coinciden con lo indicado por Kussmaul (1988). Sin embargo, trabajos recientes indican que es poco probable que estas rocas se originaran cerca del Virilla ya que se han encontrado hacia la cordillera (Ruiz et al, 2010). Según Arredondo & Soto (2006) esas fisuras eran

paralelas al frente de la cordillera, más hacia el frente de la cordillera que del río Virilla, formando parte de la Paleo Cordillera Central.

Los afloramientos de esta formación en la zona de estudio son muy pocos y se ubican en la zona noreste del área de estudio, cerca de la falla de Alajuela (Fig. 2.1), una de las incógnitas que se tenía antes del proyecto, era la extensión de la Fm. Colima hacia el oeste del Valle Central; sin embargo con información existente esto es difícil de determinar ya que las descripciones de los pozos en general no son muy detalladas y al noreste del área de estudio los pozos no superan los 80 metros en promedio, además en esta zona en particular, existen coladas provenientes del Volcán Poás y Barva, de manera que para contestar esta incógnita se necesitaría realizar pozos exploratorios profundos (de 200 metros o más), en donde se realicen análisis geoquímicos y dataciones de los distintos flujos de lava existentes. Aunque el SENARA realizó tres piezómetros: BA-931, NA-971 y NA-970 específicamente, no se contó con este tipo de análisis para correlacionar las lavas encontradas.

2.1.8 Andesitas y basaltos de la Unidad Achioté, con tobas y lahares subordinados (Paleo-Poás)

Esta unidad se ubica en la mayor parte del sector noreste y sureste de la hoja, conformando las faldas del volcán Poás, desde una altura de 2000 msnm hasta las zonas planas menores a 1000 msnm (Huapaya et al, en preparación). Esta unidad incluye lavas antiguas del volcán Poás (Paleo-Poás) que afloran al sur de la Falla de Alajuela (Rojas, V. comunicación verbal) y lavas más jóvenes de la Unidad Achioté, además de tobas y lahares subordinados. Es importante recalcar que los afloramientos de lavas son relativamente pocos, ya que las lavas están cubiertas por tobas de la unidad de Tefras y tobas de lapilli del Poás (Huapaya et al, en preparación). Ruiz et al (2010) no usan el nombre de Paleo-Poás para no confundirlo con la fase temporal PaleoPoás, en su lugar le asignan el nombre de Andesitas La Paz para describir lavas andesíticas-basálticas hasta basaltos, se distinguen por ser porfíricas con megafenocristales de plagioclasa que pueden tener hasta 2-3 cm, además incluye brechas, tobas y piroclastos interdigitados (Ruiz et al, 2010). Aflora al norte de la Laguna de Hule, en el río Toro y Sarapiquí, en el río Poás, al este de San Pedro de Póas, se trata de lavas con megafenocristales de plagioclasa similares de los observados en la catarata de la Paz. Sobreyace a la formación Colima y subyace a la Unidad Achioté, aunque existen lavas de la Unidad Achioté que son contemporáneas con Andesitas La Paz (ibid).

2.1.9 Unidad Achioté

El nombre se usó por primera vez por Brenes (1995) y Alpízar (1995) para referirse a la lavas andesíticas que afloran al norte del centro de la Ciudad de Grecia, en el río Achioté; posteriormente Campos et al (2005) proponen una localidad tipo ubicada en las coordenadas Lambert 510,180 E y 237,470 N y donde se encuentran frentes de coladas de tipo masivo, con espesores máximos de 15 m, por ser esta localidad la que corresponde con el afloramiento donde mejor se encuentra expuesta este tipo de litología, esta unidad lleva el nombre de Unidad Achioté. Ruiz et al (2010) indican que aflora en la zona sur del Volcán Poás hasta la Falla de Alajuela, según los autores está compuesta por coladas de lava andesítico-basálticas con fábrica masiva, presentan fracturación en lajas por enfriamiento. Microscópicamente presenta textura hipocristalina porfirítica seriada con matriz intersertal hasta levemente hialopilitica con fenocristales de plagioclasa (15-20%) idiomórficas e hipidiomórficas, clinopiroxenos hipidiomórficos (9%), ortopiroxenos (2%) y olivino (1-3%) idiomórficos a hipidiomórficos (ibid). La edad que le asignan los autores es de 538 ± 15 Ka, en la misma fase temporal que la Unidad Paleo Poás.

Los productos de esta unidad probablemente provienen de focos eruptivos cercanos a la actual cúspide del volcán Poás (ibid).

2.1.10 Depósitos laháricos (Unidad Cacao)

Según Campos (2005) aflora en el cauce inferior del Río Poás, al noreste de la confluencia con el río Prendas, tiene un espesor visible de 10 metros y una extensión de 100 metros de afloramiento. Está compuesto por una matriz arcillosa color café, de poca plasticidad contiene bloques de andesitas está muy consolidado y de poca plasticidad; su contacto inferior es erosivo con la Unidad Andesitas Río Poás y el contacto superior es erosivo con la Formación Tiribí (ibid).

2.1.11 Formación Tiribí

Fernández (1969) le llama Fm. Tiribí y describe la sección tipo cerca de la desembocadura del río Tiribí antes de la confluencia con el río Virilla en la zona de Electriona, para ese sitio describe una toba soldada de coloración grisácea oscura a gris claro hasta amarillenta por alteración con bandeado horizontal de vidrio negro y pómez colapsada, en una matriz cenicienta densa. Denyer & Arias (1991), retoman en nombre de Formación Avalancha Ardiente, original de Williams (1952 en Denyer & Arias 1991). Según Echandi (1981) esta formación funciona como un acuitardo debido a que tiene un potencial acuífero mucho menor comparado con el potencial de la Fm. Lavas Intracañón.

Chávez y Avilés (1993), hablan sobre la génesis de esta formación, mencionan una relación con una fase de vulcanismo fuertemente explosivo caracterizado principalmente por mantos ignimbríticos que cubrieron el piso del Valle Central durante el Cuaternario. Los principales afloramientos se presentan en los cañones de los Ríos Tiribí, Virilla, Ciruelas, y algunos tributarios menores.

Según Mora (1995) y Vargas (1995) en el sector de Grecia existen de ignimbritas negras que a veces varían su color a gris. El nivel de compactación varía verticalmente siendo la base muy densa y compacta con matriz vidriosa, y se vuelve más deleznable y con matriz escoriácea hacia el techo (ibid). Brenes (2003) describe una ignimbrita con fiames de vidrio negro bien alineados que flotan junto con pocos fragmentos de pómez en una matriz cinerítica de grano fino. Además Brenes (1995) describe también en el sector más occidental del cantón de Grecia un conglomerado volcánico de color gris claro con fragmentos de lava andesítica dentro de una matriz cinerítica muy compacta y soldada compuesta por líticos de pómez, plagioclasa y vidrio con aproximadamente 8m de espesor.

Campos et al. (2005) describen otra ignimbrita aflorando en el sector de Platanillo y alrededores. Presenta una matriz vidriosa negra con clastos de diferente composición, escorias, fiames colapsados y disyunción columnar en una facie consolidada (ibid).

Brenes (2003) describe un depósito ignimbrítico en el flanco W del volcán Barva, de color gris claro, densamente soldado, con una estructura bandeada y alternando fajas densas finas con fajas porosas de material escoriáceo. En las secciones más superiores presenta un aspecto brechoso de color gris claro o verde azulado con fragmentos de rocas color café claro y fiamespumíceos, mientras que en su parte más inferior la ignimbrita se observa densamente soldada con aspecto de lava (ibid). Pérez (2006) propone que estas rocas se originaron en el Volcán Barva.

2.1.12 Unidad Bajos del Toro-Viejo

Alvarado & Carr (1993) describen lavas basálticas-andesíticas interestratificadas con flujos piroclásticos y otras rocas piroclásticas, presentando secciones de casi 1000 metros de espesor y le asignan una edad de 0,4 millones de años, correspondiente al Pleistoceno. Huapaya & Rojas (2012) separan para la zona de estudio las Tobas con líticos, no consolidada y otras rocas piroclásticas las cuales se localizan en la zona norte del río Grande de los basaltos y andesitas, estas últimas afloran en forma localizada al norte de Sarchí.

2.1.13 Formación Barva

Definida por Fernández (1968), para referirse a las unidades lávicas conocidas como las coladas: San Rafael, Colada San Antonio, Ciruelas y Cebadilla.

La Formación Barva está compuesta por coladas andesíticas y andesítico-basálticas que pueden alcanzar espesores entre 10 y 80 metros, Echandi (1981). Esta formación ha tenido gran importancia hidrogeológica por la presencia de abundantes manantiales al norte y oeste del Valle Central (SENARA-BGS, 1985). Aflora en la zona este del área de estudio, cubre un área superficial del 13% de la subcuenca.

Protti (1986) considera que la Formación Barva comprende todos los tipos litológicos que constituyen el estratovolcán Barva, por lo que propone la siguiente denominación informal: Miembro Bermúdez, constituido por una serie de coladas de lava andesítica a basáltica, Miembro Carbonal formado por tobas líticas y tobas poco consolidadas, Miembro los Bambinos compuesto por una serie de coladas de lava andesítica de poca extensión, Miembro Porrosatí constituido por un depósito de piroclastos de granulometría gruesa (arena media a gruesa), Miembro Los Ángeles formado por una colada de lava andesítico-basáltica y Miembro Cráter el cual corresponde con una unidad de cenizas y piroclastos gruesos de poco espesor. El frente sur de las lavas andesítico basálticas del Miembro Bermúdez se ubica en el cauce del río Bermúdez al este de la ciudad de Heredia, mientras que el Miembro Carbonal está constituido por tobas líticas y cenizas poco consolidadas y meteorizadas que cubren una gran extensión (ibid).

Denyer & Arias (1991), al igual que Echandi (1981), denominan con el nombre de Formación Barva a varias coladas y depósitos piroclásticos. En cuanto a la edad de la Formación Barva, Echandi (1981) la ubica en el Holoceno y Denyer & Arias (1991) en el Pleistoceno-Holoceno.

Arredondo & Soto (2006) basados en nuevas observaciones geológicas, geología de pozos en la parte alta del volcán Barva, así como en dataciones previas y una nueva realizada por los autores, establecieron la edad del Miembro Los Bambinos y propusieron un cuadro cronoestratigráfico de la Formación Barva (equivalente al volcán Neo Barva). Los autores indican que las lavas del Miembro Bermúdez representan varios campos de coladas de lavas con un rango amplio de edades (270-40?ka), el Miembro Carbonal, en la parte superior del volcán puede tener edades en un rango de 40-27,4 ka, las lavas del Miembro Los Bambinos las dividen en dos sub-miembros (Inferior y Superior), un lahar intercalado entre ambos sub-miembros muestra una edad de 27,4 ka, el miembro podría tener en total un rango de 10-30 ka y a los piroclastos del Miembro Porrosatí le asignan una edad <15 ka, con base en la edad de tefras que sobreyacen a las lavas de Los Bambinos.

2.1.14 Unidad Poasito

Gazel & Ruiz (2005) denominan Andesitas de Poasito a las lavas afírica que afloran en la zona entre las localidades de Poasito, Sabana Redonda, Bajos del Tigre y Los Angeles. Está compuesta por coladas de lava masiva, con texturas fluidales mostrando pliegues y fallas inversas, además de estructuras de cizalle interno características que quedas como remanente del movimiento de la colada (Ruiz et al, 2012). Esta unidad sobreyace discordantemente a la Unidad Achioté, aunque no hay dataciones radiométricas su edad podría ser entre 40 y 25 ka (ibid). La localización de la fuente de estas coladas dentro de la fractura volcanotectónica del Poás, sugieren que se originaron por medio de un volcanismo fisural en el flanco sur del volcán (Prosser & Carr, 1987, Gazel & Ruiz 2005 en Ruiz et al, 2010).

2.1.15 Unidad Sabana Redonda

Ruiz et al (2010) corresponde con los depósitos de los conos piroclásticos del mismo nombre. Se compone por depósitos de bombas y bloques en una matriz de lapilli, niveles de aglomerados y pequeñas pseudocoladas de lava clastogénicas en la base (ibid). Sobreyacen a las Unidades de Achioté y Poasito (ibid). Gazel & Ruiz (2005) reportan un espesor de 60 metros. La fuente de emisión de esta unidad es un alineamiento norte-sur de al menos 5-6 conos piroclásticos (Ruiz et al, 2010).

2.1.16 Unidad Cima Poás

Ruiz et al (2010) utilizan este nombre para referirse a los productos emitidos de los cráteres Botos y Principal del Poás. Los productos del cráter Principal se extienden hacia el oeste y las coladas del cráter Botos se extienden hacia el este y sobreyacen una secuencia considerable de piroclastos indiferenciados en la quebrada Pulga (ibid). De acuerdo con Soto (1999 en Ruiz et al, 2010) las lavas provenientes de Botos rellenas principalmente el piso de la cúspide del Poás y están limitadas por escarpes de fallas.

2.1.17 Unidad de tobas de lapilli Poás

Según Ruiz et al (2010) se extiende desde la cúspide del Poás, hacia el suroeste en el sector de Grecia, cubre las lavas del sector sur del volcán Poás. Tienen un espesor de 7 metros y se observa en los cortes de los caminos. Gazel & Ruiz (2005) indican que hay una reducción en el tamaño de las partículas desde el cráter hacia el NE-SW siguiendo la dirección del viento.

2.1.18 Depósito lahárico reciente

Huapaya & Rojas (2012) ubican un depósito de lahares recientes en el río Zapote al este de Llano Bonito, Naranjo, el cual cubre un área de 300 m² aproximadamente. El lahar tiene una matriz arcillosa color café claro, con líticos piroclásticos (escorias y pómez) centimétricos y hasta 35 cm de diámetro máximo observado, contiene líticos lávicos con fenocristales de plagioclasas y piroxenos, de tamaños métricos, predominantemente angulares y algunos con meteorización tipo cebolla (Huapaya et al en preparación). Los autores indican que los contactos con otras unidades geológicas no fueron observados, sin embargo se infiere que sobreyace a la Unidad Bajos del Toro-Viejo y que se trata de un lahar reciente, <10 ka? (ibid).

Esta unidad se diferencia espacial y temporalmente de los lahares de la Unidad San Pedro, estos últimos afloran en los ríos Vigía, Achioté, Tacaes y Cabuyo, ubicados al norte y noreste de Santa Gertrudis Norte (ibid).

2.2 Geología Estructural

Tal y como se determinó en el análisis de la geología existen diferencias entre la zona este y oeste del río Colorado, esto también es evidente en los rasgos estructurales de la subcuenca del río Grande (Fig.2.1).

Huapaya & Rojas (2012) indican fallas y lineamientos en direcciones NW-SE y NE-SW, preferencialmente ubicadas en las rocas del Grupo Aguacate, las cuales por la dirección que tienen, coinciden con el modelo de esfuerzo compresivos S-N propuesto por Arias & Denyer (1991), los que causan fallas transcurrentes en las Hojas Abra y Río Grande, hacia el límite sur de la subcuenca del río Grande (ibid).

Sin duda alguna el rasgo estructural más notorio en la zona este del río Grande, es la falla de Alajuela, la cual fue estudiada por Borgia et al (1990) la cual tiene un rumbo aproximada este-oeste, consistente con el modelo de esfuerzos existente; al norte de la falla inversa pero con el mismo rumbo de esta, hay también un anticlinal. Al sur de esta falla, Huapaya & Rojas (2012) proponen dos fallas transcurrentes con rumbo NE-SW ubicadas a ambos lados de Turrucates. Durante el trabajo de campo se levantó la falla ubicada en las coordenadas (220505 Norte y 502434 Este), en la localidad de La Garita donde se observaron espejos de falla y estrías en un plano buzante al 252/34°.

En el extremo NE del área de estudio en la zona de mayor elevación de la subcuenca (>1200 m.s.n.m.), al norte de la coordenada 230 000 Lambert Norte, se notan dos fallas normales con rumbo N-S que forman una "depresión bordeada al este y al oeste por escarpes lineales de pendientes fuertes (25-45°) de hasta 70 m de altura" según

Gazel & Ruiz (2005), dentro de este graben están alineados los conos piroclásticos de Sabana Redonda, además se observan algunos alineamientos en forma de arcos abiertos hacia el NE indicados por Ruiz et al (2010), asociados posiblemente con la estructura distensiva del cráter del volcán Poás.

Finalmente, se observan algunos alineamientos en sentido N-S propuestos por Huapaya & Rojas (2012), destaca el alineamiento sobre el río Grande que se extiende desde el este de la localidad de Naranjo hasta el río Cacao en Atenas y un par de alineamientos E-W propuestos en este trabajo a partir del modelo de elevación digital que se localizan sobre el río Cacao y al este del río Grande en la margen izquierda.

2.3 Morfometría de la subcuenca del Río Grande

Se observan dos tipos principales de redes de drenajes en la zona de estudio, las cuales son el resultado de la combinación de factores geológicos y tectónicos. Al este de la subcuenca predomina el drenaje tipo paralelo con orientación NE-SW (Fig. 2.3), los drenajes principales van desde los 1900-2000 m.s.n.m descendiendo hasta los 800-700 m.s.n.m.; este sistema está asociado a la erosión de coladas y depósitos piroclásticos provenientes de los estratovolcanes Poás y Barva; los ríos principales de este sistema son: Sarchí, Trojas, Rosales, Poás e Itiquís.

Al oeste de la zona, el drenaje predominante es el dentrítico desarrollado sobre rocas terciarias y en menor grado recientes, los drenajes principales son: Colorado, Grande y Cacao. En forma aislada se observa un drenaje rectangular debido al control estructural localmente, esto es notorio en los ríos Grande y Cacao.

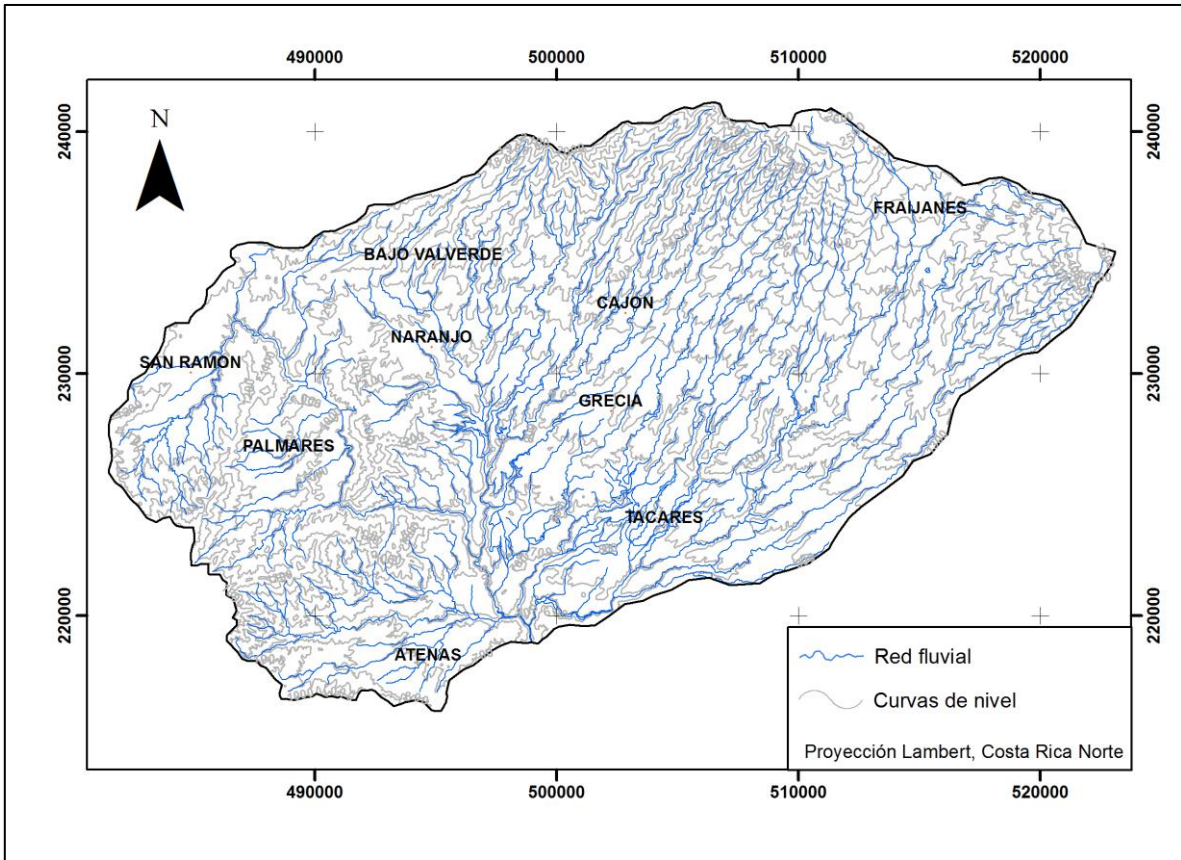


Figura 2.3: Morfometría de la subcuenca del río Grande.

3. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

María Magdalena Monge Cordero

3.1 Cuencas hidrográficas de la zona de estudio.

La subcuenca de Río Grande forma parte de la cuenca del Río Grande de Tárcoles, el cual desemboca en el océano Pacífico. Las principales microcuencas que se encuentran en la subcuenca de Río Grande corresponden a los siguientes:

Cuadro 3.1: Microcuencas en la zona de estudio

Microcuenca	Área (km ²)	Ríos asociados
Río Poás	210,0448	Poás, Itiquís, Prendas, Tacares, Tambor, Mastate
Río Colorado	163,8782	Agualote, Vigía, Sarchí, Trojas, Colorado, San Juan
Río Cacao	60,8093	Cacao, Cajón
Río Grande	132,5804	Grande, Palmitos
Río Rosales y otros	67,0678	Rosales, Pilas, Poró, Achiote. Quebrada Valverde

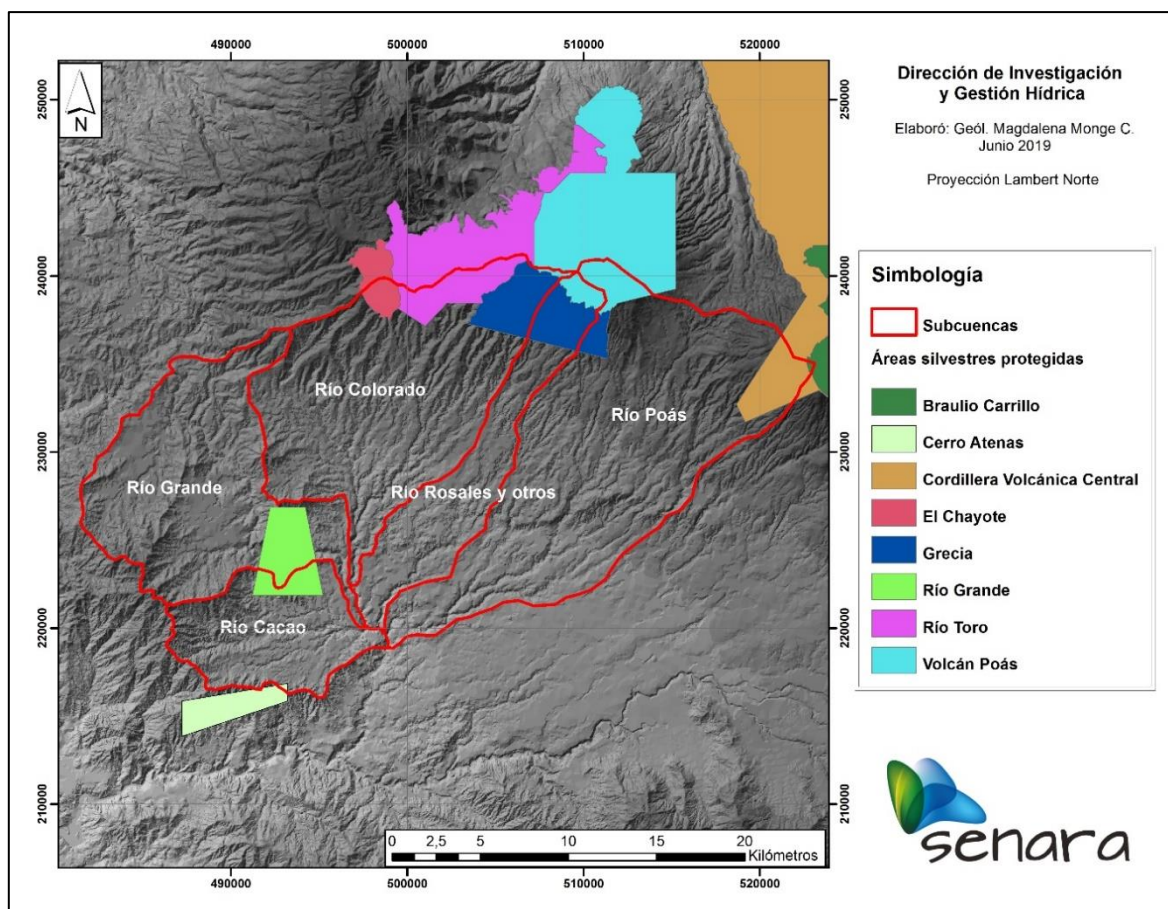


Figura 3.1: Microcuencas en la subcuenca de Río Grande y Áreas silvestres protegidas.

El área de estudio corresponde a 634,4 km². Tiene una longitud de 42,57 km de este a oeste, y una distancia aproximada de 20 km de norte a sur. La elevación máxima de la subcuenca es de 2781 m.s.n.m. en el volcán Barva y la elevación mínima es de 460 m.s.n.m. en el final de la subcuenca.

3.2 Clima, estaciones meteorológicas.

Dentro del área de estudio se encuentran 14 estaciones meteorológicas, y en los alrededores cercanos se ubican 3 estaciones (fig. 3.2). Estas estaciones pertenecen al Instituto Meteorológico Nacional (IMN), al SENARA, la Sede de Occidente de la UCR en San Ramón y la Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA).

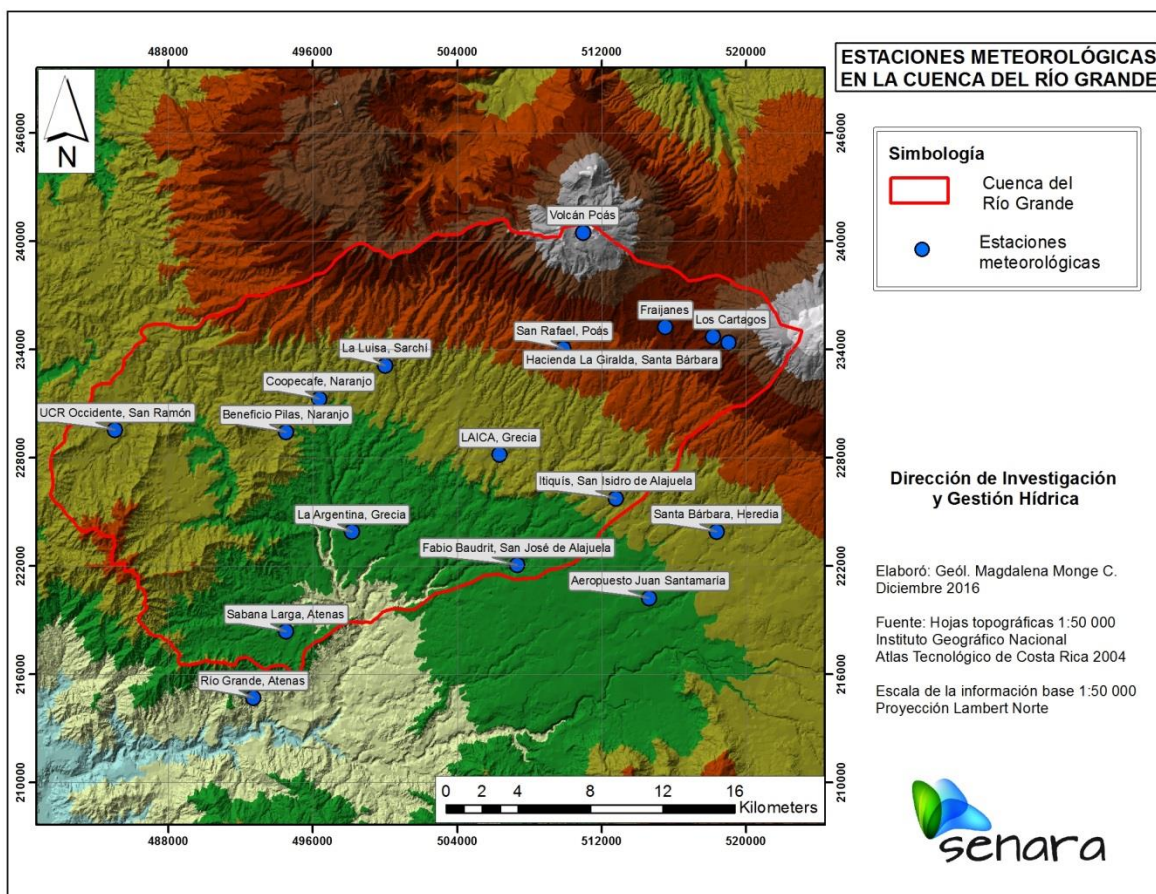


Figura 3.2: Estaciones meteorológicas dentro de la subcuenca de Río Grande.

Cuadro 3.2: Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio

Estación	X	Y	Z	Años	Precip.	Temp.
Sabana Larga, Atenas	494518	218365	696	1941-2013	Sí	Sí
Fabio Baudrit, San José de Alajuela	507309	222052	840	1961-2002	Sí	Sí
Fraijanes	515525	235234	1850	1976-2010	Sí	Sí
Hacienda La Giralda, Santa Bárbara	519027	234376	2049	1998-2009	Sí	No
Itiquís, San Isidro de Alajuela	512789	225740	1080	1989-2010	Sí	No
La Argentina, Grecia	498173	223894	760	1937-2010	Sí	Sí
La Luisa, Sarchí	500000	233111	1250	1937-2010	Sí	No
Volcán Poás	510957	240486	2564	1971-1991	Sí	No
LAICA, Grecia	506345	228160	1026	1996-2013	Sí	Sí
Los Cartagos	518147	234702		1968-2015	Sí	No
UCR Occidente, San Ramón	485020	229532	1081	2009-2015	Sí	Sí
San Rafael, Poás	509864	234065	1762	1998-2014	Sí	No
Beneficio Pilas, Naranjo	494519	229425	1042	1940-2005	Sí	Sí
Coopecafé, Naranjo	496346	231268	1100	1971-2001	Sí	Sí

En esta subcuenca se tiene una época seca de diciembre a abril, y dos épocas lluviosas separadas por un veranillo en julio, característico de la vertiente del Pacífico.

En promedio, la mayor precipitación se da en la parte alta de la subcuenca, en el área cercana al Volcán Poás, con precipitaciones mayores a 3500 mm; mientras que la precipitación más baja se da en la cuenca baja, en las cercanías de Alajuela con 1870 mm de lluvia, y en San Ramón con 1683 mm.

En la parte media y alta se miden valores de precipitaciones promedio similares, pero en la época de setiembre y octubre se da una disminución considerable de la precipitación en la parte alta de la subcuenca, así como un aumento de lluvia en los meses de enero, febrero y marzo. Esto puede ser ocasionado por un efecto de la vertiente del Caribe, ya que las estaciones del Volcán Poás, Fraijanes, Los Cartagos y La Giralda están muy cercanas a la divisoria de aguas (fig. 3.3).

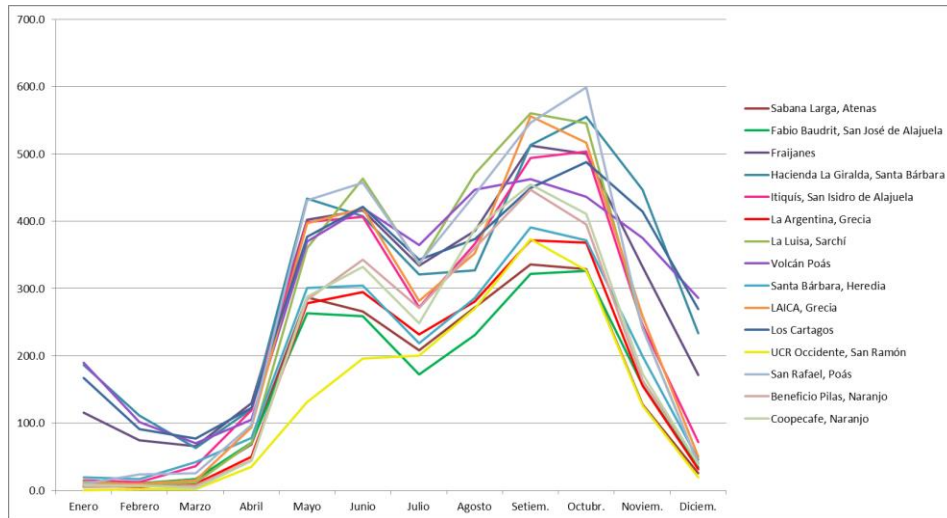


Figura 3.3: Comportamiento de la precipitación en la subcuenca de Río Grande.

Para la elaboración del Balance Hídrico de Humedad de Suelos se utilizaron los datos de precipitación de las 14 estaciones meteorológicas dentro de la subcuenca, cuya distribución se realizó a partir de polígonos de Thiessen, según se muestra en la siguiente figura:

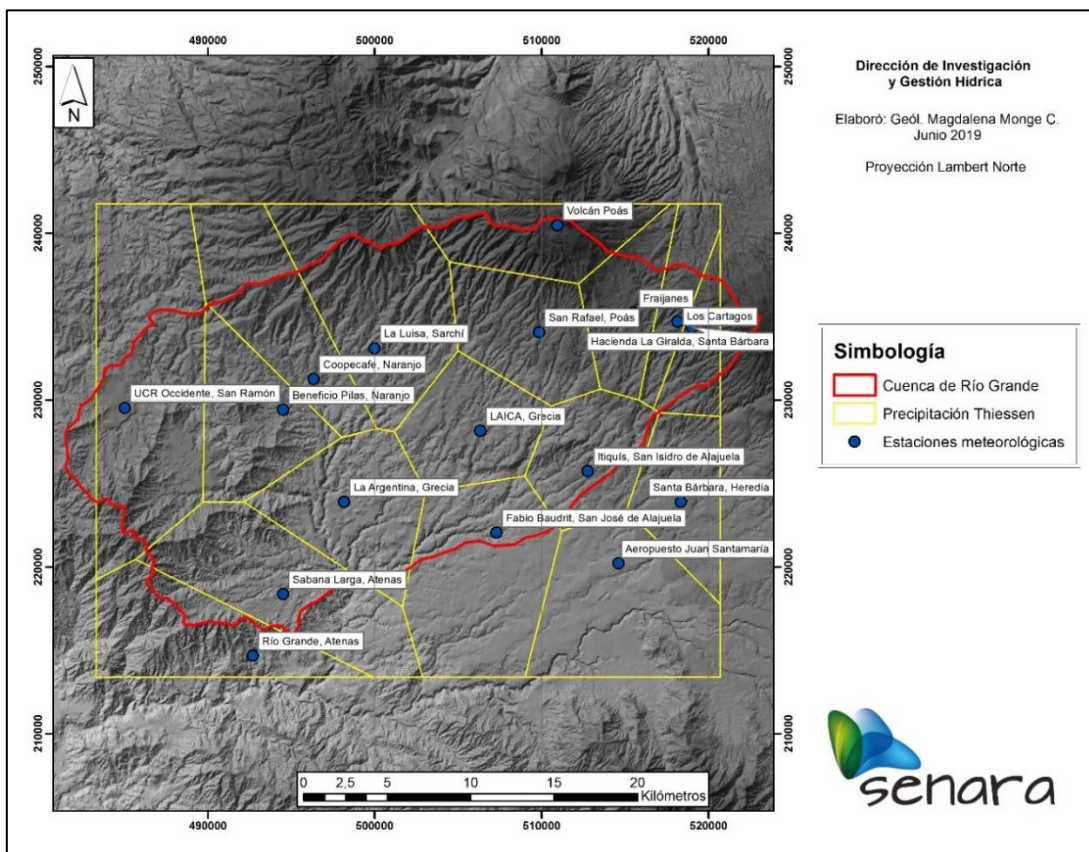


Figura 3.4: Polígonos de Thiessen a partir de las 14 estaciones meteorológicas.

En el caso de las estaciones de Santa Bárbara de Heredia y el Aeropuerto Juan Santamaría, los polígonos de Thiessen no se encuentran dentro de la subcuenca, por lo que no se utilizaron en el balance. Para la estación de Río Grande en Atenas, el polígono sí se encuentra dentro de la subcuenca, pero debido a que existen similitudes con los datos de la estación Sabana Larga, también en Atenas, entonces se utilizó esta última para el sector suroeste de la subcuenca.

La temperatura máxima alcanza hasta 35,3°C en el mes de marzo, en la zona de San Ramón. La temperatura mínima baja hasta 12,1°C en el mes de enero, en la parte alta de la subcuenca. En los siguientes gráficos se muestran las temperaturas representativas para la parte alta (Frajanes) y baja de la subcuenca (UCR Occidente y La Argentina):

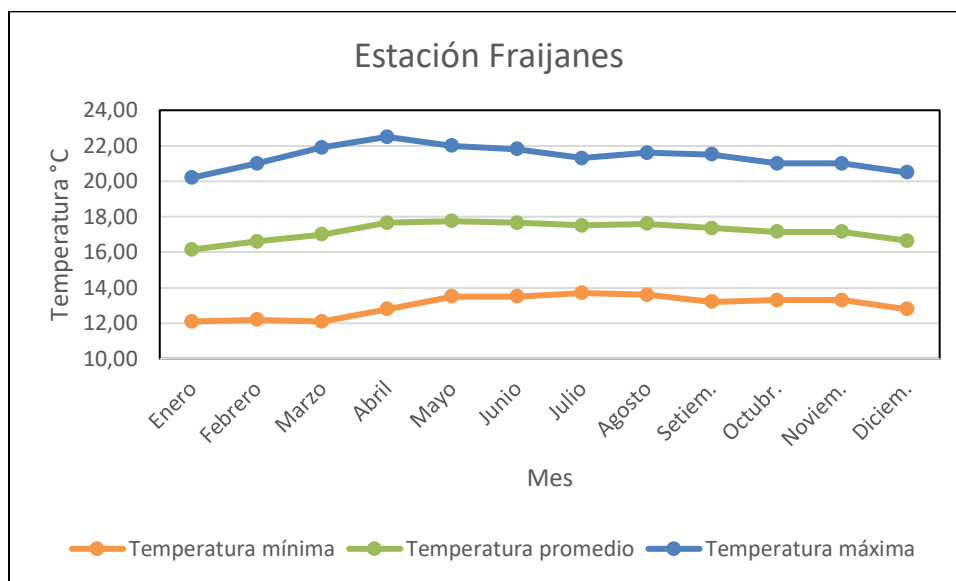


Figura 3.5: Temperaturas para la estación meteorológica de Fraijanes.

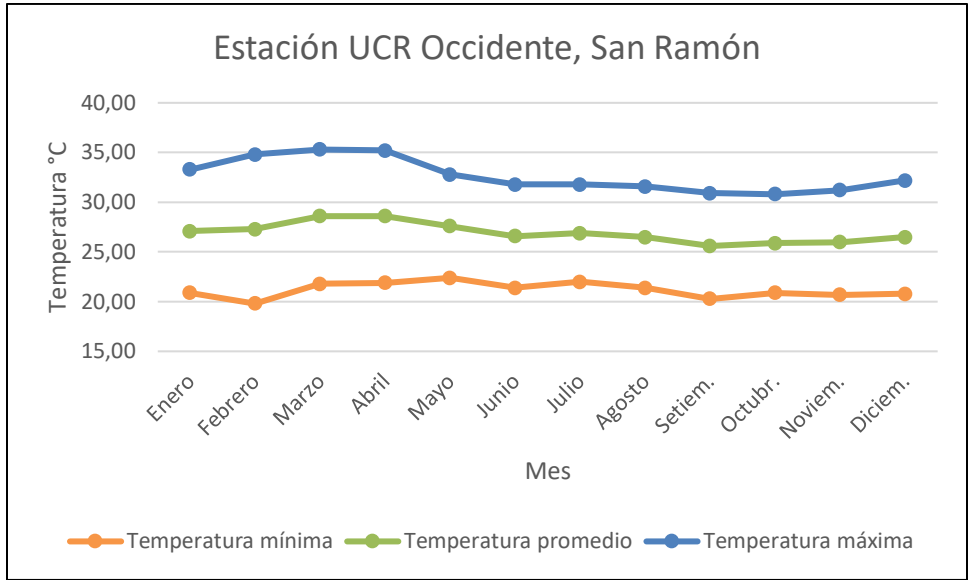


Figura 3.6: Temperaturas para la estación meteorológica de la UCR Occidente.

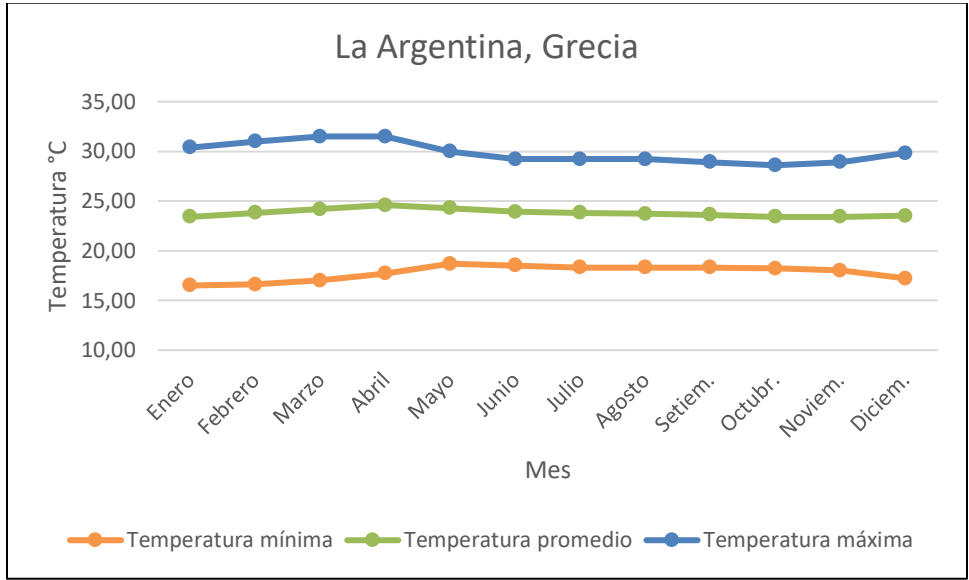


Figura 3.7: Temperaturas para la estación meteorológica de La Argentina.

De la misma manera que la precipitación, se utilizaron los polígonos de Thiessen para definir la distribución de las estaciones meteorológicas y los datos de temperatura. La figura 3.8 muestra esta distribución.

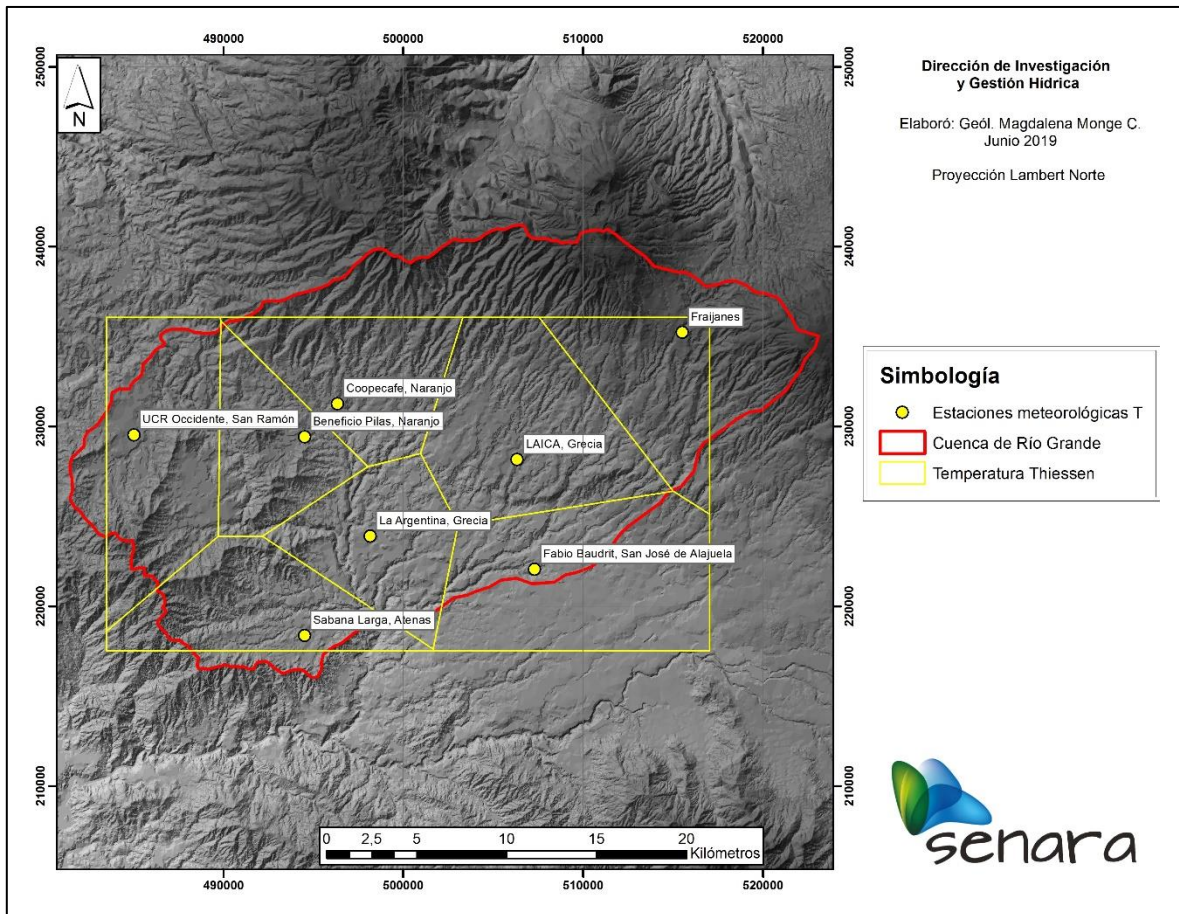


Figura 3.8: Polígonos de Thiessen a partir de las 8 estaciones meteorológicas con información de temperatura.

En los casos de las estaciones de la UCR Occidente, Sabana Larga, Coopecafé, LAICA y Fraijanes, su influencia se extendió hasta los límites de la subcuenca más cercanos.

3.3 Evapotranspiración.

La evapotranspiración se calculó mediante la metodología de Hargreaves, utilizando la siguiente fórmula:

$$ETP = K \times RA \times \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \times 0,0075 \times (32 + 1,8(T_{prom}))$$

Donde:

ETP= Evapotranspiración (mm/d)

K= Coeficiente entre 0,162 y 0,19.

RA= Radiación solar (mm/d)

T_{máx}= Temperatura máxima (°C)

T_{min}= Temperatura mínima (°C)

T_{prom}= Temperatura promedio (°C)

Se utilizaron los datos de temperatura de las estaciones de Sabana Larga de Atenas, Fabio Baudrit en San José de Alajuela, Fraijanes, La Argentina y Laica en Grecia, UCR de Occidente en San Ramón, Beneficio Pilas y Coopecafé en Naranjo, siendo estas las únicas que reportaban esta información. Los polígonos de Thiessen con la influencia de cada estación se mostraron en la figura 3.8.

Todos los valores de ETP se muestran en el cuadro 3.3.

Cuadro 3.3: Resultados de ETP calculados en el estudio

ETP mensual (mm/mes)	Sabana Larga	Fabio Baudrit	Fraijanes	La Argentina	Laica	UCR Occ.	Beneficio Pilas	Coopecafé
Enero	132.658	130.151	90.681	144.175	147.891	148.409	139.264	127.424
Febrero	138.728	131.349	93.057	143.970	147.694	159.308	137.499	128.944
Marzo	177.814	162.437	118.509	173.996	163.123	185.487	168.325	157.372
Abril	178.306	160.284	119.271	170.169	176.374	182.827	163.881	153.669
Mayo	163.663	148.572	114.223	155.980	165.535	161.375	153.213	139.009
Junio	147.880	134.725	107.517	143.612	153.704	150.757	139.253	124.220
Julio	155.373	142.074	105.863	149.421	159.688	152.244	144.356	130.785
Agosto	158.064	145.200	110.345	151.010	162.799	155.942	149.165	132.495
Setiembre	147.019	134.637	106.607	141.911	152.989	148.770	140.920	123.608
Octubre	137.486	130.271	101.363	138.881	144.949	143.727	135.813	121.741
Noviembre	125.133	120.286	90.753	127.297	132.735	132.828	123.768	111.629
Diciembre	123.769	123.744	87.678	134.473	137.698	137.206	128.483	117.166

El rango de valores de evapotranspiración es de 87,68 y 182,83 mm, siendo la parte alta de la subcuenca donde se dan los valores más bajos de ETP.

4. HIDROGEOLOGÍA

Ingrid Vargas Azofoifa y María Magdalena Monge Cordero

4.1 Pozos y manantiales reportados en las bases de datos, y red de monitoreo.

Dentro del área de estudio se contabilizan 1 151 pozos registrados en el Archivo de pozos de SENARA. De estos solamente 698 pozos cuentan con información litológica para la definición del modelo hidrogeológico conceptual (fig. 4.1).

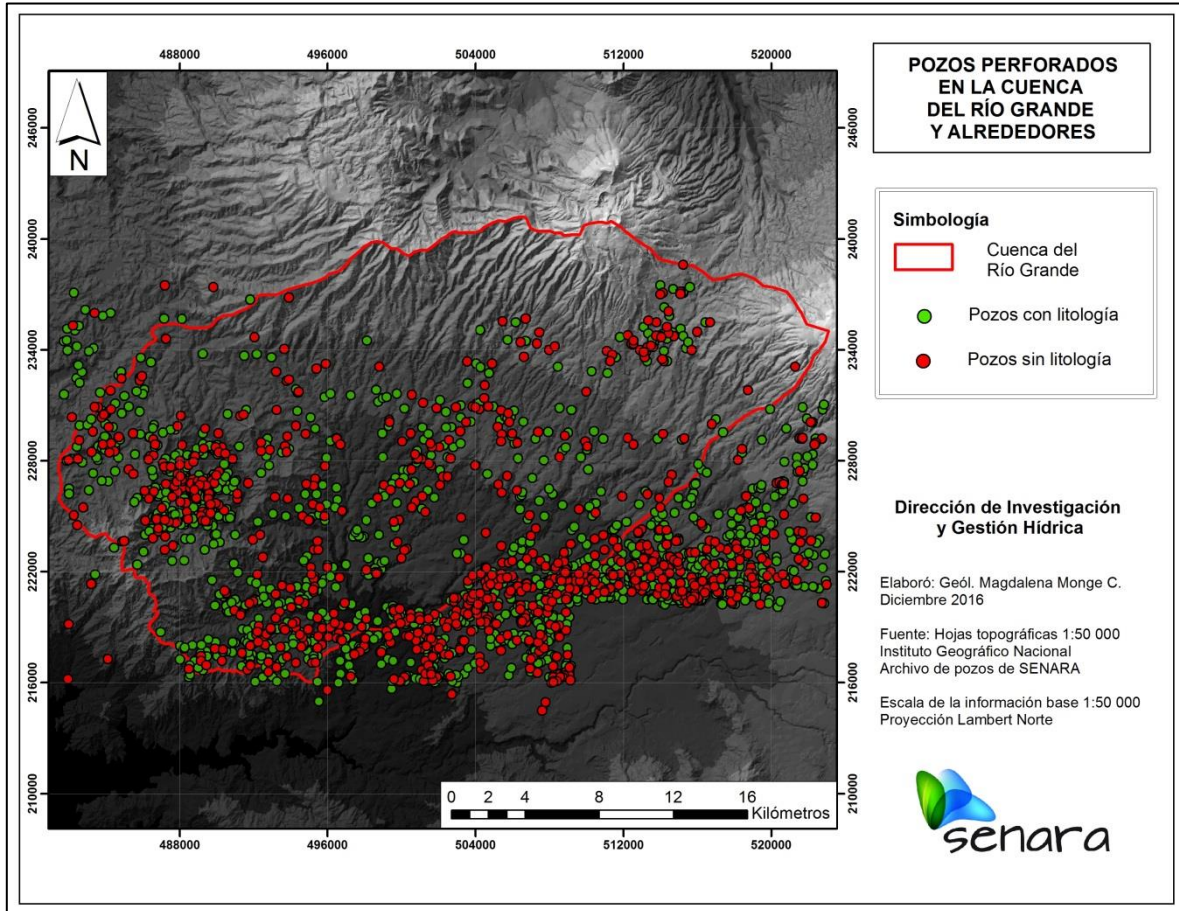


Figura 4.1: Pozos registrados en la subcuenca de Río Grande y alrededores.

En cuanto a manantiales, se encuentran 1510 reportados en la Base de datos de SENARA (fig. 4.2).

En la subcuenca de Río Grande el SENARA inventariaron en el campo 223 pozos y 47 manantiales de los cuales se escogieron 126 pozos para conformar una red de monitoreo en la zona. Los monitoreos se realizaron bimensualmente por parte del personal del SENARA desde el mes de julio del 2012, hasta octubre del 2016. Durante

el desarrollo de este proyecto, la red de monitoreo se redujo a 90 pozos, debido a que el diseño y armado de algunos pozos no permitía introducir las sondas de medición.

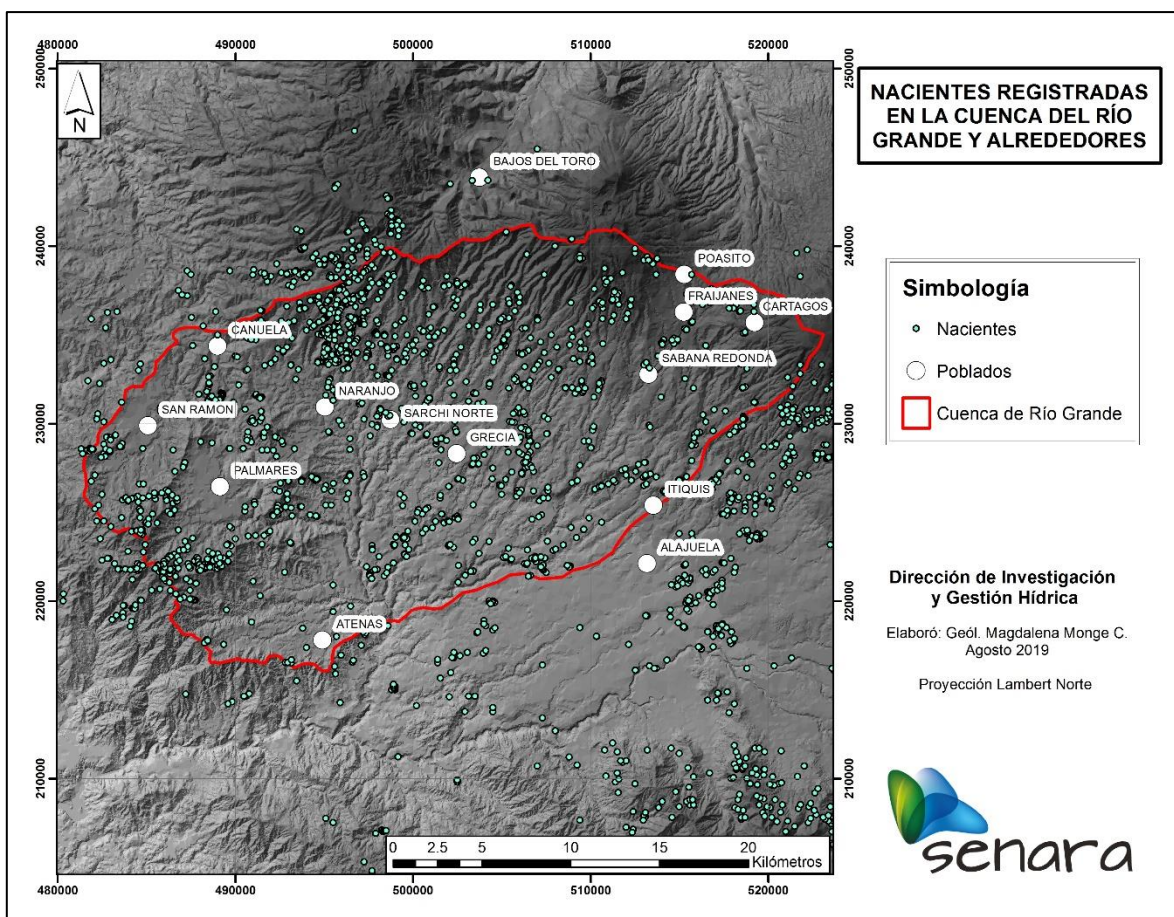


Figura 4.2: Manantiales registradas en la Base de Datos del SENARA.

Los pozos incluidos en la red son en su mayoría perforados, aunque 22 son excavados. A partir del mes de abril del 2015 se midieron además niveles en 8 piezómetros construidos por el SENARA en el marco del proyecto PROGIRH.

De los 90 pozos se seleccionaron 11 para el muestreo de aguas para análisis físico-químico y de isótopos, la red de muestreo incluyó además de los 11 pozos, 7 manantiales, así como 2 colectores de lluvia. Esta información se presenta en la sección 5.

La Base de Datos de pozos del SENARA fue filtrada por la Geól. Magdalena Monge para seleccionar únicamente los pozos que contaban con información litológica, posteriormente se revisaron en forma conjunta los expedientes de los pozos para extraer información acerca del diseño, litología, profundidad, ubicación, profundidad del nivel de agua, existencia de pruebas de bombeo, entre otros datos. Esto fue un

proceso sistemático y arduo, ya que requiere de la revisión de cada pozo para determinar la calidad de la información.

4.2 Programa de perforación exploratoria

Durante los años del 2013 al 2015 se realizó una campaña de perforación de 13 piezómetros en la zona de estudio, en lugares donde no se tuviera mucha información de pozos, mediante la Licitación Pública 2011 LN-000009-OC **“PERFORACIÓN EXPLORATORIA DEL SUBSUELO Y ARMADO DE PIEZÓMETROS PARA INVESTIGACIÓN DEL ACUÍFERO RÍO GRANDE, ALAJUELA-HEREDIA”**.

La figura 4.3 muestra la ubicación de los 13 piezómetros.

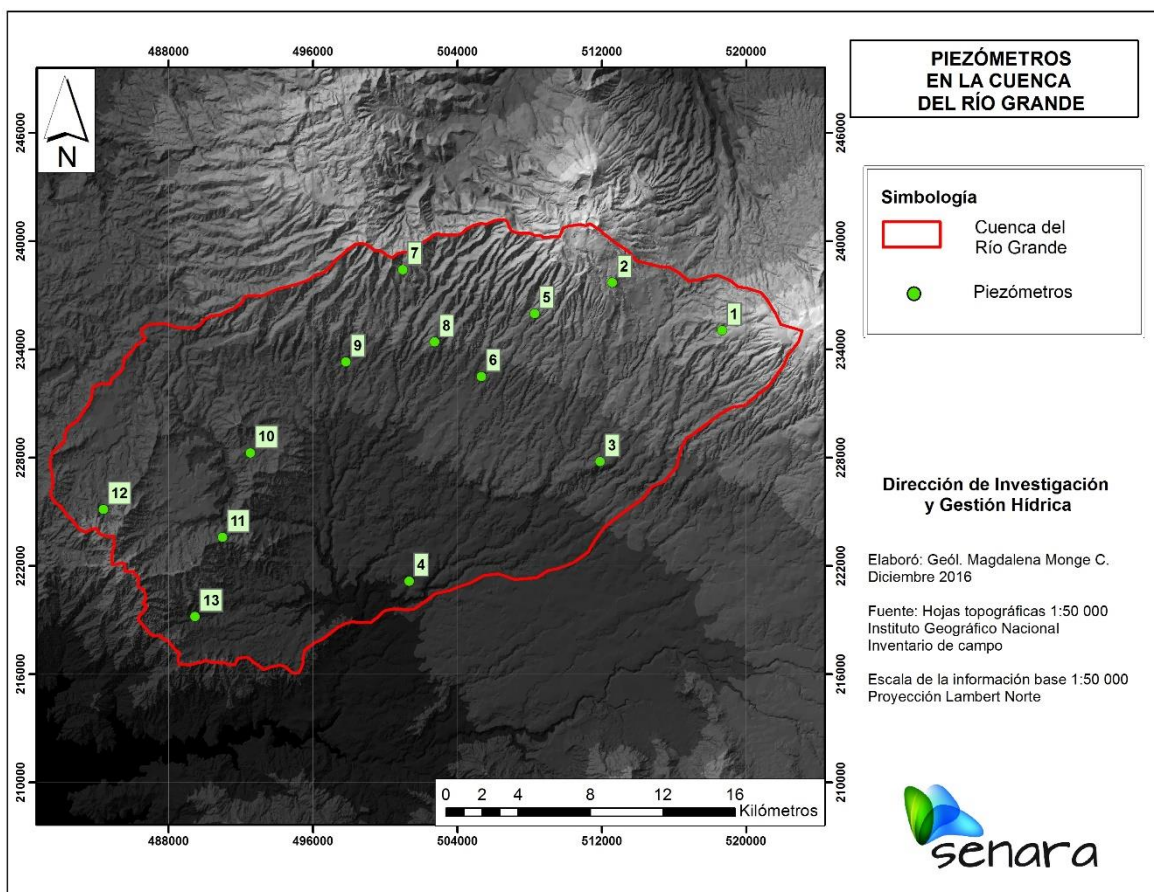


Figura 4.3: Piezómetros elaborados por SENARA.

A continuación se describen los principales datos obtenidos en cada uno de los piezómetros.

Cuadro 4.1: Piezómetro No. 1, BA-929

Rubro	Unidad de medida	Cantidad
Perforación del subsuelo	Metro lineal	150
Pruebas Lugeon	Unidad	3
Geofísica de pozo	Metro Lineal	75
Análisis microscópicos	Unidad	3
Nivel del agua	Metros	45
Litología en zona no saturada	4 m limo arcilloso, 8,5 m aluvión?, 25,5 m lavas y brechas, 2 m arcillas, 3 m bloques en matriz arcillosa-arenosa, 1,5 m toba arcillosa	
Litología en zona saturada	Intercalaciones de tobas, lavas y brechas.	

Cuadro 4.2: Piezómetro No. 2, BA-930

Rubro	Unidad de medida	Cantidad
Perforación del subsuelo	Metro lineal	150
Pruebas Lugeon	Unidad	3
Geofísica de pozo	Metro Lineal	0
Análisis microscópicos	Unidad	3
Nivel del agua	Metros	Seco
Litología en zona no saturada	7,5 m suelo residual, 24,5 m arcilla y limo arcilloso, 6 m flujo de escombros, 7 m toba, 68,6 m lavas y brechas, 2 m arcillas, 5,8 m brecha conglomerádica, 7,5 m lavas, 4,5 m suelo arcilloso, 13,5 m lava, 4 m toba arcillosa	
Litología en zona saturada	-	

Cuadro 4.3: Piezómetro No. 3, BA-931

Rubro	Unidad de medida	Cantidad
Perforación del subsuelo	Metro lineal	150
Pruebas Lugeon	Unidad	0
Geofísica de pozo	Metro Lineal	0
Análisis microscópicos	Unidad	3
Nivel del agua	Metros	Seco
Litología en zona no saturada	5,5 m suelo residual, 33,5 m arcilla y limo arcilloso, 47 m toba, 15,4 m flujo lítico, 68,6 m lavas y brechas, 48,6 m lavas.	
Litología en zona saturada	-	

Cuadro 4.4: Piezómetro No. 4, NA-969

Rubro	Unidad de medida	Cantidad
-------	------------------	----------

Perforación del subsuelo	Metro lineal	100
Pruebas Lugeon	Unidad	1
Geofísica de pozo	Metro Lineal	100
Análisis microscópicos	Unidad	3
Nivel del agua	Metros	5,2
Litología en zona no saturada	5,2 m suelos arcillo limosos, limo arcillosos o arcillo arenosos.	
Litología en zona saturada	Lahares, brechas lávicas y lavas	

Cuadro 4.5: Piezómetro No. 5, NA-971

Rubro	Unidad de medida	Cantidad
Perforación del subsuelo	Metro lineal	110,1
Pruebas Lugeon	Unidad	0
Geofísica de pozo	Metro Lineal	0
Análisis microscópicos	Unidad	3
Nivel del agua	Metros	18
Litología en zona no saturada	15,5 m suelo residual, 2,5 m toba	
Litología en zona saturada	Tobas	

Cuadro 4.6: Piezómetro No. 6, NA-970

Rubro	Unidad de medida	Cantidad
Perforación del subsuelo	Metro lineal	150
Pruebas Lugeon	Unidad	0
Geofísica de pozo	Metro Lineal	57
Análisis microscópicos	Unidad	3
Nivel del agua	Metros	5,4
Litología en zona no saturada	1,5 m suelo, 4 m aluvión	
Litología en zona saturada	Aluvión, brechas, lavas y brechas	

Cuadro 4.7: Piezómetro No. 7, NA-972

Rubro	Unidad de medida	Cantidad
Perforación del subsuelo	Metro lineal	139,6
Pruebas Lugeon	Unidad	0
Geofísica de pozo	Metro Lineal	0
Análisis microscópicos	Unidad	3
Nivel del agua	Metros	35
Litología en zona no saturada	13 m suelo limo arcilloso, 22 m brechas	
Litología en zona saturada	Brechas y lavas	

Cuadro 4.8: Piezómetro No. 8, NA-973

Rubro	Unidad de medida	Cantidad
Perforación del subsuelo	Metro lineal	146
Pruebas Lugeon	Unidad	0
Geofísica de pozo	Metro Lineal	0
Análisis microscópicos	Unidad	3
Nivel del agua	Metros	12,5
Litología en zona no saturada	5 m suelo limo arcilloso, 7,5 m tobas	
Litología en zona saturada	Tobas	

Cuadro 4.9: Piezómetro No. 9, NA-995

Rubro	Unidad de medida	Cantidad
Perforación del subsuelo	Metro lineal	155
Pruebas Lugeon	Unidad	0
Geofísica de pozo	Metro Lineal	155
Análisis microscópicos	Unidad	3
Nivel del agua	Metros	25
Litología en zona no saturada	2 m suelo limo arcilloso, 23 m tobas	
Litología en zona saturada	Tobas y lavas	

Cuadro 4.10: Piezómetro No. 10, NA-991

Rubro	Unidad de medida	Cantidad
Perforación del subsuelo	Metro lineal	100,5
Pruebas Lugeon	Unidad	2
Geofísica de pozo	Metro Lineal	57,5
Análisis microscópicos	Unidad	2
Nivel del agua	Metros	24,5
Litología en zona no saturada	4 m suelo arcilloso, 11 m suelo limo arenoso, 10 m toba.	
Litología en zona saturada	Ignimbritas y tobas	

Cuadro 4.11: Piezómetro No. 11, NA-976

Rubro	Unidad de medida	Cantidad
Perforación del subsuelo	Metro lineal	100
Pruebas Lugeon	Unidad	1
Geofísica de pozo	Metro Lineal	75
Análisis microscópicos	Unidad	3
Nivel del agua	Metros	20
Litología en zona no saturada	6,5 m limos arcillosos, 9 m cascajos, 4,5 m tobas	
Litología en zona saturada	Tobas, lavas y brechas	

Cuadro 4.12: Piezómetro No. 12, NA-982

Rubro	Unidad de medida	Cantidad
Perforación del subsuelo	Metro lineal	100
Pruebas Lugeon	Unidad	2
Geofísica de pozo	Metro Lineal	62
Análisis microscópicos	Unidad	3
Nivel del agua	Metros	8,5
Litología en zona no saturada	8,2 m limos arcillosos y arcilla	
Litología en zona saturada	Lavas alteradas hidrotermalmente	

Cuadro 4.13: Piezómetro No. 13, RG-938

Rubro	Unidad de medida	Cantidad
Perforación del subsuelo	Metro lineal	150
Pruebas Lugeon	Unidad	3
Geofísica de pozo	Metro Lineal	101
Análisis microscópicos	Unidad	3
Nivel del agua	Metros	4
Litología en zona no saturada	2 m suelo limo arcilloso, 2 m material aluvial	
Litología en zona saturada	Intercalación de brechas y lavas. Agua caliente	

Los pozos donde no se encontró agua fueron sellados para evitar contaminación en los sitios, mientras que los pozos donde se encontraron niveles de agua, fueron incorporados a la red de monitoreo.

4.3 Estudios de suelos, textura, porosidad capacidad de campo, punto de marchitez.

Los suelos de la zona se estudiaron a partir de sus propiedades físicas y químicas. Previo al muestreo de suelos se recopilaron los datos geotécnicos disponibles en la zona a partir de las campañas geológicas y tesis realizadas en la zona desde 1993 hasta la actualidad. La información fue integrada en un sistema de información geográfica para determinar las zonas en donde se debían recolectar más muestras para cubrir de la manera más completa toda el área de la subcuenca del río Grande.

Existía mucha información geotécnica previa en la zona central-oeste, sin embargo, en la zona este no se tenía información por lo que en ese sector y en otros en donde no existían datos, se recolectaron 51 muestras por parte del personal del SENARA (fig. 4.4). Dichas muestras de suelo fueron analizadas simultáneamente en el Laboratorio de Geotecnia de la Escuela Centroamericana de Geología y en el Laboratorio de suelos

del CIA, ambos de la Universidad de Costa Rica, para conocer sus propiedades físicas y químicas. Los resultados se resumen en los Anexos A y B.

Se determinaron características físicas tales como: granulometría, límites de Atterberg, gravedad específica, contenido de humedad natural, puntos de retención de humedad, (capacidad de campo y punto de marchitez), insumos requeridos para realizar el balance de suelos. También se hicieron análisis químicos de los suelos para medir el contenido de materia orgánica, CICE (capacidad de intercambio de cationes efectiva), pH, acidez, Ca, Mg, K, P, Zn, Cu, Fe, Mn.

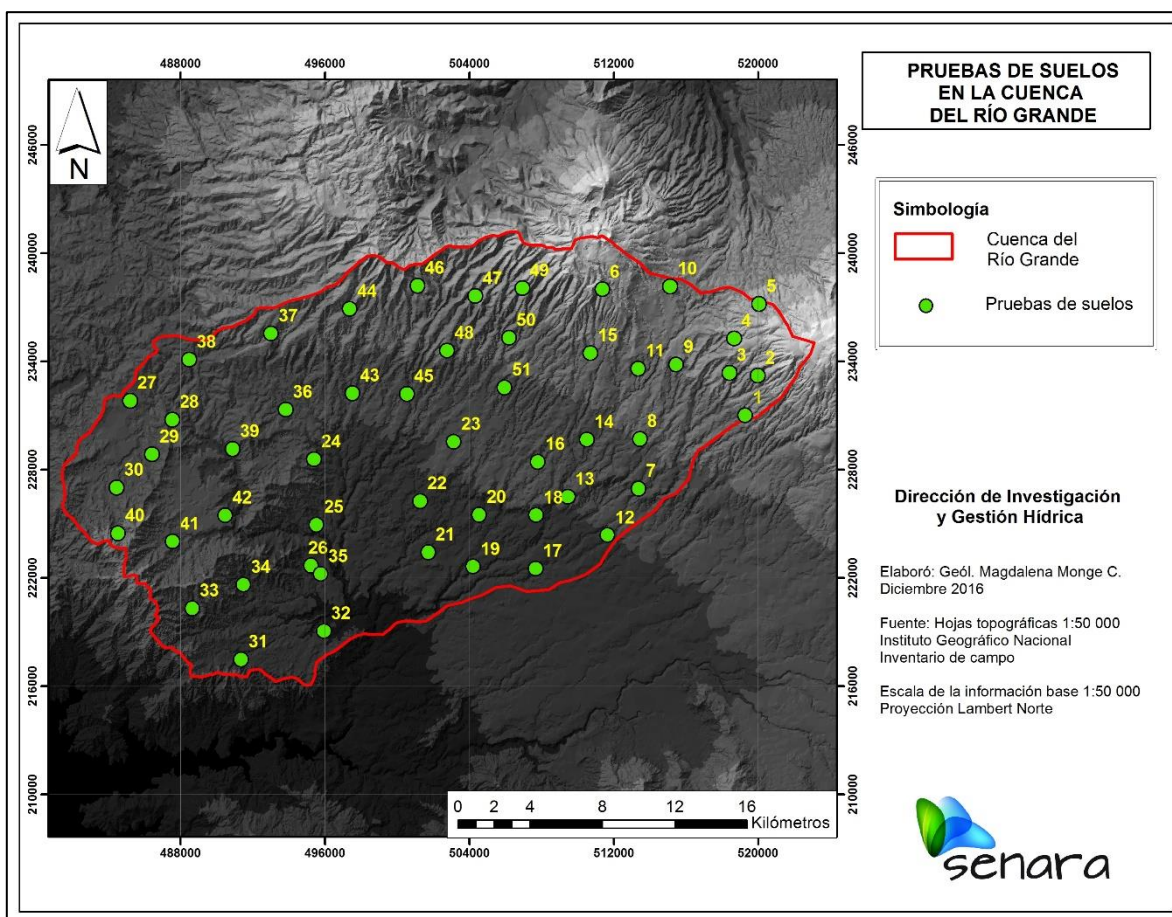


Figura 4.4: Mapa de ubicación de los sitios muestreados para análisis de suelos.

Los suelos de la subcuenca del río Grande se asocian con diversos materiales volcánicos, principalmente cenizas, por lo que desde el punto de vista agronómico se pueden clasificar como Andisoles. El Anexo A contiene las principales características de los suelos, las cuales se resumen en el Cuadro 4.14. Según Alvarado et al (2001) los Andisoles tienen las siguientes características:

- Alta porosidad total y de macroporos que ayudan a la formación de microagregados estables y a favorecer una alta velocidad de infiltración
- Baja densidad aparente
- Susceptible a la compactación por el pisoteo animal
- Elevado contenido de materia orgánica, lo cual puede reducir su densidad aparente y favorecer la retención de humedad

La meteorización rápida de vidrios o eyecciones volcánicas resulta en la acumulación de complejos órgano-minerales estables o minerales de bajo grado de ordenamiento (arcillas) como: alofana, imogolita y ferrihidrita (Shoji et al, 1993).

Un suelo arcilloso con un mayor porcentaje de microporos (menores de 10 micras) tiene una capacidad de almacenaje mucho mayor que un suelo arenoso, por lo que el agua disponible será también mayor (Henriquez & Cabalcet, 1999).

Desde el punto de vista geotécnico, los suelos de la subcuenca del Río Grande se clasifican como Limos elásticos con plasticidades desde intermedias hasta extremadamente altas. La profundidad promedio de muestreo fue de 2,5 m. La porosidad total de estos suelos es alta, varía entre 37,1 y 82,2, con un promedio de 57,1, y las densidades aparentes son bajas, en el rango de 0,45 y 1,24 g/cm³, estos datos son característicos de suelos de textura fina según lo reportado por varios autores (Henriquez & Cabalcet, 1999; Ivañez & Marinquez, 2011).

Cuadro 4.14: Resumen de las características físicas y químicas de los suelos* en la subcuenca del río Grande, Alajuela

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio
Retención 0,33 (%)	35	134	64,66
Retención 15 (%)	296	121	55,9
Agua útil(%)	1	34	9,66
Densidad aparente (g/ cm ³)	0,45	1,24	0,9
Límite líquido, WL(%)	50	179	76,05
Límite plástico, Wp(%)	29	102	51,45
Índice plasticidad, (%)	16	77	24,6
Gravedad específica	2,37	2,84	2,72
Peso unit. Húmedo, γ_h (kN/m ³)	10,97	17,70	15,37
Peso unit. Seco, γ_d (kN/m ³)	4,27	13,53	10,57
Peso unit. Saturado, γ_{sat} (kN/m ³)	11,81	20,4	16,66
Grado saturación, Sr(%)	13,13	100	82,62
Porosidad total, n	37,1	82,2	57,11
Relación de vacíos, e	0,97	4,63	1,4
pH	4,3	6,6	5,4
Acidez(cmol+/L)	0,04	19,05	1,43
Ca (cmol+/L)	0,01	16,41	3,28
Mg (cmol+/L)	0,02	11,86	1,88
K (cmol+/L)	0,01	1,49	0,22
CICE (cmol+/L)	0,28	28,81	6,81
SA %	1	89	25
Zn (cmol+/L)	1	30	4
Cu (cmol+/L)	2	76	30
Fe (cmol+/L)	6	222	115
Mn (cmol+/L)	1	39	9
C (cmol+/L)	0,06	2,81	0,7
N (cmol+/L)	0,02	0,27	0,7
C/N	2	15,8	7,4
Clasificación S.U.C.S.	Limos elásticos con plasticidades desde intermedias hasta extremadamente altas		

*Los datos completos se presentan en el Anexo B

Para la subcuenca de interés en las zonas en donde el uso del suelo es pastos puede darse la compactación de los mismos, sin embargo es difícil de cuantificar.

La capacidad de campo es una constante característica de cada suelo y depende fundamentalmente de la textura, la cantidad de materia orgánica y el grado de compactación de este, Alvarado et al (2001). Los valores reportados por el Laboratorio de Recursos Naturales del CIA para los suelos de la subcuenca del Río Grande para la CC están en el rango de 35 y 134, mientras que para el PMP entre 29 y 121, estos valores se consideran altos, y son característicos de suelos arcillosos, los cuales generalmente retienen más agua que los arenosos. Los valores superiores a 100 para CC y PM se explican a partir del procedimiento usado en el laboratorio, el cual se resume a continuación:

- 1) Se satura la muestra por 24 horas
- 2) Se coloca en un plato a 0,33 bares durante 48 horas
- 3) Se seca la muestra y se pesa (peso del suelo + el agua retenida a 0,33 bares), para calcular la humedad se emplea la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Masa suelo húmedo a 0,33 bares} - \text{Masa suelo seco}}{\text{Masa suelo seco}} * 100$$

- 4) Se vuelve a saturar
- 5) Se coloca la muestra en el plato a 15 bares por 48 horas
- 6) Se pesa la muestra nuevamente

$$\frac{\text{Masa suelo húmedo a 15 bares} - \text{Masa suelo seco}}{\text{Masa suelo seco}} * 100$$

Debido a que los suelos tienen una humedad natural y luego son saturados en el laboratorio, el suelo absorbe una cantidad extra de agua, entonces cuando el suelo se somete a la tensión de 0,33 y 15 bares, parte del agua absorbida es cedida, pero no toda, ya que los suelos andisoles contienen arcillas tales como la alófana, las cuales típicamente retienen mucha agua debido a su estructura molecular, por lo que los valores medidos de CC y el PM son altos. Los valores de CC y PM serán superiores a 100 cuando la masa de suelo húmedo (a los 0,33 o 15 bares) es mayor que la masa del suelo seco, en esas condiciones el resultado de la división es mayor que 100, esto ya había sido reportado mediante curvas de retención de humedad por Forsythe & Vázquez (1973).

Según los datos reportados por el CIA, en algunos casos para una única muestra hay valores cercanos entre la CC y PM, esto indica que los suelos tienen una baja capacidad de retención de agua, como por ejemplo las arenas, mientras que en las arcillas la diferencia entre la CC y el PM será mayor, ya que el agua utilizable aumenta en las arcillas, tal y como se observa en los datos reportados.

Los análisis químicos de los suelos indican que los suelos de la zona son ácidos, su pH varía entre 4,3 y 6,6 lo cual era esperado conociendo el origen de los mismos. La capacidad de intercambio de cationes efectiva, CICE varía entre 0,28 y 28,81, la cual se considera de entre baja e intermedia. Los cationes predominantes son el calcio, magnesio, hierro y manganeso. De acuerdo con los resultados de los análisis químicos de los suelos el porcentaje de materia orgánica es bajo, menor al 4 %, este valor se debe posiblemente a que la profundidad del muestreo fue en promedio de 2,5 m.

4.4 Pruebas de infiltración

Se realizaron 40 pruebas de infiltración en sitios seleccionados en la zona de estudio, la distribución de las mismas se muestra en la figura 4.5; se observa que en la medida de lo posible las pruebas se hicieron cerca de los puntos en donde se recolectaron las muestras de suelo. Las pruebas se realizaron en noviembre del 2014 y en marzo del 2016, el método usado fue el doble anillo. El Anexo B muestra los valores de infiltración calculados, los gráficos para cada prueba se adjuntan en el mismo anexo. Los resultados de las pruebas se compararon con la clasificación del USDA (1990), Cuadro 4.15.

Cuadro 4.15: Clasificación de la tasa de conductividad hidráulica según USDA (1990)

Rangos (cm/h)	Clasificación	Porcentaje
0,13 – 051	Lenta	0
0,51 – 2	Moderada-lenta	16,6
2 – 6,3	Moderada	33
6,3 -12,7	Moderada-rápida	33
>12,7	Rápida	16,6

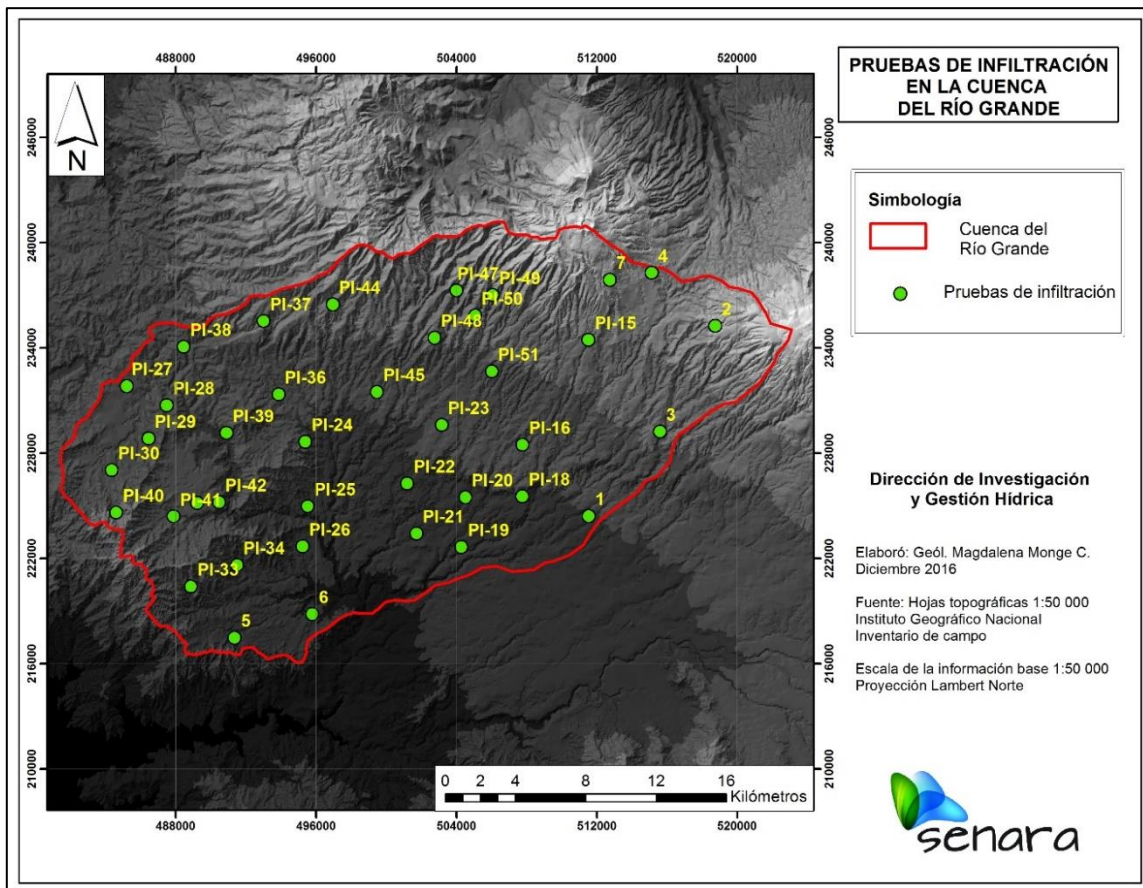


Figura 4.5: Ubicación de pruebas de infiltración.

Se observan grandes variaciones en los datos, en general los valores varían entre 0,36 y 5,5 m/día, tal y como se muestra en el Cuadro 4.16, los datos indican que el 16.6 % de las pruebas realizadas tienen valores bajos; el 33 % de los datos tiene tasas moderadas y un 33 % de los valores se consideran moderadas a rápidas, y un 16.6 % son rápidas según la clasificación del USDA (1992), esta clasificación es para valores de conductividad hidráulica, sin embargo como se saturaron los suelos para las pruebas se considera que los valores se aproximan a la conductividad hidráulica. No se observa una correlación directa entre los rangos y formaciones geológicas específicas, sin embargo de acuerdo con los datos geotécnicos se determinó que los suelos son limosos con distintos grados de plasticidad, la predominancia de los limos explica los valores moderados a altos en las tasas de infiltración.

4.5 Geofísica

Se realizaron 25 sondeos eléctricos verticales en la zona de estudio con el objetivo de mejorar el entendimiento de las distintas capas que conforman el subsuelo en la zona de estudio. En los primeros ocho sondeos el equipo utilizado fue el Terrameter SAS 1000, fabricado en Suecia por la casa ABEM, debido a que el equipo se dañó los siguientes 17 sondeos se realizaron con un equipo Terrameter LS también de la casa ABEM, ambos propiedad de la Escuela Centroamericana de Geología. Los sondeos se ubicaron en áreas con diferentes formaciones geológicas de acuerdo a lo mostrado en el Mapa Geológico de la Hoja Naranja realizado por la Dirección de Geología y Minas en conjunto con el Servicio Geológico Checo.

La ubicación geográfica de los sitios en donde se desarrollaron los sondeos eléctricos verticales se muestra en la figura 4.6. Los sondeos en la parte noroccidental de la subcuenca hidrográfica del Río Grande están distribuidos entre las coordenadas CRTM05 1105000-1124000 latitud y 445000-473000 longitud (220200-238650 latitud; 481700-509200 longitud en coordenadas Lambert Norte), Hoja Naranja en escala 1:50000. El Cuadro 4.17 muestra el listado de los sondeos eléctricos verticales realizados en la subcuenca del río Grande, Alajuela (Anexo C).

Cuadro 4.16: Ubicación de las pruebas de Infiltración realizadas en la subcuenca del río Grande, Alajuela

No. Prueba	Coordenadas x/y	Localidad	K (cm/h)	K (m/día)
PI-16	228479/507787	Calle Sitio, camino a San Rafael de Poás	4,79	1,15
PI-18	225550/507762	Al noreste de Platanillal, al Este de Tacaes	10,83	2,6
PI-19	222656/504294	Tacaes, camino a Ingenio, Grecia	1,79	0,43
PI-20	225490/504524	Cerdas, al norte de Bodegas	13,75	3,3
PI-21	223429/501734	Cataluña, Rincón de Salas, Grecia	3,71	0,89
PI-22	226279/501204	Calle Lomas, Rosario de Naranjo	2,71	0,65
PI-23	229609/503181	Carretera a Santa Gertrudis, Grecia	9,58	2,3
PI-24	228652/495392	San Francisco (Vaca Muerta), Naranjo	19,17	4,6
PI-25	224966/495541	Calle Indio, Rosario de Naranjo	5,00	1,2
PI-26	222686/495249	Monte de Oración, Santa Eulalia de Atenas	7,29	1,75
PI-27	231831/485209	San Juan, San Ramón	2,04	0,49
PI-28	230729/487503	Calle Ramírez, San Isidro, San Ramón	12,08	2,9
PI-29	228835/486464	Calle Vieja, Beneficio, San Ramón	11,25	2,7
PI-30	227026/484371	San Rafael, San Ramón 75 m Este Beneficio	7,08	1,7
PI-33	220396/488890	Alto de Los Naranjos, San isidro de Atenas	2,33	0,56
PI-34	221623/491510	San José Norte, Atenas	2,75	0,66
PI-36	231343/493869	Pilas de Naranjo	5,75	1,38
PI-37	235522/493031	San Juanillo, Naranjo	20,42	4,9
PI-38	234070/488470	Concepción de San Ramón	1,71	0,41
PI-39	229149 /490894	San Miguel de Naranjo	1,79	0,43
PI-40	224614/484625	Rincón de Mora, San Rafael, San Ramón	7,79	1,87
PI-41	224387 /487900	Santiago, Palmares	3,00	0,72
PI-42	225202 /490479	Cocaleca, Palmares	6,67	1,6
PI-43	232207/407528	San Juan, Sarchí	8,75	2,1
PI-44	236482/496955	La Isla, Cirrí, Naranjo	1,50	0,36
PI-45	231481/499483	San Pedro, Sarchí	20,83	5,0
PI-47	237273/504017	Calle a Finca Palermo, San Luis, Grecia	1,79	0,43
PI-49	237012/506075	Cabuyal, San Miguel Arriba	22,92	5,5
PI-50	235852/505076	San Miguel Arriba, Grecia	3,00	0,72
PI-51	232656/506027	Calle Mesón-San Isidro, Grecia	2,92	0,7
PI-52	224424/511548	Tuetal Norte	9,00	2,16
PI-53	229224/515596	San Isidro	2,75	0,66
PI-54	218824/495797	Los Angeles, Atenas	12,58	3,02
PI-55	217488/491360	Barrio Jesús, Atenas	1,38	0,33
PI-56	235257/518755	Finca La Giralda, Los Cartagos	8,38	2,01
PI-57	237889/512748	Cerca de la Q. Tigre camino al Poás	9,00	2,16

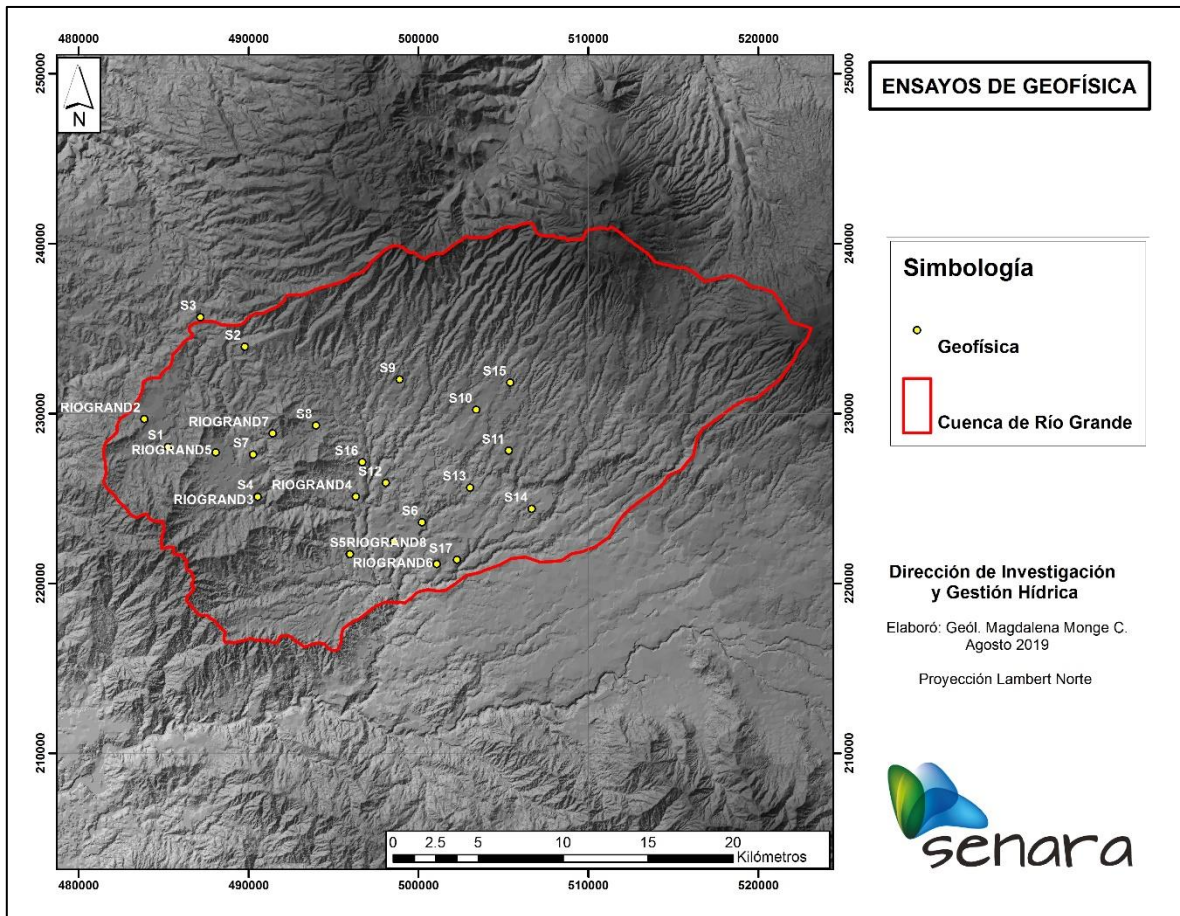


Figura 4.6: Ubicación de los Sondeos eléctricos verticales

Los sondeos fueron realizados mediante el método Schlumberger, en los primeros 8 sondeos la abertura $AB/2$ utilizada fue de 200 a 300 metros utilizando la siguiente separación entre electrodos: 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12.5, 15, 20, 25, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 150, 200. Mientras que los siguientes 17 sondeos se realizaron utilizando las posiciones de electrodos en forma logarítmica definidas en el Protocolo contenido en el sistema operativo del Terrameter LS, con extensiones (AB) de 478 m mínimo y 632 m máximo, con lo cual se podría esperar profundidades de investigación teóricas de 120 a 160m. Las separaciones entre electrodos de corriente son distribuidas en tres ciclos logarítmicos con valores de 1, 1.33, 1.78, 2.37, 3.16, 4.22, 5.62, 7.5, 10.0 y los correspondientes múltiplos en cada ciclo subsiguiente (10.0, 13.3, 17.8, 23.7 etc), con lo cual se logra una distribución muy simétrica de los puntos de la curva del sondeo como se muestra en el gráfico siguiente. Los electrodos de potencial se localizaron a 0.2, 0.5, 2.5 y 20 metros, con traslape de dos medidas para cada cambio en MN.

Cuadro 4.17: Detalle de los sondeos eléctricos realizados en la subcuenca del río Grande, Alajuela.

<i>Sondeo</i>	<i>Coord. CRTM05</i>	<i>Coord.Lambert CR Norte</i>	<i>Pozos cercanos al SEV</i>	<i>AB/2</i>
1	1113449 / 448933	228037/485254	NA-421, NA-632, NA-660	237
2	1119329 / 463472	233922/489788	NA-520 NA-1012	316
3	1107114 / 459637	235668/487166	NA-686, NA- 917	237
4	1110517 / 454196	225110/490520	NA-164, NA-472, NA-529	237
5	1107114 / 459637	221712/495965	NA-209, NA-222	237
6	1108989 / 463891	223592/500218	NA-23, NA-824	316
7	1112990 / 453956	227582/490278	NA-161, NA-246	316
8	1114700 / 457659	229297/493980	NA-202, NA-235, NA-935	316
9	1117375 / 462574	232000/498892	NA-578, NA-666, NA-742	316
10	1115598 / 467095	230204/503415	NA-6, NA-477, NA-509	237
11	1113199 / 468992	227807/505315	NA-680, NA-746, NA-838	316
12	1111312 / 461774	225913/498098	NA-215, NA-769, NA-1000	237
13	1111020 / 466721	225626/503046	NA-376, NA-671, NA-771	316
14	1109780 / 470356	224389/506683	NA-243, NA-866	316
15	1117212 / 469091	231820/505410	NA-469, NA-719, NA-970	316
16	1112525 / 460367	227124/496690	NA-232, NA-809, NA-927	316
17	1107908 / 466460	221393/502264	NA-307, NA-696, NA-969	316
RIOGRAN 1	1107869 / 462211	222470/498539	NA-110, NA-139, NA-219	
RIOGRAN 2	1115075 / 447546	229662/483866	NA-785, NA-79, NA-855	
RIOGRAN 3	1110498 / 454212	225091/490537	NA-398,NA-659, NA-529,NA-164	
RIOGRAN 4	1110501 / 459998	225100/496323	NA-408, NA-826, NA-191	
RIOGRAN 5	1113111 / 451742	227702/488064	NA-527, NA-753, NA-766,NA-333	
RIOGRAN 6	1106526 / 464752	221129/501081	No hay pozos cercanos	
RIOGRAN 7	1114232 / 455113	228826/491434	NA-848, NA-154	
RIOGRAN 8	1107106 / 459641	221704/495969	NA-291, NA-463, NA-375, NA-737	

Para la interpretación de los sondeos se realizaron trabajos previos de revisión y análisis de información geológica e hidrogeológica del sector, incluyendo pozos registrados en la base de datos del SENARA ubicados en las cercanías de cada sondeo, campañas geológicas realizadas por la Escuela de Geología en San Ramón, Palmares, Naranjo y Grecia y el Mapa Geológico de la Dirección de Geología y Minas.

Posteriormente se graficaron los datos obtenidos en cada sondeo, procediendo a su interpretación geofísica con tres métodos diferentes:

- Interpretación manual mediante el método de punto auxiliar
- Interpretación automática mediante el Software denominado Resistivity Sounding Interpretation, IP2Win versión 3.0.1e (1990-2003) desarrollado por Bobachev, Shevnin y Modin en la Universidad de Moscú.
- Interpretación interactiva con el mismo Software IP2Win, en el cual el interpretador puede fijar los espesores, número de capas etc.

Finalmente, se comparó la información de los pozos perforados en los alrededores de cada sitio de sondeo para determinar la mejor correlación posible entre los parámetros geofísicos de la interpretación anterior con la estratigrafía del subsuelo.

En la figura 4.7, se muestra el Mapa Geológico de la Hoja Naranja, publicado por la Dirección de Geología y Minas (2012). Ha habido necesidad de corregir la posición de la retícula de coordenadas CRTM05 de este mapa, las cuales están desplazadas de su posición real como se muestra en la figura siguiente, donde se observa que hay un notorio desplazamiento en la cuadrícula.

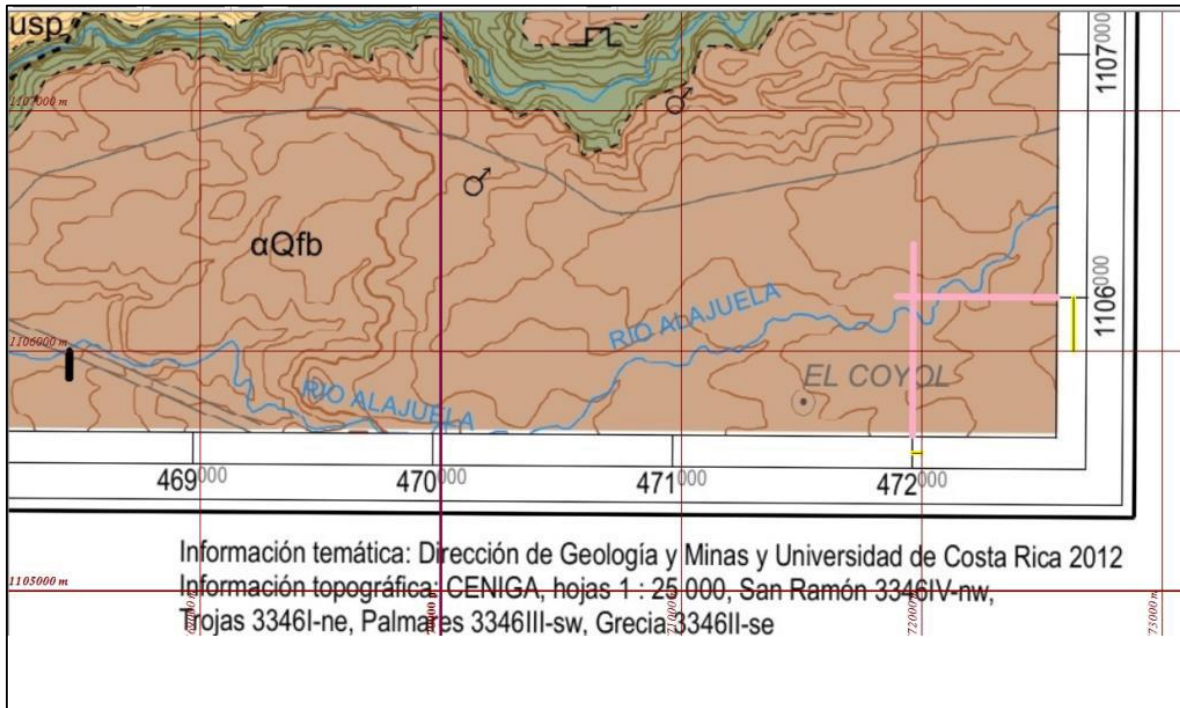


Figura 4.7: Desplazamiento de la retícula en el Mapa Geológico de la Hoja Naranja, Huapaya & Rojas (2012).

Esta corrección es necesaria porque de lo contrario la posición de los sondeos con respecto a rasgos geográficos y con relación a los piezómetros y pozos perforados no sería la correcta.

De acuerdo con lo mostrado en el Mapa Geológico (Fig. 2.1) hay diferencias notorias entre los sectores Oeste y Este, ya que en el primero afloran rocas volcánicas de la Formación Grifo Alto (Grupo Aguacate) que no se observan en el Este, sector en el que los materiales volcánicos son aparentemente más jóvenes y relacionables con las estructuras volcánicas actuales.

De esta manera el “basamento” local sobre el que se depositaron los materiales piroclásticos y sedimentos lacustres del Terciario tardío y Cuaternario en el sector Oeste puede considerarse que es el Grupo Aguacate, mientras que en el Este, la cobertura piroclástica, lahares y lavas recientes podría considerarse que tienen como basamento local la Formación Lavas Intracañón (Arias y Denyer, 1993) (Colima en contexto hidrogeológico), como se muestra en la figura 2.2.

Como se observa en la figura 4.6, siete de los sondeos realizados se localizan en el sector Este del área de estudio, donde afloran las unidades más recientes como Unidad Achiote y Unidad San Pedro, cuatro sondeos se ubican en la parte central cubierta por el mapa y seis en el sector Oeste.

Con el fin de contar con mayor detalle con respecto a la constitución geológica en cada sitio de sondeo, que permita la correlación de los resultados geofísicos con la geología, se realizó la búsqueda de pozos perforados alrededor de cada sitio que tuvieran descripciones litológicas en la Base de Datos de Pozos del SENARA. Se escogieron un total de 45 pozos que son los más cercanos a los sitios de sondeo. Posteriormente, los datos se dibujaron como columnas litológicas usando el software BOHR v.9.1 y se muestran más adelante.

La información de los pozos también permitió en la mayoría de los casos ubicar al menos un nivel acuífero, lo cual es un factor a considerar también en la interpretación de los sondeos. Los pozos cercanos a los sondeos realizados se indicaron en el Cuadro 4.17.

La interpretación geofísica implica la definición de las posibles “capas” geo-eléctricas obtenidas en cada sondeo para su posterior confrontación con los datos litológicos que permitan asociar los valores resistivos a las capas geológicas conocidas con base en los pozos perforados en cada sitio. Los datos de campo fueron procesados con el programa IPI2Win, para obtener las posibles “capas” geo-eléctricas para cada sondeo. Posteriormente se compararon los resultados del programa con la deducción de capas

por el método de punto auxiliar y finalmente se correlacionaron con los datos geológicos.

Interpretación mediante punto auxiliar

Para cada sondeo se dibujaron los valores de resistividad versus profundidad en gráficas logarítmicas para mostrar los cambios y realizar su interpretación mediante el método de punto auxiliar para efectos de comparación con la interpretación computarizada anterior.

Correlación Geológica de los Sondeos

En términos técnicos estrictos no existe un procedimiento que pueda llamarse “interpretación geológica” por la cantidad de variables que determinan la respuesta geo-eléctrica del medio. En este sentido es más correcto postular como correlación geológica el proceso mediante el cual se relaciona los valores de resistividad interpretados de los sondeos con la estratigrafía geológica del sitio del sondeo, derivada de columnas litológica cercanas, obtenidas de pozos perforados.

Con este fin se presentan a continuación los gráficos de perforaciones de pozos perforados en las cercanías de cada sondeo que servirán para establecer luego la correlación indicada.

Interpretación geofísica

A continuación se muestra la síntesis de la interpretación en términos de “capas” geo-eléctricas de los sondeos realizados.

- Interpretación SEV 1

La figura 4.8 muestra que la ubicación del sondeo y el pozo NA-421 es en un área cubierta por rocas asignadas al Grupo Aguacate. Los resultados del sondeo y la perforación del pozo NA-421 sugieren que la litología cercana a la superficie corresponde más a la unidad denominada tNag (“tobas y tobitas del Grupo Aguacate”) en el mapa que a la unidad β Nag descrita como “andesitas hasta basaltos con diques y brechas del Grupo Aguacate”.

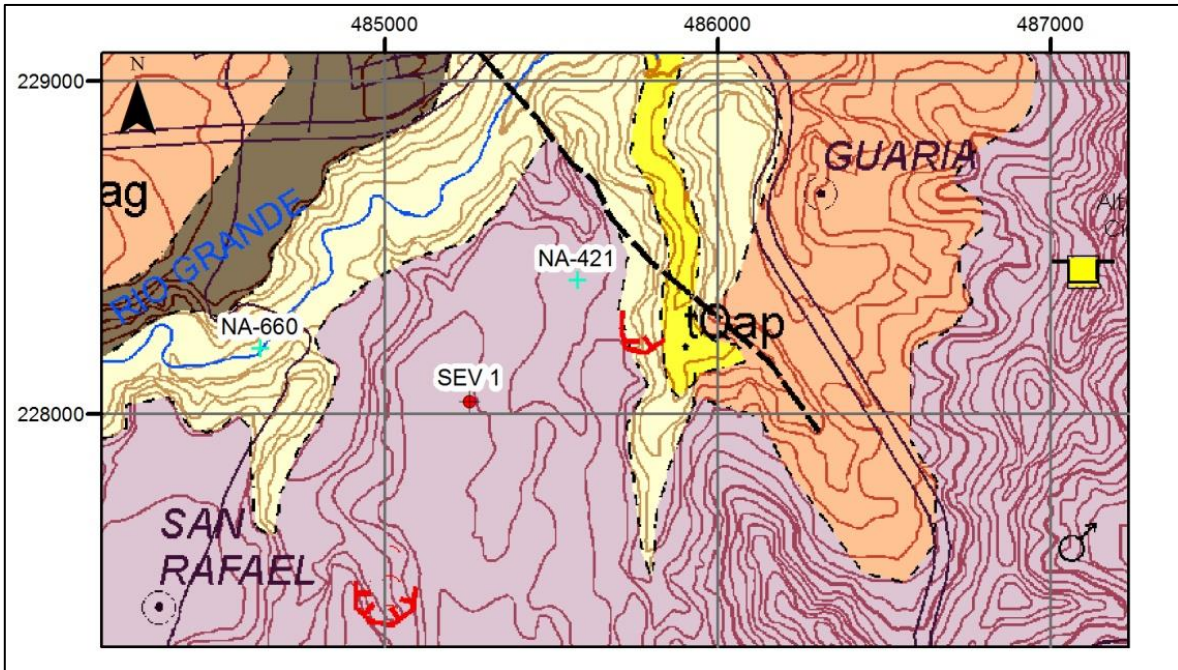


Figura 4.8: Ubicación del SEV1 y los pozos más cercanos en el Mapa Geológico de la Hoja Naranja (Huapaya & Rojas, 2012)

Las primeras tres capas del sondeo interpretado con IPI2Win corresponden a las capas 1 a 4 de la interpretación con punto auxiliar (Fig. 4.9). Luego aparece una capa de resistividad relativamente baja (18-20 ohm.m) que se interpreta mejor con el punto auxiliar, con un espesor de 60 metros a lo que seguiría una capa de roca con tendencia a un valor resistivo de 60 ohm.m que se proyecta hacia la profundidad por más de 60 m probablemente.

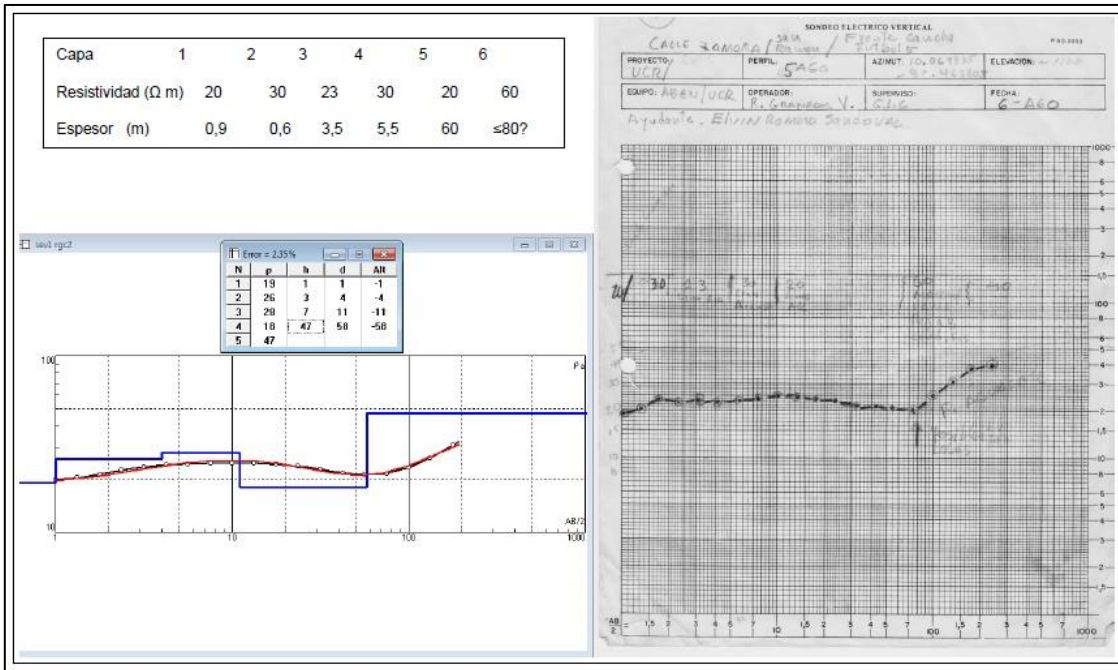


Figura 4.9: Interpretación geoelectrica del SEV 1

El perfil resistivo correlaciona bastante bien con lo observado en la perforación del Pozo NA-421 (Fig. 4.10), que es el más cercano, en términos de la cobertura de tobas arcillificadas con espesor total de 58 a 70 metros en el sondeo a lo que sigue una posible lava, observada en NA-421 que en el pozo NA-660 fue descrita como toba soldada (ignimbrita). De acuerdo a la posible profundidad alcanzada por el sondeo, la lava podría tener un espesor de 80 m o mayor pues no es claro si la resistividad tiende a disminuir en el último punto.

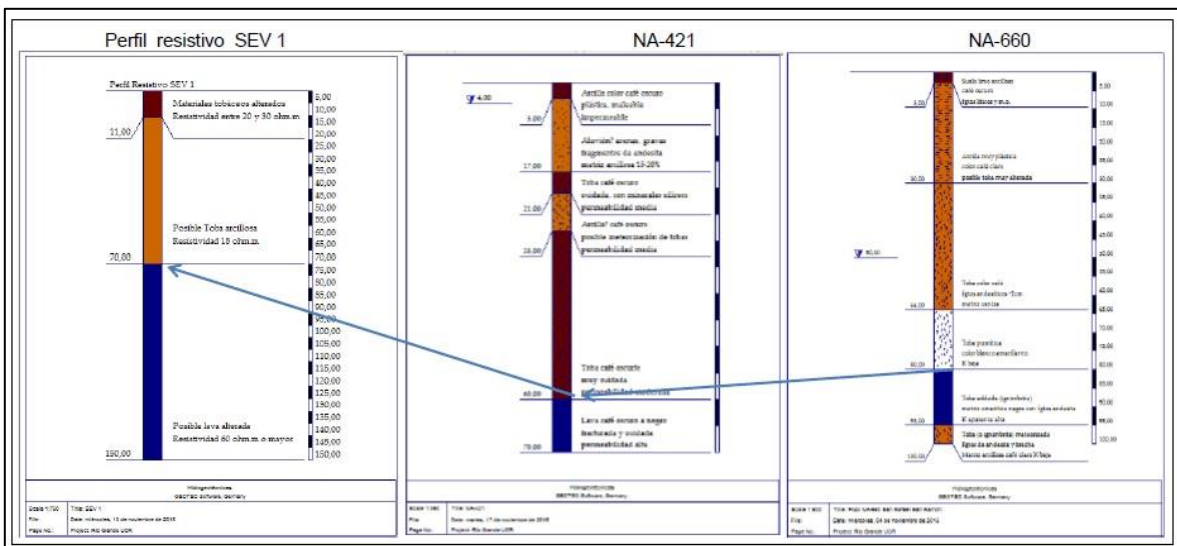


Figura 4.10: Correlación geológica SEV1

Nota: obsérvese que por las diferentes profundidades en alcanzadas cada caso, los gráficos no están a escalas iguales.

- Interpretación SEV 2

La figura 4.11 muestra que la ubicación del sondeo y el pozo NA-520 es una área cubierta por rocas asignadas a la Unidad Bajos del Toro (tQubt) descrita como “Tobas con líticos, no soldadas” en la leyenda que acompaña dicho mapa.

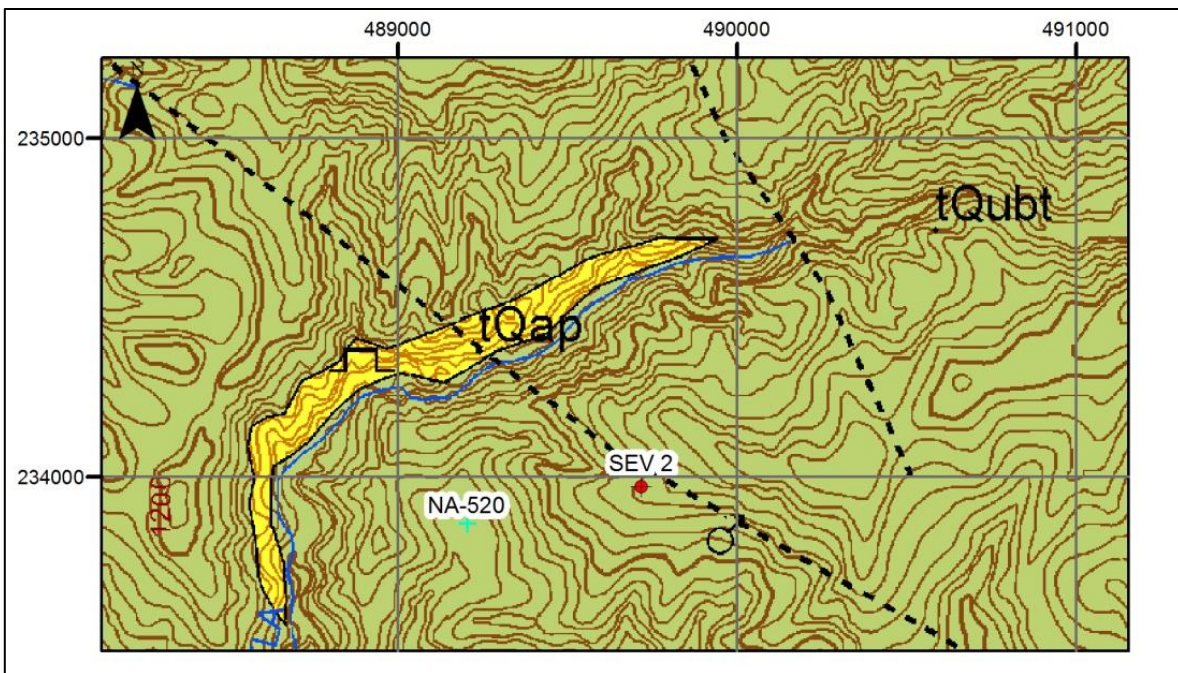


Figura 4.11: Ubicación del SEV2 y el pozo NA-520 en el Mapa Geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).

Como se observa en la figura 4.12 existe una primera capa geo-eléctrica con valor de resistividad entre 68 y 80 ohm.m y espesor de 2 a 2,5 m. Por debajo hay un paquete más resistivo (80 a 150 ohm.m) con espesor entre 14 y 15 metros. Por debajo de esto, la resistividad baja a valores entre 30 y 25 para volver a subir (50 a 80 ohm.m) y luego vuelve a bajar a valores del orden de 20 ohm.m.

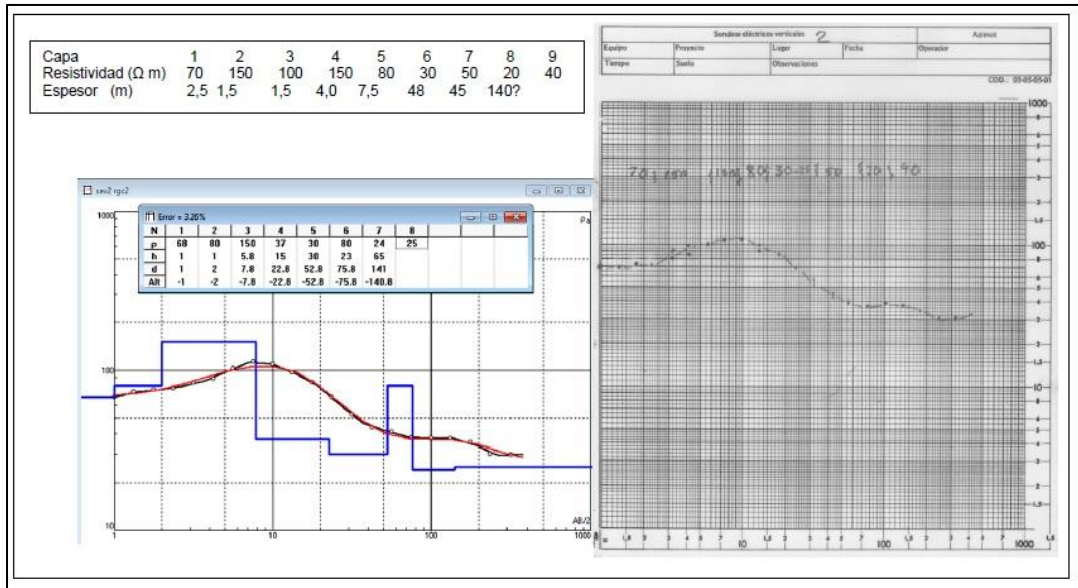


Figura 4.12: Interpretación geoelectrica del SEV 2

El perfil resistivo correlaciona razonablemente con lo descrito en la perforación del Pozo NA-520 (Fig. 4.13). Se tendría que el conjunto de suelo seco y toba o piroclastos no saturados (resistividades de 70 a 150 ohm.m) con espesor total de unos 17 metros corresponde con los 15(m) superiores en la perforación NA-520. Es evidente que en el sondeo se detecta más cambios que los descritos en forma generalizada en el pozo, que debemos recordar se originan en el análisis de muy pequeños fragmentos (“cortados”) que salen a superficie con el fluido de perforación. La secuencia siguiente se proyecta en el sondeo hasta los 65 m, con resistividad del orden de 30 ohm.m, correspondería a lo descrito en NA-520 entre los 15 y 62 m como toba “poco meteorizada” a “muy arcillosa”. Luego se presenta un aumento de resistividad a 50 ohm.m que se proyecta hasta 110 m en el sondeo y corresponde a los últimos 25 perforados en el pozo. El sondeo señala por debajo de esto nuevamente tobas, posiblemente meteorizadas, que obviamente no se perforaron en el pozo por estar mucho más profundas.

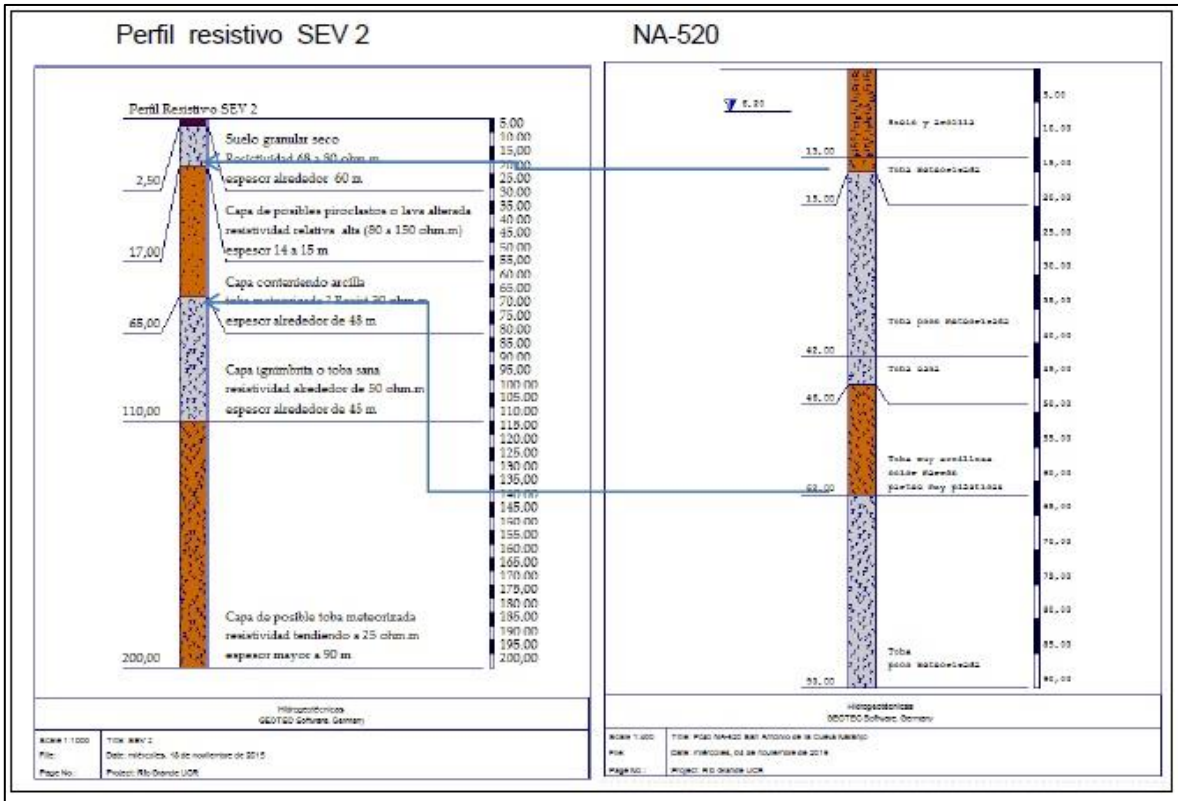


Figura 4.13: Correlación geológica SEV2

Nota: obsérvese que por las diferentes profundidades en alcanzadas cada caso, los gráficos no están a escalas iguales. La flecha inferior señala profundidades similares (62 en NA-520; 65 en el perfil resistivo).

- Interpretación SEV 3

La figura 4.14 muestra que la ubicación del sondeo y el pozo NA-686 es una área cubierta por rocas descritas como depósitos fluviales, arenas, gravas y bloques (fQ) en la leyenda que acompaña dicho mapa.

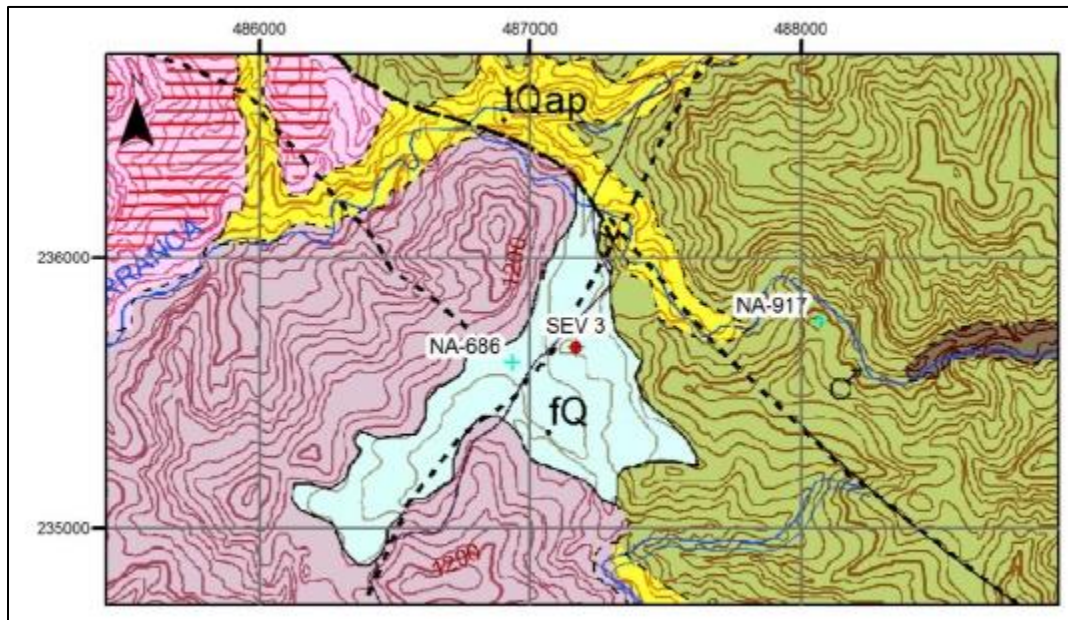


Figura 4.14: Ubicación del SEV 3 y pozo NA-686, al suroeste del sondeo, en el Mapa Geológico de la Hoja Naranja (Huapaya & Rojas, 2012).

En la figura 4.15 se observa que la primera capa geo-eléctrica tiene un valor de resistividad entre 45 y 48 ohm.m y espesor de 0,6 a 1,1 m. Por debajo hay un conjunto de capas poco resistivo (25 a 12 ohm.m) con espesor del orden de 20 metros. Por debajo de esto, la resistividad aumenta a valores del orden de 50 a 60 ohm.m con un espesor de 27-38 m y luego vuelve a bajar a valores del orden de 15-25 ohm.m, con espesor que puede llegar a los 100 m. Hay final se observa una tendencia a subir la resistividad que no es claramente definida.

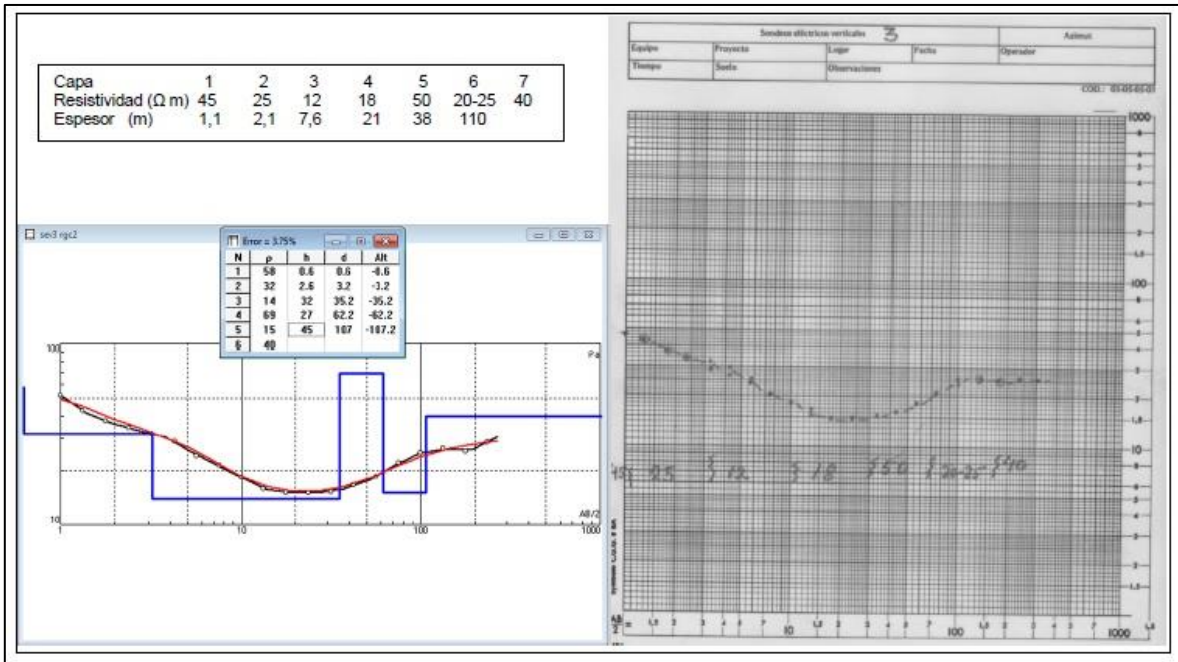


Figura 4.15: Interpretación geoelectrica del SEV3

En los gráficos de la figura 4.16 es claro que la descripción del pozo es demasiado simplificada para intentar una correlación de detalle entre los cambios resistivos en el sondeo con la litología encontrada en el pozo. En este caso en particular podemos rescatar que posiblemente se trata de tobas o ignimbrita alterada, que conforma un acuífero de bajo rendimiento según describe el informe de perforación del pozo. En el informe se indica que el nivel de agua subió de los 15 m a 10 m por debajo de los 80 metros lo cual parece coincidir con el cambio de resistividad de 50 a 25 indicado en el sondeo a los 70 metros de profundidad aproximadamente. El sondeo indica que los materiales descritos llegan por debajo de los 200 m sin que aparezcan lavas de acuerdo a los contrastes resistivos.

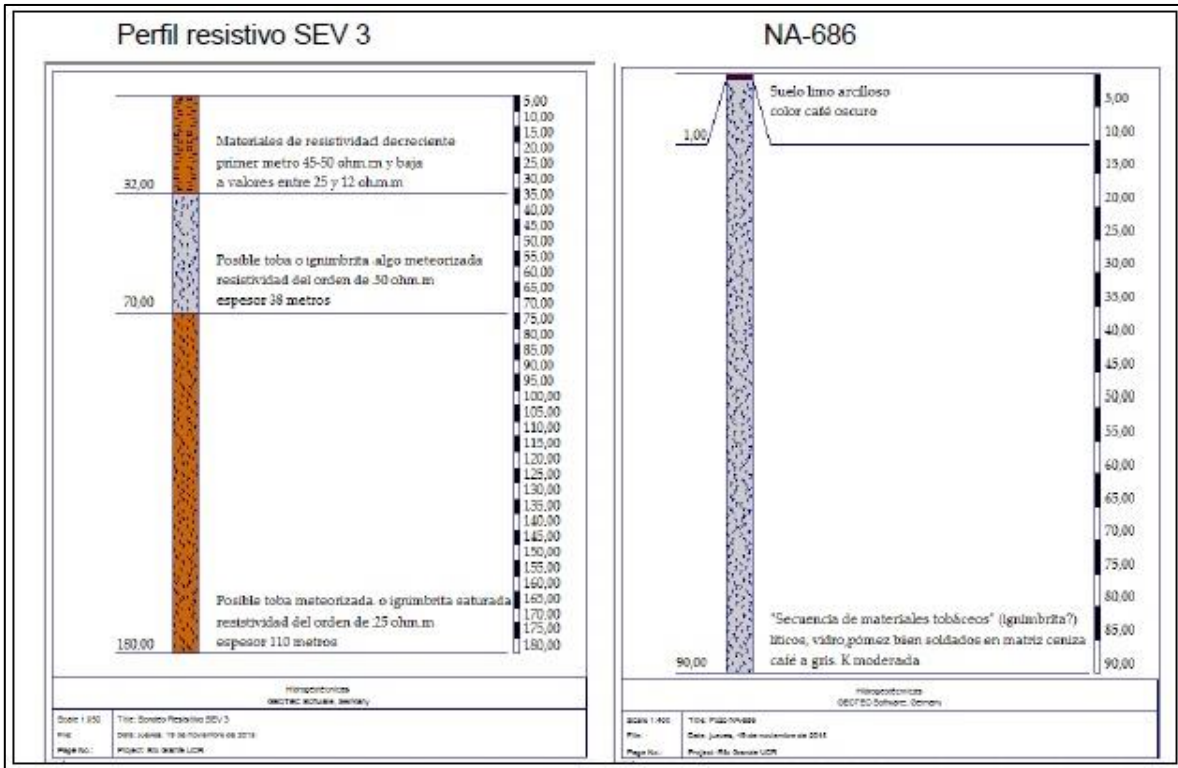


Figura 4.16: Correlación geológica SEV3

- Interpretación SEV 4

La figura 4.17 muestra que la ubicación del sondeo y el pozo NA-164 es una área cubierta por rocas asignadas a la Formación Tiribi, descrita como “ignimbrita gris, con escoria, vidrio volcánico, líticos lávicos y pocas pómez” en la leyenda que acompaña dicho mapa, mientras que el pozo NA-529 se encuentra en un área cubierta por el Lacustre de Palmares.

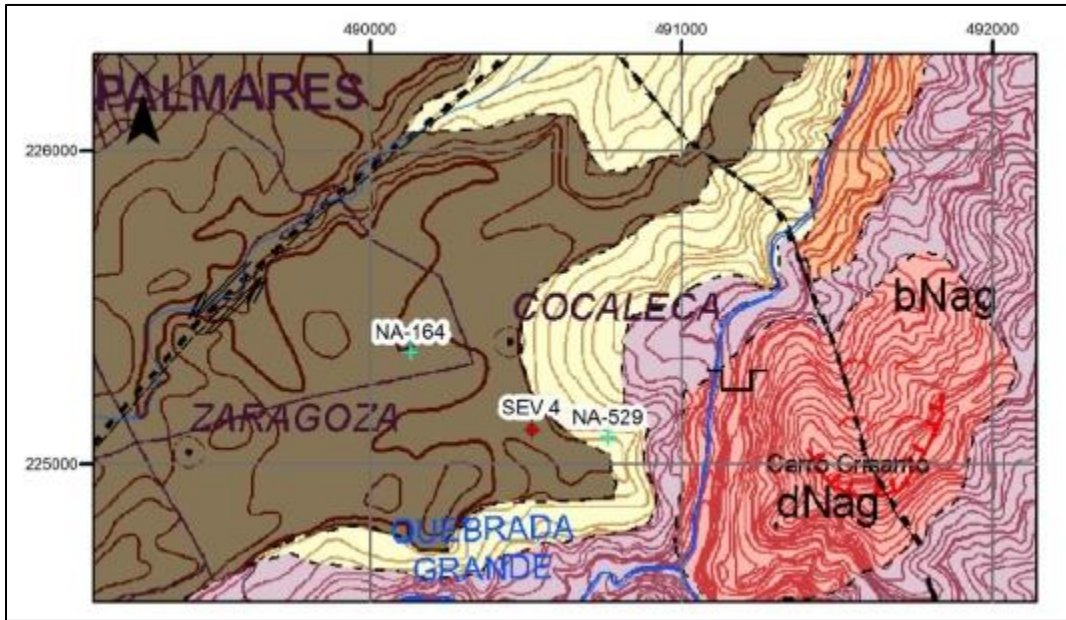


Figura 4.17: Ubicación del SEV 4 y pozos cercanos en el Mapa Geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).

El perfil resistivo del sondeo sugiere un material de relativa alta resistividad y espesor pequeño (9 m) cerca de la superficie subyacente por materiales de baja resistividad que podrían ser tobas muy alteradas, que a su vez descansan sobre una capa de muy baja resistividad que puede ser una arcilla lacustre de mucho espesor (≥ 60 m) (Fig. 4.18).

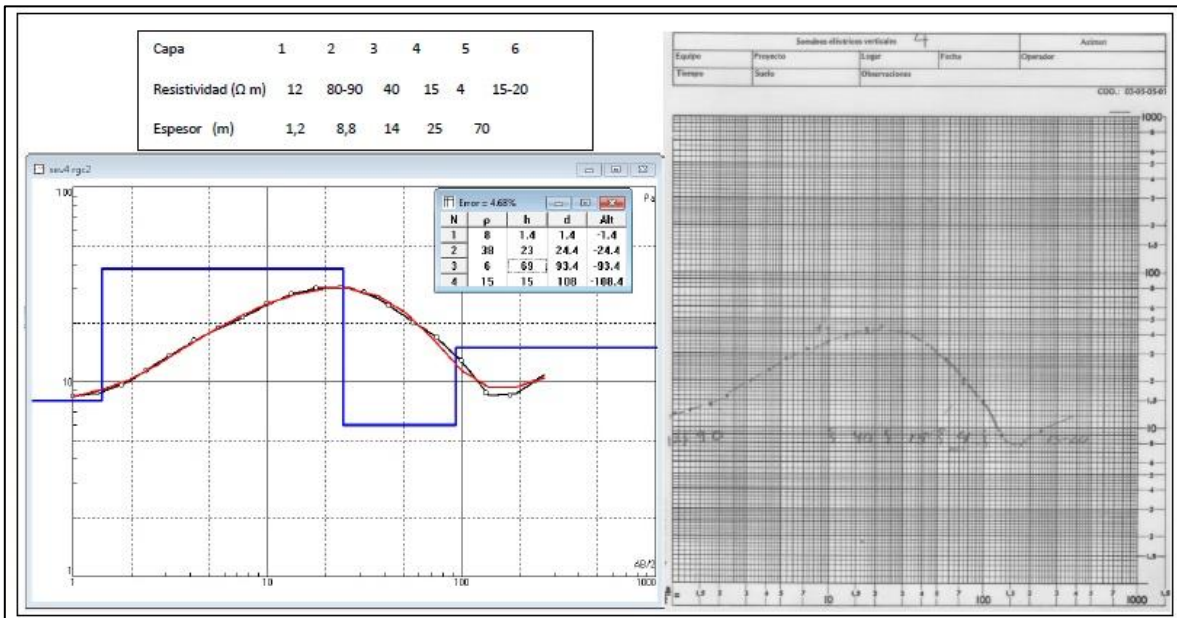


Figura 4.18: Interpretación geoelectrica del SEV4

Como se nota en la 4.17, el sondeo se ubica muy cerca de un contacto litológico entre el lacustre y las ignimbritas con dos pozos cercanos, aunque el reporte del NA-164 indica que es un dato “construido a partir de otros pozos y datos suministrados por el propietario”, lo cual le resta credibilidad a la descripción.

El pozo NA-529 describe lavas a profundidades de 47 a 90 m que no coinciden con lo determinado en el sondeo, aunque éste se localiza en un sector diferente litológicamente (Fig. 4.19).

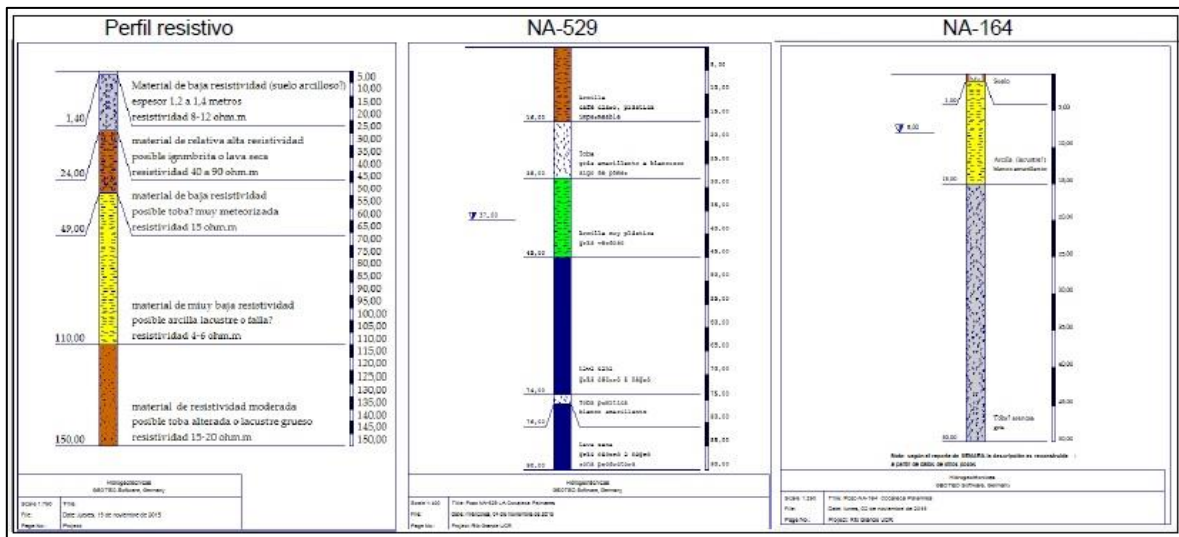


Figura 4.19: Correlación geológica SEV4

Por lo tanto se puede concluir que el sondeo señala la posibilidad de una alternancia de ignimbritas de poco espesor, tobas alteradas a muy alteradas y material lacustre intercalado, lo cual ha sido descrito en pozos en los alrededores de Palmares.

- Interpretación SEV 5

La figura 4.20 muestra la ubicación del sondeo y el pozo NA-209 y NA-222, de acuerdo con el Mapa Geológico de la Hoja Naranja el área está cubierta por rocas de la Formación Tiribi, descrita como “ignimbrita gris, con escoria, vidrio volcánico, líticos lávicos y pocas pómez” (igQft) en la leyenda que acompaña dicho mapa.

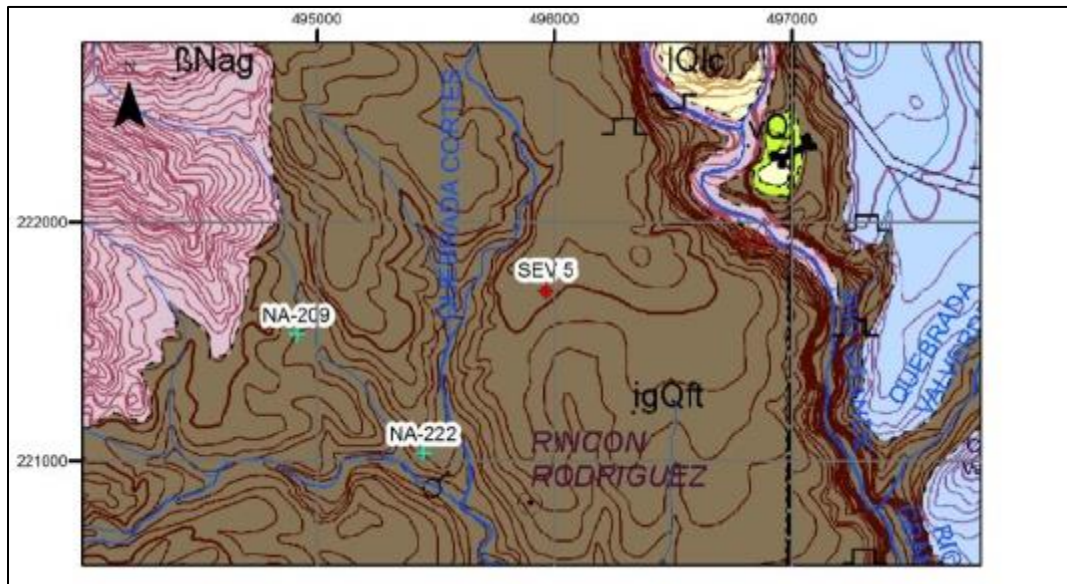


Figura 4.20: Ubicación del SEV 5 y pozos cercanos en el Mapa Geológico de la Hoja Naranja (Huapaya & Rojas, 2012).

En la figura 4.21 se nota una capa superficial de 3-4 m de espesor y resistividad de 39-47 ohm.m (suelo seco) que es subyacente por posibles tobas de resistividad 20 a 25 ohm.m y espesor del orden de 20 m. Luego aparece una capa con tendencia a 80 ohm.m y espesor 25 m que descansa sobre un material menos resistivo (toba?) de mucho espesor (91 m). La última capa detectada tiende a un valor resistivo muy bajo (6ohm.m).

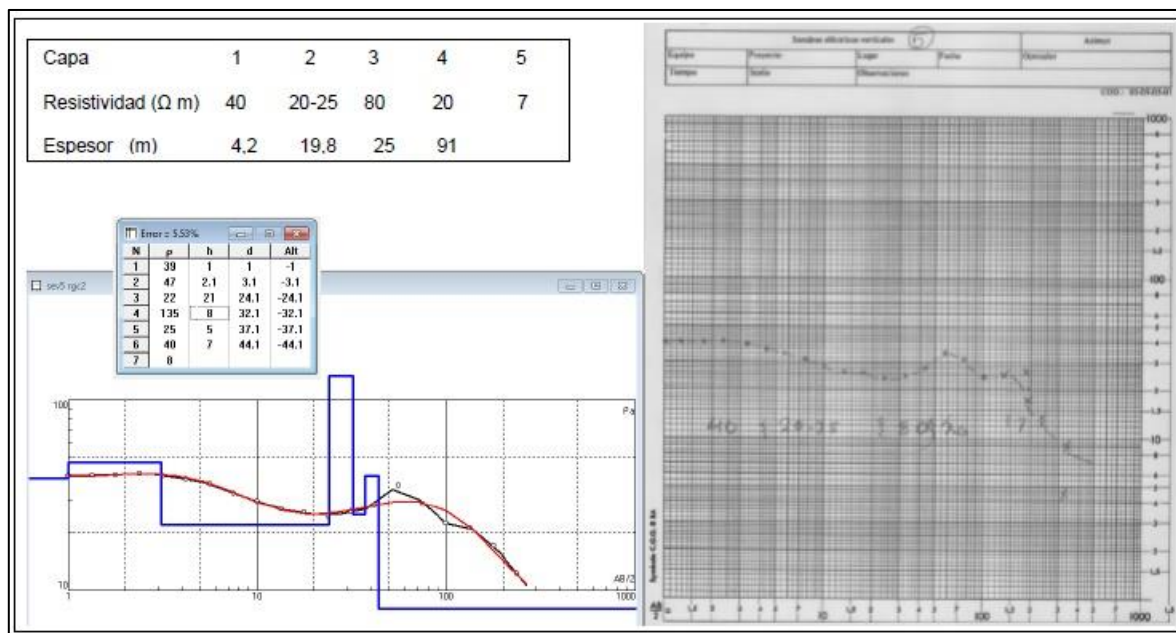


Figura 4.21: Interpretación geoelectrica del SEV5

Es necesario para efectos de la correlación considerar que el pozo NA-209 está en terreno alrededor de 25 m más bajo que el sitio del sondeo y el NA-222 unos 55 m por debajo de la elevación del sondeo. Con lo anterior en mente se puede indicar que existe buena correlación entre los datos del sondeo con las perforaciones de pozos mostrados (Fig. 4.22). La capa de lava en la perforación del NA-209 correlaciona bien con la capa de resistividad alta en el sondeo. Similarmente la toba alterada en el pozo NA-222 (descrita como Aguacate) correlaciona bien con la capa de 20-25 ohm.m en el sondeo.

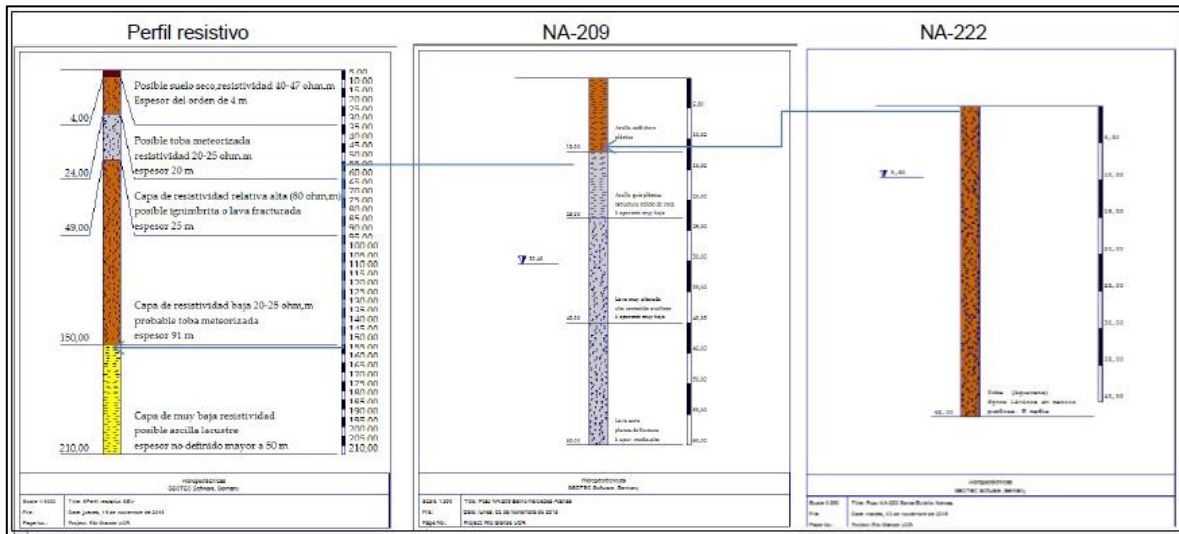


Figura 4.22: Correlación geológica SEV5

De acuerdo con estos datos, lo observado en el campo y trabajos previos de detalle como la campaña geológica de la Hoja Colorado y la Hoja Hornos, el mapa de la DGM tiene un error al indicar la presencia de la Formación Tiribi en una zona que obviamente debería considerarse como Grupo Aguacate.

De acuerdo entonces con los datos del sondeo, no habría presencia de lavas similares a la Formación Lavas Intracañón en el sector.

- Interpretación SEV 6

De acuerdo al mapa geológico (Fig. 4.23), el sector donde se ubica el sondeo se ubica dentro de la Unidad Achiote que se describe como “andesitas y basaltos, con lahares y tobas subordinadas (Paleo Poás)”.

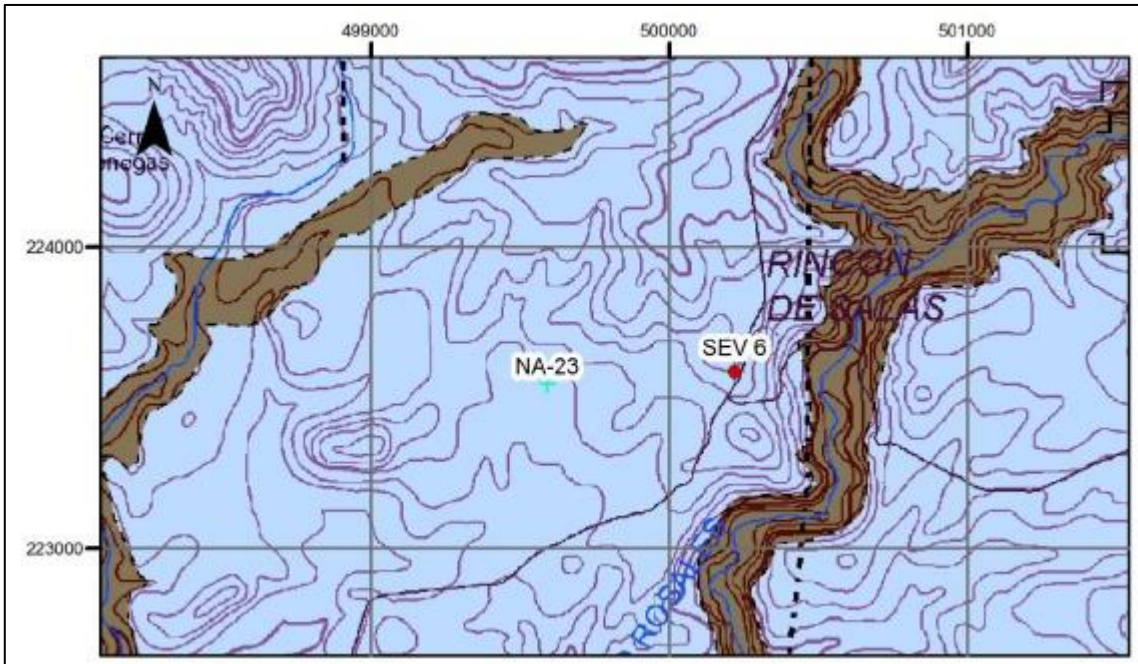


Figura 4.23: Ubicación del SEV 6 y pozos cercanos en el Mapa Geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).

Se observa en la figura 4.24 una primera capa geo-eléctrica de un espesor de 3 m en promedio que podría ser un suelo muy seco, debajo de lo cual hay una capa de resistividad relativamente baja (23 ohm.m) con espesor de 12 m que podría ser una toba meteorizada. Debajo de la anterior habría una secuencia de resistividad relativamente alta (100 ohm.m) que puede ser lava o ignimbrita bien soldada, de 20 m de espesor. La resistividad baja a 60 ohm.m posiblemente por fracturación o por efecto de la presencia de un acuífero, siendo el espesor de esta capa del orden de 50 m.

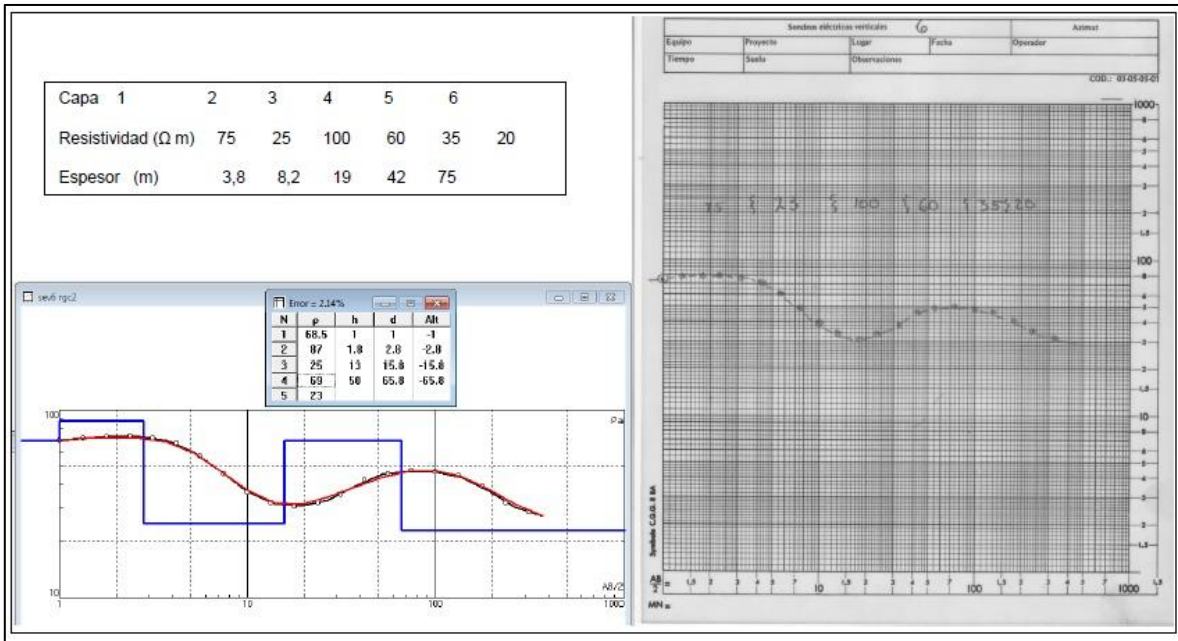


Figura 4.24: Interpretación geoelectrica del SEV6

Por debajo de estos materiales se presenta una gruesa capa (75 m) de posible toba o ignimbrita alterada. Esta capa podría descansar sobre un material con resistividad menor (20 ohm.m) que no es claramente definida en el sondeo.

Con base en la ubicación del sondeo se podría considerar que las relativamente altas resistividades (100-60 ohm.m) entre los 15 y 85 m, de profundidad podrían corresponder a lavas, meteorizadas y posiblemente muy fracturadas y saturadas. Sin embargo en el pozo NA-23 (Fig. 4.25), ubicado unos 600 m al oeste se describe la presencia de ignimbrita que sobreyace a una brecha a profundidades equivalentes (el pozo está unos 30-35 m más bajo topográficamente). Igualmente en el pozo NA-824, unos 750 m al sur se describe la presencia de ignimbrita por debajo del suelo y tobas meteorizadas más cercanas a la superficie. Estas litologías (brecha e ignimbrita) no están descritas dentro de la Unidad Achioté. Solamente los primeros 15 metros (“lahar”) descritos en el pozo NA-824 parecen corresponder con la descripción de la Unidad Achioté.

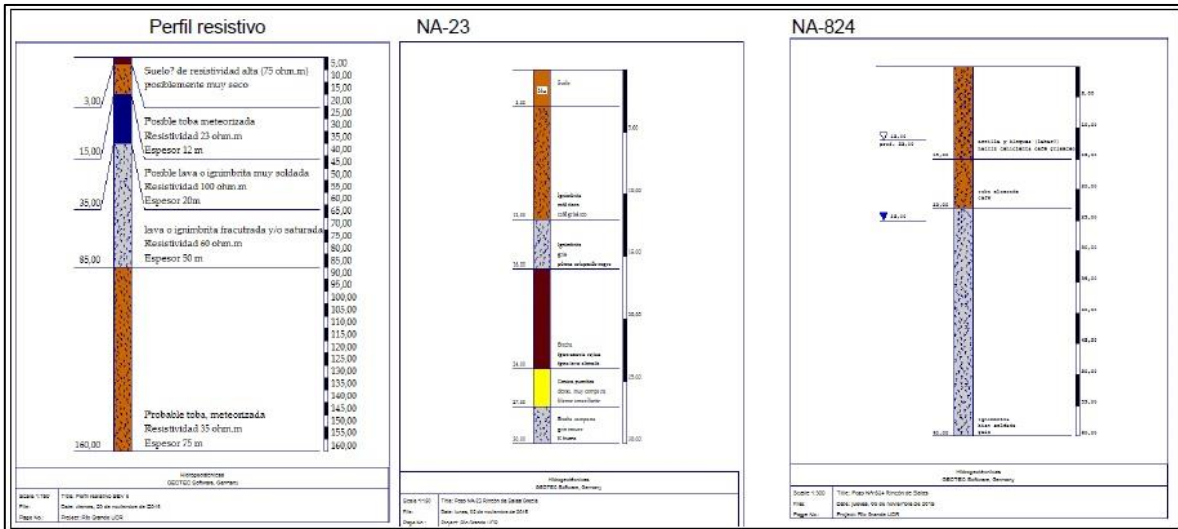


Figura 4.25: Correlación geológica SEV6

Como consecuencia, es claro que las resistividades de 100 y 60ohm.m corresponden con las brechas e ignimbritas, siendo los valores de 25 a 35 ohm.m correspondientes a lo que se describe como toba e ignimbrita café (meteorizada) que se proyecta al menos hasta los 160 m de profundidad y son subyacidas por una capa aún menos resistiva que podría ser una toba muy meteorizada. Es claro entonces que no hay lava en los primeros 200 m en este sector.

- Interpretación SEV 7

De acuerdo con el Mapa Geológico de la Hoja Naranja el área donde se ubica el sondeo y los pozos NA-338 y NA-246 está cubierta por rocas de la Formación Tiribi (Fig. 4.26).

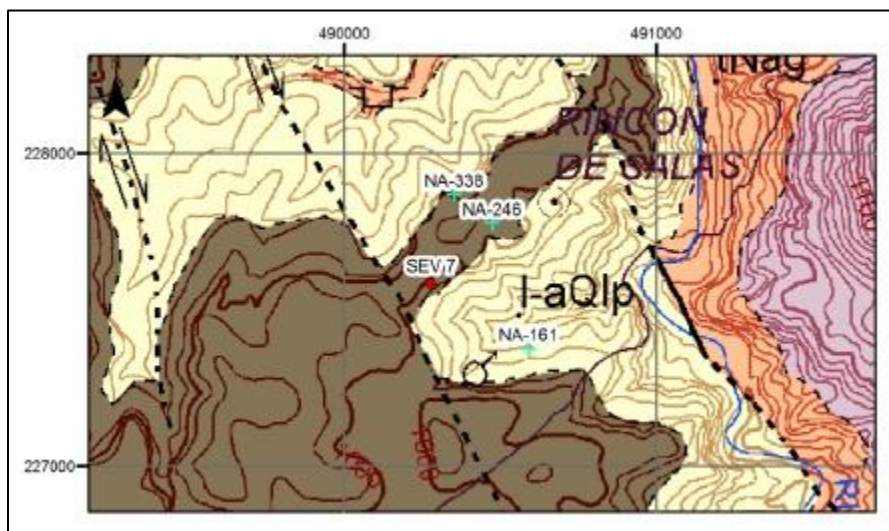


Figura 4.26: Ubicación del SEV 7 y pozos cercanos en el Mapa Geológico de la Hoja Naranja (Huapaya & Rojas, 2012).

En la figura 4.27 se presenta una primera capa de baja resistividad (7-8 ohms.m) y espesor 1m a la cual subyace otra capa de resistividad aún menor (5) con un espesor del orden de 2m. Ambas capas podrían ser material lacustre y sonsubyacidas por un material de resistividad alta (≥ 300 ohm .m) y espesor de 15 metros, seguida por una capa de resistividad 60 a 80 ohm.m, de 42 m, por debajo de la cual se tiene resistividad baja a muy baja (tendiente a 5-7 ohm.m) de unos 60 m de espesor. Se intercala una capa de resistividad alrededor de 30 ohm.m y un espesor del orden de 35 m. La capa de fondo tiende a 15-17 ohm-m.

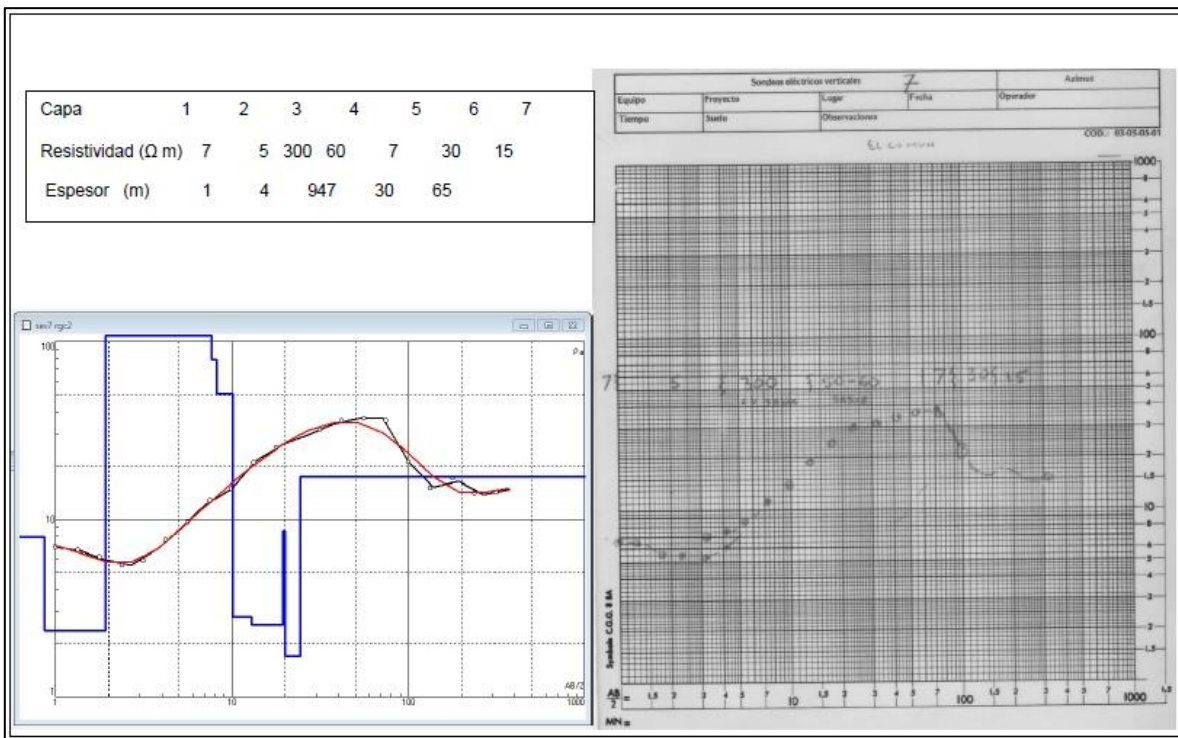


Figura 4.27: Interpretación geoelectrica del SEV7

La correlación geológica del sondeo es difícil por cuanto las perforaciones cercanas no reflejan la secuencia resistiva del sondeo. De igual manera la descripción de los pozos, localizados en terrenos de la Formación Ignimbritas (Tiribí) no se ajusta, particularmente en el caso del NA-338 (Fig. 4.28) que describe de principio a fin una secuencia de arcillas y arenas más posibles de ser parte del Lacustre, excepto por una capa de poco espesor (4 m) ubicada de 24 a 28 m de profundidad y descrita (erróneamente cremos) como lava fracturada (Fig. 4.28).

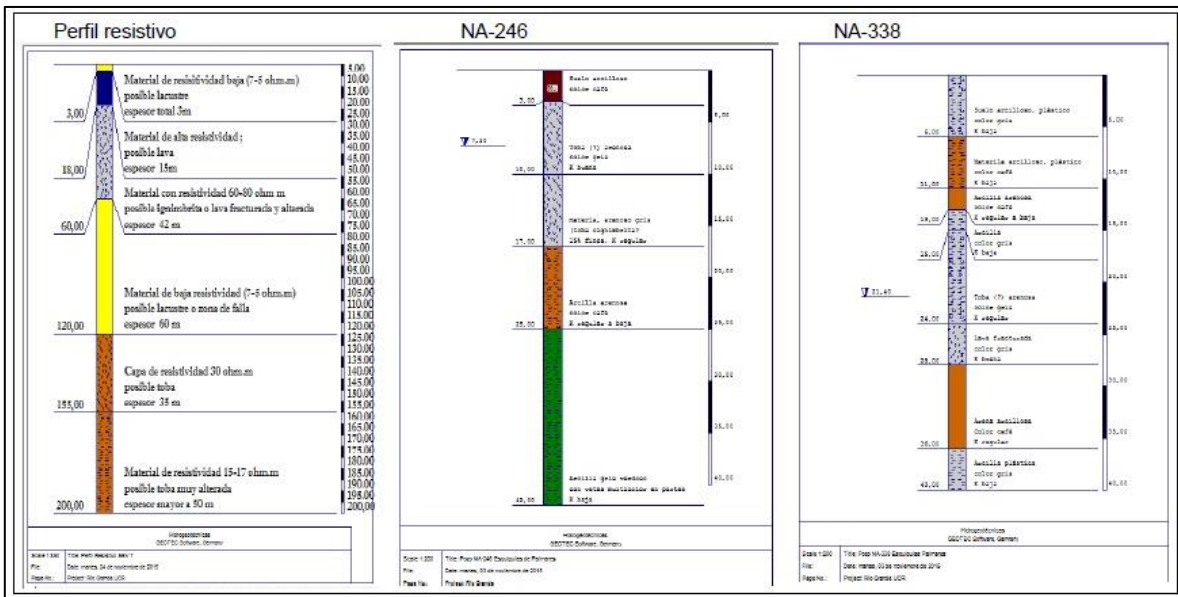


Figura 4.28: Correlación geológica SEV7

El mapa geológico indica una falla muy cercana al sondeo que puede ser la explicación para estas contradictorias condiciones y para los fuertes cambios que se observa en el sondeo. La falla se indica como de desplazamiento sinistral y podría haber desplazado materiales del Grupo Aguacate (tNag) que afloran al noroeste y este del sitio y que estratigráficamente subyacen a los depósitos lacustres.

El perfil resistivo del sondeo se acerca más a una mezcla de material asociables a tobas (como las del Grupo Aguacate) y materiales lacustres.

- Interpretación del SEV 8

La figura 4.29 muestra la ubicación del sondeo y de los pozos cercanos, de acuerdo con el Mapa Geológico de la Hoja Naranja estos se encuentran en un área cubierta por rocas de la Formación Tiribí, sin embargo de acuerdo con la interpretación de este sondeo se asocia con el Grupo Aguacate.

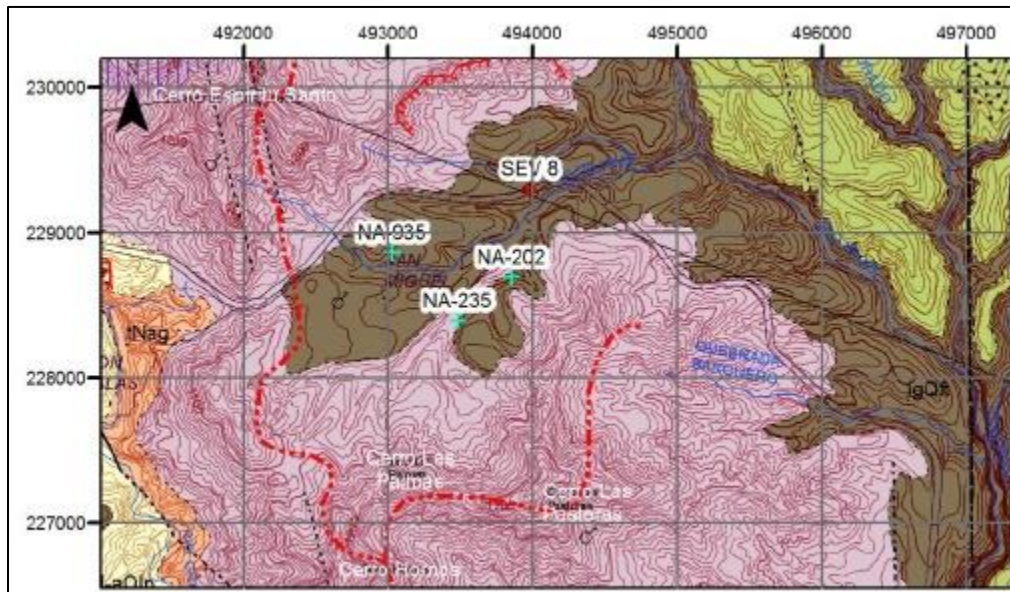


Figura 4.29: Ubicación del SEV 8 y pozos cercanos en el Mapa Geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).

En el sondeo se presenta un suelo seco bastante resistivo de 1,7 metros de espesor seguido por una capa de posible lava y brecha o ignimbrita con un espesor conjunto de 9,5 metros (Fig. 4.30). Debajo de estos materiales aparece un material de resistividad baja (toba muy alterada, tobita) de 15 ohm.m, y espesor del orden de 35 metros, que a su vez es subyacida por una capa muy potente (espesor 90 m), probablemente una ignimbrita o brecha alterada. Al final parece insinuarse una capa de baja resistividad de nuevo (tendiente a 10 ohm.m) de espesor indefinido pero que podría ser mayor a 50m.

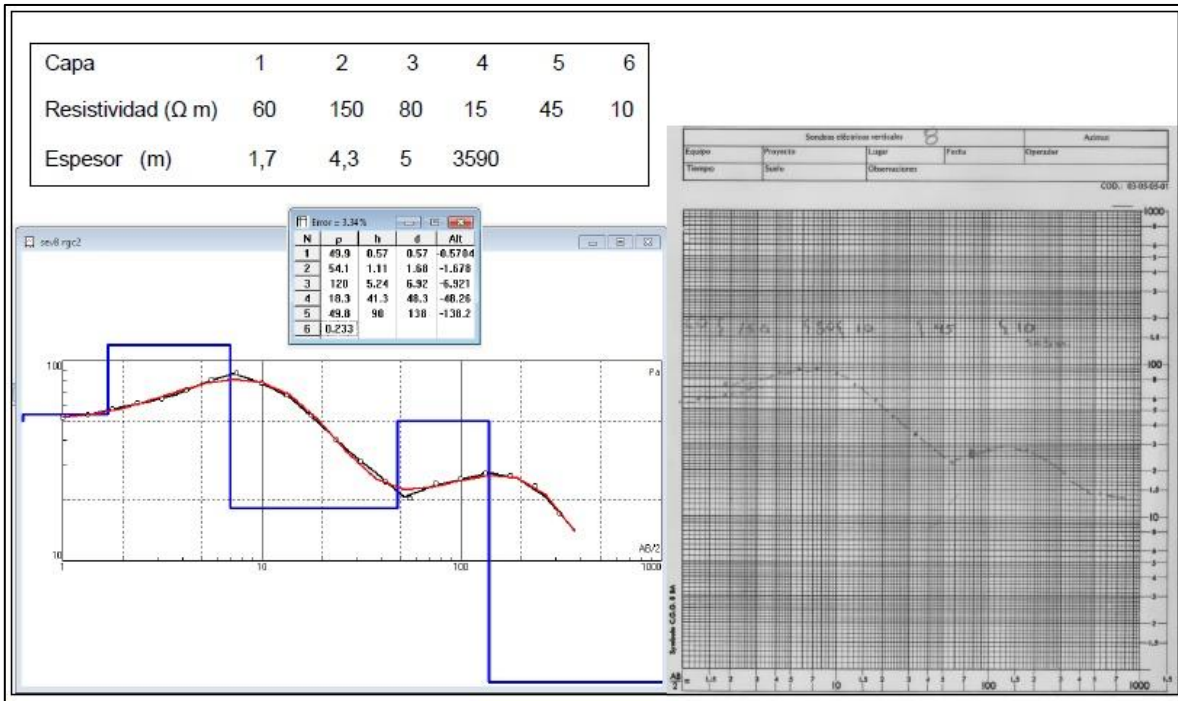


Figura 4.30: Interpretación geoelectrica del SEV8

Se observa una buena correlación con las litologías descritas en el pozo NA-935, donde se nota que el valor alto resistivo en el sondeo efectivamente se manifiesta como una lava en el pozo, así como la secuencia subsiguiente de baja resistividad (Fig. 4.31).

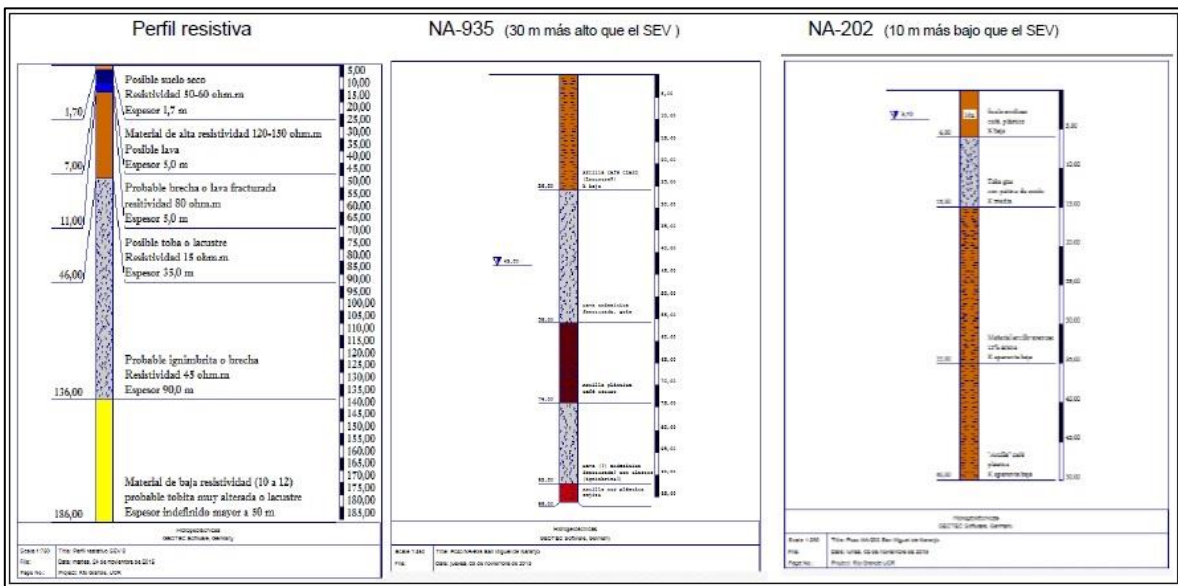


Figura 4.31: Correlación geológica SEV8

Nótese que esta secuencia no es propia de la Formación Tiribí que es lo que muestra el mapa geológico en el sitio del sondeo y en la ubicación de los pozos, pareciendo corresponder más bien a las litologías de Aguacate, que aflora mayoritariamente en los alrededores. En la figura 4.29 se ha destacado con línea punteada el conjunto de cerros en forma de herradura abierta (Espíritu Santo, Las Palomas, Las Pastoras, Hornos) que en las campañas geológicas de Naranjo, Palmares y San Ramón se han sugerido como posibles centros volcánicos efusivos.

Por lo anterior parece que el área delimitada como igQft no corresponde en realidad a esa formación.

- Interpretación SEV 9

La figura 4.32 muestra que la ubicación del sondeo y los pozos cercanos es una área cubierta por rocas asignadas a la Unidad Bajos del Toro (tQubt) descrita como “Tobas con líticos, no soldadas” en la leyenda del Mapa Geológico de la Hoja Naranjo, estas son subyacidas por la unidad descrita como “Basaltos y andesitas, Unidad Bajos del Toro” (β - α Qubt).

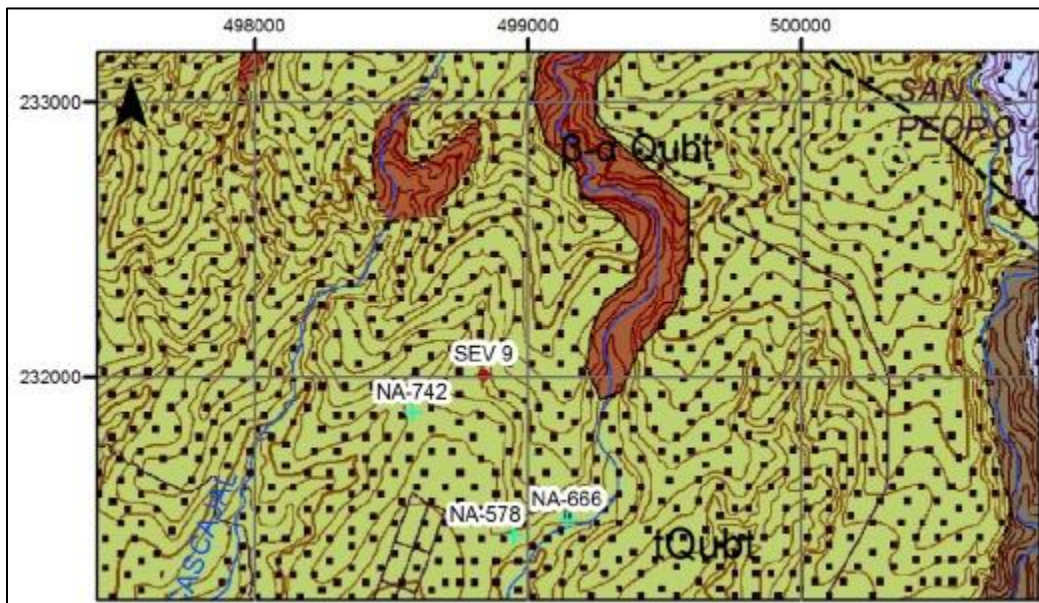


Figura 4.32: Ubicación del SEV 9 y pozos cercanos en el Mapa Geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).

En la figura 4.33 se presenta una capa de suelo de resistividad 60 ohm.m con espesor menor a 1 m desarrollado sobre un material resistivo, 60 a 100 ohm.m con espesor entre 1,5 y 3 m. Por debajo de esto aparece una capa relativamente gruesa (27-35 m) con resistividad tendiente a 20-25 ohm.m. Subyaciendo a la anterior se presenta una

capa de resistividad alta 100 a 150 ohm.m con espesor de 65 a 75 m, que disminuye hacia abajo a 60-80 ohm.m, con un espesor de unos 90 m. La tendencia final es bajar a una resistividad del orden de 40 ohm.m.

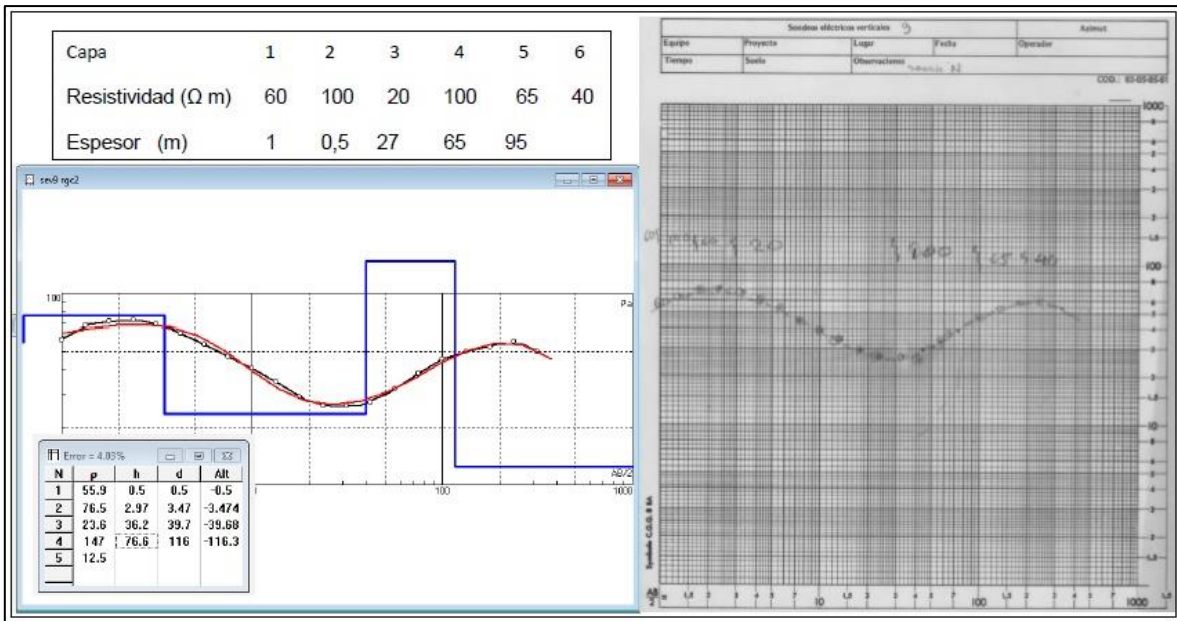


Figura 4.33: Interpretación geoelectrica del SEV9

Se nota una bastante buena correlación entre las capas resistivas del sondeo con la descripción de la litología descrita en el pozo NA-666 (Fig. 4.34), no así con el pozo NA-742 ni con la definición de la formación tQubt, aunque sí podría ser correlacionado con los basaltos y andesitas de la Unidad Bajos del Toro. Por otro lado, la descripción de la perforación NA-742 no correlaciona muy bien con la descripción de la unidad tQubt pero sí se podría asimilar parcialmente a β - α Qubt.

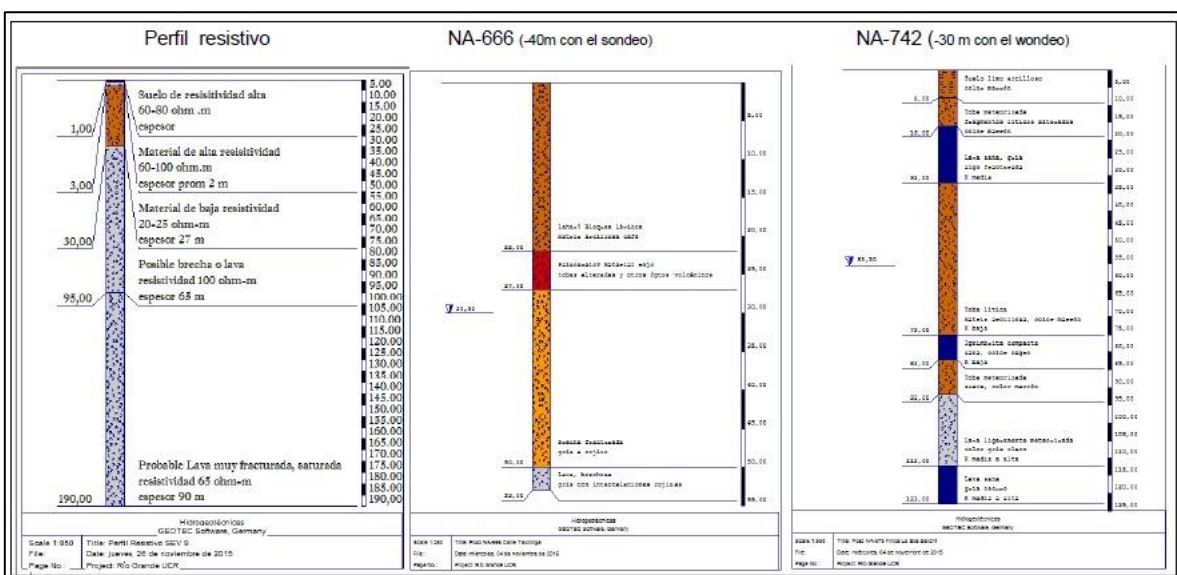


Figura 4.34: Correlación geológica SEV9

- Interpretación SEV 10

La ubicación del sondeo y los pozos cercanos se puede observar en la figura 4.35, estos están dentro del área descrita como “andesitas y basaltos (Unidad Achiote) con lahares y tobas subordinadas (Paleo Poás)” (α - β Qua), en el Mapa geológico de la Hoja Naranjo.

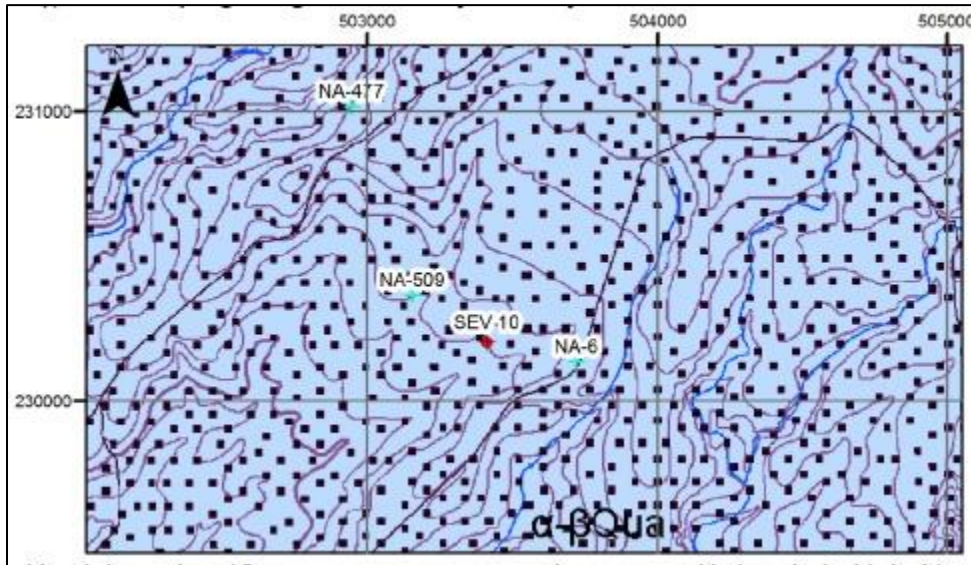


Figura 4.35: Ubicación del sondeo 10 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).

En la figura 4.36 se presenta una capa de suelo de resistividad de 130 a 150 ohm.m, espesor 1m, por debajo del cual hay una capa de resistividad 60 ohm.m de 2,2 m de espesor y que a la vez es subyacida por una capa de resistividad baja, 20-25 ohm.m con espesor del orden de 5-6 m. La siguiente capa tiene una tendencia hacia 90-100 ohm.m y un espesor del orden de 20 m. que baja a 60 ohm.m en los siguientes 32 m. La última capa interpretable en términos de espesor, se proyecta hacia los 20-25 ohm.m con un espesor del orden de 60 m, posterior a lo cual la resistividad tiende a subir de nuevo hacia un valor de 60 ohm.m.

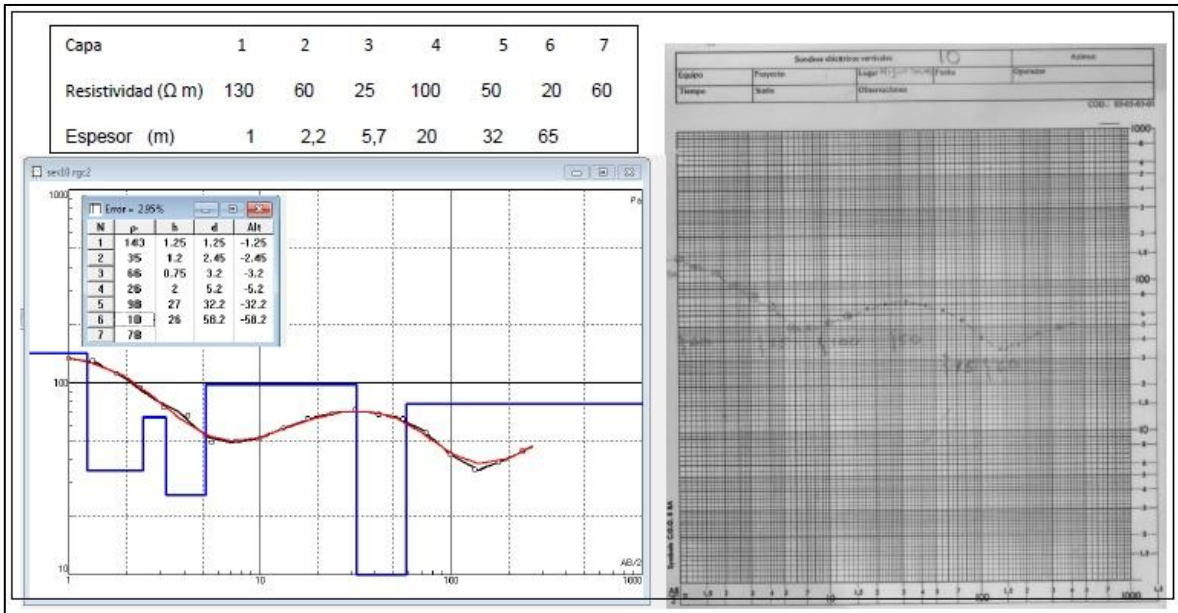
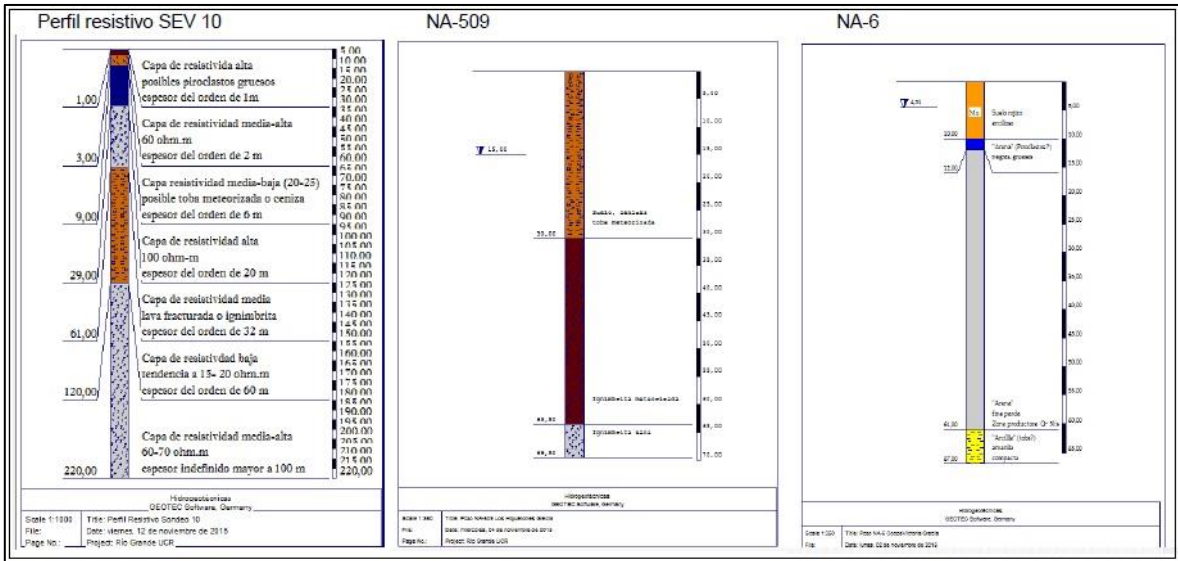


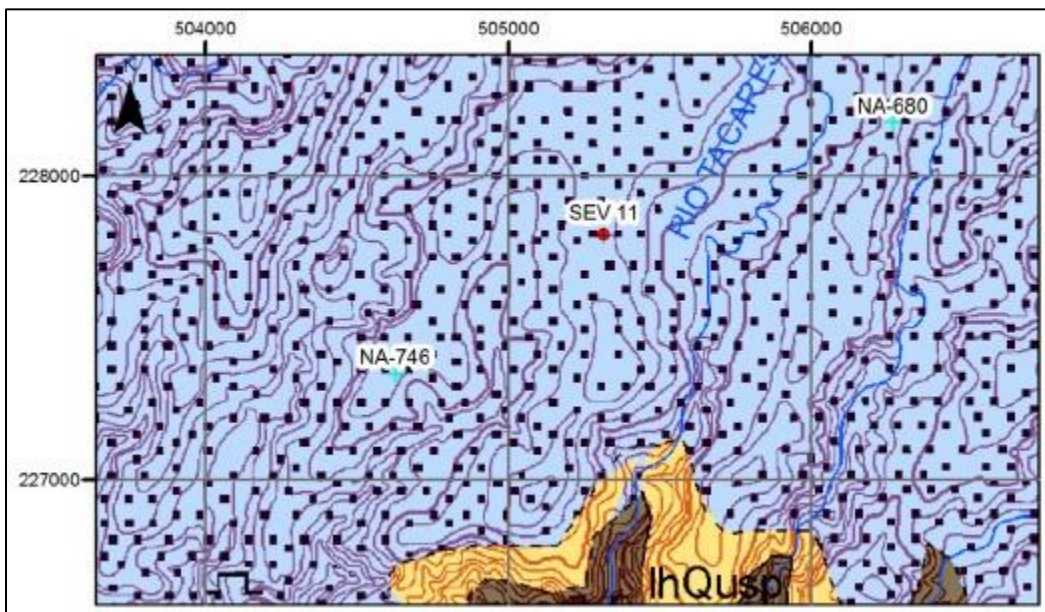
Figura 4.36: Interpretación geoelectrica del SEV10

En la figura 4.37 se determinan tres capas geo-eléctricas que se repiten y que podrían resumirse en lo siguiente: las capas de alta resistividad (9 a 29 y por debajo de los 120 m) podría consistir en lava o brecha fracturada, siendo los valores intermedios lava o brecha bastante meteorizada. Por su parte los valores de 15 a 25 corresponderían muy posiblemente a toba relativamente meteorizada. Esta interpretación encaja bien en la definición de la unidad geológica (α - β Qua). Es notorio sin embargo, que la descripción de las perforaciones no se ajustan a lo observado en el sondeo a menos que se considere que lo descrito en la perforación NA-509 corresponda a brecha y no ignimbrita como se describe en el reporte, el cual aclara que la descripción “se basa en los cortados y datos del perforador” por lo cual no sería improbable una confusión de este tipo (Fig. 4.37). En el caso de NA-6 parece evidente que la descripción es del tipo usual en los perforadores.



- Interpretación SEV 11

La ubicación del sondeo y los pozos cercanos se puede observar en la figura 4.38, estos están dentro del área descrita como “andesitas y basaltos (Unidad Achiote) con lahares y tobas subordinadas (Paleo Poás)” (α - β Qua), en el Mapa geológico de la Hoja Naranjo.



En las figura 4.39 y 4.40 se observa que hay buena correlación entre las capas resistivas del sondeo y la perforación NA-746. Las altas resistividades corresponden a lava y la resistividad media a lahar no saturado. La parte más profunda del sondeo, indica que la secuencia se repite a profundidad.

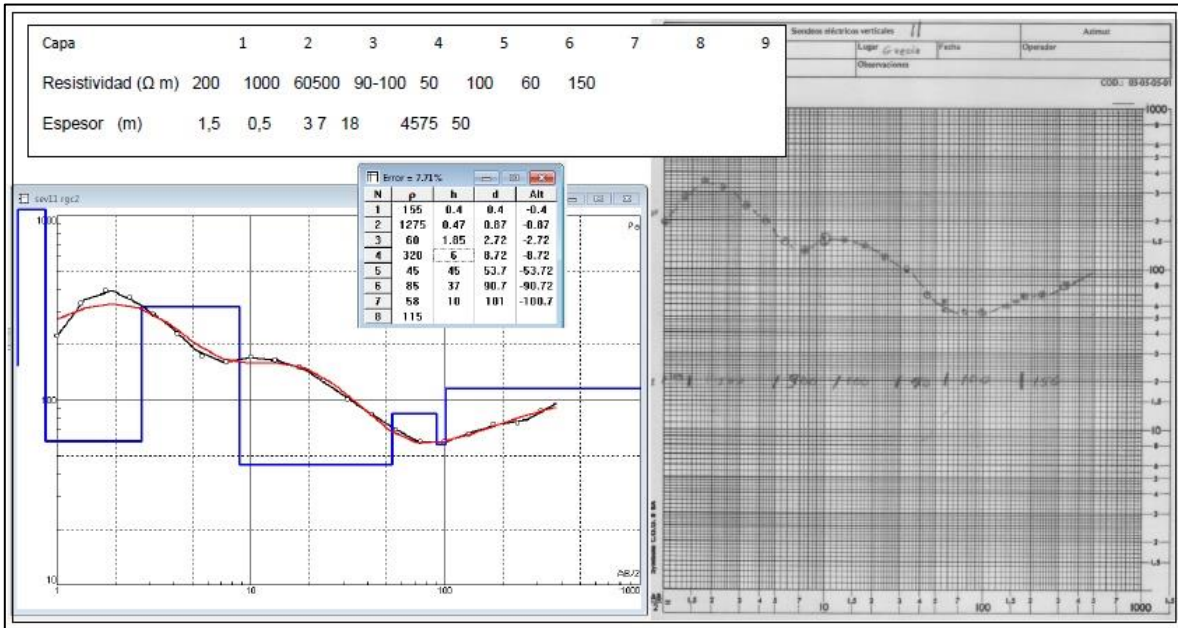


Figura 4.39: Interpretación geoelectrica del SEV 11

De acuerdo a la localización en el mapa geológico, también existe correlación adecuada con la definición de la Unidad Achote.

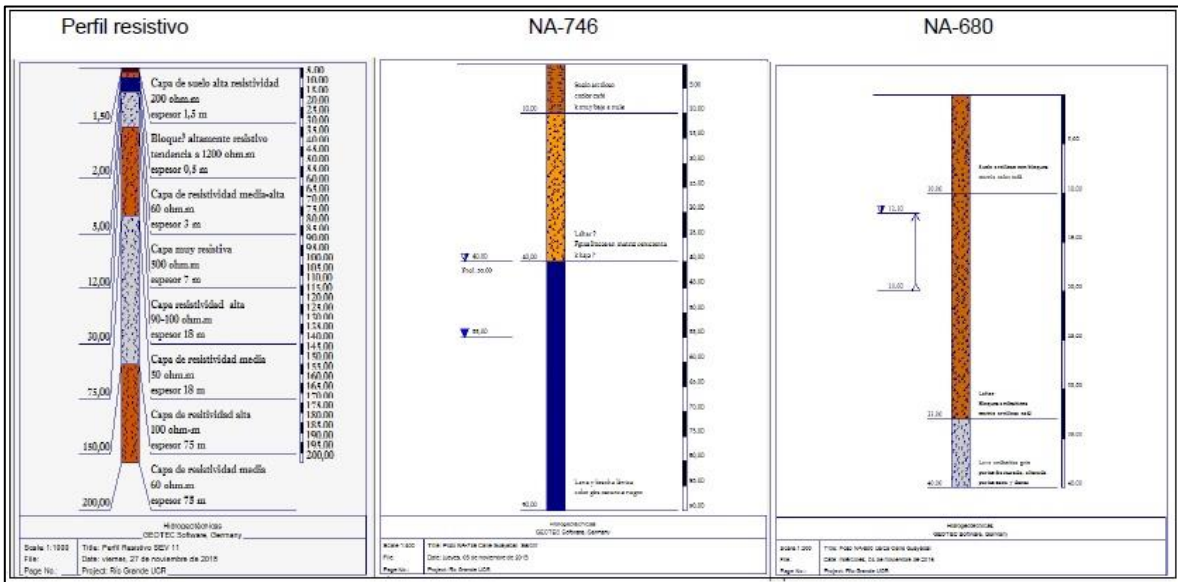


Figura 4.40: Correlación geológica del SEV11

- Interpretación SEV 12

La figura 4.41 muestra la ubicación del sondeo y los pozos cercanos, el área en la que se encuentran ha sido descrita como “andesitas y basaltos (Unidad Achiote) con lahares y tobas subordinadas (Paleo Poás)” (α - β Qua), en el Mapa geológico de la Hoja Naranjo.

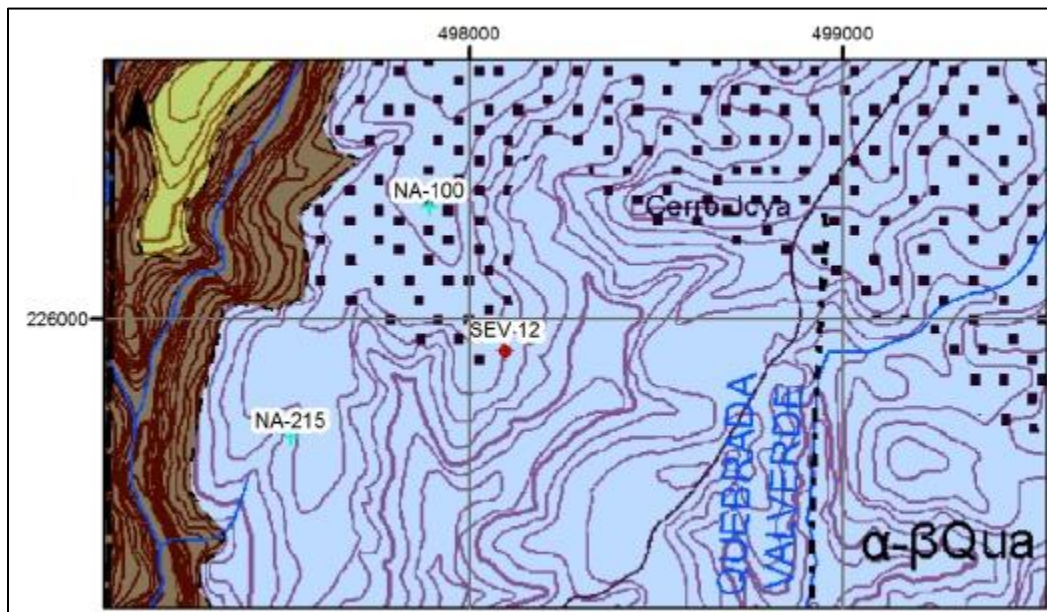


Figura 4.41: Ubicación del SEV 12 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).

La correlación del sondeo con la perforación NA-1000 es buena en cuanto a la identificación de la lava, la cual tiene valores de resistividad de 120 oh.m (Figs. 4.42 y 4.43), la cual también aparece en el pozo NA-215. Sin embargo, el sondeo muestra que el espesor de esta unidad es mayor a 100 metros, mientras que la descripción del pozo NA-1000 señala un espesor de 48 m a la lava e indica ignimbrita en un espesor similar por debajo de la lava, lo cual es un poco atípico no sólo por no ser parte de la ignimbrita de la Unidad Achiote, sino además que debería haber algún paleosuelo si la ignimbrita correspondiera a la formación igQft.

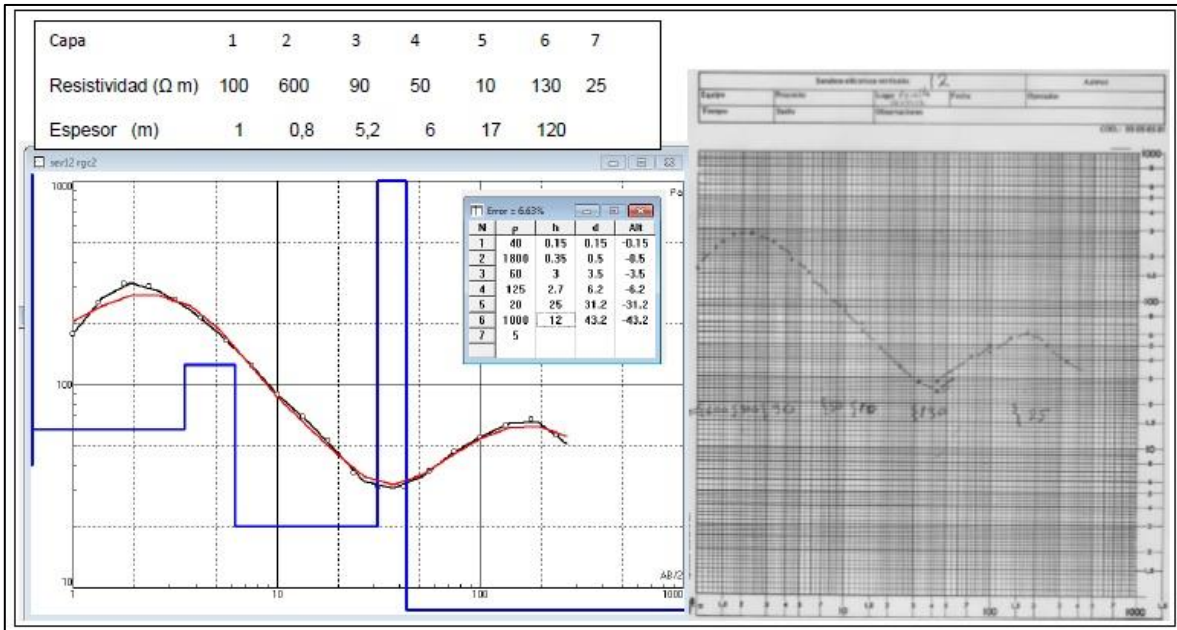


Figura 4.42: Interpretación geoelectrica del SEV 12

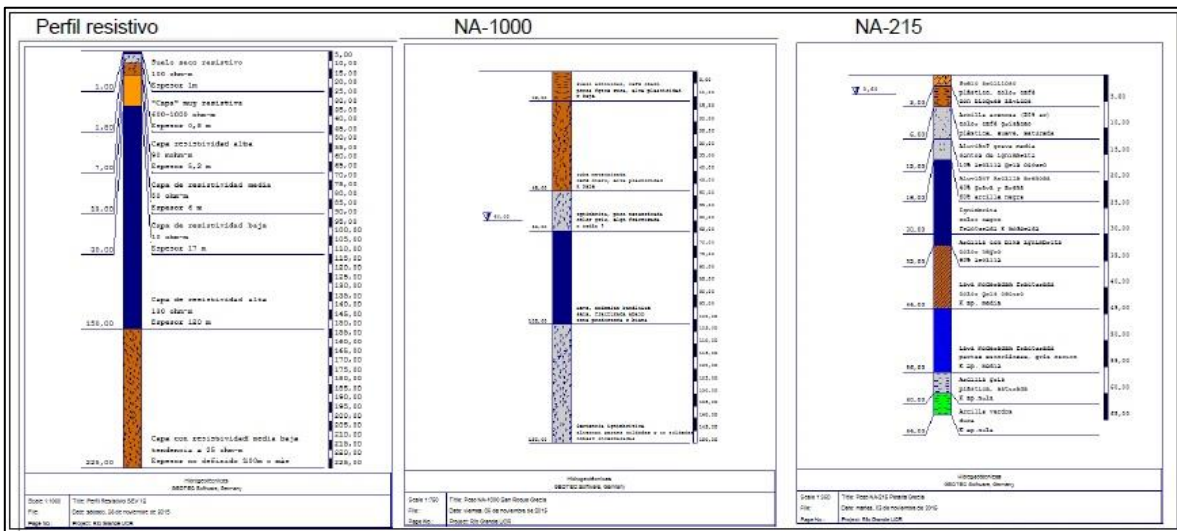


Figura 4.43: Correlación geológica del SEV12

En todo caso tanto la descripción del pozo NA-1000 como el sondeo indican que el espesor de la lava es muy superior a lo que se deduce para ese sitio con base a la elevación del contacto entre las unidades antes indicadas. Considerando la elevación del pozo en el mapa, el techo de la lava se ubica alrededor de la elevación 790 y la base cerca de la elevación 740, mientras que el contacto entre las unidades igQft y α - β Qua en el mapa se muestra en la elevación 820-825, es decir alrededor de 80 m por encima de lo que describe la perforación del pozo.

- Interpretación SEV 13

La figura 4.44 muestra la ubicación del sondeo y el pozo NA-301, estos se encuentran en un área cubierta por rocas asignadas como “andesitas y basaltos (Unidad Achiote) con lahares y tobas subordinadas (Paleo Poás)” (α - β Qua), en el Mapa geológico de la Hoja Naranja.

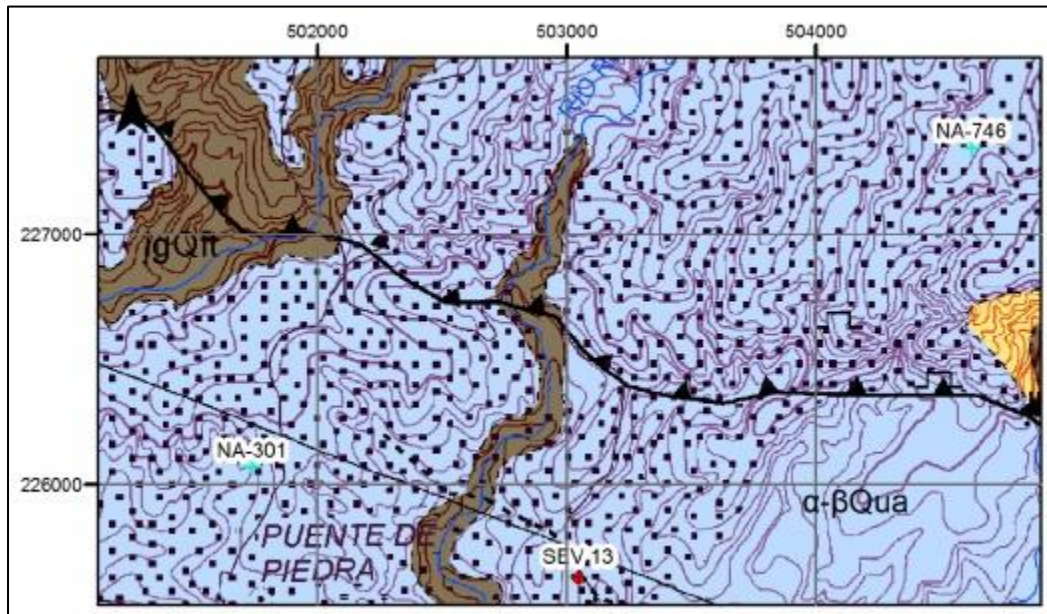


Figura 4.44: Ubicación del SEV 13 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranja (Huapaya & Rojas, 2012).

De acuerdo a los datos del sondeo, existen dos posibles capas de resistividad alta (Fig. 4.45), las cuales se asocian con lavas, la primera capa se ubica a una profundidad de 12 metros y la segunda por debajo de los 50 metros. La primera de ellas no se presenta en la descripción del pozo NA-301 y posiblemente porque el pozo se ubica a una altura superior, más o menos 40 metros por encima de la elevación del sondeo podría estar a la altura en la cual se describe ignimbrita en el pozo (Fig. 4.46). También esto podría ser ocasionado por la presencia de una falla mostrada en el mapa geológico justo en el sitio del sondeo y que podría reflejarse en algunos picos bruscos en el sondeo. La segunda capa que por su alto valor resistivo debe corresponderá a una lava, estaría por debajo del fondo del pozo.

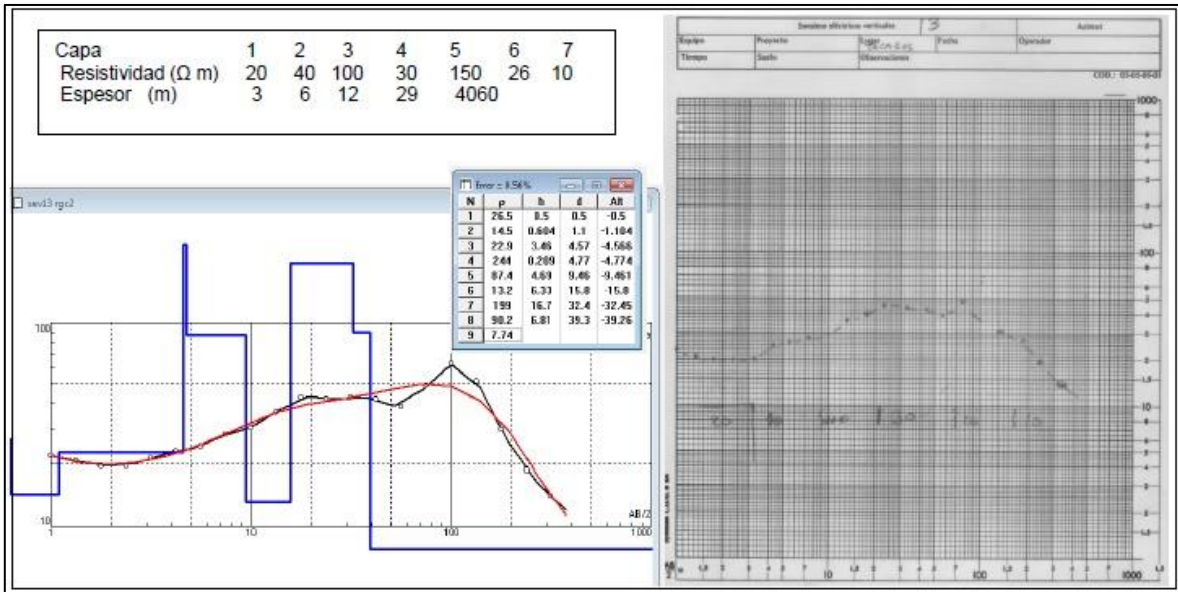


Figura 4.45: Interpretación geoelectrica del SEV 13

En relación con el contexto geológico del mapa se puede indicar que la secuencia superior del sondeo puede correlacionarse como lahar, toba, lava, toba se ajusta a la descripción de la unidad α - β Qua.

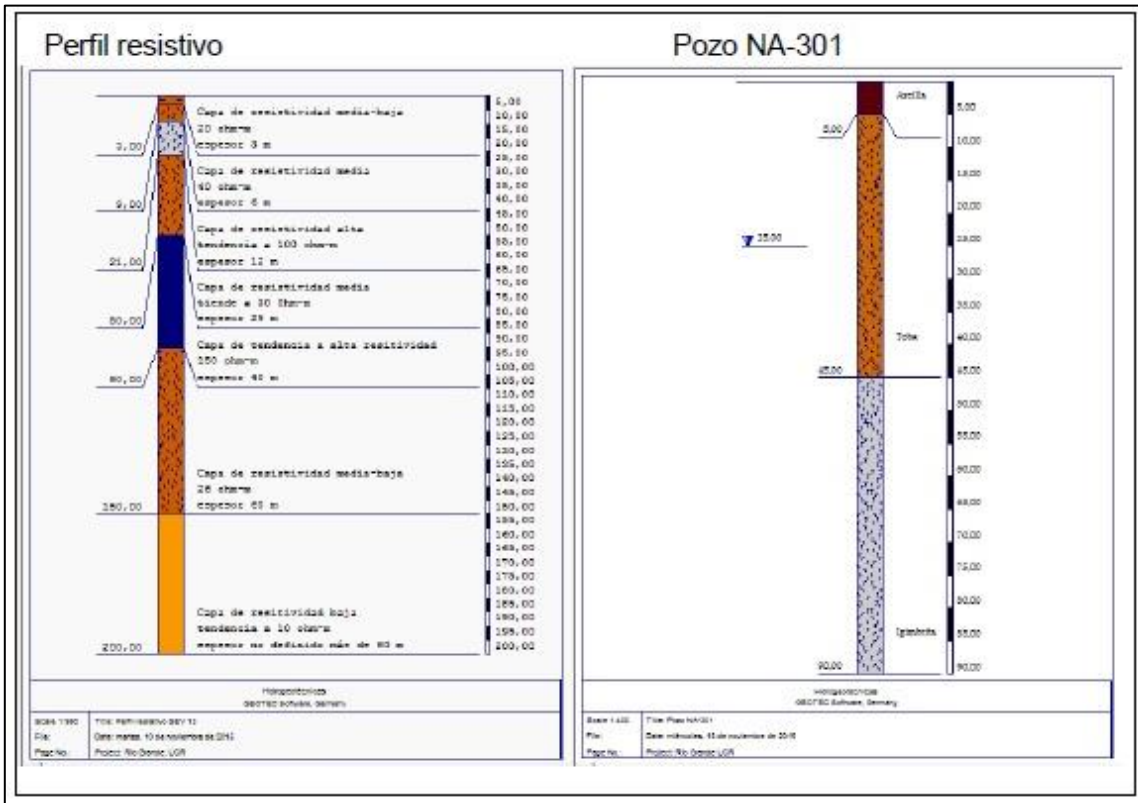


Figura 4.46: Correlación geológica del SEV13

- Interpretación SEV 14

La figura 4.47 muestra la ubicación del sondeo y los pozos cercanos, estos se encuentran en un área cubierta por rocas asignadas como “andesitas y basaltos (Unidad Achiote) con lahares y tobas subordinadas (Paleo Poás)” (α - β Qua), en el Mapa geológico de la Hoja Naranja.

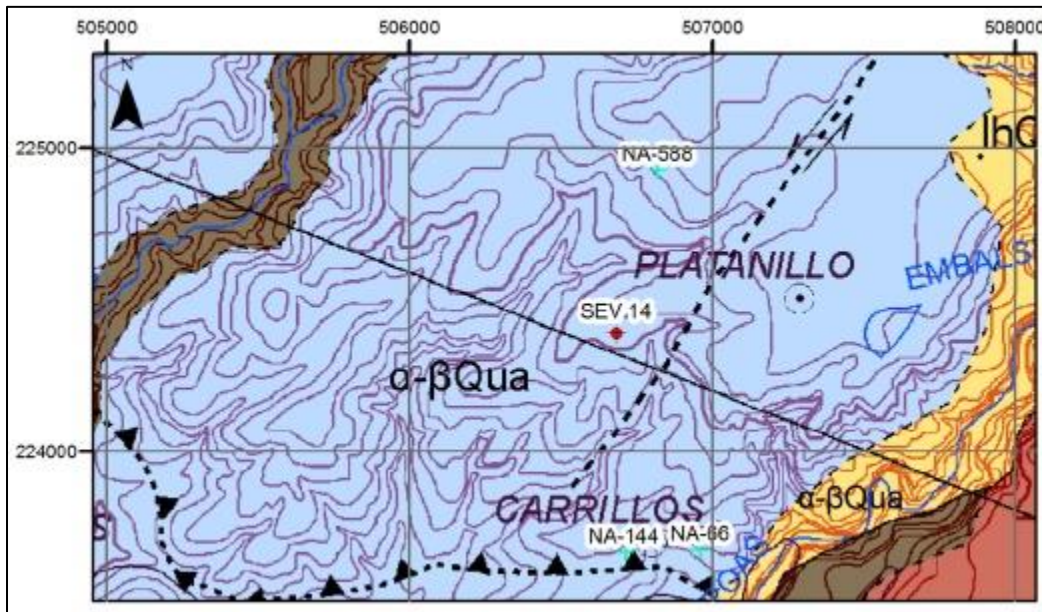


Figura 4.47: Ubicación del SEV 14 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranja (Huapaya & Rojas, 2012).

En términos generales hay una correlación buena entre el sondeo y las descripciones de las perforaciones NA-588 y NA-66 donde aparece una capa de lava que se presenta también en el SEV como capa de alta resistividad (Fig. 4.48 y 4.49). El que la capa correlacionable con la lava aparezca un poco más arriba en el sondeo puede ser consecuencia de la falla que se muestra en el mapa.

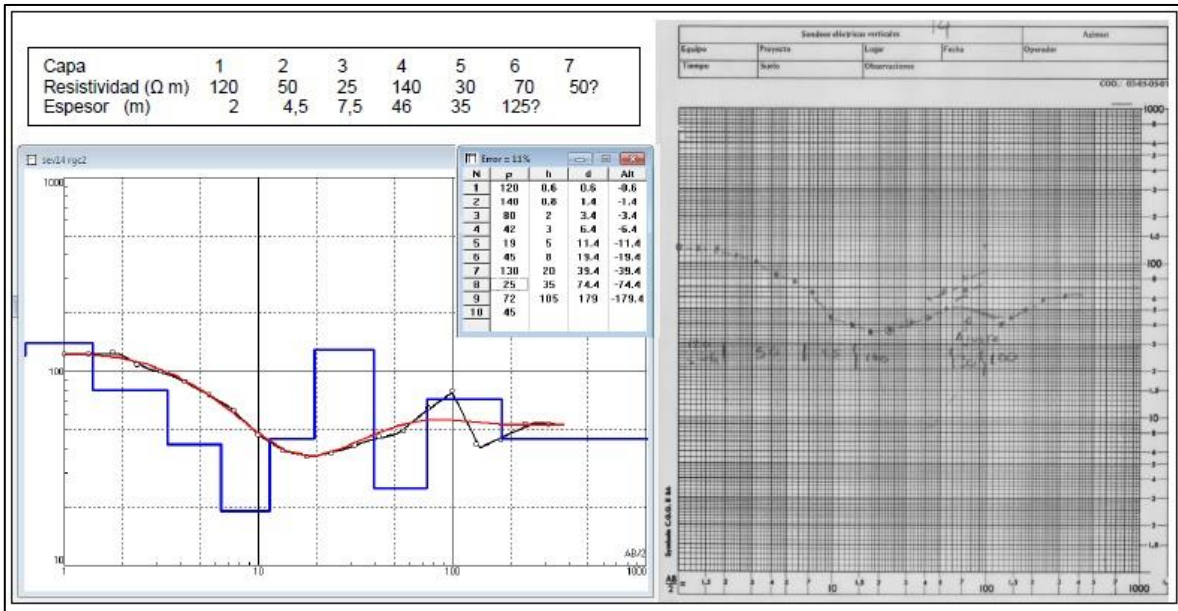


Figura 4.48: Interpretación geoelectrica del SEV 14

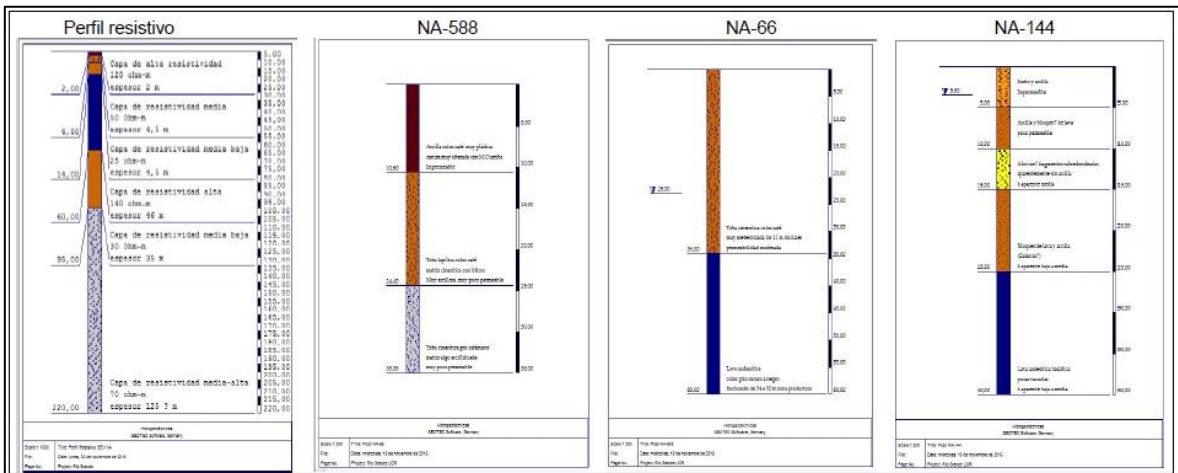


Figura 4.49: Correlación geológica del SEV14

- Interpretación SEV 15

La figura 4.50 muestra la ubicación del sondeo y los pozos cercanos, estos se encuentran en un área cubierta por rocas asignadas como “andesitas y basaltos (Unidad Achote) con lahares y tobas subordinadas (Paleo Poás)” (α - β Qua), en el Mapa geológico de la Hoja Naranja.

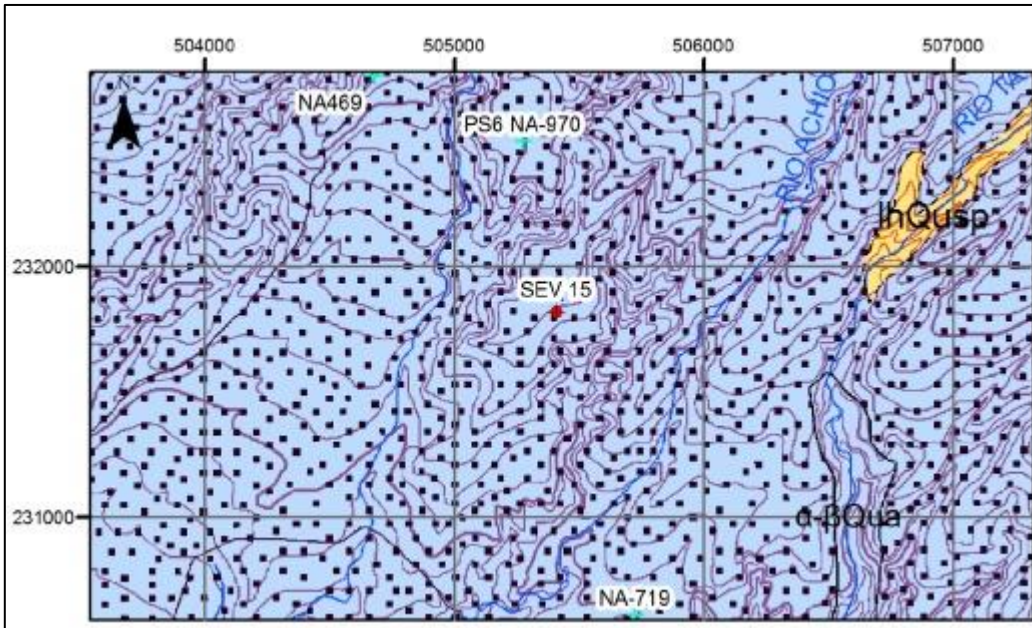


Figura 4.50: Ubicación de sondeo 15, piezómetro PSRG 6 y pozos cercanos (Huapaya & Rojas, 2012).

Las dos descripciones de pozos perforados en las cercanías no correlacionan bien con las altas resistividades en el sondeo que más tienden a correlacionar con brechas y lavas (Fig. 4.51 y 4.52). El piezómetro PSRG 6 (NA-970) perforado recientemente en el marco de la investigación de la subcuenca del Río Grande, se ubica 683 m al noroeste del sitio del sondeo, describe en los 150 metros perforados con saca núcleos, una alternancia de brechas y lavas que sí correlacionan bien con los resultados del sondeo eléctrico vertical. Esto demuestra que posiblemente la descripción de cortes de los pozos está equivocada, si consideramos además que el sector según el mapa geológico corresponde a las lavas de la Unidad Achioté.

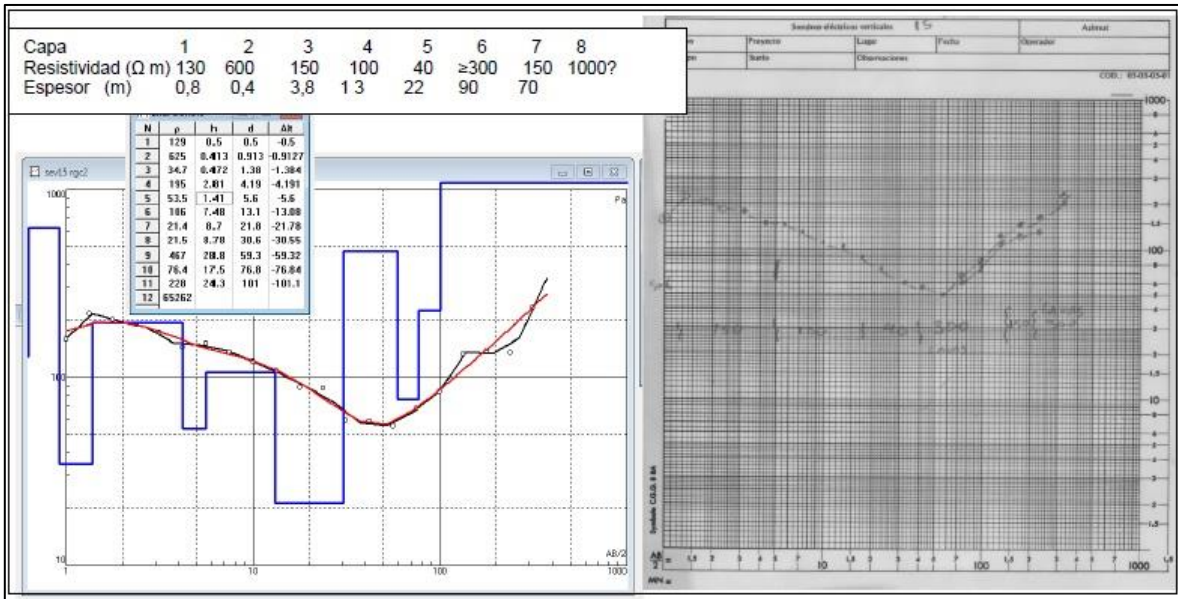


Figura 4.51: Interpretación geoelectrica del SEV 15

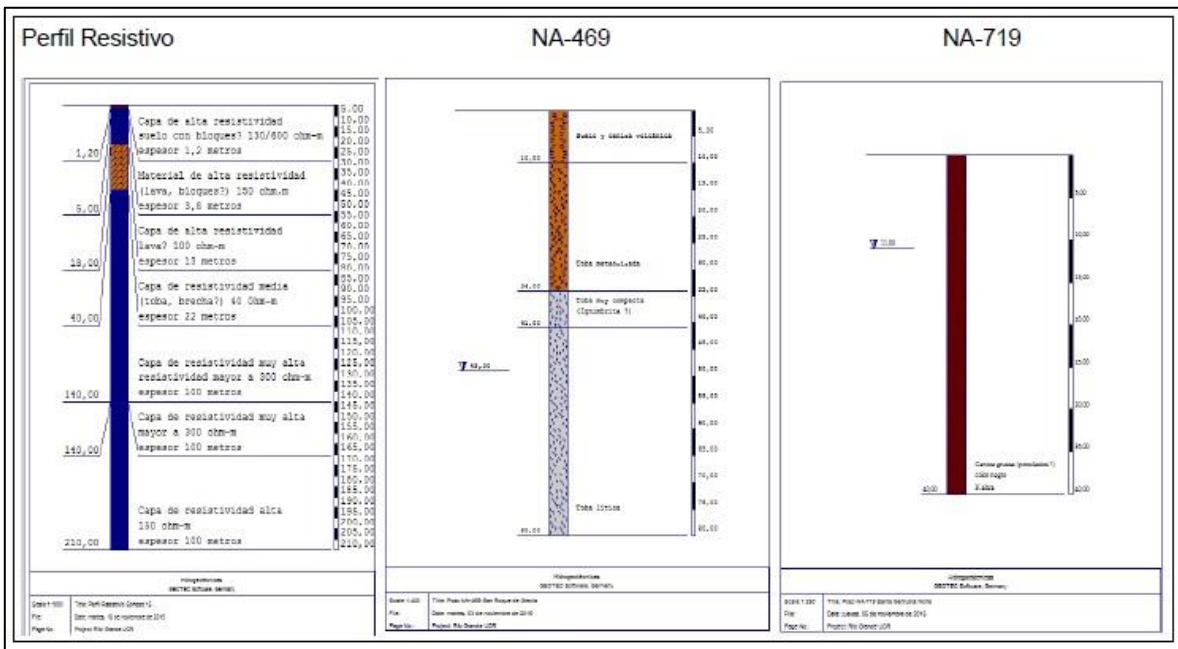


Figura 4.52: Correlación geológica del SEV15

- Interpretación SEV 16

De acuerdo con el Mapa Geológico de la Hoja Naranja el área donde se ubica el sondeo y los pozos NA-232 y NA-927 está cubierta por rocas de la Formación Tiribí (Fig. 4.53).

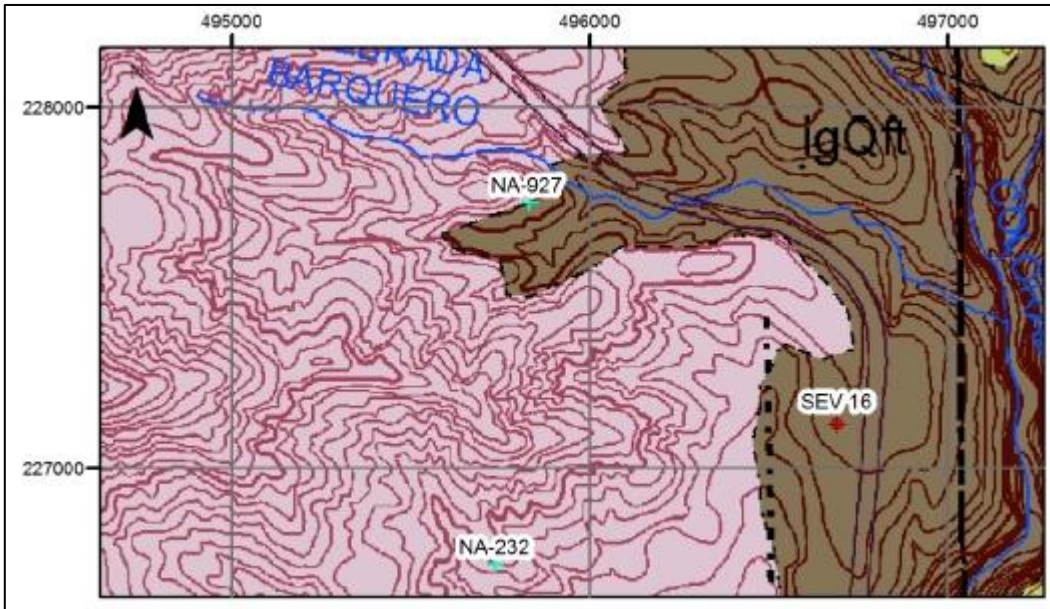


Figura 4.53: Ubicación del SEV 16 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranja (Huapaya & Rojas, 2012).

Se nota una muy buena correlación entre el sondeo y la descripción de la perforación del pozo NA-232 (Fig. 4.54 y 4.55). Como se nota en la figura 4.53 el pozo NA-232 se localiza en terrenos donde afloran rocas del Grupo Aguacate como es también evidente en el campo. También en el campo se nota evidencia de que el sitio del sondeo se localiza en terrenos conformados geológicamente por las mismas litologías del Grupo Aguacate.

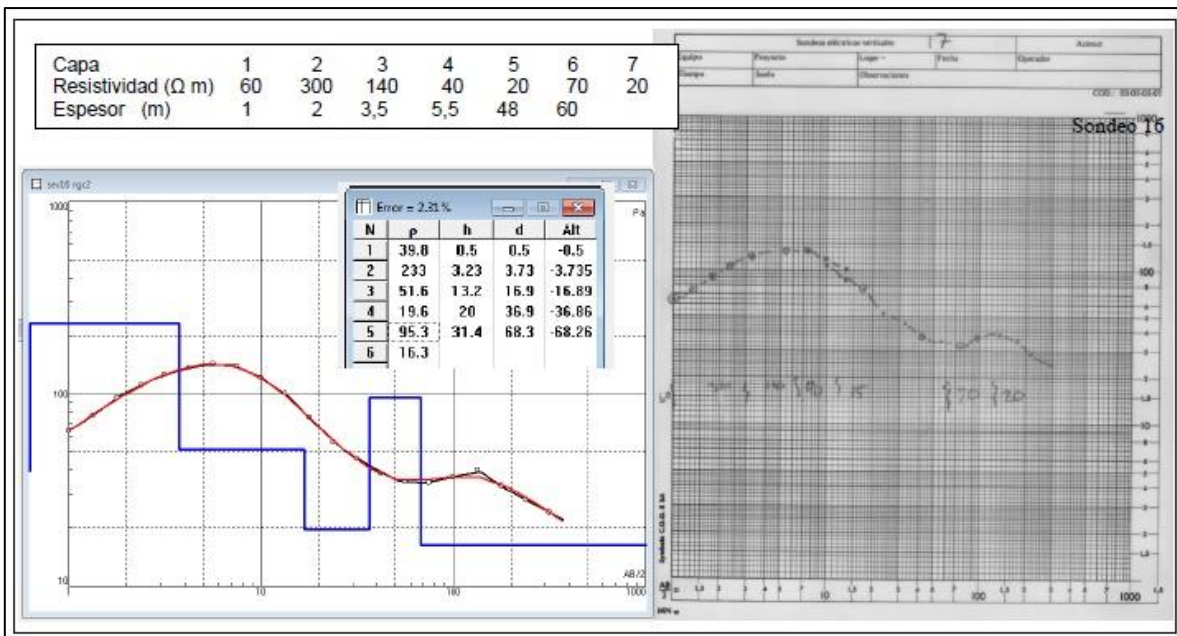


Figura 4.54: Interpretación geoelectrónica del SEV 16

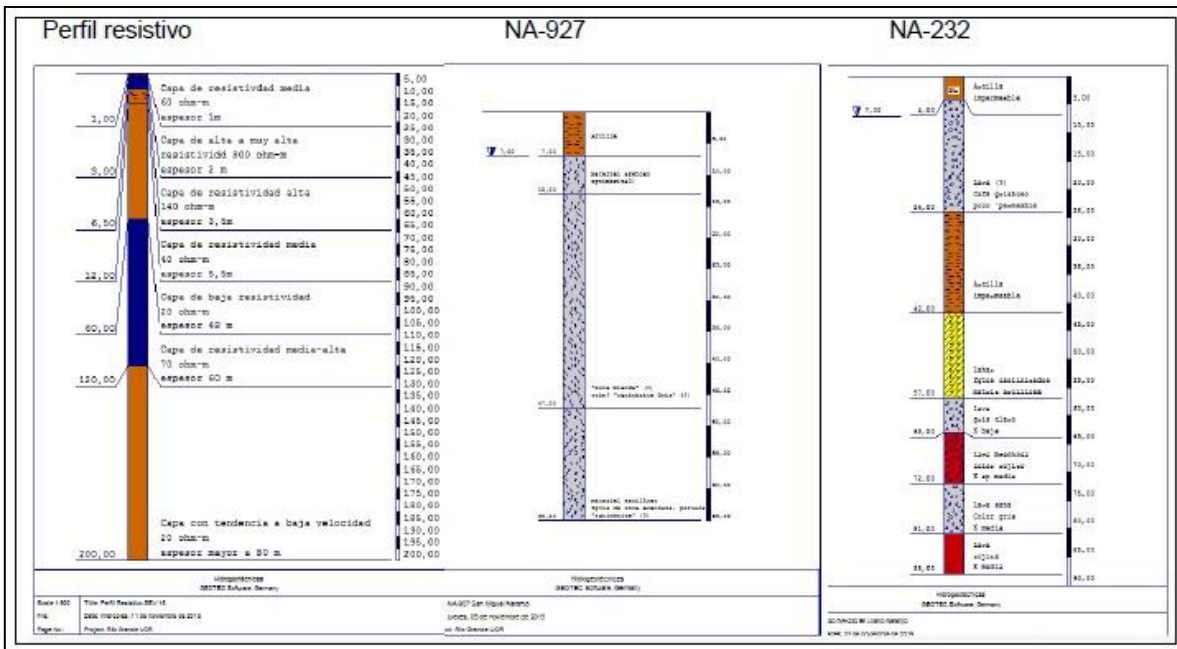


Figura 4.55: Correlación geológica del SEV16

- Interpretación SEV 17

La figura 4.56 muestra la ubicación del sondeo, este se encuentra en un área cubierta por rocas asignadas como “andesitas y basaltos (Unidad Achiote) con lahares y tobas subordinadas (Paleo Poás)” (α - β Qua), en el Mapa geológico de la Hoja Naranja.

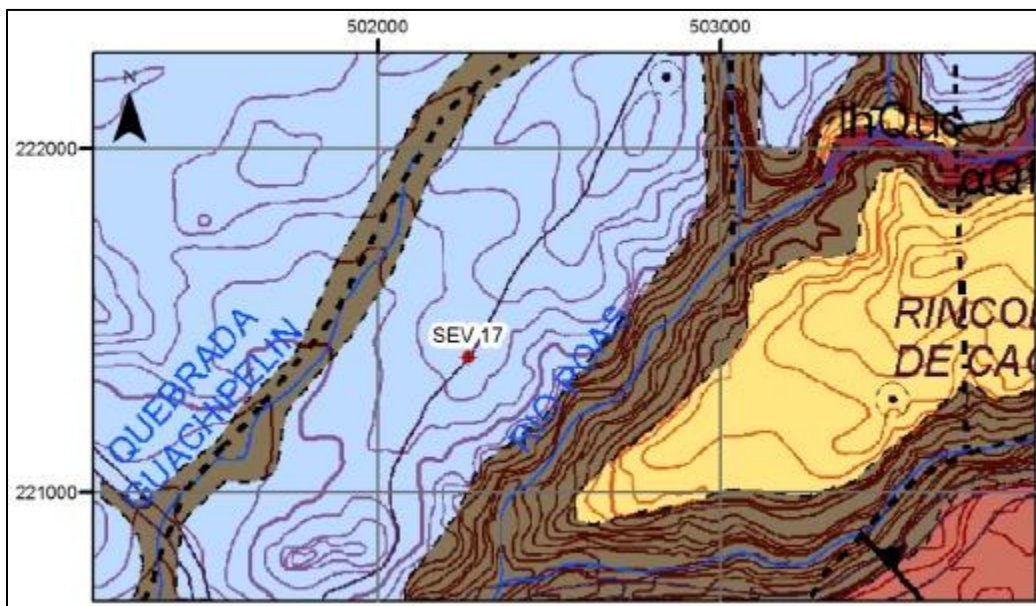


Figura 4.56: Ubicación del SEV 17 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranja (Huapaya & Rojas, 2012).

Como se observa en las figuras 4.57 y 4.58, hay una buena correlación entre los resultados del sondeo y la descripción de la perforación NA-696. En ambos se observa la predominancia de materiales de alta resistividad, claramente correlacionables con las lavas descritas en la perforación del pozo.

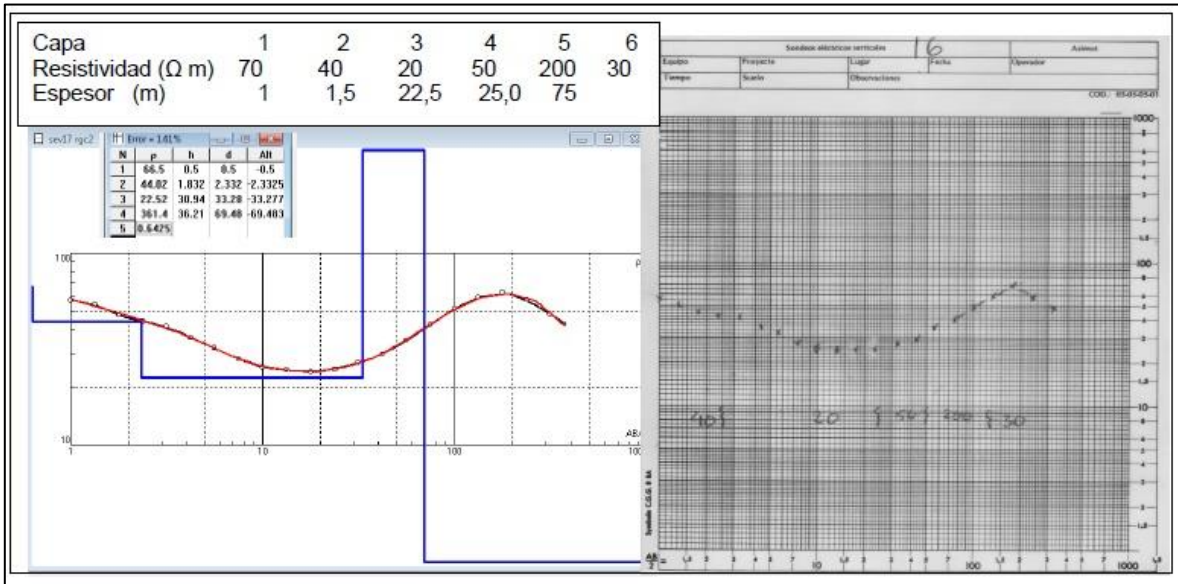


Figura 4.57: Interpretación geoelectrica del SEV 17

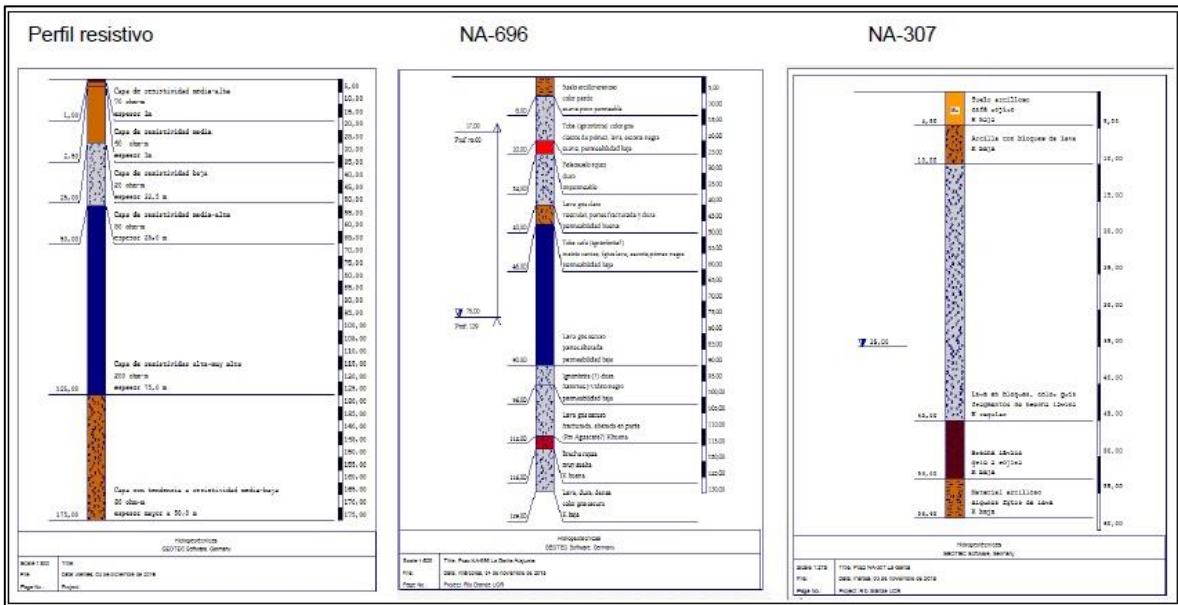


Figura 4.58: Correlación geológica del SEV17

- Interpretación SEV RIOGRAN 1

El sondeo y los pozos cercanos se ubican en un área cubierta por rocas asignadas como “andesitas y basaltos (Unidad Achiote) con lahares y tobas subordinadas (Paleo Poás)”, en el Mapa geológico de la Hoja Naranja (Fig. 4.59).

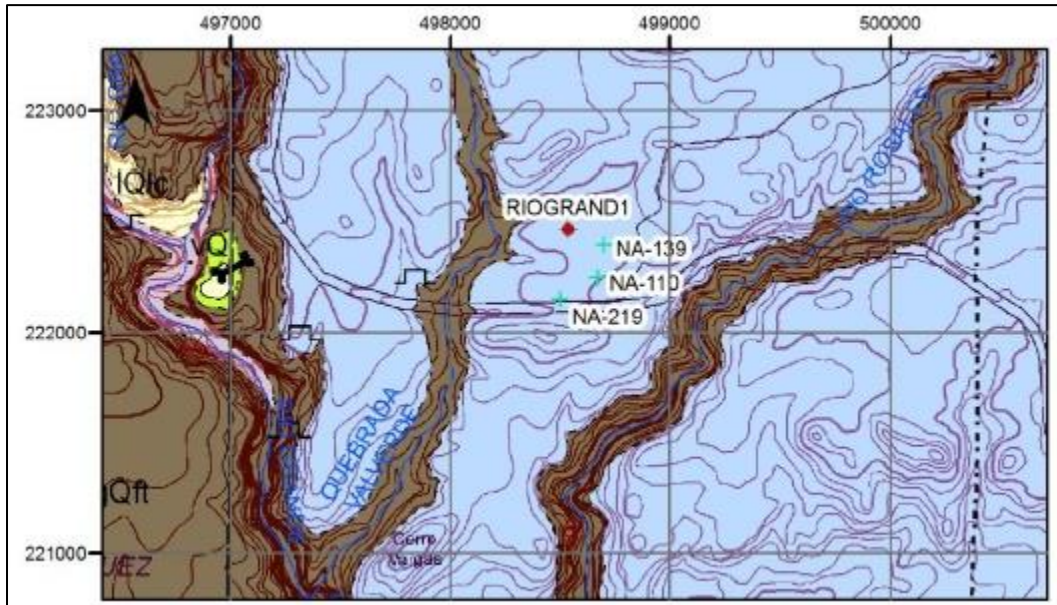


Figura 4.59: Ubicación del SEV RIOGRAN 1 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranja (Huapaya & Rojas, 2012).

El pozo más cercano es el NA-110 a 256,3 m. El nivel acuífero se reporta a 42,75 m indicando que es “piezométrico”. Se puede indicar que el suelo, residual, seco, tiende a un valor de resistividad de 40 Ω m que disminuye a 20-30 Ω m hacia los 30 m. Debajo de los 30-35 m se presenta una tendencia a subir la resistividad a valores de 50 o más, hasta cerca de los 80m (Fig. 4.60). Dado que el nivel reportado se sitúa a los 42,75 m, se puede concluir que el acuífero está localizado en ignimbritas relativamente sanas pero fracturadas (Fig. 4.60). Aunque no es muy claro en la curva, por falta quizás de un punto a $AB/2 = 125$, se da una tendencia a bajar la resistividad hacia el orden de 40 Ω m que incluiría la “toba” o ignimbrita meteorizada que aparece a los 70-86 m (Fig. 4.61). Es claro que la secuencia lávica y brechas lávicas inferiores no se reflejan en los datos de las curvas. Para intentar poder dilucidar esto se requeriría puntos de lectura más seguidos de $AB/2=100$ en adelante y extender las medidas hasta el orden de $AB/2=300$ m por lo menos.

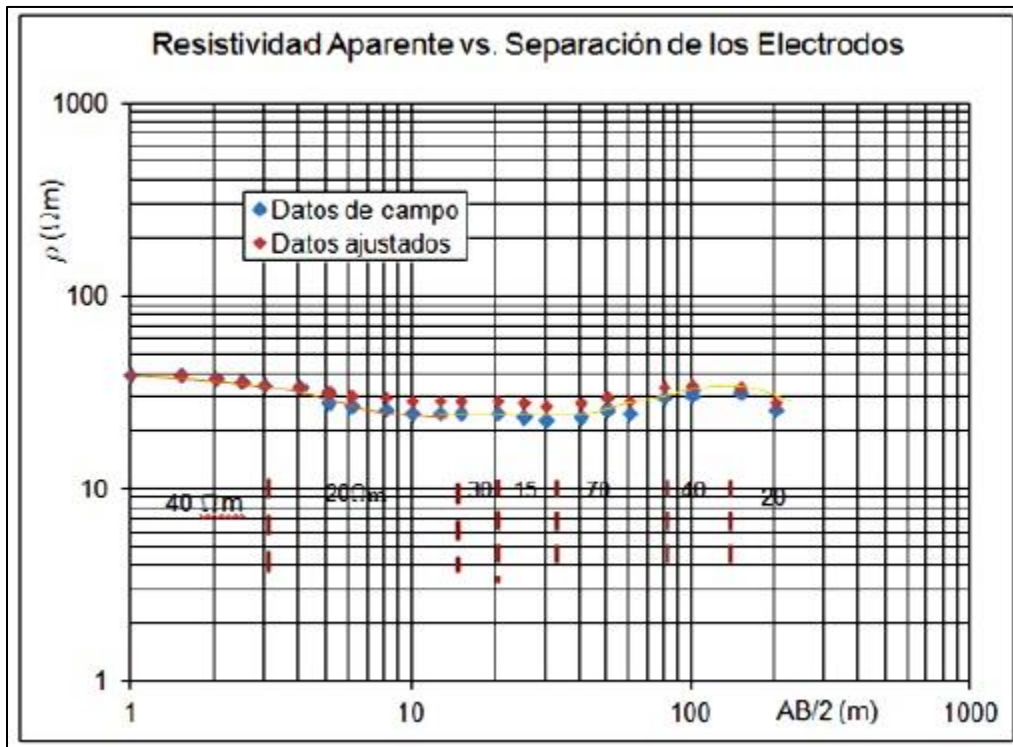


Figura 4.60: Interpretación geoelectrica del SEV RIOGRAN1. “Capas Geofísicas”: 7 Valores en Ωm Línea punteada delimita las capas.

Interpretación Geofísica	Datos litológicos
Capa 1 Resistividad 40 Ωm Espesor 3,2 m	Pozo NA-110
Capa 2 Resistividad 20 Ωm Espesor 14,0 m	0-8m Arcilla, suelo vegetal y ceniza
Capa 3 Resistividad 30 Ωm Espesor 3,0 m	8- 11 Toba, mucha arcilla.Fgto lava, pómez, esc.
Capa 4 Resistividad 15 Ωm Espesor 12,0 m	11-15 Similar, menos meteor. Poca arcilla
Capa 5 Resistividad 50 Ωm Espesor 62,0 m	15-20 Ignimbrita, negra. Fiammes, fgto lávico
Capa 6 Resistividad 40 Ωm Espesor 45,0 m	20-58 “Toba” con sectores ignimbriticos. K _{ap} alta
Capa 7 Resistividad 20 Ωm Espesor indefinido	58-70 Mat. Volc. Fgto toba, lava e ignimb. K _{ap} alta
	70-86 Toba met, fgto lava, vidrio, fldsp. K _{ap} baja
	86-99 Lava, gris densa, no fracturad. K _{ap} baja
	99-136 Brecha gris a rojo.Muy fract de 116-130

Figura 4.61: Correlación geológica del SEV RIOGRAN1

- Interpretación SEV RIOGRAN 2

De acuerdo con el Mapa Geológico de la Hoja Naranja el área donde se ubica el sondeo y el pozo NA-785 está cubierta por rocas descritas como “Andesitas hasta basaltos, con diques y brechas subordinadas (Grupo Aguacate)” en la leyenda del

mapa, mientras que el pozo NA-855 se encuentra al noreste del sondeo, en un área cubierta por rocas de la Formación Tiribí (Fig. 4.62).

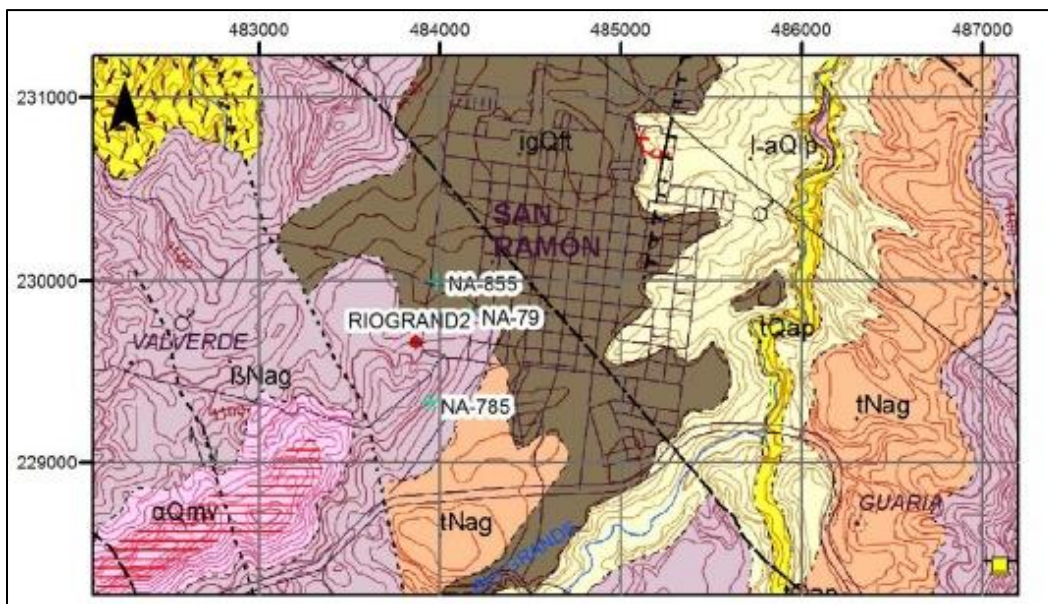


Figura 4.62: Ubicación del SEV RIOGRAN 2 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranja (Huapaya & Rojas, 2012).

El pozo NA-855 (353 m NE) y el NA-785 a 338 m al SE tienen descripciones diferentes como se indica en la figura 4.64, lo cual tiene cierta lógica si observamos el mapa geológico (Fig. 4.62). El nivel estático se localiza a 37 m de profundidad en el pozo NA-855, dentro de la “toba con cristales pequeños y fragmentos líticos”. En el pozo NA-785, el nivel se reporta a 35m dentro de lo que se describe como “lava andesítica afanítica”. Se puede indicar que la descripción litológica de los pozos es muy simplificada y éste se localiza en el sector donde aflora la Formación Flujos Piroclásticos Indiferenciados (Fajardo, 1994; Ramírez, 1995), o Formación Tiribí (igQft) en el Mapa Geológico de la Hoja Naranja. Con base a lo anterior y a la descripción de la perforaciones, se puede indicar que este sondeo refleja condiciones muy particulares, que pueden resumirse como sigue: existe un suelo areno limoso de 1 a 1,5 m de espesor a lo cual siguen capas tobáceas o ignimbríticas con resistividades de 40 a 80 Ω m, con un espesor conjunto de unos 18 metros. Por debajo de los 20 metros aparece una toba (o lava muy alterada?) Fm Grifo Alto, con espesor de unos 20 metros y resistividad de 30 Ω m. Por debajo de esto, la alteración de los materiales aumenta con el correspondiente descenso de la resistividad, bajando a 20 Ω m hasta los 105 metros de profundidad aproximadamente. Por debajo de lo anterior hay una posible capa más arcillosa con resistividad que tiende a 10 Ω m que podría ser resultado de alteración hidrotermal de los materiales de la Formación Grifo Alto (Figs. 4.63 y 4.64).

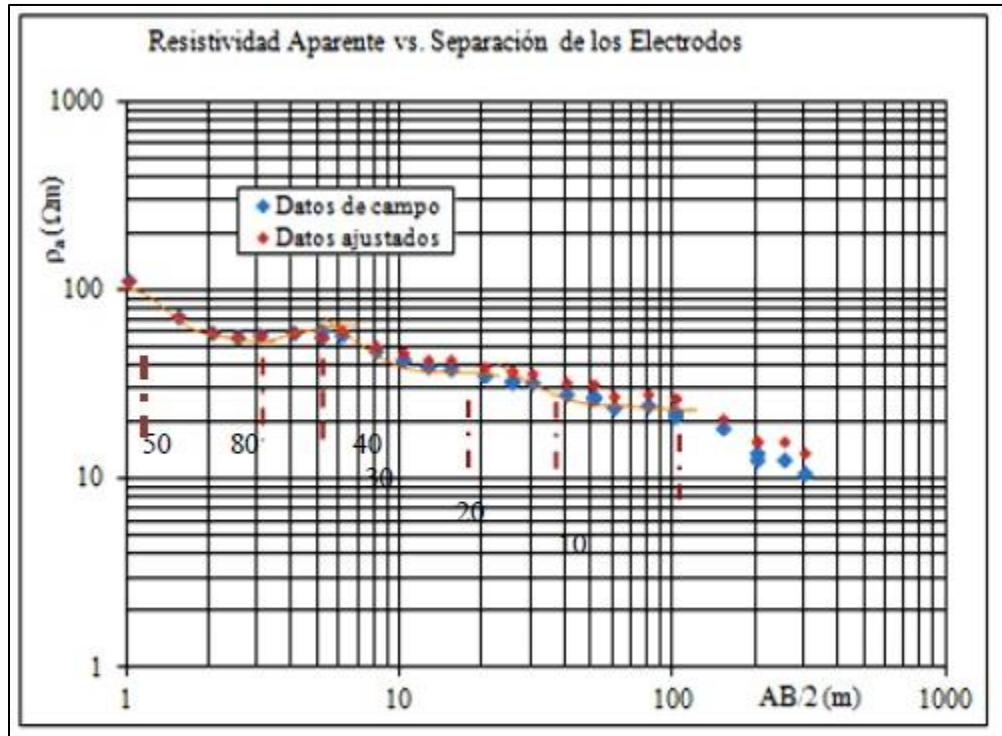


Figura 4.63: Interpretación geoelectrica del SEV RIOGRAN2

Interpretación Geofísica	Datos litológicos
Capa 1 Resistividad 100Ωm Espesor 1,2 m	Pozo NA-855 (353 m NE)
Capa 2 Resistividad 50Ωm Espesor 1,8 m	0-10 Toba fina con arcilla?
Capa 3 Resistividad 80Ωm Espesor 2,0 m	10-100 Toba con cristales y frgtoslíticos peq.
Capa 4 Resistividad 40Ωm Espesor 12,0 m	100-127 Toba arenosa gruesa
Capa 5 Resistividad 30Ωm Espesor 20,0 m	Pozo NA-785 (338 m SE)
Capa 6 Resistividad 20Ωm Espesor 50,0 m	0-18 Suelo, ceniza fina a media, café claro
Capa 7 Resistividad 10Ωm Esp. no definido	18-72 Lava andesítica, afanítica

Figura 4.64: Correlación geológica del SEV RIOGRAN2. Valores en Ωm Línea punteada delimita las capas.

- Interpretación SEV RIOGRAN 3

La figura 4.65 muestra que la ubicación del sondeo y el pozo NA-398 es una área cubierta por rocas asignadas a la Formación Tiribi, descrita como “ignimbrita gris, con escoria, vidrio volcánico, líticos lávicos y pocas pómez” en la leyenda que acompaña dicho mapa, mientras que el pozo NA-529 se encuentra en un área cubierta por el Lacustre de Palmares.

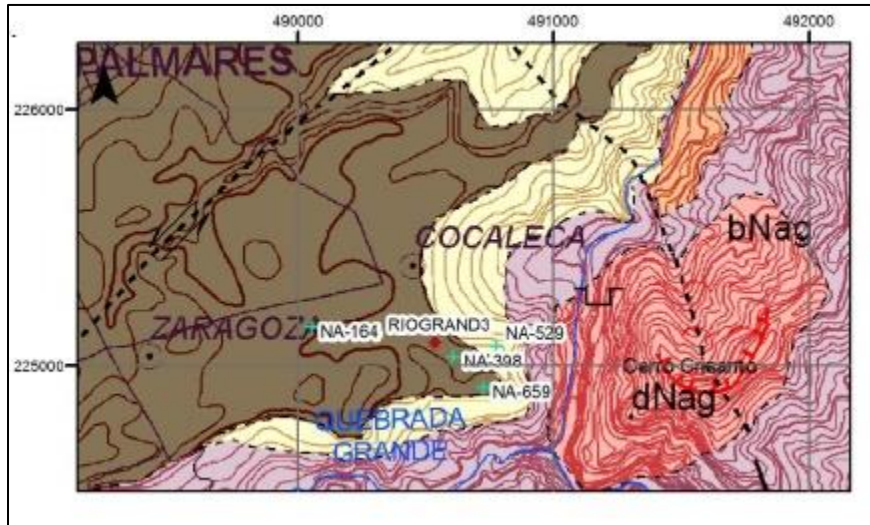


Figura 4.65: Ubicación del SEV RIOGRAN 3 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranja (Huapaya & Rojas, 2012).

El pozo más cercano (NA-398) se ubica a 92 metros del sondeo. De acuerdo a los datos anteriores la interpretación es así:

Suelo arcilloso de 2 m de espesor, a lo cual seguirían dos capas con tendencia a valores resistivos de 80 a 100 Ω m hasta los 18 a 20 m de profundidad que podría ser parte de la toba gris amarillento a blanco (Fig. 4.66). El nivel estático se reporta a 8 m de profundidad aunque se señala que el acuífero principal está en las lavas, con aporte “significativo” de la toba. Por su parte, en el pozo NA-529 a 238,54 m del sondeo, el nivel se reporta a 37 m de profundidad. Luego la capa 4 (35 Ω m) sería quizás una toba que llegaría hasta los 28 m de profundidad. Hasta este punto se da una correlación relativa del sondeo con los datos de las perforaciones, pues si interpretamos una capa 5 de 25 Ω m que llegaría a la profundidad de 42 metros, las perforaciones indican una capa de arcilla que no se asimila mucho con el valor resistivo indicado. El valor de 6 Ω m sí se asimila a la arcilla pero el espesor posible en el sondeo eléctrico duplica el reportado en los pozos, además está desfasado. Es claro que las lavas o ignimbritas donde se ubica el acuífero no se reflejan en el sondeo (Fig. 4.67).

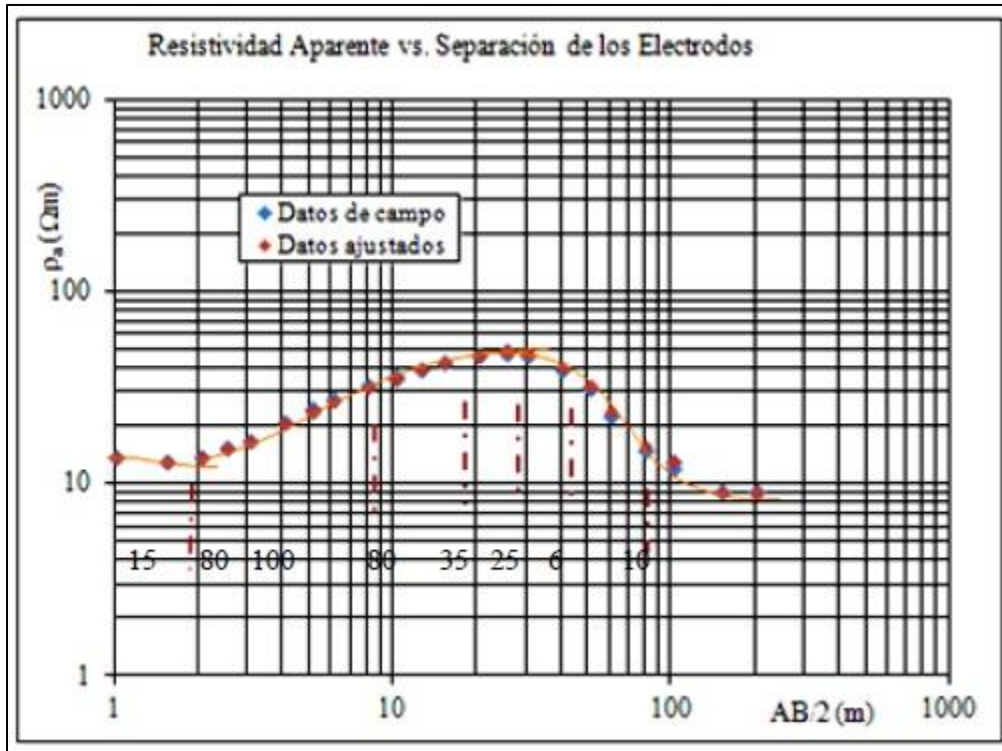


Figura 4.66: Interpretación geoelectrica del SEV RIOGRAN3. Valores en Ωm Línea punteada delimita las capas.

<i>Interpretación Geofísica</i>	
Capa 1 Resistividad 15 Ωm Espesor 1,8 m	
Capa 2 Resistividad 80-100 Espesor 6,7 m	
Capa 3 Resistividad 80 Ωm Espesor 9,5 m	
Capa 4 Resistividad 35 Ωm Espesor 10,0 m	
Capa 5 Resistividad 25 Ωm Espesor 14,0 m	
Capa 6 Resistividad 6 Ωm Espesor 35,0 m	
Capa 7 Resistividad 10 Ωm Esp. no definido	
<i>Datos litológicos</i>	
Pozo NA-398	Pozo NA-529
0-18 Arcilla, café muy plástica	0-16 Arcilla, café claro, muy plástica
18-27 Toba gris amarillento a blanco, pómez	16-28 Toba, gris amarillento a blancuzco
27-44 Arcilla verdosa, muy plástica	28-45 Arcilla gris verdoso, plástica, impem.
44-68 Lava, gris oscuro, andesítica	45-74 Lava gris oscuro a negra, sana, zona prod.
68-75 Lava color negro, muy dura, sana.	74-76 Toba blanco amarillento, con pómez
	76-90 Lava gris oscuro a negro fracturada.

Figura 4.67: Correlación geológica del SEV RIOGRAN3.

- Interpretación SEV RIOGRAN 4

El sondeo y el pozo NA-408 se ubican en rocas descritas como “Andesitas hasta basaltos, con diques y brechas subordinadas (Grupo Aguacate)” en el Mapa Geológico de Hoja Río Grande (Fig. 4.68).

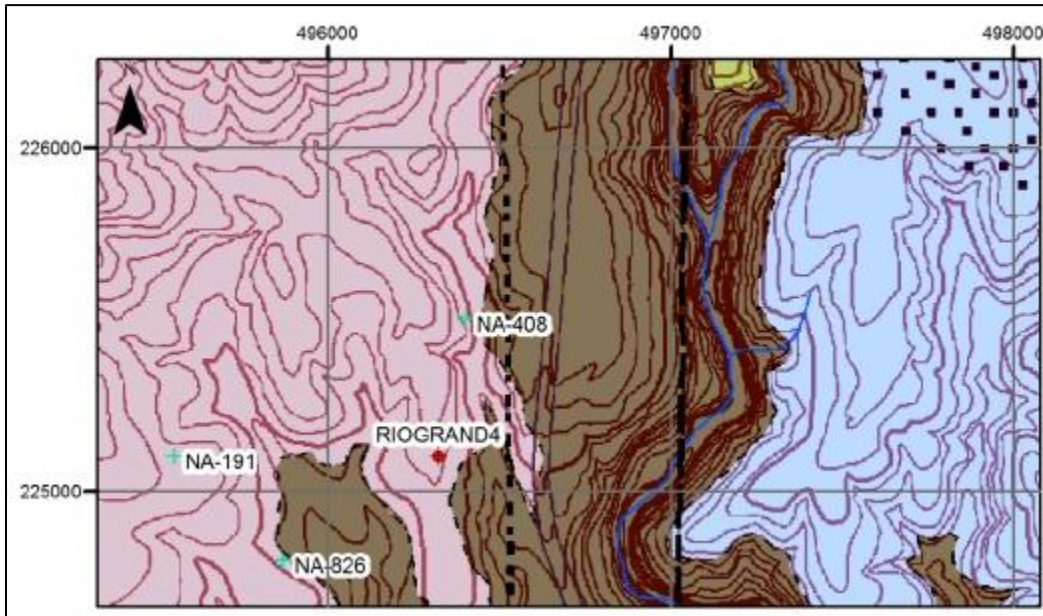


Figura 4.68: Ubicación del SEV RIOGRAN 4 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranja (Huapaya & Rojas, 2012).

El pozo NA-408 es el más cercano, ubicado a 400,5 m de distancia. El nivel estático se localiza a 37 m de profundidad, en la toba fracturada. Se puede indicar que la descripción litológica del pozo es muy simplificada y resumida en los primeros 37 m. Es más lógico pensar que exista un suelo residual de 3 m de espesor y que luego se presenta un horizonte más arcillificado, de 1,5 m de espesor sobre tobas muy alteradas (Fm. Grifo Alto) (Fig. 4.69). Estas tobas están más sanas y además fracturadas por debajo de los 37 m donde se reporta el nivel estático. La toba que contiene el acuífero tiene un espesor importante, llegando a los 160 metros o más. Por debajo de 160-180 metros aparece una zona más alterada, arcillificada que podría ser la base del acuífero (Fig. 4.70).

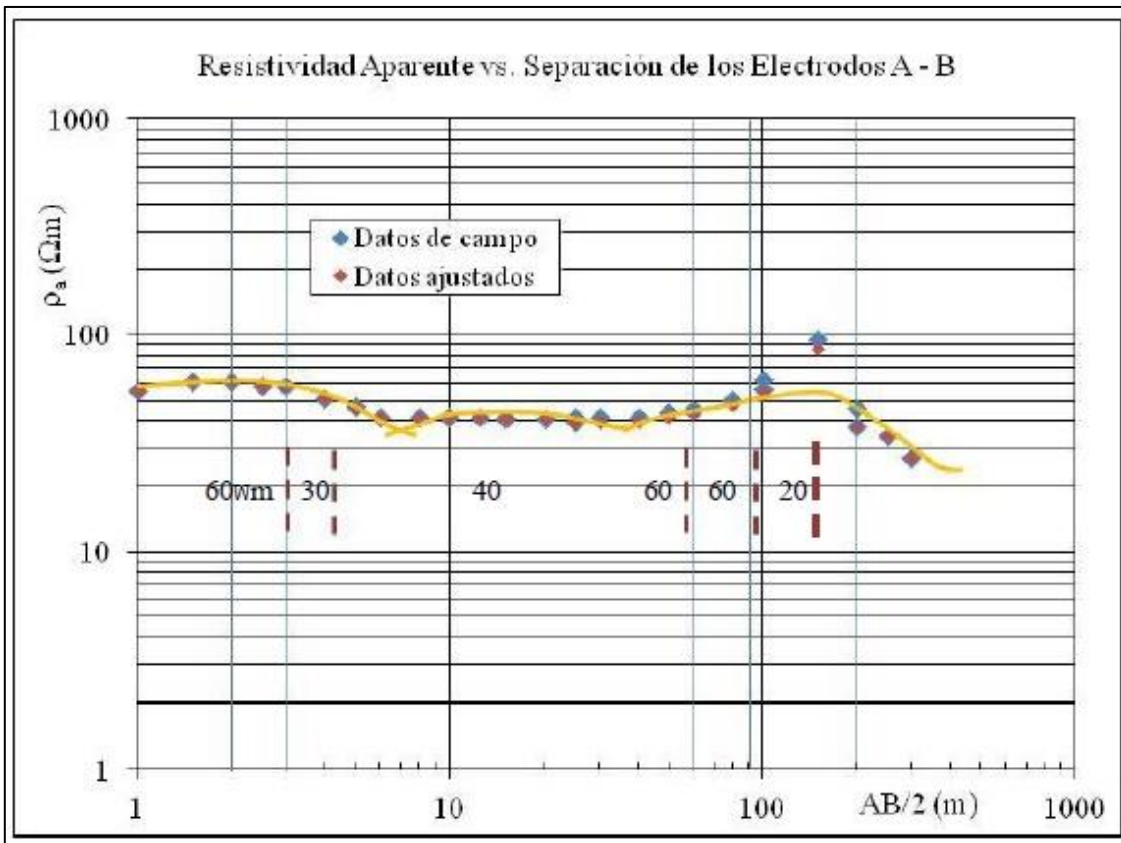


Figura 4.69: Interpretación geoelectrica del SEV RIOGRAN4. Valores en Ωm Línea punteada delimita las capas

Interpretación Geofísica	Datos litológicos
Capa 1 Resistividad 60Wm Espesor 3,0 m	Pozo NA-408
Capa 2 Resistividad 30Wm Espesor 1,5 m	0-37 Arcilla, intercalada con material arenoso
Capa 3 Resistividad 40Wm Espesor 53,0 m	37-54 Toba fracturada
Capa 4 Resistividad 60Wm Espesor 97,0 m	54-58 Similar, poco fracturada. Fragn. lava
Capa 5 Resistividad 20Wm Espesor Indefinido	58-62 Lava? Basáltica, fracturada
	62-72 Toba fracturada
	72-110 Toba fracturada con fragm. de lava

Figura 4.70: Correlación geológica del SEV RIOGRAN4.

- Interpretación SEV RIOGRAN 5

El sondeo 5 se localiza contiguo a la Ruta 1 en Buenos Aires de Palmares en un sector donde afloran rocas de la Fm Tiribí (Flujos piroclásticos indiferenciados según Fajardo). El pozo más cercano con datos litológicos es el NA-753, cercano al NA-766 (Fig 4.71).

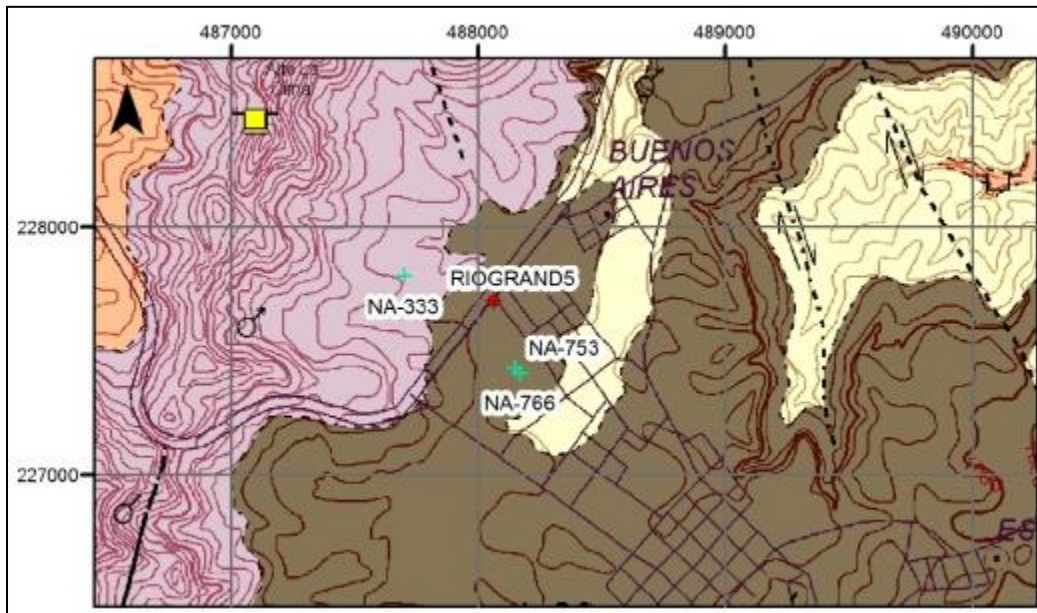


Figura 4.71: Ubicación del SEV RIOGRAN 5 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranja (Huapaya & Rojas, 2012).

De los datos anteriores se puede deducir que los primeros 10 m corresponden a suelo y sedimentos lacustres muy alterados, bajo lo cual aparecen las ignimbritas de la Fm. Tiribí que se prolongan hasta más de 120 m de profundidad. Aunque una de las perforaciones menciona lava, por los valores resistivos registrados no aparecen en el sondeo. Lastimosamente los datos del sondeo por debajo de los 125 m son confusos y no permiten la interpretación por debajo de los 120 m (Fig. 4.72 y 4.73).

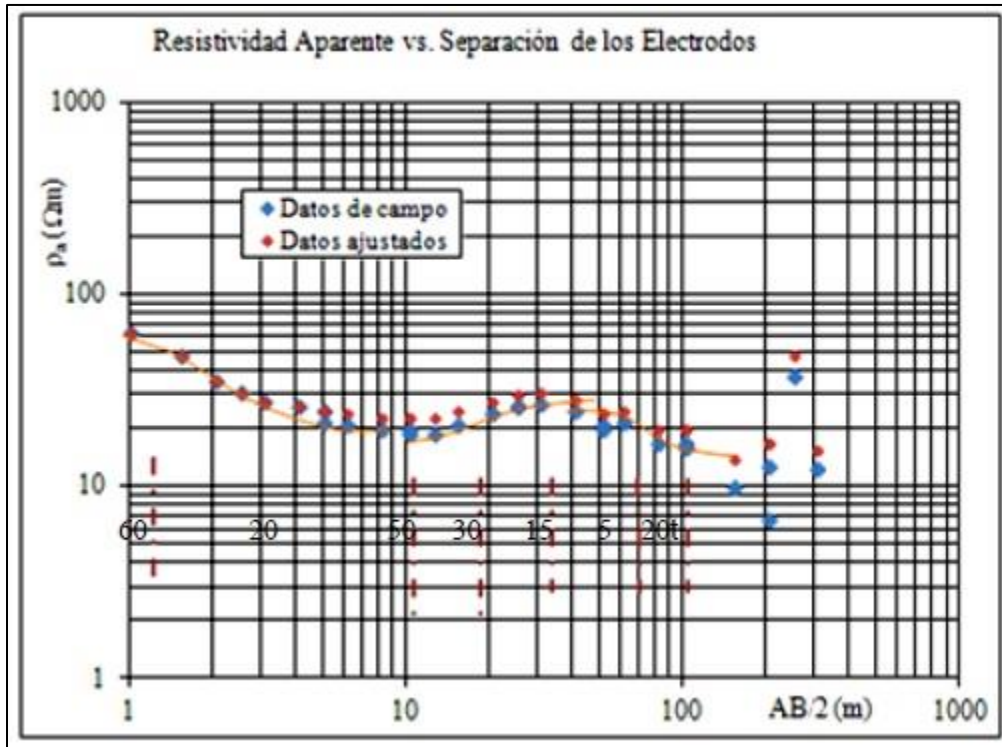


Figura 4.72: Interpretación geoelectrica del SEV RIOGRAN5. Valores en Ωm Línea punteada delimita las capas

Interpretación Geofísica	
Capa 1 Resistividad 65 Ωm Espesor 1, 2 m	
Capa 2 Resistividad 20-15 Ωm Espesor 9,8 m	
Capa 3 Resistividad 50 Ωm Espesor 8,0 m	
Capa 4 Resistividad 30 Ωm Espesor 15,0 m	
Capa 5 Resistividad 15 Ωm Espesor 46,0 m	
Capa 6 Resistividad 5 Ωm Espesor 20,0 m	
Pozo NA-753	Pozo NA- 766
0-5 m Suelo arcilloso	0-30 m Arcilla café claro imperm.
5-11m Arcilla plástica café claro	30-57 m Toba, fgts líticos y pómez, matriz café rojizo
11-24 Toba arenosa, fina, negra	57-63 Toba arenosa, gris claro, suave
24-45 Toba arcillosa café claro	63-64 m Arcilla gris, plástica
45-55 Toba compacta café claro	
55-62 Lava, cristales fldsp	

Figura 4.73: Correlación geológica del SEV RIOGRAN5.

- Interpretación RIOGRAND 6

El sondeo se ubican en un área cubierta por rocas asignadas como “andesitas y basaltos (Unidad Achiote) con lahares y tobas subordinadas (Paleo Poás)”, en el Mapa geológico de la Hoja Naranjo (Fig. 4.74), no existe ningún pozo cercano al sondeo que pueda utilizarse para correlación geológica.

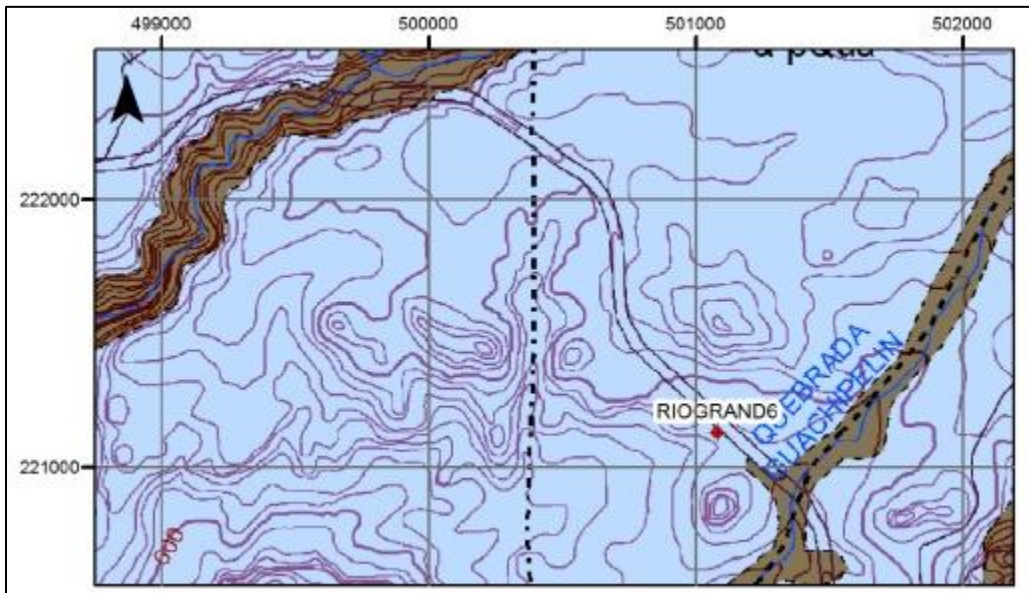


Figura 4.74: Ubicación del SEV RIOGRAN 6 en el mapa geológico de la Hoja Naranjo (Huapaya & Rojas, 2012).

Se intentará establecer la correlación geológica del sondeo con base a la ubicación en el Mapa Geológico. En este contexto, el sondeo se ubica en el sector dominado por rocas agrupadas en $\alpha\beta Qua$, las unidades Achiote (andesitas y basaltos) con lahares y tobas subordinadas (PaleoPoás), en forma similar al Sondeo 1 que sin embargo tiene una curva resistiva diferente en amplitud aunque en cierto modo con tendencias morfológicas similares.

Se podría decir entonces que el sondeo refleja la presencia de un suelo poco o nada arcilloso de unos 2 metros de espesor, debajo de lo cual aparece lo que podría ser material limo arenoso en los primeros metros y que se vuelve muy arcilloso hacia los 9 metros de profundidad. Posteriormente aparece lahar relativamente fino o toba hasta los 39 metros de profundidad. Luego de esto aparece lo que podría ser lava fracturada o brecha (Unidad Achiote), que contendría el nivel acuífero alrededor de los 45 metros de profundidad. La capa de lava o brecha tiene un espesor del orden de 50 metros, por debajo de la cual aparece lo que podría ser la ignimbrita (Tiribí?) que de acuerdo a los datos que presenta el mapa geológico en el cauce de la Quebrada Guachipelín a

unos 300 metros al este del sondeo. La tendencia a bajar la resistividad determina luego valores del orden de 30-20 Ωm , pero faltan puntos de levantamiento para confirmarlo (Figs. 4.75 y 4.76).

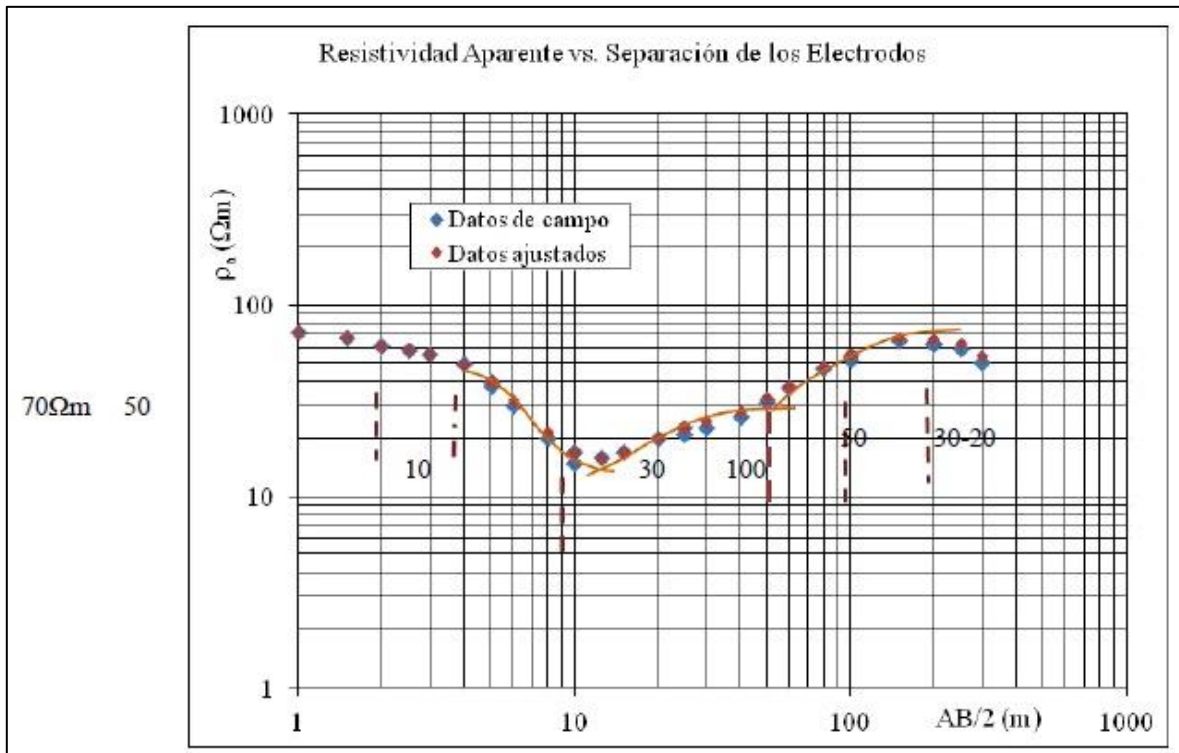


Figura 4.75: Interpretación geoelectrica del SEV RIOGRAND6. Valores en Ωm Línea punteada delimita las capas

Interpretación Geofísica		
Capa 1	Resistividad 70 Ωm	Espesor 2,0 m
Capa 2	Resistividad 50 Ωm	Espesor 2,0 m
Capa 3	Resistividad 10 Ωm	Espesor 5,0 m
Capa 4	Resistividad 30 Ωm	Espesor 30,0 m
Capa 5	Resistividad 100 Ωm	Espesor 50,0m
Capa 6	Resistividad 50 Ωm	Espesor 45,0 m
Capa7	Resistividad 30 Ωm	Espesor No definido

Figura 4.76: Correlación geológica del SEV RIOGRAND6.

- Interpretación SEV RIOGRAN 7

El sondeo y el pozo NA-848 se ubican en un área donde afloran rocas descritas como “Depósitos Lacustres con pómez y/o diatomita (Lacustre de Palmares)” en el Mapa Geológico de la Hoja Naranja (Fig. 4.77).

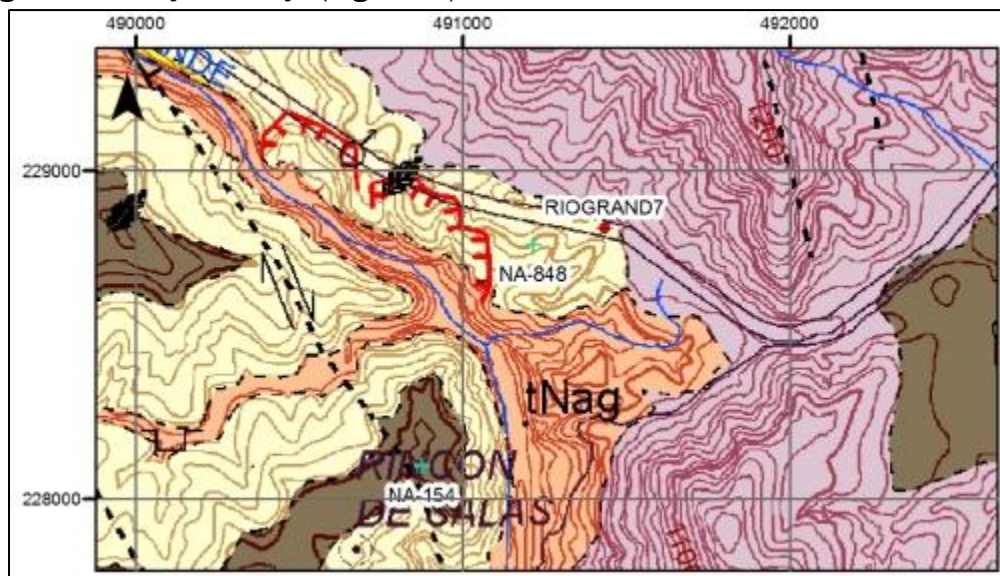


Figura 4.77: Ubicación del SEV RIOGRAN 7 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranja (Huapaya & Rojas, 2012).

El pozo NA-848 es el más cercano, ubicado a 225,09 m de distancia. El nivel estático se localiza a 55 m de profundidad, en la “toba arenosa”. Se puede indicar que la descripción litológica del pozo es muy simplificada. Esta formación la constituye una secuencia estratificada de capas limosas, arenosas y arcillosas con diatomáceas y/o pómez muy fino, cuya relación estratigráfica con las tobas e ignimbritas de Tiribí no es clara pero que en la leyenda del Mapa Geológico de la Hoja Naranja parecen estar interdigitadas. Con base a lo anterior y a la descripción de la perforación indicada, se puede indicar que los materiales lacustres se presentan con un espesor del orden de 55 metros (48 m según el pozo NA-848) con resistividades entre 20 y 50 Ω m (Fig.4.78), con una posible capa más arcillosa al fondo (10-15 Ω m). Luego de esta secuencia aparecerían las “tobas arenosas café”, descripción que no es muy frecuente para los materiales de la Formación Tiribí aunque como ya se dijo parece subyacer o intercalarse con los materiales lacustres (Fig. 4.79). Falta más extensión en el sondeo para determinar el espesor de las “tobas arenosas” el cual con los datos existentes debe superar los 60 m.

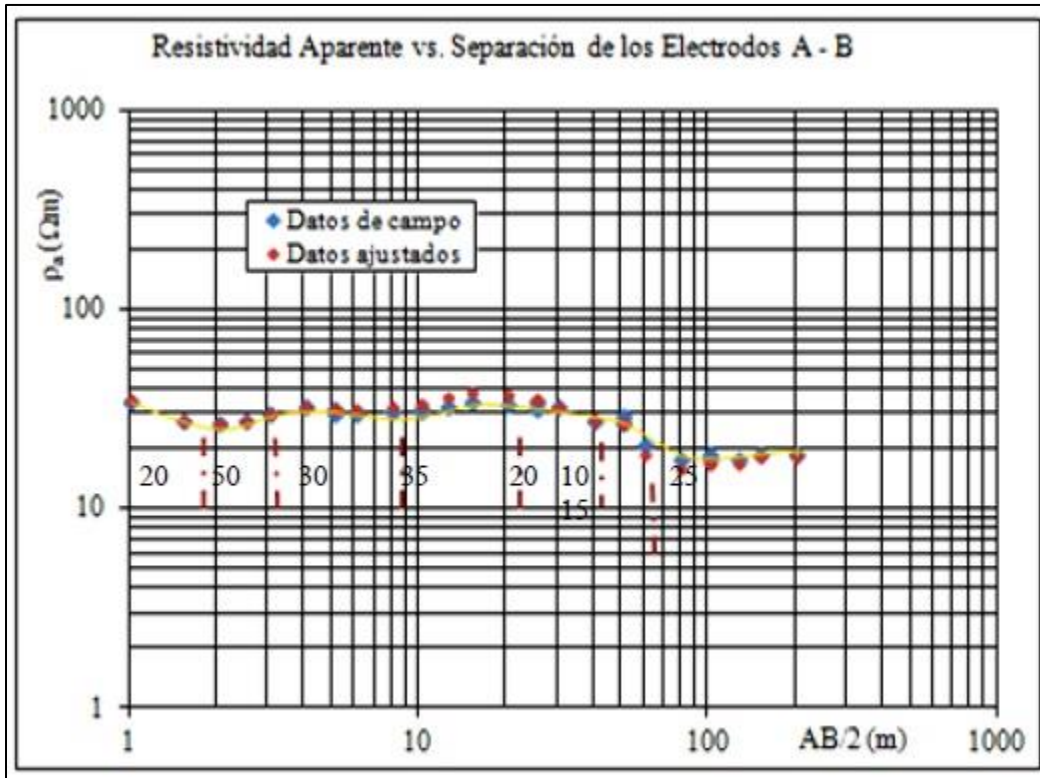


Figura 4.78: Interpretación geoelectrica del SEV RIOGRAN7. Valores en Ωm Línea punteada delimita las capas

Interpretación Geofísica	Datos litológicos
Capa 1 Resistividad $20\Omega m$ Espesor 1,8 m	Pozo NA-848
Capa 2 Resistividad $50\Omega m$ Espesor 1,5 m	0-22 Capas de arcilla plást., color café claro
Capa 3 Resistividad $30\Omega m$ Espesor 6,5 m	22-48 Similar, color café oscuro
Capa 4 Resistividad $35\Omega m$ Espesor 14,0 m	48-74 "Mat. Volcánico tipo toba arenosa", café
Capa 5 Resistividad $20\Omega m$ Espesor 19,0 m	
Capa 6 Resistividad 10-15 Ωm Espesor 22,0 m	
Capa 7 Resistividad $25\Omega m$ Esp. no definido	

Figura 4.79: Correlación geológica del SEV RIOGRAN7.

- Interpretación SEV RIOGRAN 8

La figura 4.80 muestra que la ubicación del sondeo y los pozos cercanos, en un área cubierta por rocas asignadas a la Formación Tiribí en el Mapa Geológico de la Hoja Naranjo.

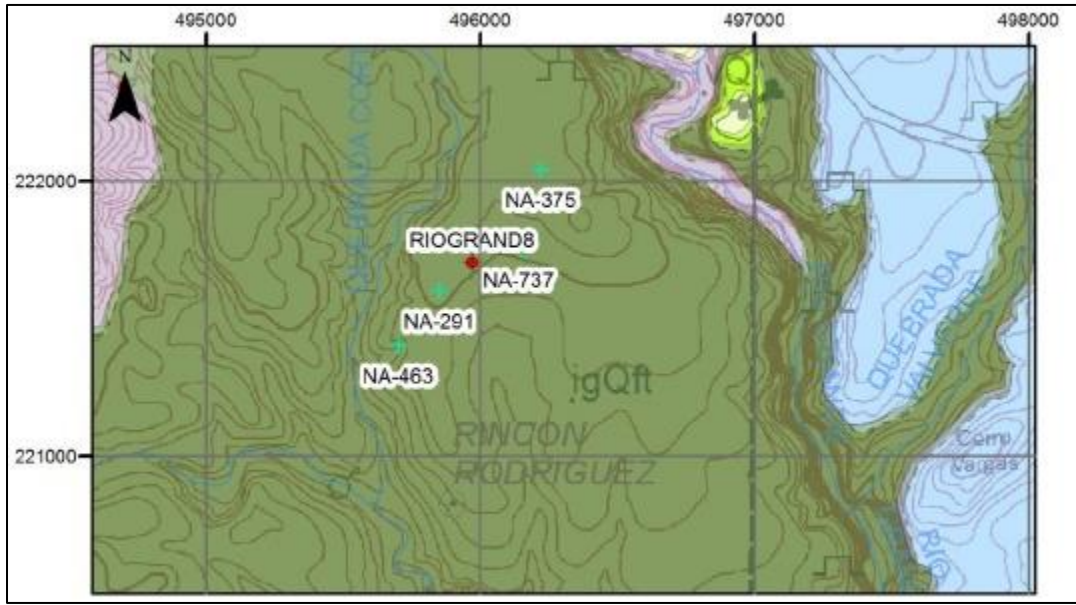


Figura 4.80: Ubicación del SEV RIOGRAN 8 y pozos cercanos en el mapa geológico de la Hoja Naranja (Huapaya & Rojas, 2012).

El pozo más cercano es el NA-291 a 158 m al SO. El NA-737 está a 187 m al NE y el NA-463 se localiza a 400 m al SO. Basados en las descripciones y datos del sondeo se interpreta éste de siguiente forma (Figs. 4.81 y 4.82):

Una capa de suelo residual (seco) que tiende a 100 Ω m, con 1,8 m (2) de espesor seguida por una ignimbrita o toba compacta de unos 15 metros de espesor y resistividad 40 Ω m. La resistividad baja un poco a 30 en la capa siguiente, que podría ser una lava muy meteorizada como se describe en el Pozo NA-463 o bien una ignimbrita más alterada que en el nivel superior. En todo caso la ubicación del sondeo correspondería a litologías de la Fm Grifo Alto y no a Tiribí, como muestra el Mapa de la DGM, según nuestra experiencia de campo. Esta capa según el sondeo puede tener un espesor de unos 55 metros. De acuerdo con los datos de los pozos 737 y 463, el nivel estático se ubica entre 45 y 48 metros de profundidad, lo que ubicaría el acuífero en esta capa. Por deficiencia de puntos no se puede definir más capas por debajo de los 100 metros, por lo que sería recomendable repetirlo o realizar una imagen resistiva en ese sitio o cerca de él.

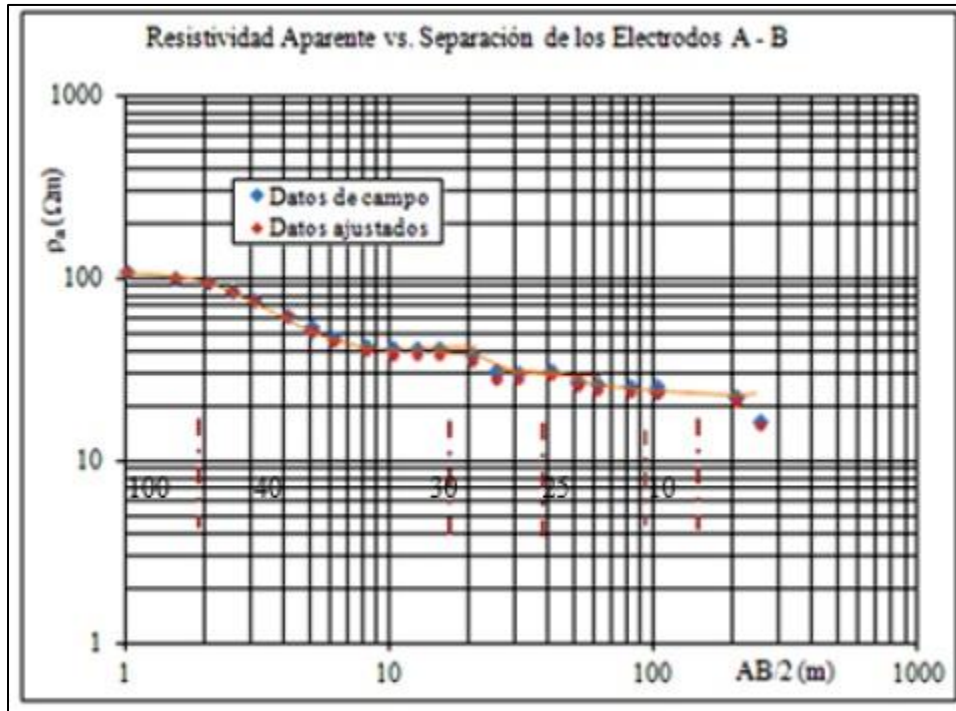


Figura 4.81: Interpretación geoelectrica del SEV RIOGRAN8. Valores en Ωm Línea punteada delimita las capas

Interpretación Geofísica		
Capa 1 Resistividad	100 Ωm	Espesor 1,8 m
Capa 2 Resistividad	40 Ωm	Espesor 15,0 m
Capa 3 Resistividad	30 Ωm	Espesor 12,0 m
Capa 4 Resistividad	25 Ωm	Espesor 55,0 m
Capa 5	falta puntos para definirla	

Datos litológicos		
Pozo NA-291	Pozo NA-737	Pozo NA-463
0-2 m Suelo arcilloso café	0-2 m Suelo arcilloso	0-12 m Toba café claro muy alterada
2-84 m Toba con matriz pumítica	2-35 Material heterogéneo (toba?)	12-44 Lava, café oscuro, muy suave arcillosa
48-74 "Mat. Volcánico tipo toba arenosa", café	35-120 Ignimbrita	44-65 Lava café oscuro, relat., sana y dura

Figura 4.82: Correlación geológica del SEV RIOGRAN8.

4.6 Modelo Hidrogeológico.

A partir de la información geológica, geofísica, hidrogeoquímica e hidrogeológica se propone un modelo conceptual para la subcuenca del Río Grande. Tal y como se

muestra en la figura 4.83, en la zona hay al menos tres sistemas de flujo, el de menor extensión se localiza al noreste de la subcuenca en la zona de mayor elevación, característico de acuíferos colgados hospedados en distintas capas geológicas de corta extensión típicos en ambientes volcánicos, donde prácticamente no hay interacción con las rocas debido al flujo rápido y la corta distancia del recorrido del agua subterránea. Se trata de aguas meteóricas, que se localizan en las mayores elevaciones topográficas, en las faldas del volcán Poás y originan manantiales con una composición bicarbonatada cálcica con valores más altos de sulfatos que en las demás muestras de agua, lo que evidencia la influencia de deposición atmosférica de sulfatos, asociada con la actividad volcánica.

Los otros dos flujos se dan entre los 1200 metros y 600 metros de altura, los cuales son los que predominan, ya que la mayor parte de los pozos se ubican en esta zona (fig. 4.84). Se observa una diferencia importante en la composición química al este y oeste del río Colorado, esto se debe a la presencia de rocas más antiguas pertenecientes al Grupo Aguacate en la parte oeste, en donde se observó una influencia de hidrotermalismo en la composición química del agua subterránea. En la zona oeste la composición del agua es bicarbonatada cálcica con un aumento en las concentraciones de sulfato, mientras que en la zona este del río el agua aunque es bicarbonatada cálcica, tiene concentraciones más bajas en los iones mayores.

Al oeste del río Grande el flujo es hacia el sur y al este por lo que se considera un sistema aparte del sistema ubicado al este del río Grande en donde el flujo es preferencialmente hacia el suroeste, o sea también converge hacia el río Grande.

Es importante indicar que todas las aguas muestreadas presentaron tritio, por lo que en general se trata de aguas relativamente jóvenes recargadas directamente en la zona, por lo que los acuíferos son tipo libre o semiconfinados; con excepción del pozo NA-342 que no tiene tritio, tratándose de aguas más antiguas posiblemente de un flujo regional.

La presencia de nitratos en pozos en Palmares indica que se está dando un impacto local en el agua subterránea por actividades humanas.

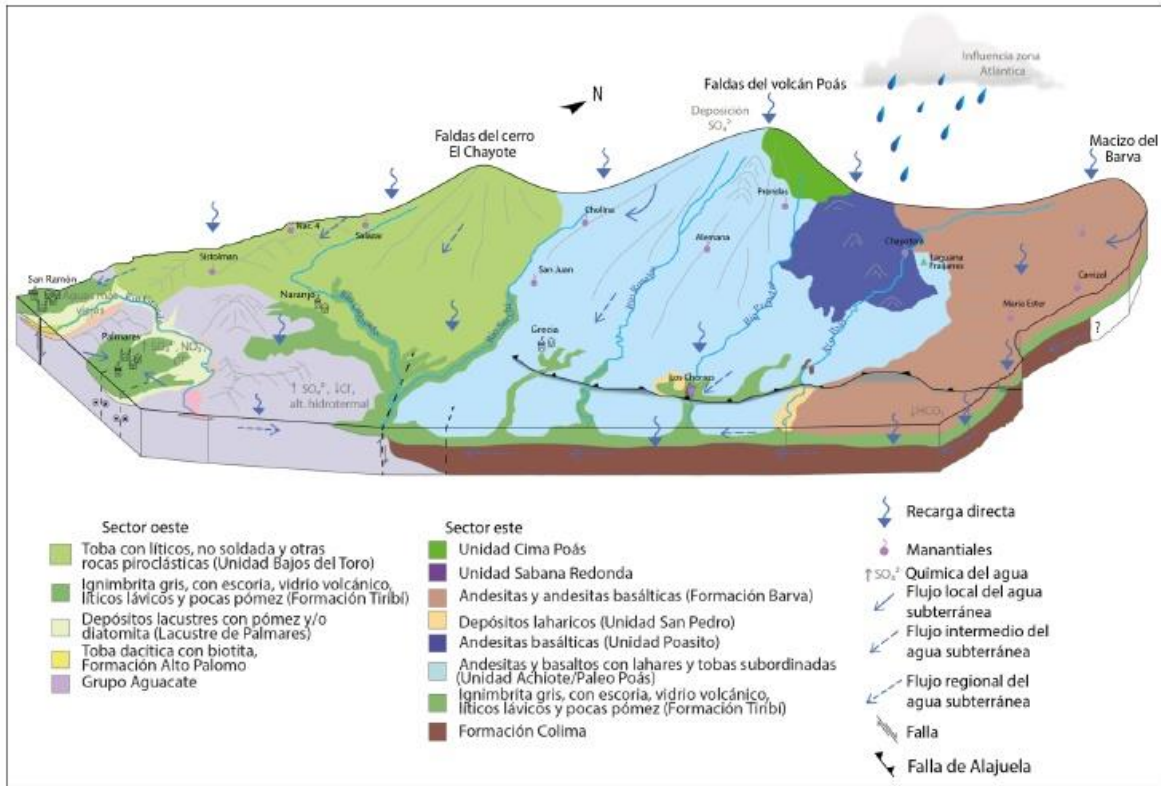


Figura 4.83: Modelo hidrogeológico conceptual de la subcuenca del río Grande, Alajuela

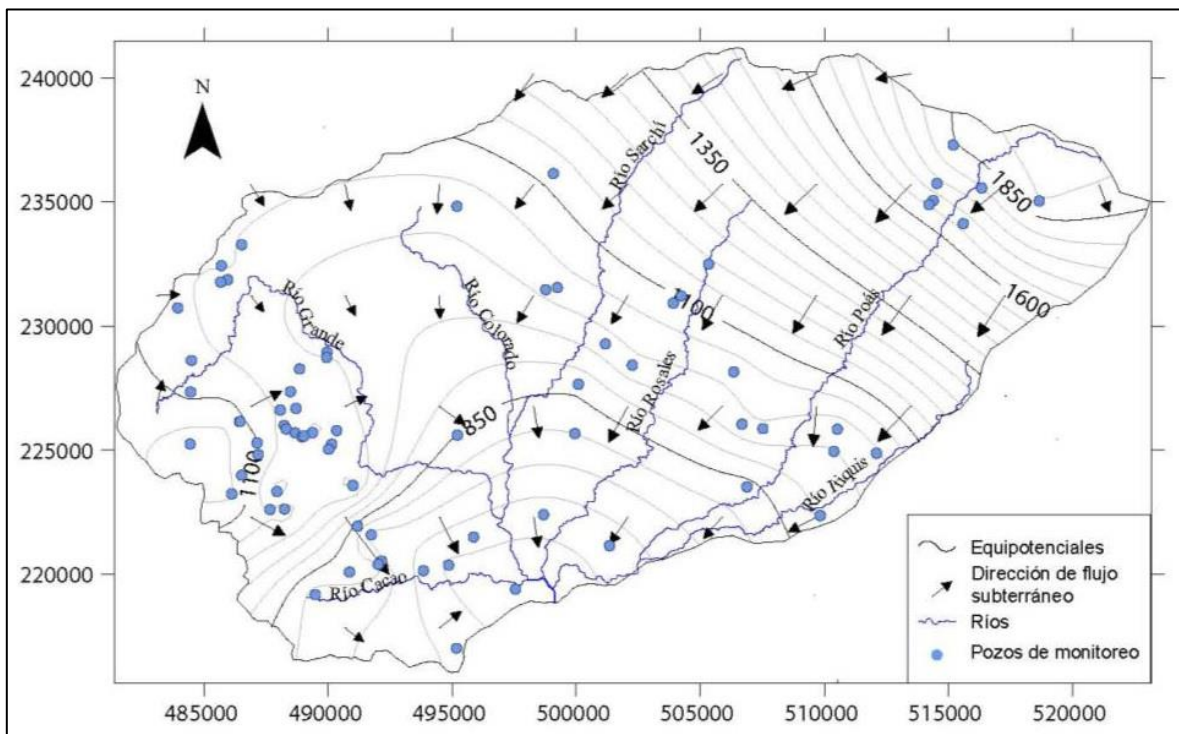


Figura 4.84: Mapa de equipotenciales en el área de estudio.

La figura 4.85 muestra la ubicación de los perfiles hidrogeológicos, y la figura 4.86 muestra el perfil A-A´-A”, el cual es el más extenso e ilustra las principales unidades geológicas reportadas en la zona, abarca elevaciones desde los 850 m hasta 2200 m.s.n.m., se extiende desde San Ramón de Alajuela hasta las faldas del volcán Poás. Se observa un contraste entre las unidades geológicas ubicadas en la zona oeste del río Colorado y la zona este del mismo. La diferencia principal se debe a la presencia de las rocas del Grupo Aguacate al oeste, las cuales constituyen el basamento regional; a partir de las descripciones de los pozos se determinó que se trata de lavas y piroclastos antiguos, meteorizados y en el sector sur alterados hidrotermalmente, dichas rocas volcánicas terciarias son sobreyacidas por depósitos del Lacustre de Palmares y la Formación Tiribí, ambas se pueden interdigitar y en algunos sectores esta última sobreyace al lacustre.

Según las descripciones de los pozos existe intercalación de tobas y los materiales arcillosos y arenosos del lacustre, esta condición favorece el almacenamiento y movimiento del agua, especialmente en las zonas en donde el material es arenoso, tal y como lo confirman las descripciones de los pozos NA-457, NA-437, NA-260, el nivel del agua subterránea en este sector está entre los 4 y 10 metros de profundidad. Es importante mencionar que el lacustre no se reporta en los pozos ubicados entre el río Grande y el río Colorado, excepto por el pozo NA-213 en el cual se reporta entre los 24 y 50 m de profundidad, en general el lacustre únicamente aparece al oeste del río Grande en este perfil. Algunos de los pozos ubicados entre el río Grande y el río Colorado describen tobas en los primeros metros (NA-434, NA-178, NA-213), sin embargo con la información de la geología en superficie no fue posible diferenciar las lavas de las tobas con exactitud, de manera que en el perfil se agruparon con una misma simbología ya que se considera que se trata de piroclastos del Grupo Aguacate.

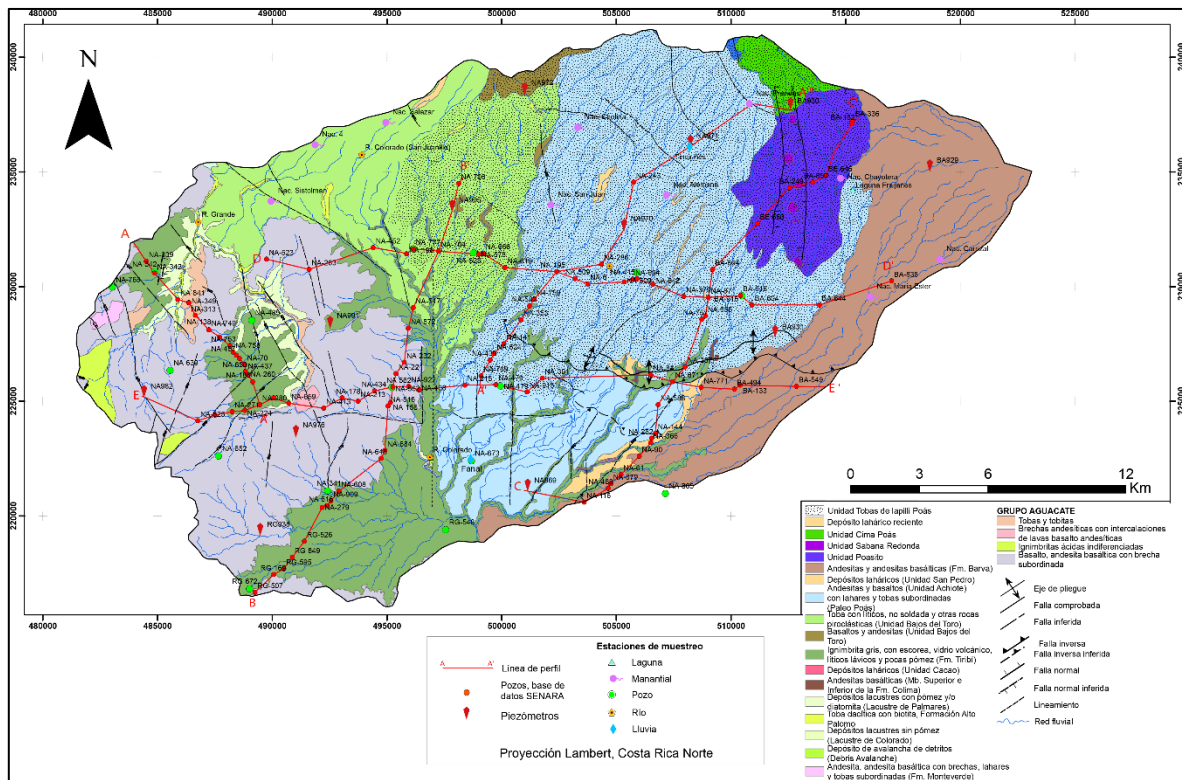


Figura 4.85: Ubicación de los perfiles hidrogeológicos en la subcuenca del río Grande.

En contraste, los pozos ubicados en la zona este del río Colorado (Fig. 4.85) no reportan la presencia de las rocas del Grupo Aguacate, parece ser que el contacto superior de estas rocas se profundiza hacia el este con una pendiente moderada, de manera que los pozos no las interceptan ya que en promedio no superan los 80 metros de profundidad, en estas rocas el nivel del agua subterránea se reporta entre 17 y 40 metros de profundidad.

La zona este del área de estudio como basamento lavas de la formación Colima, la extensión de estas rocas hacia el norte no se pudo determinar con exactitud debido a que los pozos no son profundos como se mencionó anteriormente y a partir de los 1100 metros de elevación la pendiente topográfica aumenta considerablemente, esto debe estudiarse en el futuro a partir de perforaciones exploratorias profundas, análisis geoquímicos y dataciones para determinar la extensión de la formación Colima. Las lavas de la formación Colima son sobreyacidas por tobas e Ignimbritas de la formación Tiribí, las cuales según Pérez (2006) provienen del Volcán Barva. Estas rocas son cubiertas por flujos de lavas andesíticas y basálticas de la Unidad Achiote, con tobas y lahares subordinados (Paleo-Poás), a partir del perfil se puede obtener un espesor máximo 80 metros para ambas formaciones como se interpreta del pozo NA-970, ya que no fue posible separarlas con las descripciones de los registros de los pozos. Estos depósitos fueron generados por la actividad del volcán (Ruiz et al, 2010).

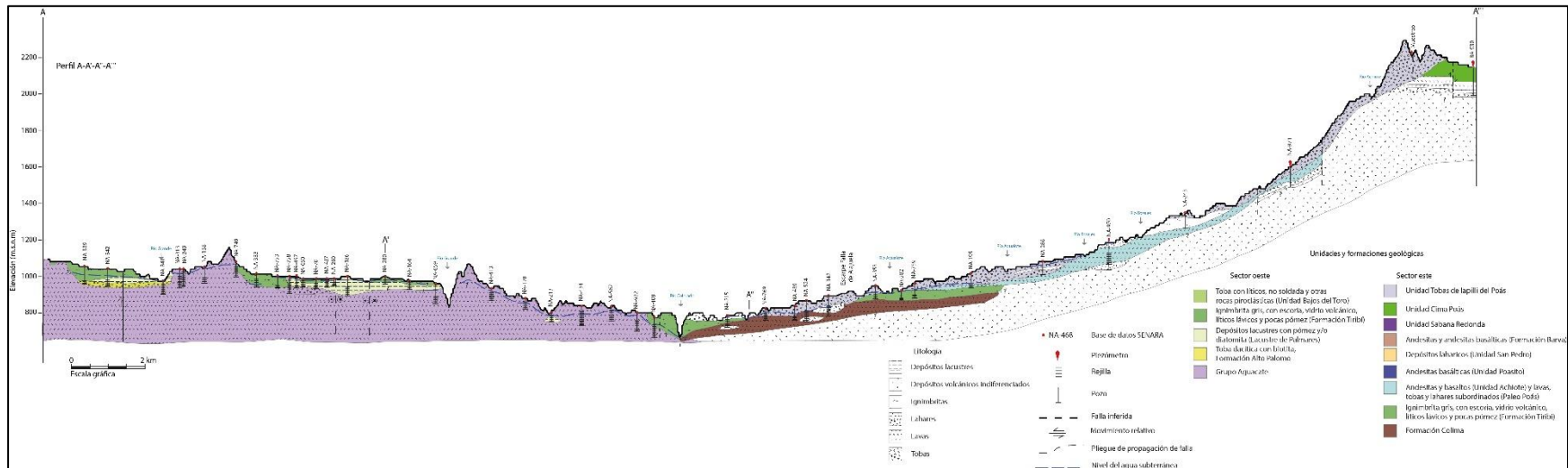


Figura 4.86: Perfil A-A'-A''-A'''

A continuación se describen en detalle las características de cada microcuenca, las cuales se muestran en la figura 4.87. En general, la zona no saturada se compone de arcillas y tobas en su mayoría; lavas, ignimbritas y depósitos laháricos en menor cantidad. Hacia la parte este de la cuenca se encuentra lapilli como parte de la zona no saturada.

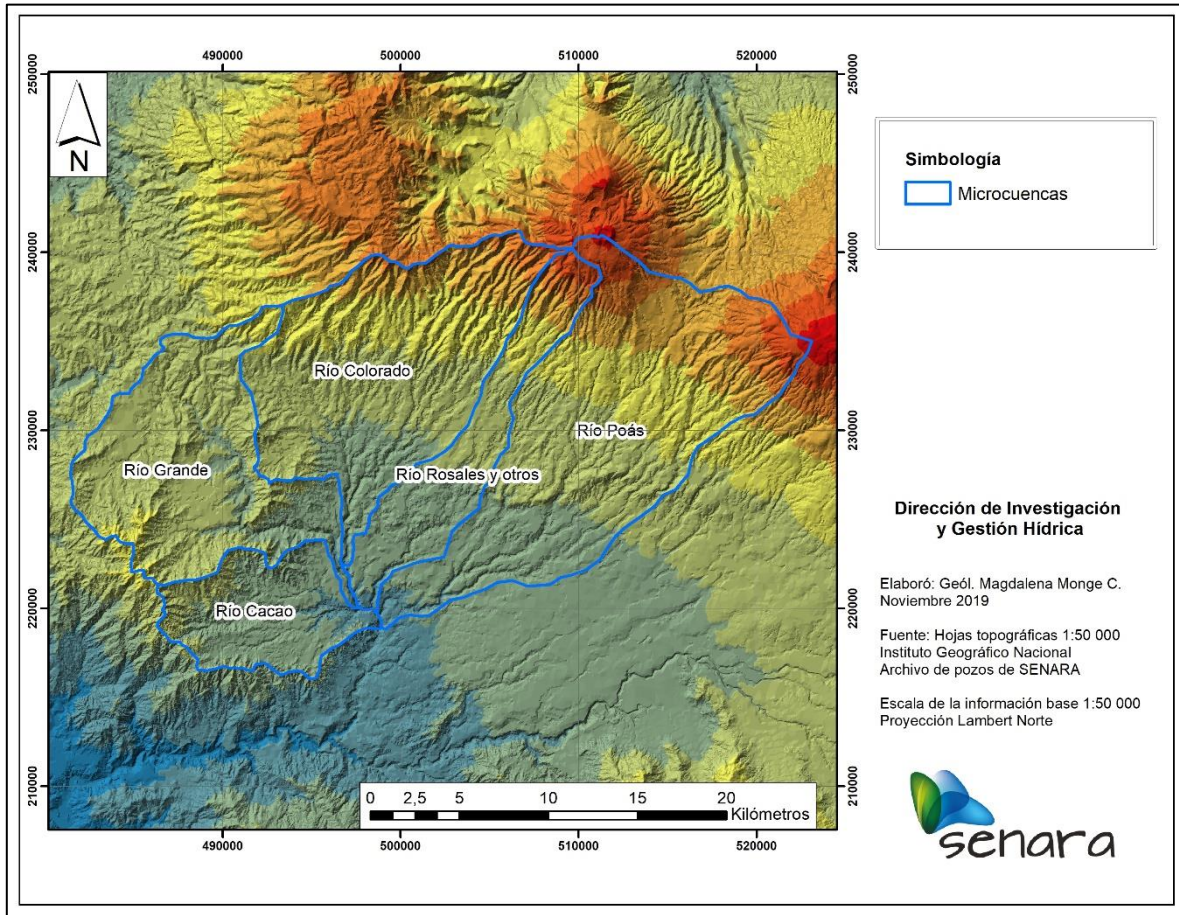


Figura 4.87: División del área de estudio en microcuencas

4.6.1 Microcuenca de Río Grande

San Ramón

En la zona de San Ramón, el acuífero está formado por tobas arcillosas y arenosas, que sobreyacen a lavas andesíticas y/o basálticas, de la Formación Grifo Alto, Grupo Aguacate.

Las tobas pueden tener fragmentos de lava y pómez, y presentan de baja a media permeabilidad aparente, según su grado de meteorización, así como también pueden tener alteración propilítica.

Las lavas tienen textura afanítica, ligeramente porfirítica. Tienen una permeabilidad aparente de moderada a alta por su fracturamiento y presentan oxidación en los planos de fractura. Pueden tener alteración hidrotermal (argilitización).

En pozos que solamente captan tobas, los niveles varían entre 1 y 61 m de profundidad, y los espesores del acuífero están entre 13 y 110 m. Las transmisividades van desde 1 a 19,4 m²/d.

En pozos que solamente captan lavas, los niveles varían entre 2,5 y 39 m de profundidad. En las partes sur y oeste de San Ramón el acuífero presenta un confinamiento muy local. Las transmisividades van desde 1,3 a 25,66 m²/d.

Para captaciones de intercalaciones de tobas y lavas, los niveles están entre 1 y 44 m de profundidad, con espesores entre 28 y 64 m. Las transmisividades van desde 1 a 249 m²/d.

Existen algunos aluviones localizados asociados a la Quebrada Caracol con niveles a 1m de profundidad. Al mismo tiempo, se asocian niveles de agua a ignimbritas en el sector de la Guaria en San Ramón, a 9 m de profundidad.

Se pueden tener también arenas y arcillas lacustres al oeste de San Ramón, con niveles de agua de 27 a 82 m profundidad. La permeabilidad de las arenas es buena y la de las arcillas es baja. Espesor de al menos 55 m.

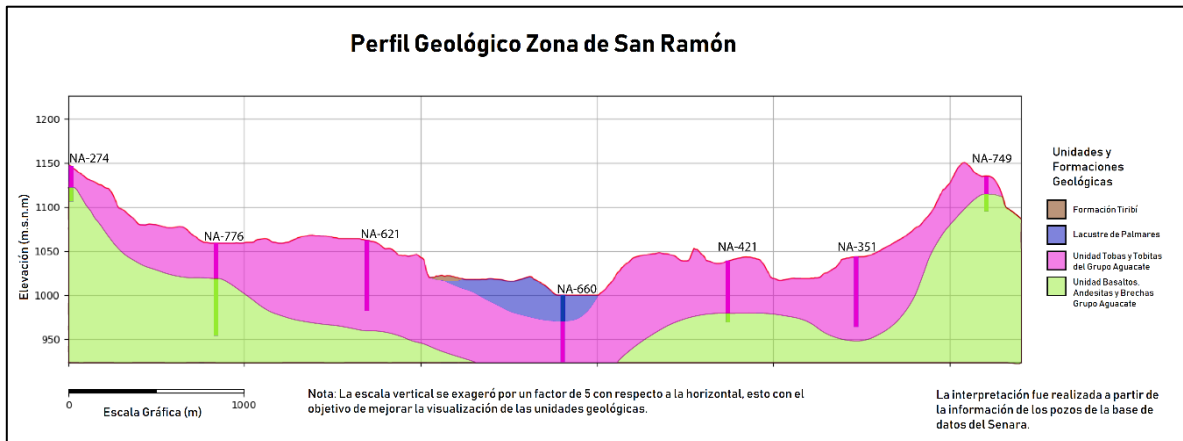


Figura 4.88: Perfil geológico en la zona de San Ramón

Palmares

En la zona de Palmares, el acuífero está constituido por tobas formadas por cenizas volcánicas argilitizadas de diferentes granulometrías, con algunos fragmentos líticos y pómez. En ocasiones están intercaladas con arcillas, y sobreyacen o intercalan las lavas. Tienen espesores de 6 a 97 m, una permeabilidad aparente baja y las transmisividades varían entre 1,6 y 2,01 m²/d.

Por debajo de las tobas se encuentran lavas color gris verdoso hasta negro, de textura afanítica ligeramente porfirítica y composición andesítica basáltica, poco oxidada, dura y sana, con meteorización y alteración propilítica en algunos tramos. Corresponden a lavas del Grupo Aguacate. La permeabilidad es de baja a media y porosidad secundaria por fracturas. Los espesores van desde 23 a 90 m. Los niveles de agua subterránea varían desde 4 a 54 m y las transmisividades están entre 7 y 69,17 m²/d. Este es un acuífero con mejores condiciones que las tobas.

Localmente se captan Ignimbritas color gris celeste y con fenocristales de piríboles alargados, caracterizadas por estar sanas, duras y tener baja permeabilidad. Tienen entre 21 y 27 m de espesor y una T=42 m²/d. Hacia el centro de Palmares se ubican por encima de las tobas.

En el centro de Palmares se identifica un nivel superficial entre 18 y 22 m de profundidad, y a mayor profundidad, entre 30 y 37 m de profundidad, se encuentra un acuífero confinado en gravas y arenas constituidas por fragmentos de lavas y tobas.

También al centro se encuentran intercalaciones de arcillas y arenas del lacustre de Palmares, con espesores entre 31 y 75 m.

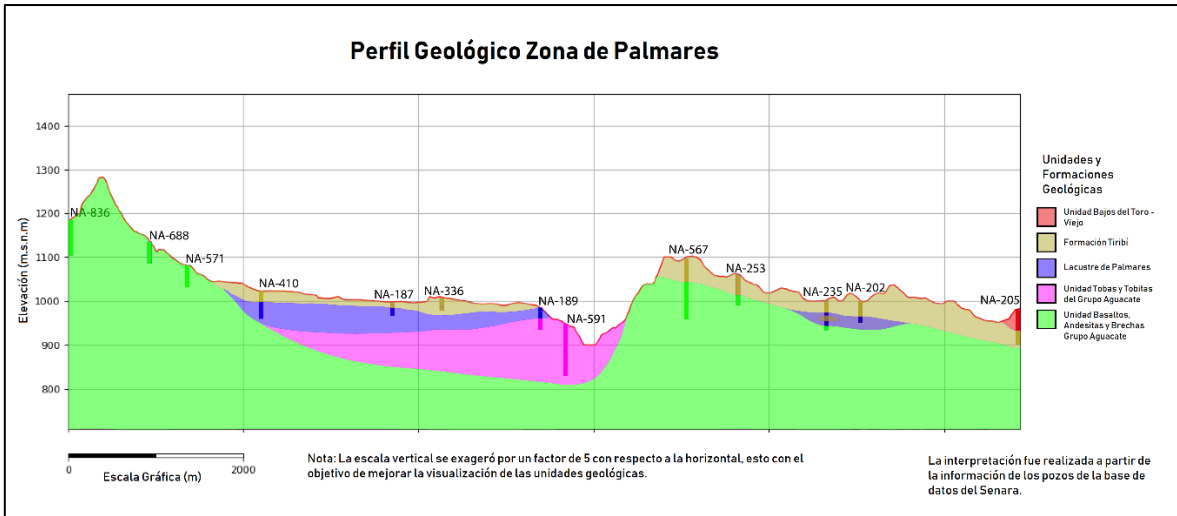


Figura 4.89: Perfil geológico en la zona de Palmares

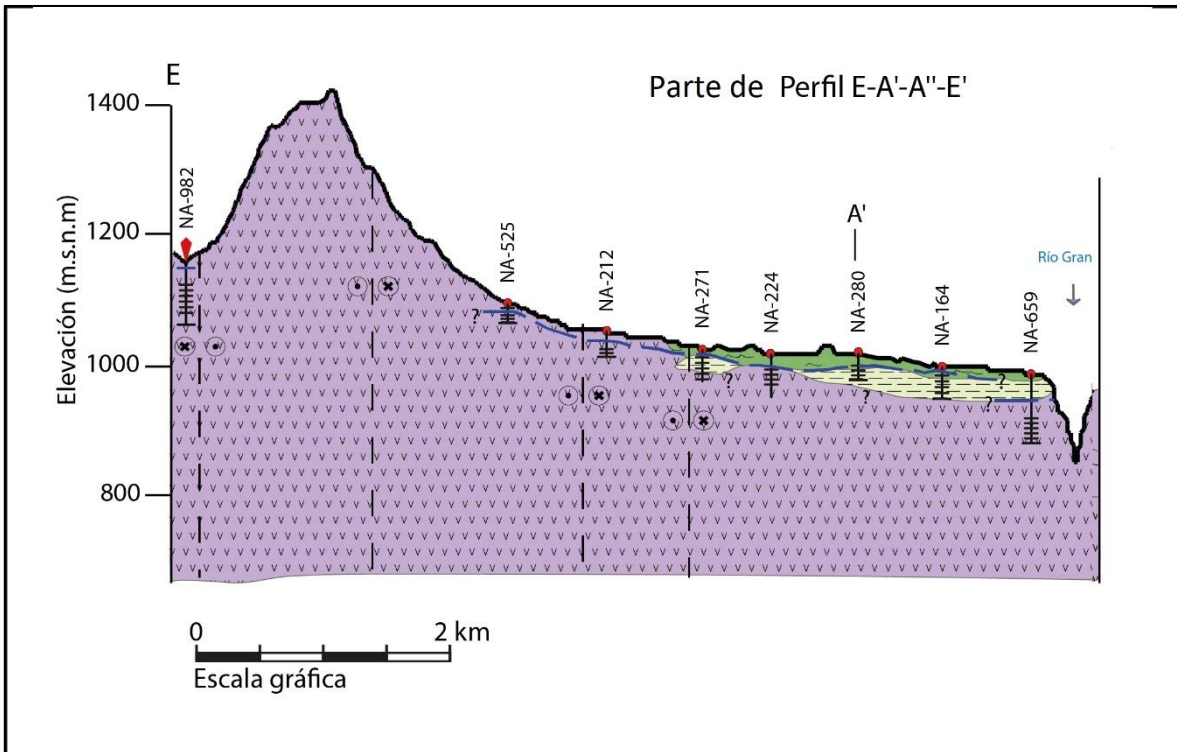


Figura 4.90: Parte del perfil E-A'-A''-E' en Palmares (Anexo D) (Simbología en la figura 4.85)

Naranjo

Se encuentran tobas finas a medias, relativamente sanas, con permeabilidad aparente y porosidad bajas a moderadas. Los espesores van de 19 a 87 m y los niveles entre 6 y 55 m de profundidad. El acuífero es libre pero se comporta confinado en algunas localidades. La transmisividad observada es de 155 m²/d.

Se encuentran también arcillas con arenas de permeabilidad baja a regular, intercaladas con otras capas de arcillas de baja permeabilidad, con 28 m de espesor y niveles a 16 m.

Subyaciendo a las tobas o arcillas se encuentran lavas con textura afanítica ligeramente porfirítica y composición andesítica a basáltica, relativamente sanas y duras, pero fracturadas. En ocasiones presentan brechas lávicas asociadas. Los niveles se encuentran entre 7 y 90 m de profundidad, y los espesores de 7 a 85 m. La transmisividad observada es de 80,64 m²/d.

Localmente se encuentran materiales fluviolacustres con intercalaciones de capas arenosas y limo arcillosas, de moderada permeabilidad, con un comportamiento confinado. Tienen espesores de 26 m, encontrando el techo a 24 m y el nivel piezométrico a 17 m de profundidad.

4.6.2 Microcuenca de Río Cacao

Atenas

El acuífero se compone de lavas andesíticas basálticas color gris verdoso, gris oscuro a negro, con textura ligeramente porfirítica con fenocristales de plagioclasas y piríboles, relativamente sana. Se considera libre, pero presenta confinamiento localmente. Tiene baja a moderada permeabilidad aparente y porosidad secundaria por fracturación. Existen algunas muestras de alteración hidrotermal, con presencia de cuarzo y arcillas de origen hidrotermal, y algunas veces afectación por fallas. Los espesores van de 15 a 101 m y los niveles se encuentran entre 4 y 90 m de profundidad. La transmisividad va desde 0,76 a 263 m²/d. Se asocian al Grupo Aguacate.

Las lavas se encuentran sobreyacidas por tobas de grano fino, a veces con bloques andesíticos, minerales y pómez, a veces vítreas, alteradas y con baja permeabilidad aparente. La permeabilidad secundaria es alta. Los espesores van desde 10 a 120 m (el espesor crece hacia el este de Atenas). Los niveles están entre 5 y 57 m metros de profundidad, sin embargo, en ocasiones estas tobas no presentan nivel de agua subterránea y esta aparece solamente en las lavas. La transmisividad va desde 17 a 343 m²/d.

En la zona este de Atenas también se encuentran ignimbritas con abundantes fiames, pómez y cuarzo, grises, con permeabilidad aparente de media a alta. Espesores de 8 a

75 m, con niveles de 22 a 80 m de profundidad. La transmisividad va desde 6,7 a 240 m²/d. Estas ignimbritas también están sobreyacidas por las tobas.

Existen algunos coluvios localizados de 15 m de espesor, y tobas arcillosas que subyacen a las lavas, así como aluviones finos y gruesos intercalados, posiblemente paleocauces, con alta permeabilidad aparente.

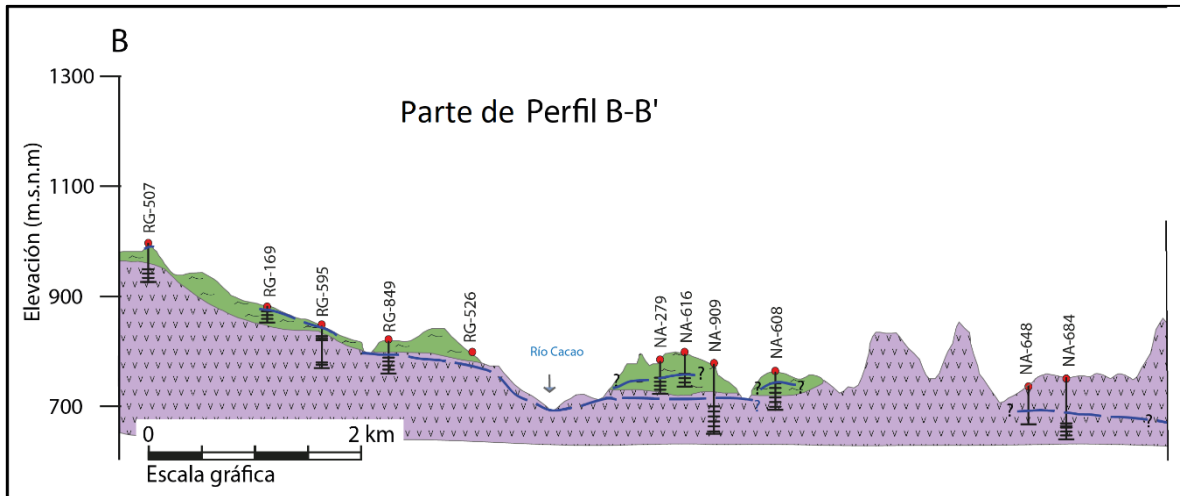


Figura 4.91: Parte de perfil B-B' en Atenas (Anexo D) (Simbología en la figura 4.85).

En general, las microcuencas de Río Grande y de Río Cacao tienen una dirección de flujo hacia el sur y hacia el este.

4.6.3 Microcuenca de Río Colorado, Río Rosales y otros

Naranja – Sarchí – Grecia

En esta zona existen arcillas en superficie de entre 16 y 60 m de espesor.

Subyacen tobas constituidas por fragmentos líticos, minerales, vidrio y pómez, soldados en una matriz de ceniza fina, con permeabilidad aparente baja, cuyo espesor varía entre 9 y 92 m, y los niveles de 13 a 55 m. No existe mucha información de pruebas de bombeo, pero se identifica una transmisividad de 3 m²/d. Estas tobas a veces se encuentran secas, estando el nivel de agua en lavas o ignimbritas.

Por debajo de las tobas se encuentra el acuífero en las lavas de composición andesítica y textura porfirítica con fenocristales de plagioclasas y piríboles, sanas, con fracturas, con moderada a alta permeabilidad aparente. Los espesores varían entre 14 y 51 m, con niveles entre 12 y 120 m. La transmisividad que se obtuvo de la base de datos de pozos varía entre 8,19 y 16,08 m²/d.

En algunos sectores las lavas son brechosas rojizas de hasta 26m de espesor.

En la parte media y baja de Grecia se encuentran ignimbritas grises a negras, tobáceas y compactas, sanas, con abundantes líticos, vidrio volcánico y pómez, de media a buena permeabilidad, fracturada. Los niveles varían entre 17 y 45 m de profundidad y los espesores van de 13 a 70 m. Esta ignimbrita se vuelve arcillosa en superficie.

Las ignimbritas se encuentran intercaladas entre las lavas.

Ocasionalmente se encuentran lahares con bloques lávicos en matriz arcillosa de al menos 10 m espesor.

Al considerar los pozos que captan varias litologías, se identifican transmisividades entre 632 y 1284 m²/d.

El acuífero se comporta como libre, sin embargo, en la parte media y en la parte baja de Grecia existen localidades donde el acuífero se comporta como confinado.

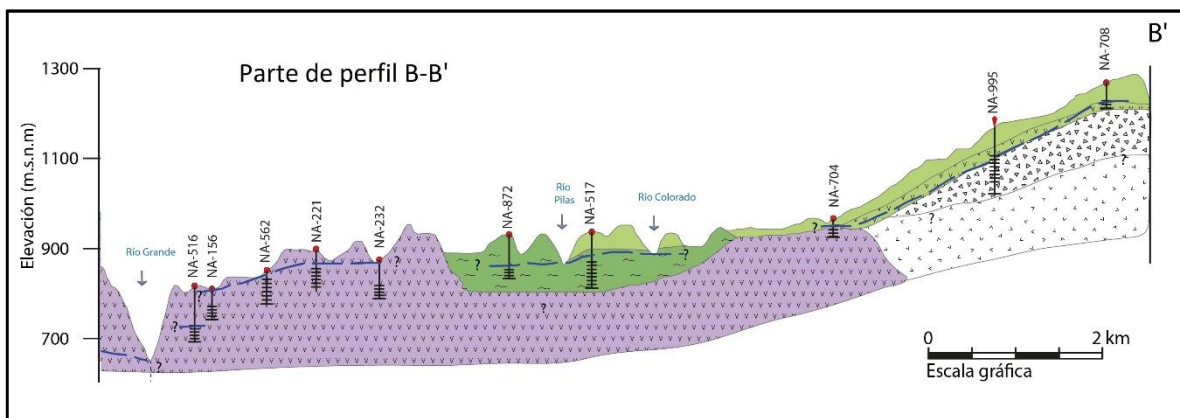


Figura 4.92: Parte de perfil B-B' en Atenas (Anexo D) (Simbología en la figura 4.85).

La figura 4.90 muestra el perfil D-D' el cual tiene una dirección aproximada oeste-este donde se distinguen las principales unidades geológicas de la zona. Se observa que en la zona oeste aflora el basamento regional constituido por el Grupo Aguacate el cual es sobreyacido por rocas piroclásticas de la Fm. Tiribí y la Unidad Bajos del Toro al oeste del río Grande, al este del río aparecen en superficie las Unidades Achioté, Paleo Poás y los depósitos asociados con el Volcán Barva. Se identificaron dos niveles de agua, el más superficial se localiza en la Fm. Tiribí, y continúa en la Unidad Paleo Poás y Bajos del Toro y el más profundo en lavas posiblemente de la Fm. Colima.

4.6.4 Microcuenca de Río Poás

Poás – Alajuela

Parte alta

Existe un acuífero en lavas andesíticas y basálticas, porfiríticas, color gris oscuro. Son brechosas en la parte inferior y superior (P.A. buena), con tonalidades rojizas, y el

núcleo denso con pocas fracturas (P.A. baja). Tiene un espesor de 12 a 39 m, con niveles entre 20 y 91 m (se presenta un confinamiento a 123 m de profundidad, de manera localizada).

Las lavas se encuentran separadas por capas de tobas y paleosuelos, siendo que las lavas superficiales no tienen agua y los niveles de agua subterránea se encuentran en lavas profundas. También se identifican escorias rojas y negras de hasta 20 m de espesor.

Sobreyacen a las lavas las arcillas, tobas y cenizas, entre 1 y 28 m de espesor, con una permeabilidad aparente baja a media. Se presentan niveles colgados en piroclastos.

También sobreyacen otras lavas de 36 m de espesor en algunos sectores.

Se encuentra un paleosuelo rojizo entre las lavas y las ignimbritas en profundidad.

El acuífero en Ignimbritas está constituido por gran cantidad de fragmentos de lava escoriácea y densa en una matriz tobácea, con abundantes pómez alterado. Tiene una permeabilidad aparente de media a alta, probablemente de tipo secundaria por fracturación y disyunción prismática. Tiene un espesor de 24 m y niveles a 44 m de profundidad.

También se encuentran niveles de agua subterránea en piroclastos con fragmentos de lavas, pómez, escorias y cuarzo. La permeabilidad es de moderada a baja. El espesor va de 4 a 8 m y los niveles aparecen a 28 m de profundidad. Se comporta como libre, pero existe un confinamiento local.

Parte media

Existe un acuífero en lavas andesíticas, de color gris oscuro, con secciones rojizas, textura ligeramente porfirítica con fenocristales de plagioclasas y piríboles, fracturadas. De baja a moderada permeabilidad aparente. Permeabilidad secundaria por fracturas. Espesores entre 29 y 41 m, y niveles entre 6 y 102 m de profundidad.

Sobreyacen tobas e ignimbritas, las primeras constituidas por minerales y pequeños fragmentos líticos y pómez, englobados en una matriz fina ligeramente arcillosa o arenosa, de color café claro o gris, baja a media permeabilidad aparente. Espesores de 20 a 50 m, niveles de 13 a 40 m. En ocasiones se encuentran secas.

Las ignimbritas tienen matriz cenicienta, clastos redondeados de lava, lapilli, pómez, vidrio volcánico. Son grises cuando están sanas, cafés cuando están meteorizadas. Estas también pueden ser parte del acuífero, identificándose niveles de 16 a 44 m de profundidad, con 20 a 41 m de espesor de ignimbritas.

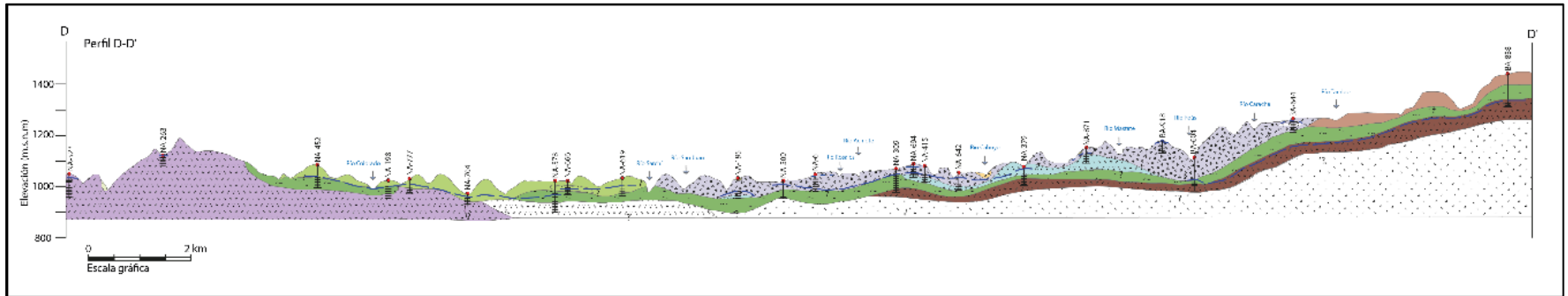


Figura 4.93: Perfil D-D' en la zona de Naranjo, Sarchí y Grecia (Simbología en la figura 4.93).

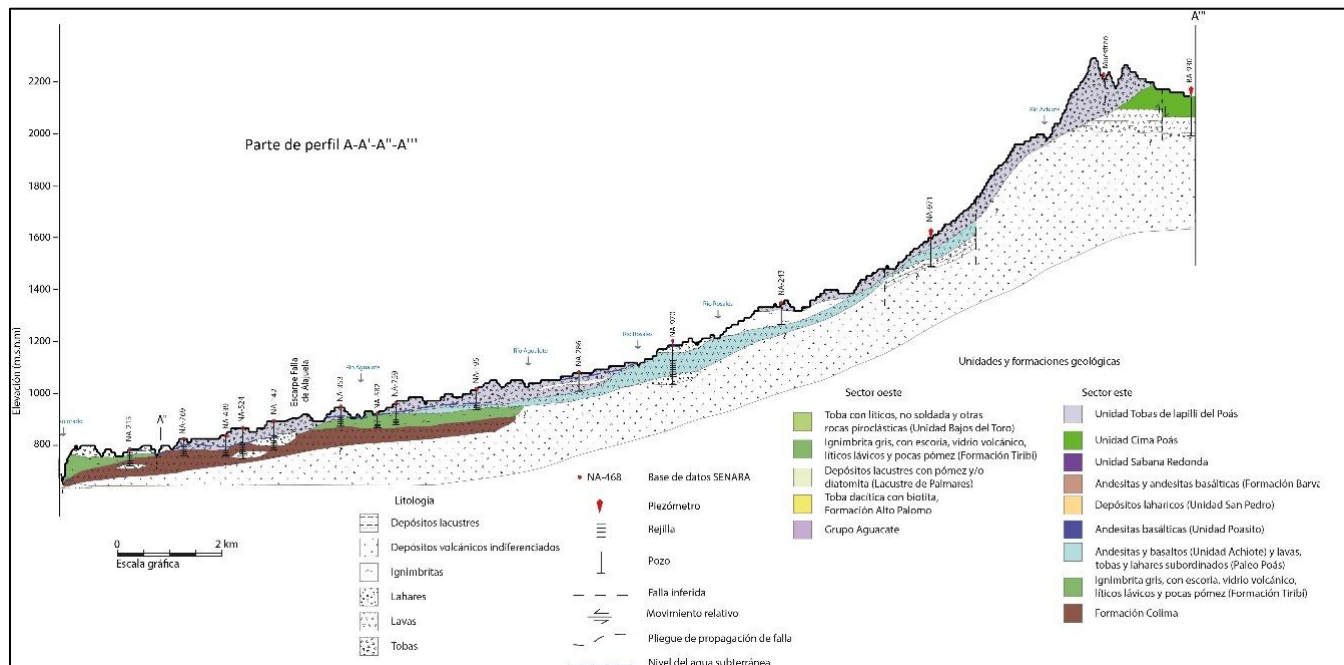


Figura 4.94: Parte de perfil A-A'-A''-A''' en la zona de Naranjo, Sarchí y Grecia

De manera intercalada con las lavas se pueden encontrar lahares, conformados por fragmentos de lava e ignimbritas grises estando sanos, y naranja-café cuando están alterados y oxidados, en una matriz de ceniza. Los espesores van de 20 a 32 m y se encuentran niveles de agua de 56 a 70 m con algún grado de confinamiento.

Se encuentra suelo arcilloso en superficie.

Parte baja

En la zona no saturada se encuentran arcillas entre 2 y 18 m de espesor en la superficie.

Subyacen tobas caóticas líticas arcillosas color café, con fragmentos de pómez y líticos volcánicos, con espesores de 5 a 87 m. Tienen permeabilidad aparente baja. Los niveles de agua subterránea van de 3 a 25 m de profundidad.

Por debajo de las tobas se encuentran ignimbritas con matriz cenicienta, clastos redondeados de lava, lapilli, pómez, vidrio volcánico. Gris cuando está sana, café cuando está meteorizada. Tiene de 6 a 50m de espesor y los niveles se encuentran de 16 a 40 m de profundidad.

Subyacen lahares, que consisten de bloques andesíticos englobados en una matriz arcillosa café, con fragmentos de lava y pómez, cuyo espesor es de 31 a 38 m. Los niveles se encuentran a 26 m de profundidad.

En profundidad se encuentran lavas afaníticas, porosas a lavas brechosas, fracturadas, de color gris a negro. Meteorizadas se tornan rojizas en la parte superior. La permeabilidad aparente es de media a alta. Los espesores van de 13 a 52 m y los niveles de agua subterránea se encuentran de 30 a 62 m de profundidad.

Algunos sitios presentan confinamiento localizado, y la presencia de óxidos de hierro en la zona saturada. Hacia el borde sur de la cuenca se muestra confinamiento en el acuífero.

La transmisividad de las lavas varía entre 11,3 y 492 m²/d, mientras que las tobas tienen transmisividades entre 0,6 y 7,9 m²/d.

Las microcuencas de Río Rosales, Río Colorado, Río Poás y otros presentan un flujo de agua en dirección suroeste.

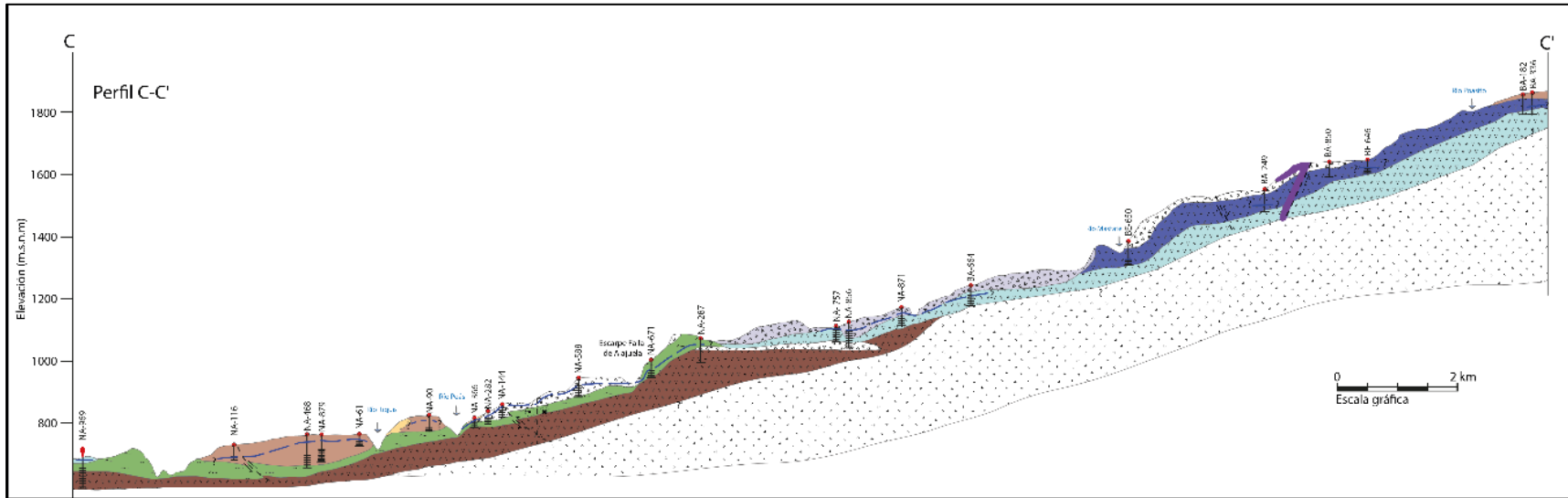


Figura 4.95: Perfil C-C' en la zona de Poás. (Simbología en la figura 4.92)

5. HIDROGEOQUÍMICA E ISÓTOPOS

Ingrid Vargas Azofeifa

Los datos analizados en este trabajo se adjuntan en el **Anexo E**, donde se resumen los datos de los reportes de los distintos laboratorios que realizaron los análisis químicos.

5.1 Composición química de las aguas

Se consideraron únicamente los resultados que tienen un balance iónico inferior a $\pm 15\%$, por lo que siete de los 97 análisis realizados no fueron considerados. Las 19 muestras para las cuales el balance iónico está entre ± 5 y 15% estarán tomadas en cuenta pero con cuidado en la interpretación. Los puntos de muestreo se muestran en la Fig.5.1 y en el Cuadro 5.1.

Para la interpretación de los datos hidrogeoquímicos las muestras fueron agrupadas por formaciones geológicas, lo que corresponde a una variabilidad espacial y litológica; por ejemplo las aguas de la formación Aguacate, al oeste de la subcuenca, se distinguen por tener influencia de alteración hidrotermal.

Se realizaron también 3 muestreos mensuales de lluvia a dos estaciones, un sitio se localiza en Coopevictoria, en la Finca Inés en Grecia, localizada en la parte alta de la subcuenca al pie del Poas y la otra en la propiedad de Fanal (Grecia), en la parte baja de la subcuenca (Cuadro 5.1).

Las aguas recolectadas en pozos y manantiales en agosto, septiembre y octubre del 2014 muestran una diferencia notable en la concentración de sulfatos. Las concentraciones en la parte alta de la subcuenca son de 9 mg/L, las cuales tienen posiblemente influencia del volcán Poás, mientras que las muestras de la parte más alejada del volcán tienen valores cercanos a ~ 2 mg/L de $[SO_4]$.

La estación de lluvia ubicada en la Finca Inés, en la zona más alta, tiene un alto contenido en calcio, mientras que la concentración en cloruro es bastante baja (entre 0,5 y 1,4 mg/L).

Considerando que el factor de enriquecimiento (P/ (P-ETP)) tiene un promedio anual de 3 se puede esperar una concentración en las aguas por origen de las precipitaciones en Cl hasta 3 mg/L, en SO_4 18 mg/L, en K 10 mg/L, en Ca 24 mg/L. Los datos de lluvia no están representados en las figuras presentadas en este documento.

La relación entre la conductividad eléctrica medida en el campo y la suma de los iones disueltos (Fig.5.1) indica una buena correspondencia global, solo algunos puntos se salen ligeramente de la tendencia.

Cuadro 5.1: Puntos de muestreo de aguas, subcuenca del río Grande, Alajuela

Sitio de muestreo	Coord. Este	Coord. Norte	Tipo
Nac. 4	492022	236187	manantial
Nac. Salazar	495091	237159	manantial
Nac. Sistolman	490093	233728	manantial
Nac. Alemana	507323	233996	manantial
Nac. Prendas	510933	237983	manantial
Nac. San Juan	502285	233566	manantial
Nac. Cholina	503460	236943	manantial
Nac. Chayotera	514911	234732	manantial
Nac. Maria Ester	516199	229558	manantial
Nac. Carrizal	519241	231200	manantial
NA-765	483020	229973	pozo
NA-523	498772	231470	pozo
NA-639	485538	226352	pozo
NA-562	495209	225609	pozo
NA-673	498680	222401	pozo
NA-479	499939	225672	pozo
RG-672	489002	216826	pozo
RG-548	497555	219402	pozo
NA-652	487652	222611	pozo
BA-918	510476	229605	pozo
NA-309	505894	230623	pozo
NA-777	496150	231650	pozo
NA-485	489100	228530	pozo
NA-342	484888	230654	pozo
NA-341	492410	221096	pozo
NA-805	507140	220970	pozo
R. Colorado	496870	222564	superficial
R. Grande	486769	232826	superficial
R. Colorado (San Juanillo)	493903	235748	superficial
R. Rosales	504705	230902	superficial
Laguna Fraijanes	515305	234226	superficial
Estación Finca Santa Inés	508018	236179	Lluvia
Estación Fanal	498466	222558	lluvia

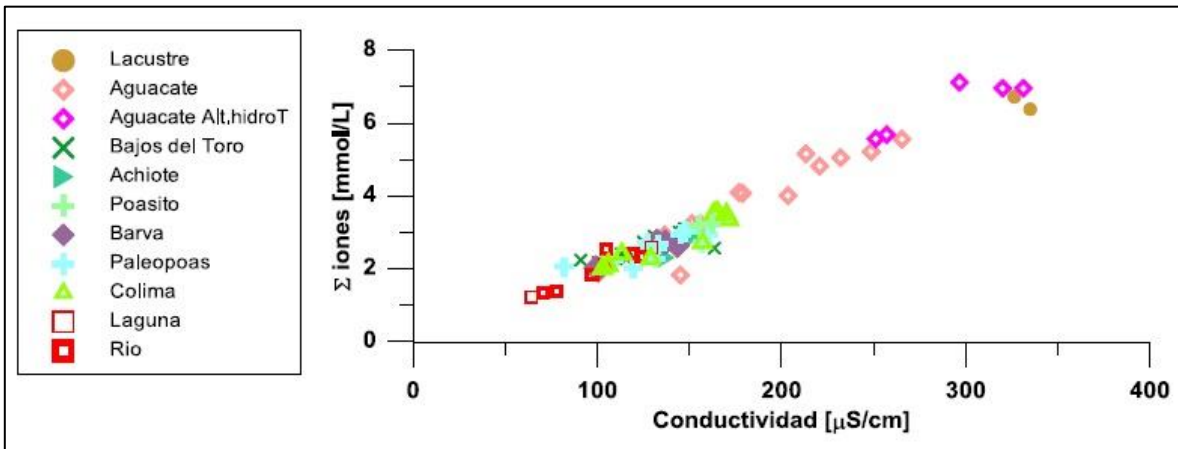


Figura 5.1: Total de los iones vs conductividad para las muestras del acuífero del Rio Grande

Quedan algunos datos dudosos, más precisamente los de bicarbonatos, sílice y de los elementos trazas. También los datos de potencial redox no se pueden relacionar con los del oxígeno disuelto ni con la presencia de hierro y manganeso debido a la dispersión que muestran.

Las concentraciones de manganeso y de hierro se correlacionan bastante bien lo cual podría dar información sobre las condiciones oxido-reductoras en el entorno de los pozos muestreados (Fig.5.2). Las aguas de los ríos, de la laguna de Fraijanes y de los pozos NA-765 y RG-672 podrían presentar condiciones reductoras marcadas.

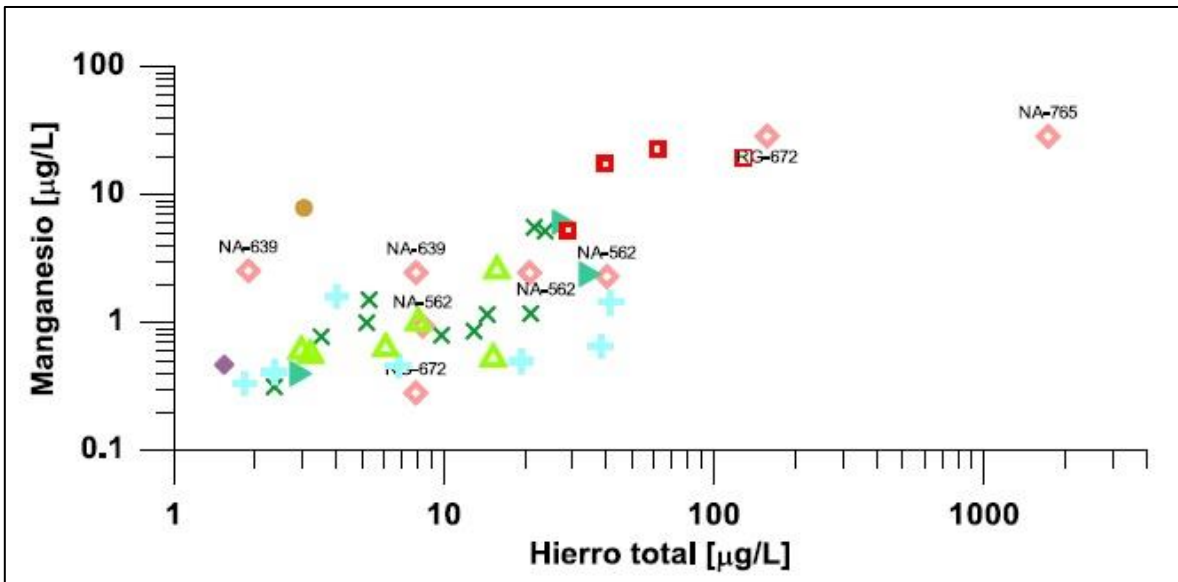


Figura 5.2: Mn vs Fetot para las muestras del acuífero del Rio Grande

Se nota que las aguas de la formación Aguacate, la cual es la formación más vieja de la subcuenca estudiada, están más enriquecidas en iones, por lo que la conductividad eléctrica es mayor, esto también se nota en el caso de las aguas que circulan en el Lacustre de Palmares localizado en la subcuenca del Río Grande (Fig.5.1 y Fig.5.3).

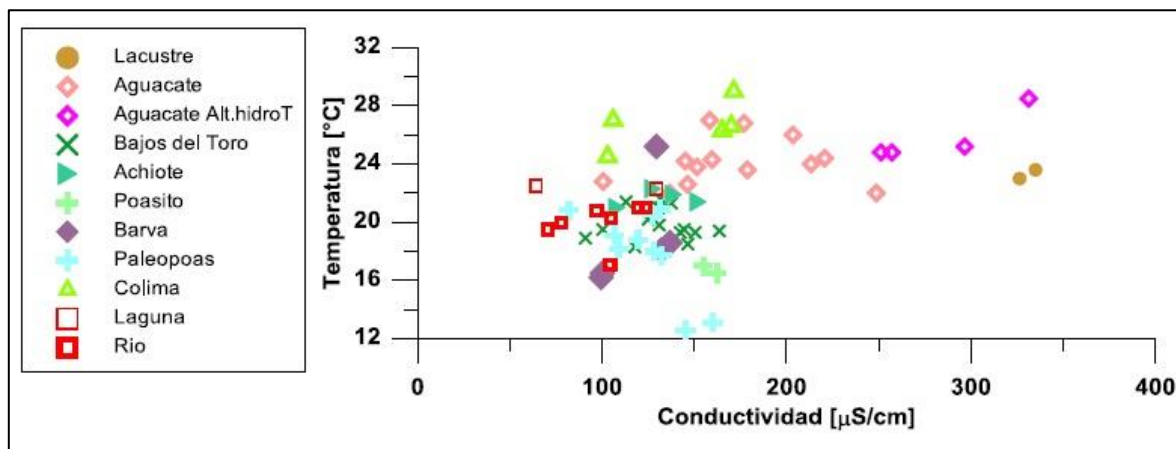


Figura 5.3: Temperatura vs conductividad para las muestras del acuífero del Río Grande

La temperatura de la aguas está fuertemente ligada a la altura del punto de muestreo y de recarga medido lo cual también se verá con los datos de isótopos estables (Fig. 5.4).

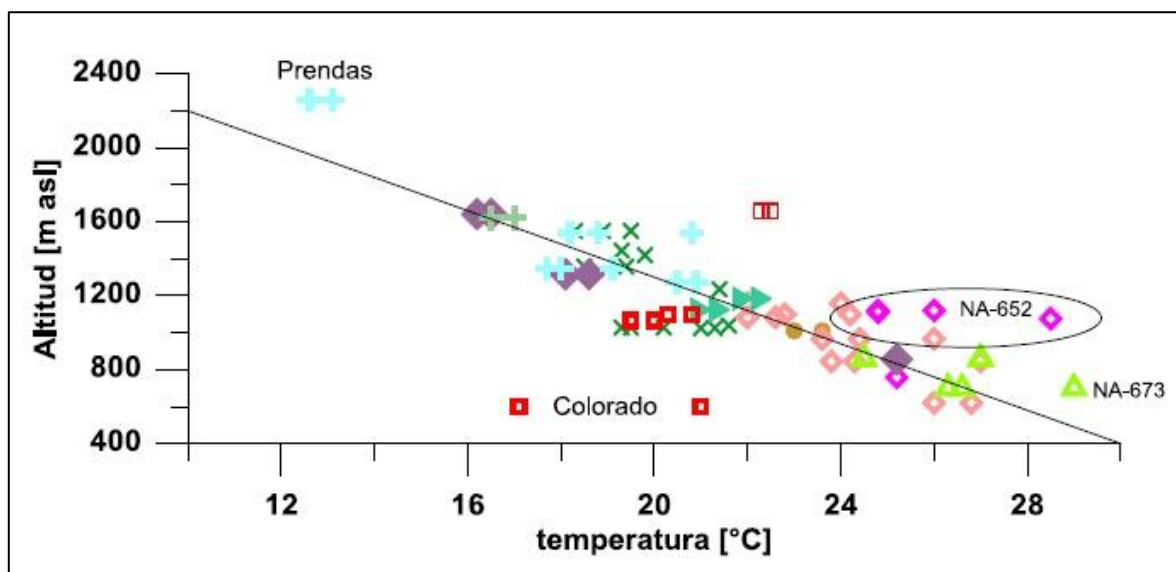


Figura 5.4: Altitud del punto de muestreo vs temperatura para las muestras del acuífero del Río Grande

La altura de recarga del río Colorado está mucho más alta que el punto de muestreo. Tanto para las aguas de la laguna Fraijanes como para el manantial Prendas existe la posibilidad de influencia de masas de aire proviniendo del Atlántico y que tienen una temperatura promedio diferente de las masas atmosféricas del Pacífico.

Para las aguas de la formación Aguacate se nota la influencia de alteración hidrotermal ya que la temperatura del agua es ligeramente superior al patrón regional y más específicamente el punto NA-652.

La temperatura medida en octubre 2014 para las aguas del punto NA-673 podría ser un poco sobre sobre estimada.

Debido al gran número de formaciones geológicas y para mejorar el análisis de los diagramas de Piper se prepararon dos diagramas, uno con las formaciones del oeste de la subcuenca, donde se incluyen aguas que circulan en el Grupo Aguacate y el Lacustre de Palmares y otra para los puntos de muestreo del este de la subcuenca (Fig.5.5; Fig.5.6).

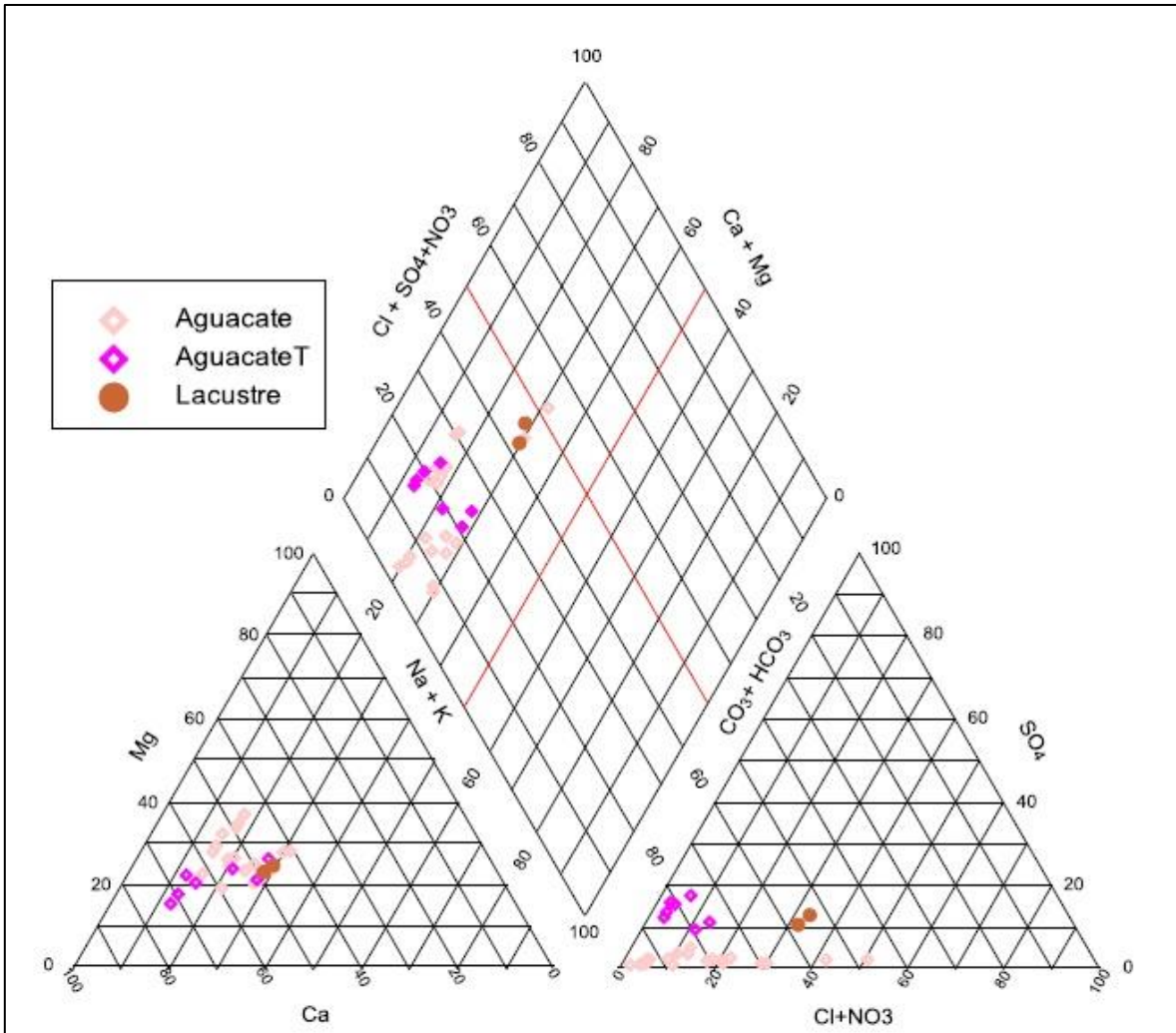


Figura 5.5: Diagrama de Piper para las aguas de las formaciones del oeste de la subcuenca del Río Grande

Las aguas que circulan en las rocas del Grupo Aguacate sin rasgos de hidrotermalismo presentan una proporción de ion magnesio más alta y de ion calcio más baja en comparación con las aguas que circulan en el Grupo Aguacate con influencia de hidrotermalismo.

Las aguas que circulan en el Lacustre de Palmares son relativamente enriquecidas en cloruro + nitrato.

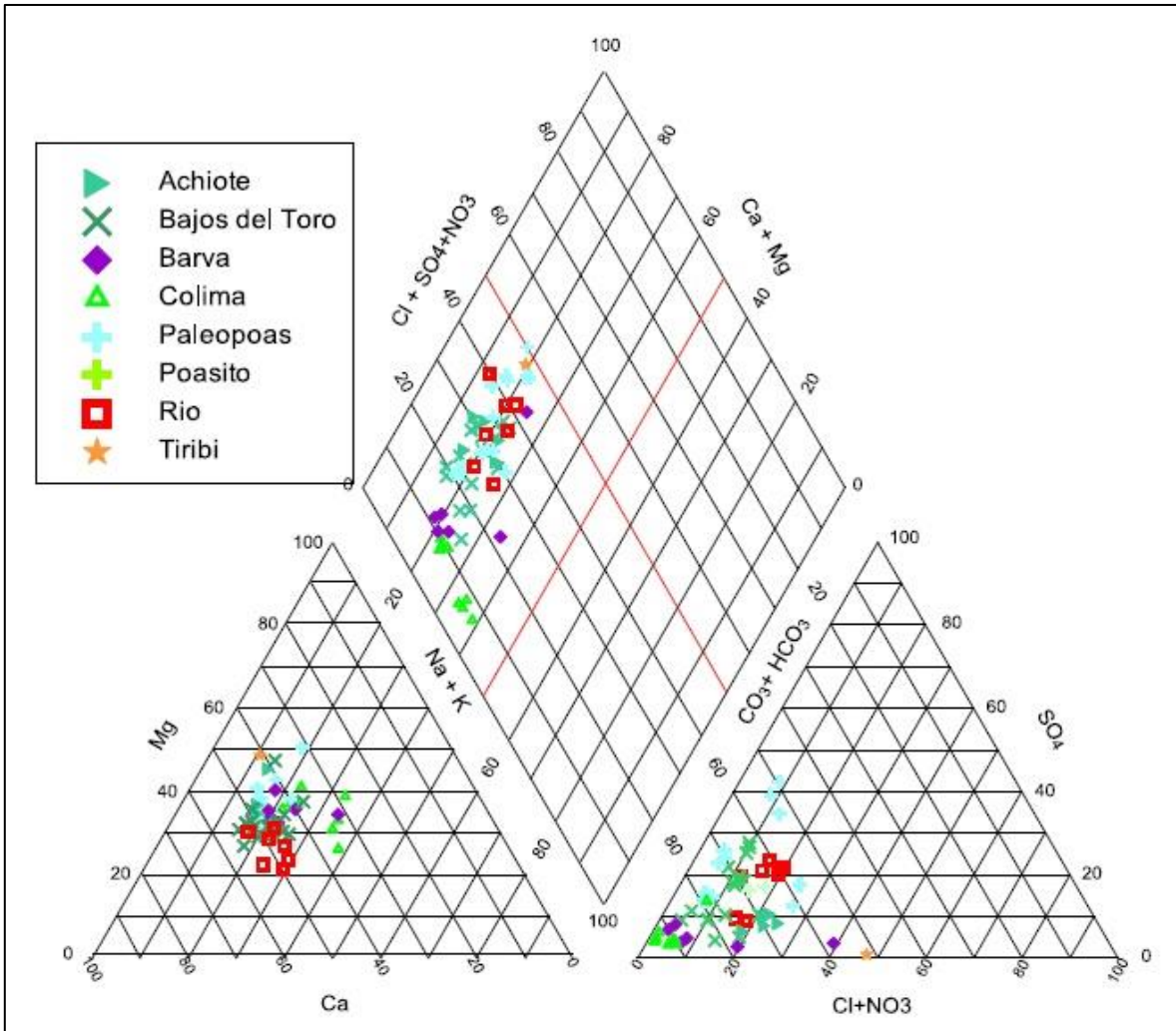


Figura 5.6: Diagrama de Piper para las aguas de las formaciones del este de la subcuenca del Río Grande

El punto de muestreo BA-876 es el único que capta la formación Tiribí. El agua está bastante contaminada (38,6 mg/L de NO₃) y no se pudieron mostrar en el diagrama todos los resultados, solo para la primera campaña de septiembre 2012. Este punto no está incluido en los otros gráficos presentados ya que no se considera como representativo de la formación Tiribí.

En general se puede concluir que las aguas son de tipo bicarbonatadas cálcicas. Se notan dos tipos de evolución en el triángulo de los aniones: uno por enriquecimiento en Cl y NO₃ para las aguas de la formación Barva y la otra por enriquecimiento en sulfato y empobrecimiento relativo en bicarbonatos, esto se nota particularmente para los sitios de la formación Paleopoás (Prendas y Cholina) y Poasito (Chayotera) situadas al pie del volcán.

Para entender mejor tanto la variación temporal y como espacial de la composición química de las aguas se puede graficar las concentraciones de un elemento de origen natural dominante como el calcio y la de un elemento antrópico como el nitrato, tal y como se muestra en las Fig.5.7 y Fig.5.8, es importante indicar que los puntos muestreados una sola vez no están representados en estas figuras. Para los otros puntos hay un máximo de 5 muestras para un mismo punto correspondiente a las 5 campañas de muestreo.

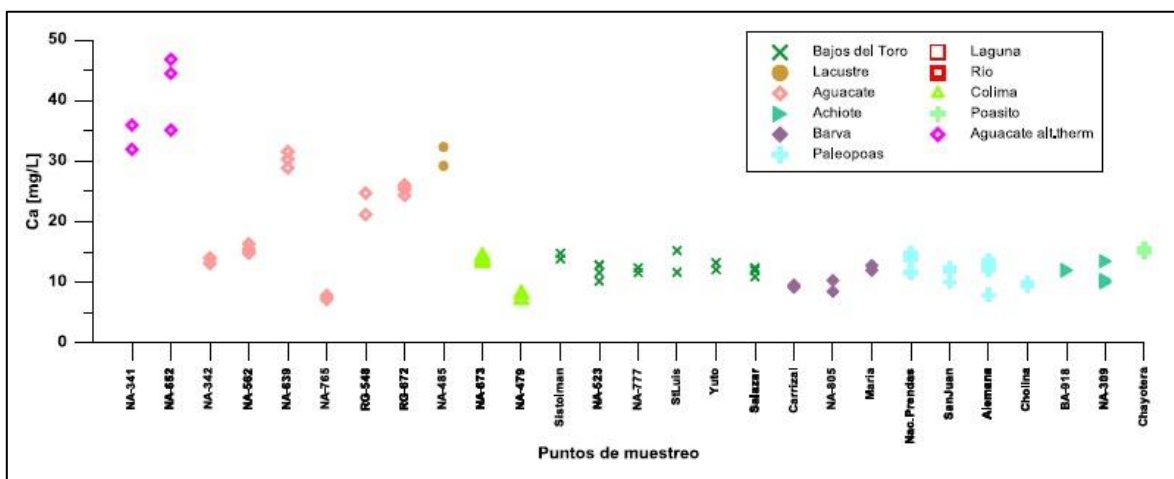


Figura 5.7: Concentración en calcio en los varios puntos de muestreo para los 2 a 5 campañas de muestreo.

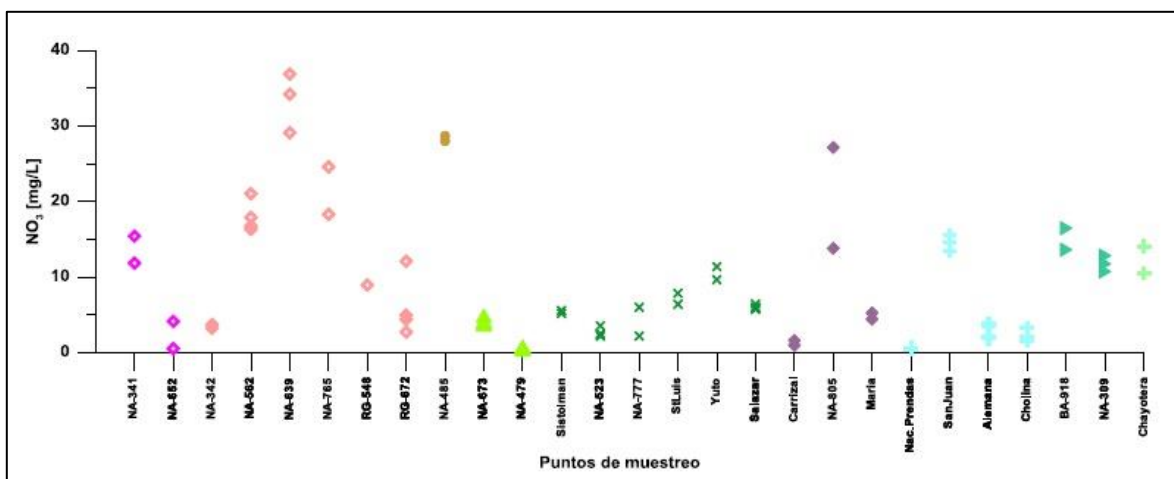


Figura 5.8: Concentración en nitrato en los varios puntos de muestreo para los 2 a 5 campañas de muestreo.

En la Fig. 5.7 se notan pocas variaciones en la concentración del calcio para las diferentes formaciones del este de la subcuenca. Unos puntos muestran una variación temporal de casi 40%. Las concentraciones bajas (alrededor de 10 mg/L) y

condiciones de laboratorio, así como las condiciones naturales podrían explicar estas variaciones.

Las aguas analizadas de las formaciones del oeste de la subcuenca (Aguacate) son las que muestran las mayores variaciones de las concentraciones entre un punto y otro. El punto NA-652 tiene una variación de un poco más de 10 mg/L de calcio, lo que corresponde con menos del 25%.

Considerando una incertidumbre analítica bastante alta se puede considerar que la variación estacional/temporal de la composición química de las aguas esta baja en cuenta a los elementos de origen natural (roca).

Considerando la concentración del nitrato (Fig.5.8), el cual se considera un elemento mayormente de origen antrópico, las variaciones observadas de una campaña de muestreo a la otra pueden ser importantes. Para el punto NA-805 la variación es de 15 mg/L (casi 50%). Los isótopos estables mostraron que este pozo es muy vulnerable con un tiempo de renovación de las aguas muy corto.

5.2 Relación Ca versus HCO₃

La relación Ca vs HCO₃ tiene una recta de una relación 1:2, lo cual representa la disolución de formaciones de tipo CaCO₃, a partir del gráfico se confirma la mineralización que ocurre en las aguas de la formación Aguacate (lavas, brechas) y el Lacustre de Palmares (Fig.5.9).

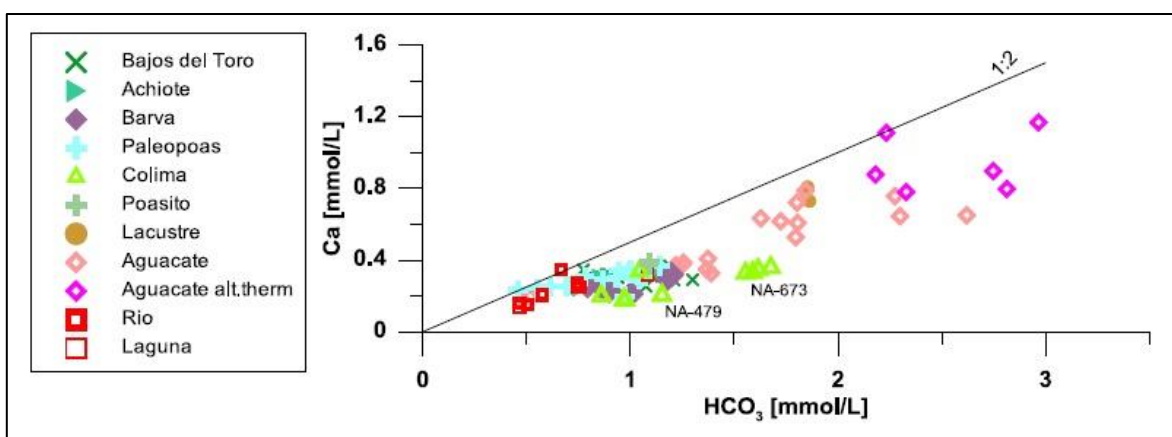


Figura 5.9: Ca vs bicarbonatos para las muestras del acuífero del Rio Grande

Se nota que la composición química de las aguas representa bastante bien la litología donde circulan las aguas con una relativa buena correlación con respecto a la

evolución de la razón concentración/dilución entre las aguas de la formación Aguacate, Colima, Barva y Paleopoás.

El punto de muestreo NA-673 capta aguas de la formación Colima en un pozo bastante profundo, mientras que otro punto, el pozo NA-479, aunque capta estas mismas formaciones podría estar influenciado por aguas que circulan en las formaciones superiores de Tiribí. Esta información se debe analizar con cuidado debido a que el balance iónico es alto, probablemente debido a problemas en medición de la alcalinidad.

5.3 Relación Ca versus SO_4

En la Fig. 5.10 se nota que las aguas de los manantiales Prendas, Cholina, los cuales están en las formaciones Paleopoas, la Chayotera, así como las de la formación Bajos del Toros están enriquecidas en sulfatos. Estas fuentes están influenciadas por los vientos del Atlántico que pasan sobre el volcán Poás, tal y como lo confirmaron los resultados de los isotopos estables. La cercanía al volcán permite un enriquecimiento en sulfatos originado por la deposición atmosférica.

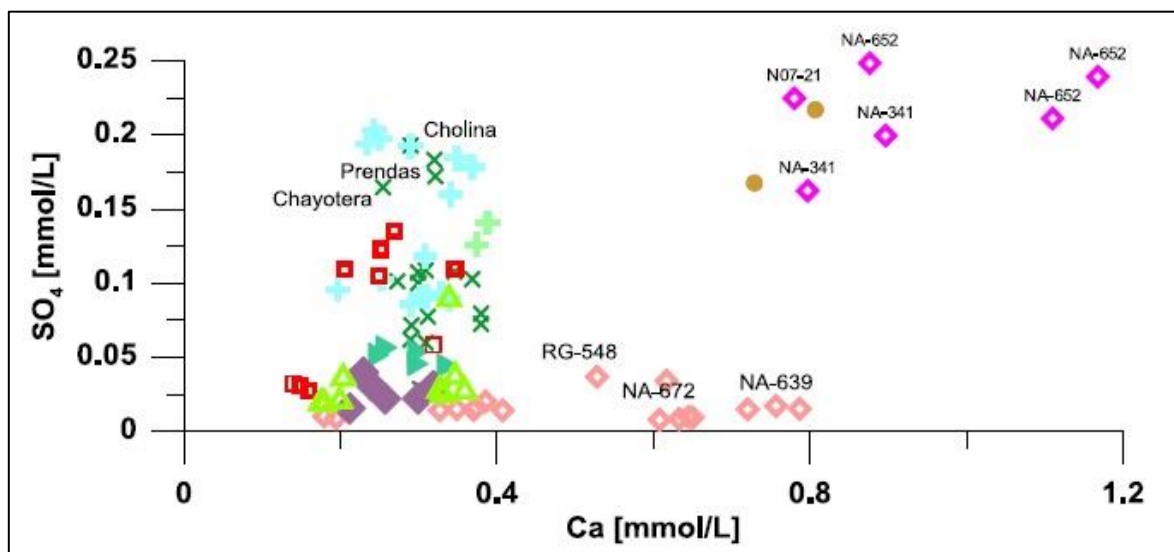


Figura 5.10: Sulfato vs calcio para las muestras del acuífero del Río Grande

Las aguas influenciadas por la formación Aguacate se pueden dividir en dos grupos. El grupo de aguas con alteración hidrotermal (NA-652, NA-341, NA-07.21) las cuales están más enriquecidas en sulfatos. Es importante mencionar que las aguas del pozo NA-652 se distinguen por contener arsénico, alrededor de 6 $\mu\text{g/L}$. El otro grupo de aguas de la formación Aguacate (NA-639, NA-672, RG-548) no están enriquecidas en sulfatos.

Las aguas que circulan en las formaciones Bajos del Toro y Paleopoás muestran una importante variación en la concentración en sulfatos sin cambio significativo en calcio. Estos puntos de muestreo se localizan más cerca del volcán Poás.

5.4 Concentración de Cl versus SO_4

La Fig.5.11 resume varios procesos químicos que se pueden observar en la subcuenca del Río Grande.

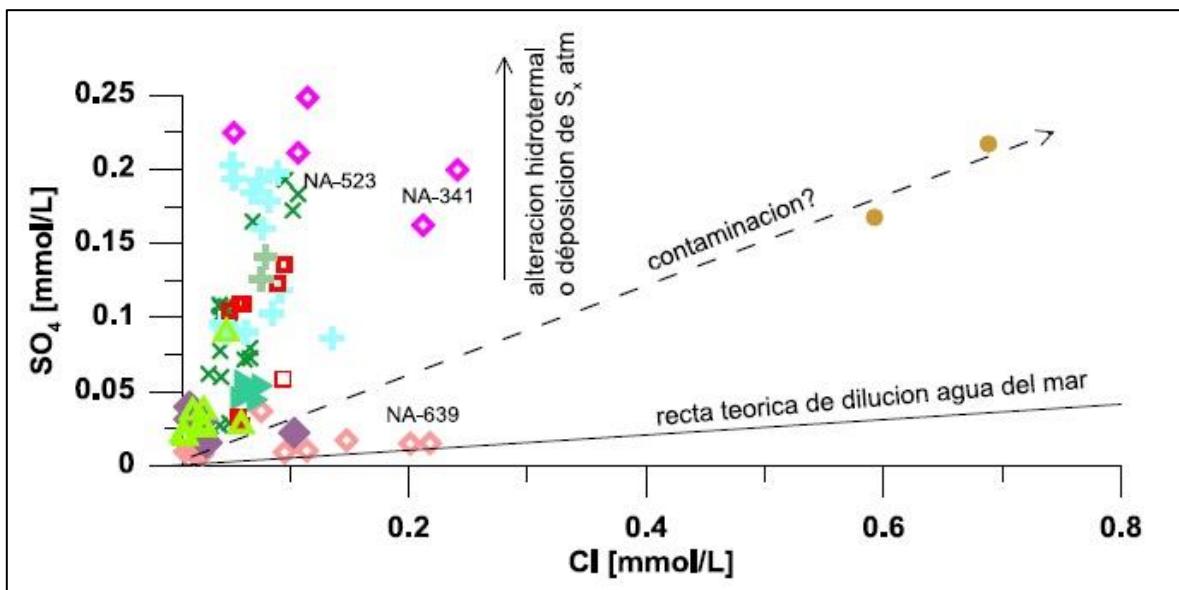


Figura 5.11: Sulfato vs cloruro para las muestras del acuífero del Río Grande

Las aguas de la formación Aguacate tienen influencia de alteración hidrotermal ya que muestran enriquecimiento en SO_4 y valores bajos en Cl .

Las aguas de la formación Aguacate sin alteración hidrotermal (NA-639, NA-672, RG-548) tienen valores bajos en sulfatos. Las aguas del pozo NA-639 tienen una evolución a lo largo de la línea teórica de mezcla con agua del mar. Estas aguas tienen una concentración en nitrato alto (encima de 30 mg/L) que podría también explicar en parte el enriquecimiento en cloruro.

Las aguas que circulan en el Lacustre de Palmares tienen una concentración alta en SO_4 y en Cl . El sulfato podría provenir de los minerales presentes en las rocas o también de la misma fuente de contaminación que aporta nitrato y potasio a las aguas.

Los manantiales al pie del volcán Poas (Cholina, Chayotera y Prendas) están enriquecidos en sulfatos por deposición atmosférica influenciada por el volcán. La presencia de sulfatos en el aire está confirmada por el análisis de las aguas de lluvia de la estación de Finca Inés.

Además una muestra de la formación Bajos del Toro, NA-523, también tiene un contenido en sulfato un poco más alto (16-20 mg/L).

Las aguas de la formaciones Barva y Colima tienen baja mineralización.

5.5 Otras relaciones hidrogeoquímicas

Los gráficos de la Fig. 5.12 confirman las hipótesis descritas. En todos los gráficos está indicada la línea teórica de mezcla con el agua del mar. Se nota un enriquecimiento importante en Na, Ca, Mg y K comparando con el cloruro por alteración de las rocas ricas en minerales como aluminio-silicatos sódicos, feldespatos, plagioclasas, piroxenos.

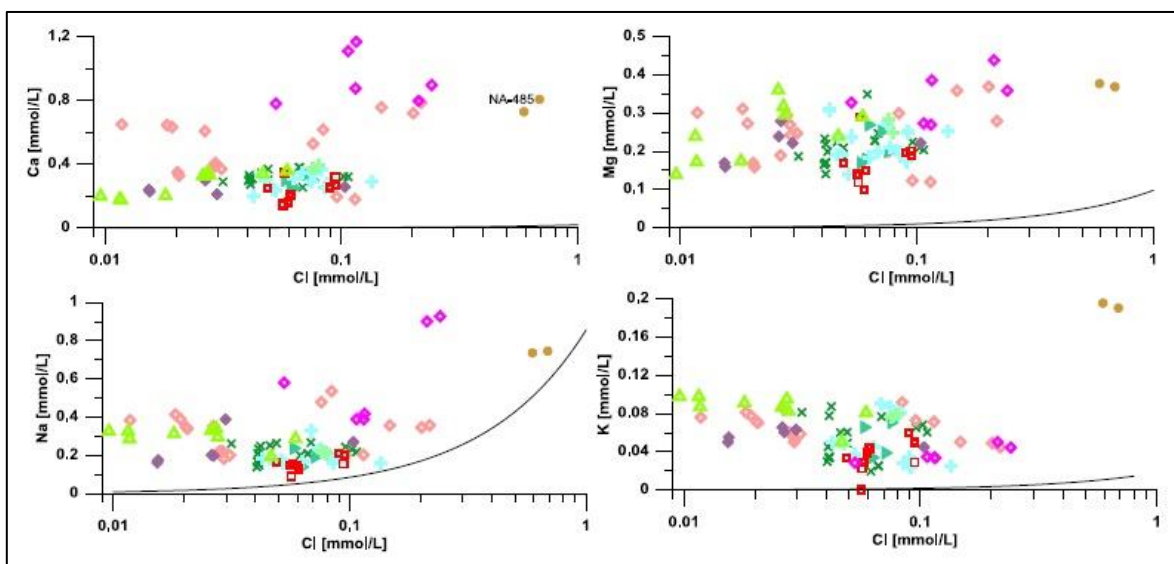


Figura 5.12: Ca, Mg, Na y K vs cloruro para las muestras del acuífero del Río Grande

El potasio es poco abundante en las aguas subterráneas en comparación con las de la lluvia. La composición química de las rocas de la subcuenca indica variaciones en contenido en potasio. En las aguas, a la excepción de la formación Lacustre, solamente las aguas de la formación Colima contienen ligeramente más potasio.

En formaciones carbonatadas, se esperaría encontrar concentraciones en magnesio más altas para las aguas con más tiempo de residencia por las reacciones agua/roca,

pero como en el área de estudio no hay este tipo de rocas, no se destaca ningún esquema particular para el Mg.

En los casos en que la mineralización de las aguas proviene predominantemente de la meteorización de los minerales de las rocas se obtiene una buena correlación entre el total de los cationes y los bicarbonatos o la alcalinidad total, tal y como se muestra en la Fig.5.13). Los feldespatos y carbonatos son los minerales que regulan la química de las aguas. En la subcuenca de Río Grande la correlación es buena para las aguas de la formación Colima y algunas muestras de la formación Aguacate confirmando que la disolución de los minerales es el proceso que domina en estas aguas. En las aguas con influencia hidrotermal, de depósitos de azufre o con influencia antropogénica, las aguas se localizan muy por encima de la recta 1:1 mostrando que otros procesos entran en juego.

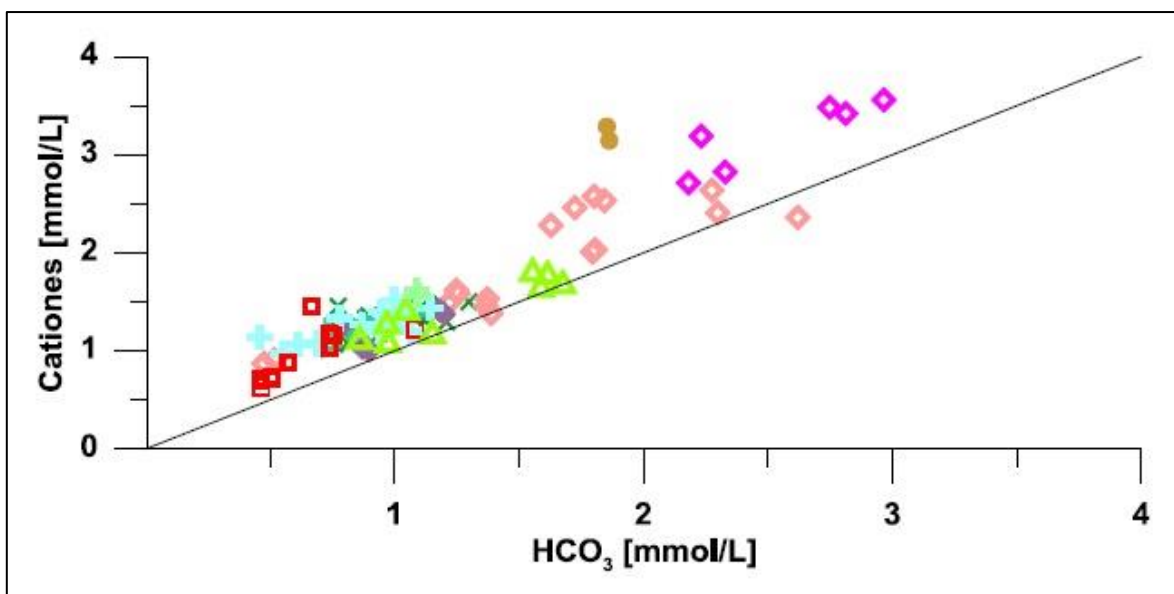


Figura 5.13: Suma de los cationes vs bicarbonatos para las muestras del acuífero del Río Grande

En la Fig.5.14 se nota particularmente la evolución temporal de las aguas de la Formación Colima en el pozo NA-479 y las del Grupo Aguacate del pozo RG-672.

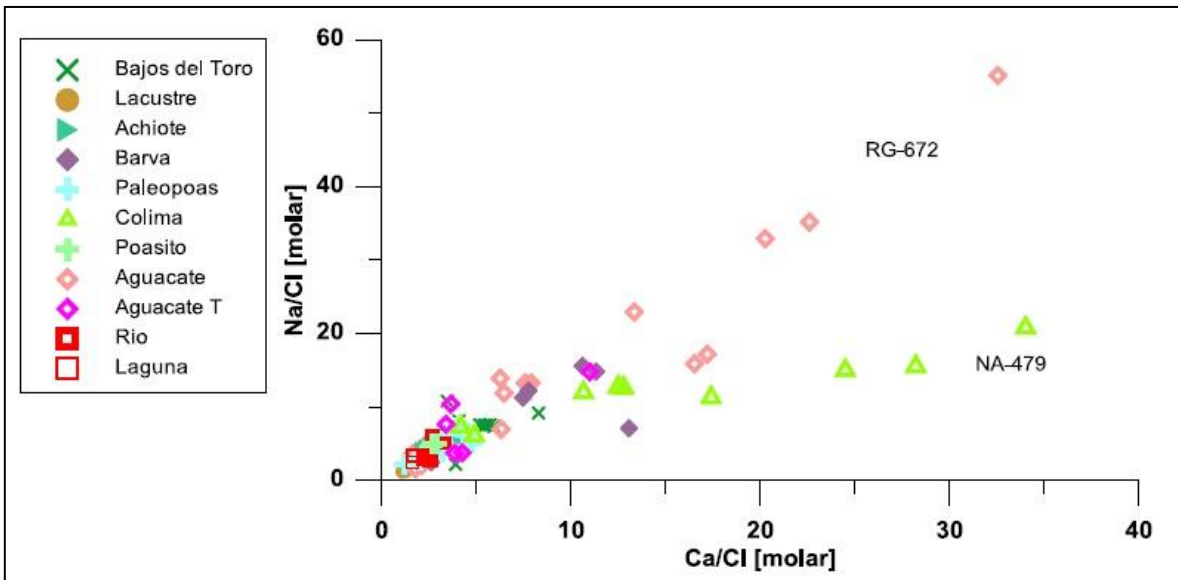


Figura 5.14: Na/Cl vs Ca/Cl para las muestras del acuífero del Río Grande

En el gráfico Ca/Cl vs cloruro (Fig.5.15) se notan dos evoluciones diferentes para las aguas de Colima y las de Aguacate. Esta misma evolución se nota, de forma menor, para la relación Mg/Cl. Tanto en estos gráficos como en los anteriores sobresale una muestra de la formación Achiote, NA-309 del 15/10/2014, la cual tiene una composición química muy diferente en los demás muestreos para este mismo punto.

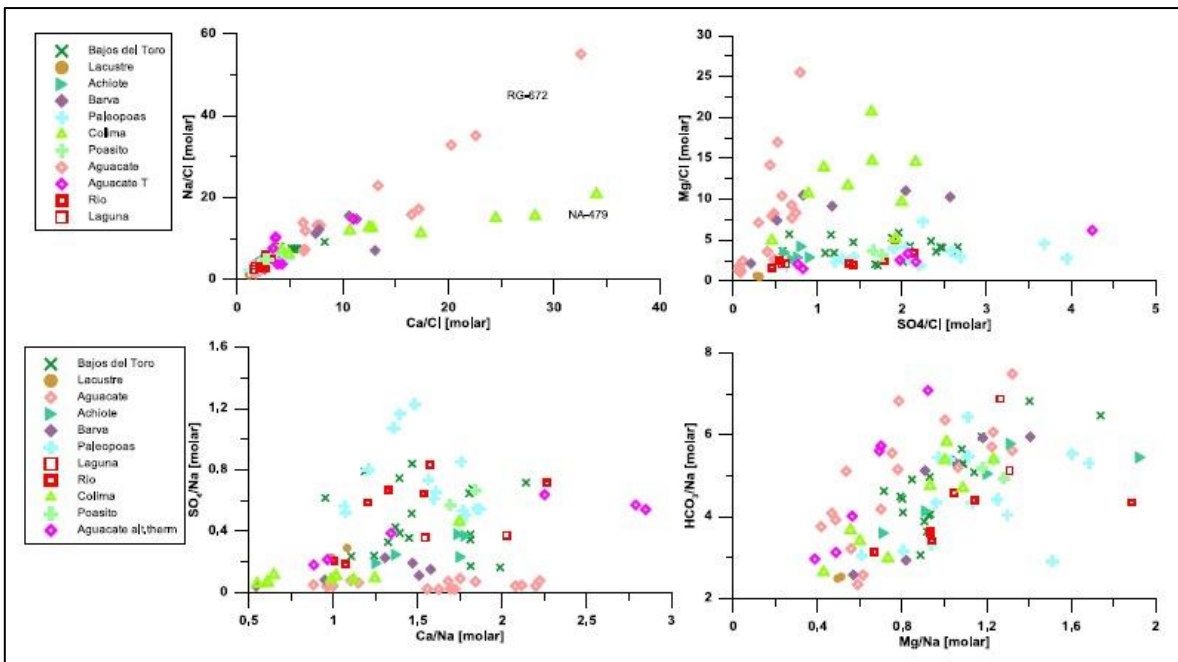


Figura 5.15: Ca/Cl, Na/Cl, Mg/Cl, SO₄/Cl vs cloruros para las muestras del acuífero del Río Grande

Como se observó antes los valores de la razón SO_4/Cl dependen del origen de los sulfatos en las aguas, así tienen influencia el tipo de formación geológica, la alteración hidrotermal o la deposición atmosférica por la influencia del volcán Poás.

En síntesis, la composición química de las aguas subterráneas refleja bastante bien la geoquímica de las formaciones geológicas acuíferas con variaciones menores debido a procesos de dilución/concentración.

Cuatro de las ocho formaciones estudiadas muestran evolución hidrogeoquímica en los diferentes puntos de agua muestreado, el Colima, el Aguacate, el Barva y el Paleopoás.

El principal fenómeno que permite un cambio químico de las aguas del Barva parece ser la contaminación.

Las aguas del Paleopoás tienen una composición química influenciada por los depósitos volcánicos y presentan concentraciones en sulfatos relativamente altas.

Una parte de las aguas del Aguacate muestran claramente una variación química debido a la influencia de la alteración hidrotermal.

Las variaciones del Colima se dan principalmente en las concentraciones de calcio, magnesio y bicarbonato y podría relacionarse al tiempo de residencia de las aguas en el sistema.

Las aguas de las formaciones Achote, Bajos del Toro y Poasito no cambian o cambian muy poco y son pobres en minerales. Esto indica una interacción débil con la roca por tiempos de residencia cortos del agua en el acuífero.

5.6 Isótopos estables en aguas

Se analizaron datos de dos laboratorios de dos campañas diferentes en los mismos sitios de muestreo. Considerando las variaciones importantes que se ven entre estas dos campañas se decidió no utilizar los datos del laboratorio del CICA (Fig.5.16).

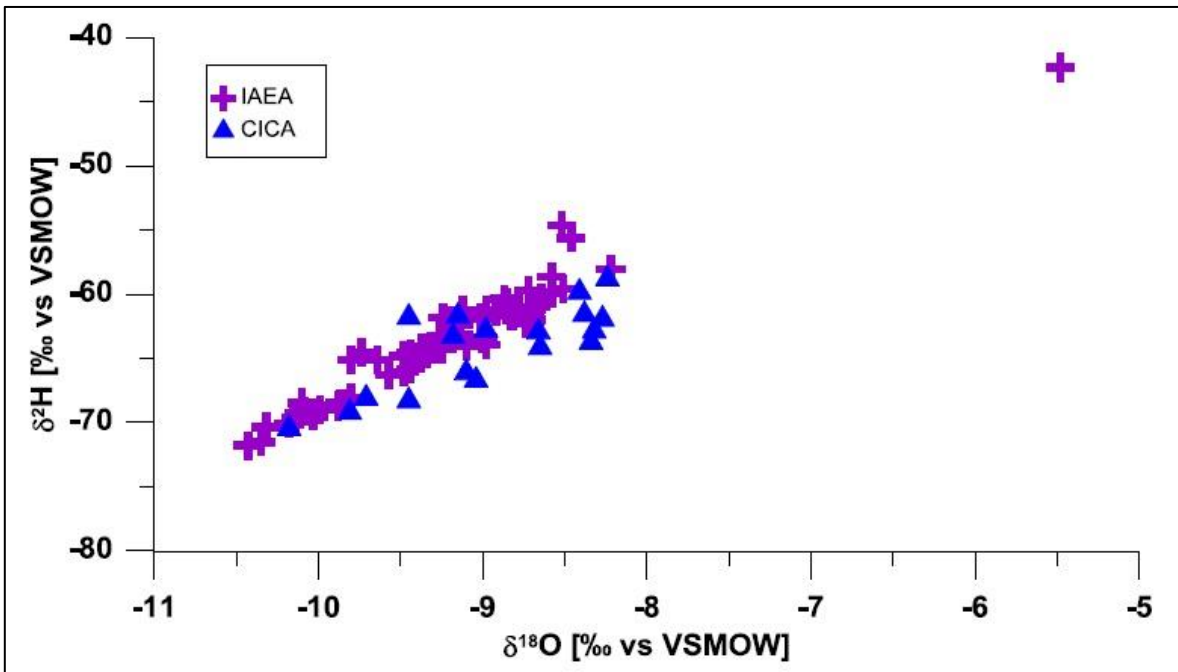


Figura 5.16: Comparación de los resultados de los análisis de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ realizados por dos laboratorios para los mismos puntos de muestreo a diferentes épocas del año.

Así quedan disponibles 63 datos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ correspondientes a las tercera y cuarta campañas de muestreo de septiembre y noviembre 2014.

La línea meteórica local (LML) deducida de los datos disponibles de varias estaciones de lluvia de Costa Rica y disponible en la base de datos del GNIP (Lachniet and Patterson, 2002) de ecuación $\delta^2\text{H} = 7,8 * \delta^{18}\text{O} + 7,9$ se añadió a la Fig. 5.17 así como la línea meteórica mundial (LMM).

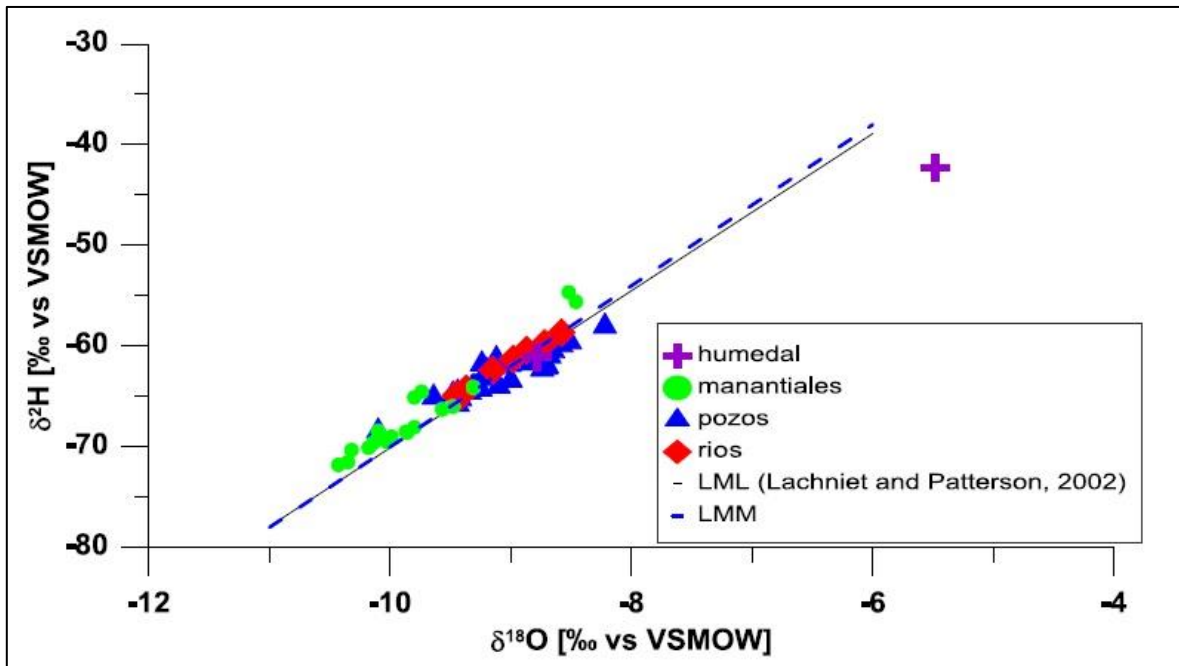


Figura 5.17: Resultados de los análisis de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ realizados en 2014 – La LML proviene de Lachniet and Patterson (2002).

Una sola muestra está debajo de las líneas locales y mundiales de precipitación, indicando evaporación. Esta muestra corresponde a la Laguna de Fraijanes, ésta muestra fue tomada en septiembre 2014. Las aguas del humedal no muestran una evaporación en la muestra de noviembre 2014 correspondiente a una época lluviosa donde ocurre una recarga importante.

Las aguas de los ríos quedan muy cerca de la LML mientras las de las aguas subterráneas pueden encontrarse un poco por encima o por debajo de la LML.

El agua de la laguna durante la época de recarga de noviembre tiene una composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ -8,78‰ y $\delta^2\text{H}$ -61,1‰. Esta composición isotópica podría corresponder al promedio de la composición isotópica de las aguas de lluvia. Este promedio corresponde a valores mínimos para la época de lluvia según el análisis de los datos de estaciones de precipitación hecho por Lachniet y Patterson (2002).

En la Fig.5.18 y Fig.5.19 que representan las muestras del muestreo de septiembre 2014 (muestreo 3) y de noviembre 2014 (muestreo 4) se puede notar que para los manantiales las variaciones entre estos meses son muy débiles y no sistemáticos, mientras que dos pozos (BA-918 y NA-805) varían de manera significativa.

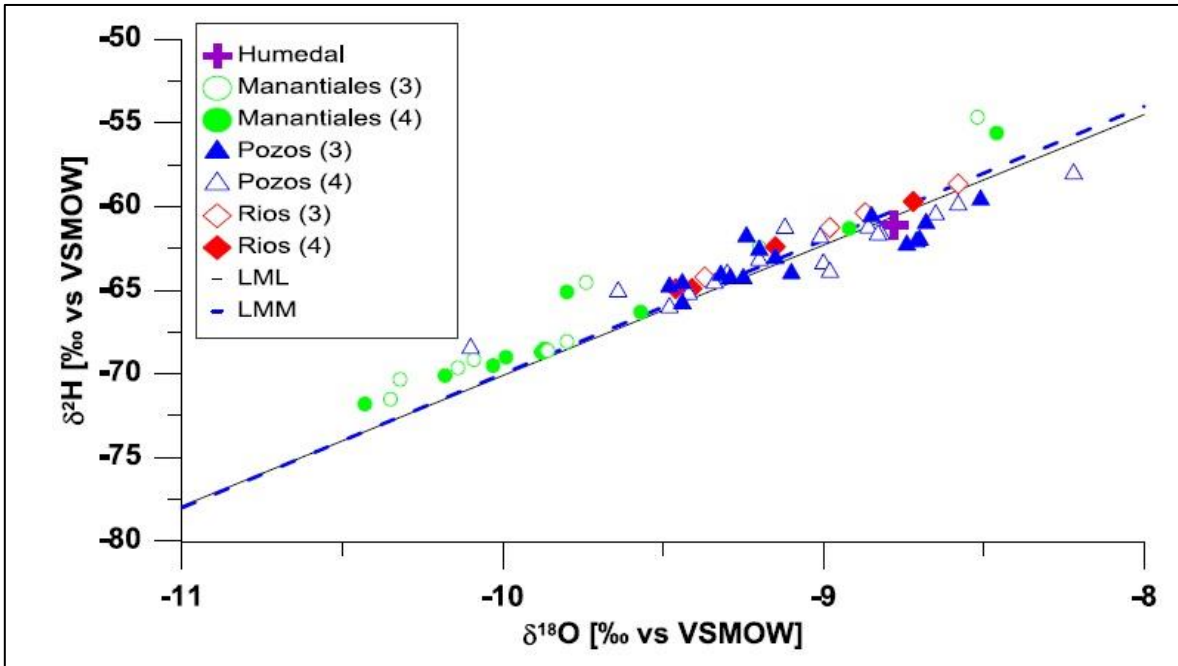


Figura 5.18: Comparación de los resultados de los análisis de $\delta^{18}O$ y δ^2H de las dos últimas campañas de muestreo para los manantiales, ríos, pozos y laguna.

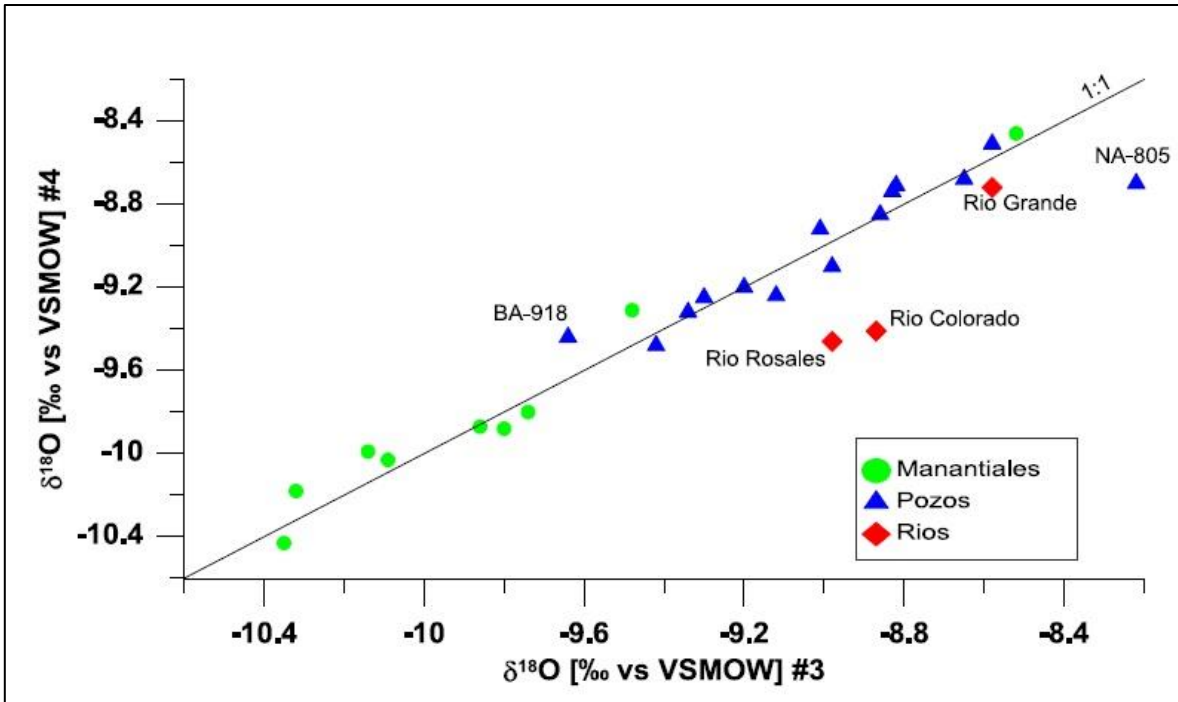


Figura 5.19: Comparación de los resultados de los análisis de $\delta^{18}O$ de la tercera y de la cuarta campaña de muestreo.

El pozo NA-805 varía en el mismo sentido que los dos ríos Rosales y Colorado. Hay un empobrecimiento durante la cuarta campaña de muestreo que puede reflejar una importante recarga por lluvias.

La firma isotópica de los ríos está más empobrecida en noviembre que las de la laguna localizada a mayor altura ($\delta^{18}\text{O}$ -9,41‰/ $\delta^2\text{H}$ -64,9‰ para el Colorado y $\delta^{18}\text{O}$ -9,46‰/ $\delta^2\text{H}$ -64,9‰ por el Rosales).

El pozo NA-805 situado en la parte sur-este de la subcuenca, formación Colima, podría ser muy vulnerable. La composición química de las aguas varía de manera importante también de un período a otro y su contenido en nitrato llega a más de 27 mg/L en septiembre. El contenido en tritio es de 1 UT indicando aguas recientes.

El punto BA-918 presenta una evolución mensual diferente a la de los otros puntos con un enriquecimiento durante el mes de noviembre. Este pozo está localizado cerca del río Poás, no muestreado en la parte este de la subcuenca. El manantial La Alemana localizado aprox. A 5 km de este punto presenta también un enriquecimiento especialmente en octubre.

De forma sorprendente, el río Grande, localizado en el sector noroeste no presenta grandes variaciones entre los meses de octubre y diciembre.

Para cuatro puntos hubo un muestreo adicional en octubre llevando a 3 el número de muestras al mismo punto entre septiembre y noviembre 2014. Estos datos confirman la variación al río Colorado y el comportamiento diferente del punto BA-918.

Este estudio permite indicar que solamente una parte de las variaciones isotópicas observadas provienen directamente de una variación temporal de la firma isotópica de las lluvias.

El estudio de Lachniet and Patterson (2002) indica que las épocas con más lluvia (mayo a noviembre) presentan lluvias con firma isotópica más empobrecida.

No se dispone al momento de redactar este informe los resultados de la precipitación mensual para el año 2014 para confirmar la relación entre los periodos de lluvia y las variaciones isotópicas en los ríos y el pozo NA-805.

5.7 Variaciones isotópicas en función de la altura

La altitud máxima de la subcuenca es de alrededor de 2700m (volcán Poás) y la parte baja de la subcuenca queda a un promedio de 620 m. Así se puede considerar que el

efecto de altitud sobre la composición isotópica puede ser dominante en la zona de estudio.

La línea altitudinal considerada para el Valle central en Lachniet (2002) es, para el $\delta^{18}\text{O}$, de $-1,9\text{‰}/\text{km}$ y $-1,4\text{‰}/\text{km}$ en el vertiente Pacífico.

El efecto altitudinal calculado para el mes de septiembre 2014 o el de noviembre 2014 es muy similar con un empobrecimiento de $-2,25\text{‰}/\text{km}$ para el $\delta^{18}\text{O}$ y de $-14,3\text{‰}/\text{km}$ para el $\delta^2\text{H}$. Estos valores están muy dentro del rango de valores observados en el mundo.

Se observa (Fig. 5.20) que la Laguna Fraijanes no sigue el patrón. Situada a una altitud alta está relativamente enriquecida. En el mismo sector, las dos nacientes Prendas y Chayotera siguen también un patrón diferente. El efecto altitudinal es similar ($-2\text{‰}/\text{km}$ para el $\delta^{18}\text{O}$) pero las aguas están mucho más enriquecidas. Estos puntos están situados en el corredor entre el volcán Poás y el volcán Barva y las aguas podrían recibir precipitaciones influenciadas por el Atlántico.

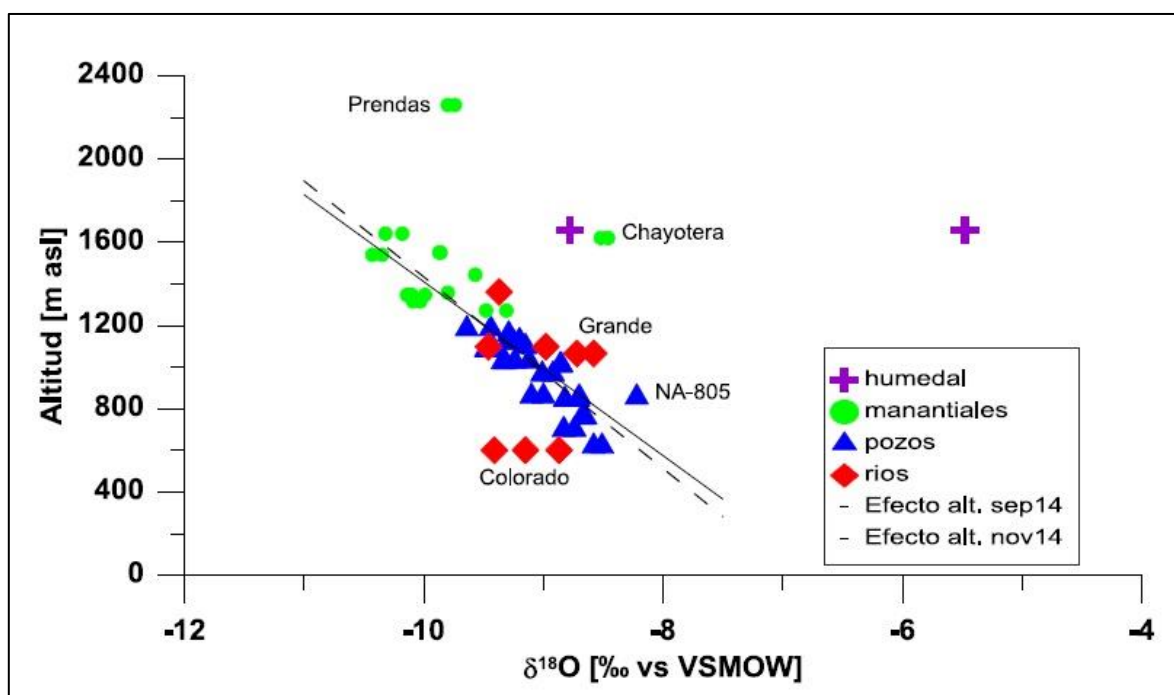


Figura 5.20: Altitud vs $\delta^{18}\text{O}$ para las muestras de las dos últimas campañas de muestreo para los manantiales, ríos, pozos y laguna.

El pozo NA-805 está también un poco más enriquecido como descrito antes.

Las aguas del río Colorado se salen también del patrón general quizás por ser el resultado de una mezcla de varios ríos de origen y trayecto diferente. Las aguas son relativamente empobrecidas.

Se observa una grande variación del exceso en deuterio que difícilmente se puede relacionar con la altitud, longitud o latitud seguramente por combinación de varios efectos en la señal de entrada (la lluvia). Los dos nacientes de Chayotera y Prendas tienen un exceso de deuterio encima de 13‰, lo que podría reflejar una historia de la precipitación que ha generado el caudal diferente (Fig.5.21).

Para los puntos que tienen un exceso en deuterio superior a 9,5‰, se nota una relación entre la latitud y el aumento del exceso de deuterio del oeste hacia el este.

A la excepción de los pozos localizados a una altitud superior a 1000 m y del NA-673 se destacan dos grupos de pozos. Unos pozos se agrupan alrededor del Río Grande de punto de vista isotópico y también geográficamente. El otro grupo presenta un exceso en deuterio por debajo 9 ‰.

El punto NA-673 no cabe en la línea de variación con la altitud. Una de las posibles razones sería la influencia de un flujo regional recargado a una altura mucho más alta que el punto de muestreo o sea a una altitud promedio de 1400m. La información del tritio indica que el flujo regional sería de tiempo de residencia de no más de unos 50 años ya que el valor del tritio es de 1 UT.

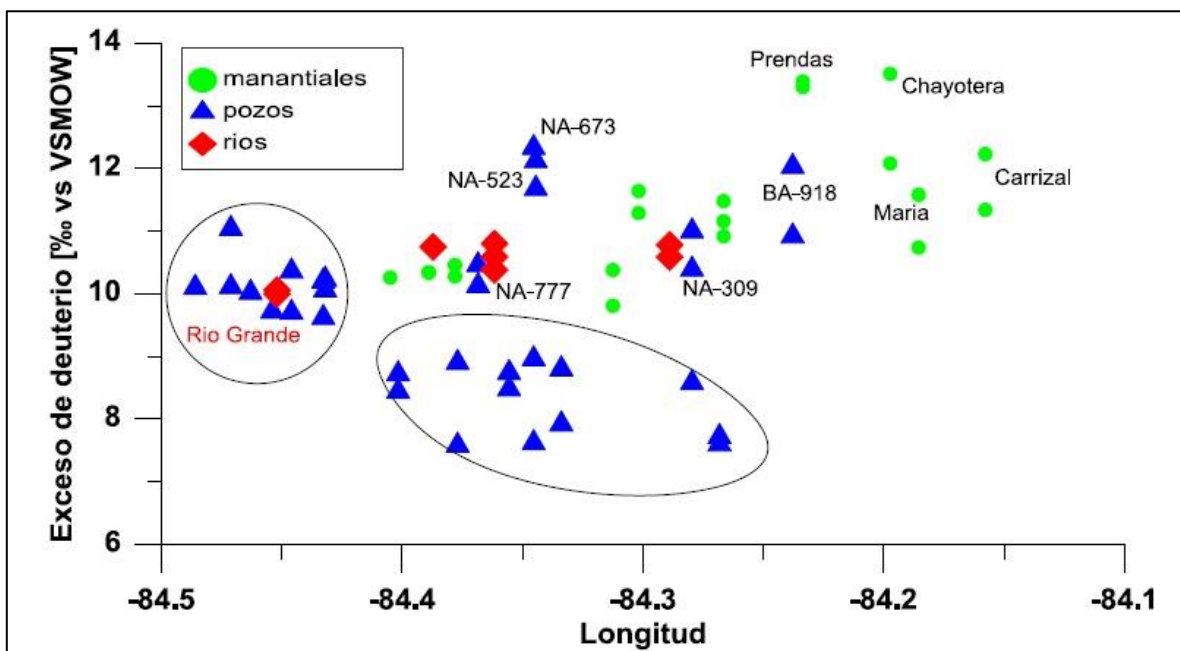


Figura 5.21: Exceso en deuterio en las muestras en función de la longitud.

5.8 Análisis de tritio

El análisis de los resultados de tritio fue realizado por el Dr. J.A. Corcho-Alvarado (informe IAEA 2014).

De los 20 análisis de tritio se pudo deducir que 19 pozos reciben recarga reciente (0-50 años). Un solo punto, el pozo NA-342, ubicado en el Hospital de San Ramón, presenta valores $<0,4$ lo que significaría una recarga dominante anterior al periodo de los ensayos nucleares atmosféricos. Este punto no se destaca en las figuras.

La interpretación de los datos (Fig. 5.22; Fig.5.23) permite indicar que la mayor parte de las aguas infiltraron en estos últimos años (o decenas de años).

Un estudio llevado a cabo en los años 80 y publicado por Darling et al. (1989) en la zona volcánica del Valle Central indicaba tiempo de residencias de las aguas subterráneas de las formaciones Colima y Barva de 10 a 15 años. Esta información es consistente con los datos tomados en 2014.

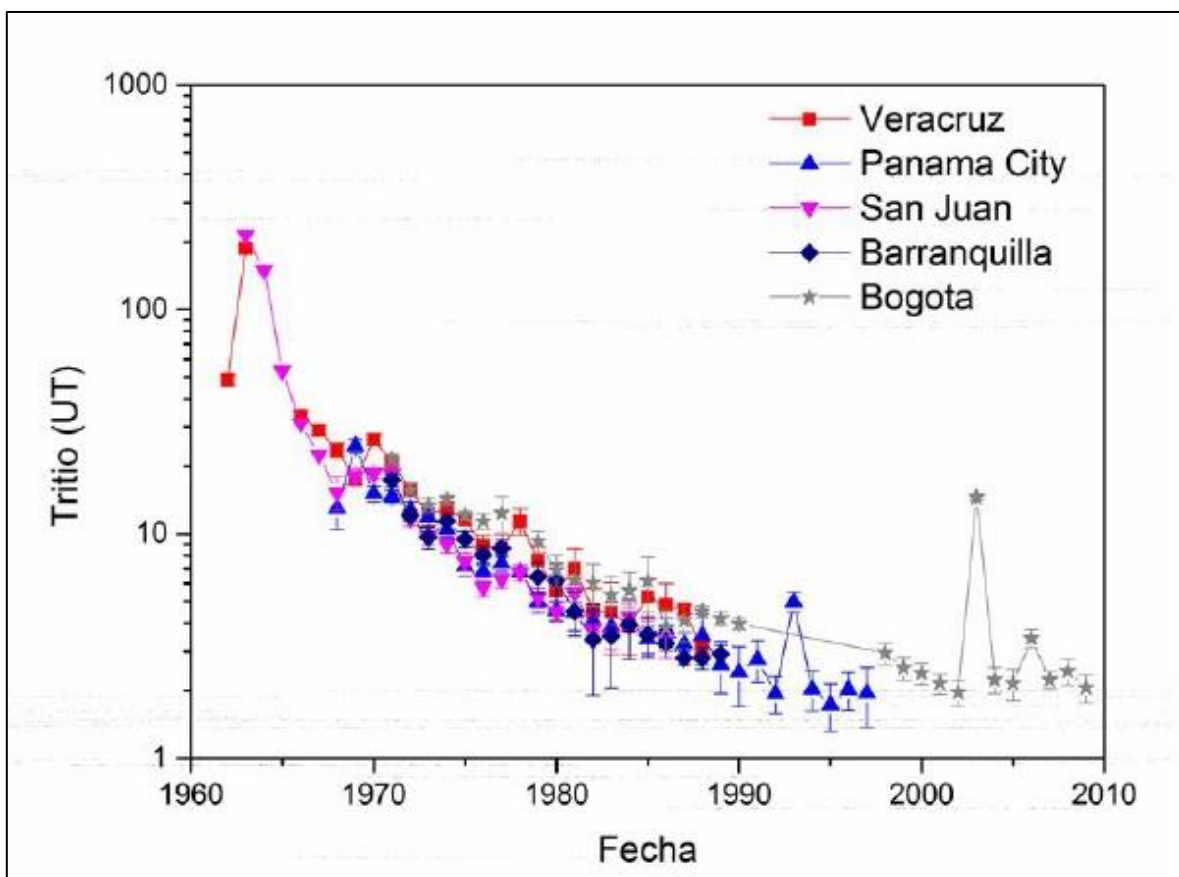


Figura 5.22: Contenido en tritio de la precipitación de las estaciones localizadas cerca de Costa Rica (datos del GNIP/IAEA).

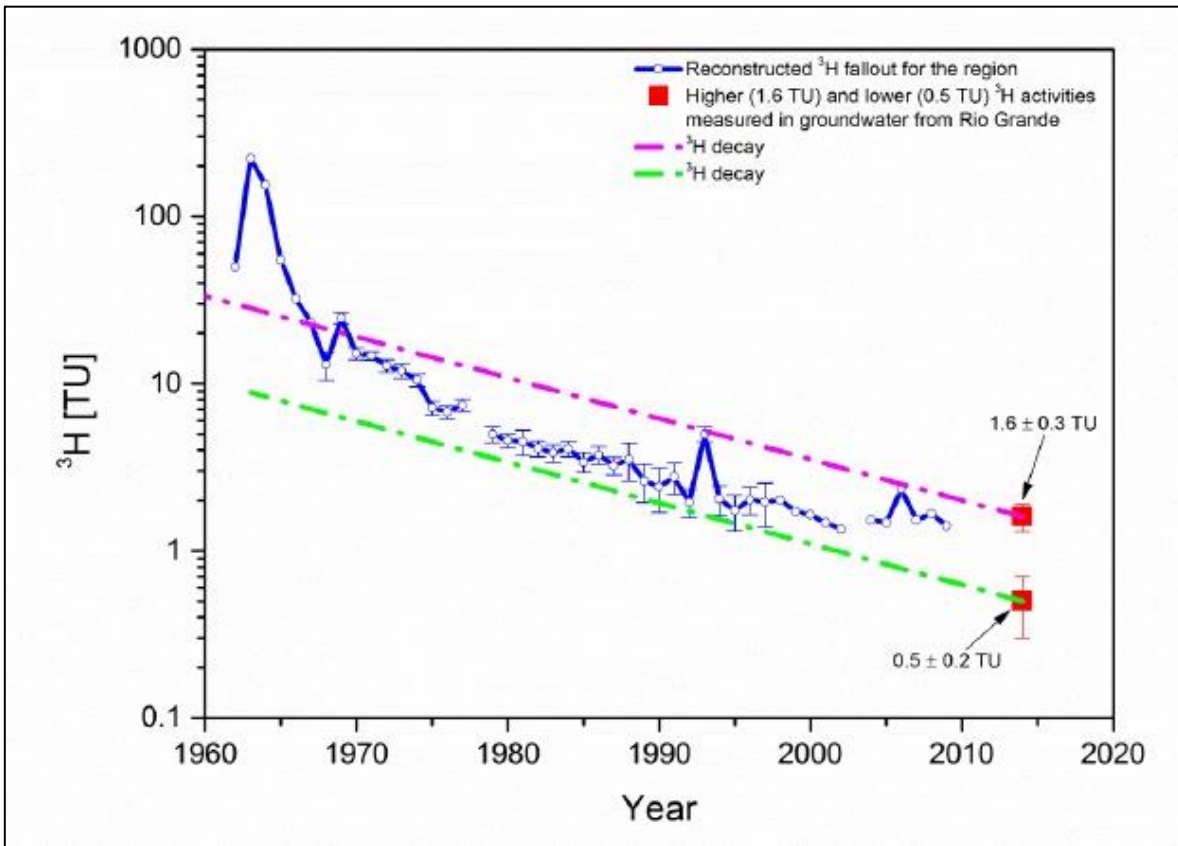


Figura 5.23: Comparación del contenido en 3H en las aguas subterráneas del acuífero Río Grande con la crónica de las precipitaciones reconstruida para Costa Rica (línea azul). Solamente el valor máximo (1,6 TU) y mínimo (0,5 TU) de 3H medido en las aguas subterráneas estas indicadas (cuadros rojos). Las dos líneas de decrecimiento del 3H están también indicadas (magenta y verde).

5.9 Análisis del $\delta^{13}C$ y de la actividad ^{14}C

Cinco muestras fueron analizadas para estimación de la edad del agua. Suponiendo un tiempo de residencia de las aguas en las rocas importante la herramienta carbono-14 fue utilizada.

La actividad en ^{14}C de las aguas varía entre 90,93 y 111,4 pmc, lo que indica que las aguas no muy antiguas (Fig.5.24). Para tres muestras, los valores encima de 100 pmc indican la presencia de carbono de origen de los ensayos nucleares o sea de menos de 60 años en un medio sin formaciones carbonatadas.

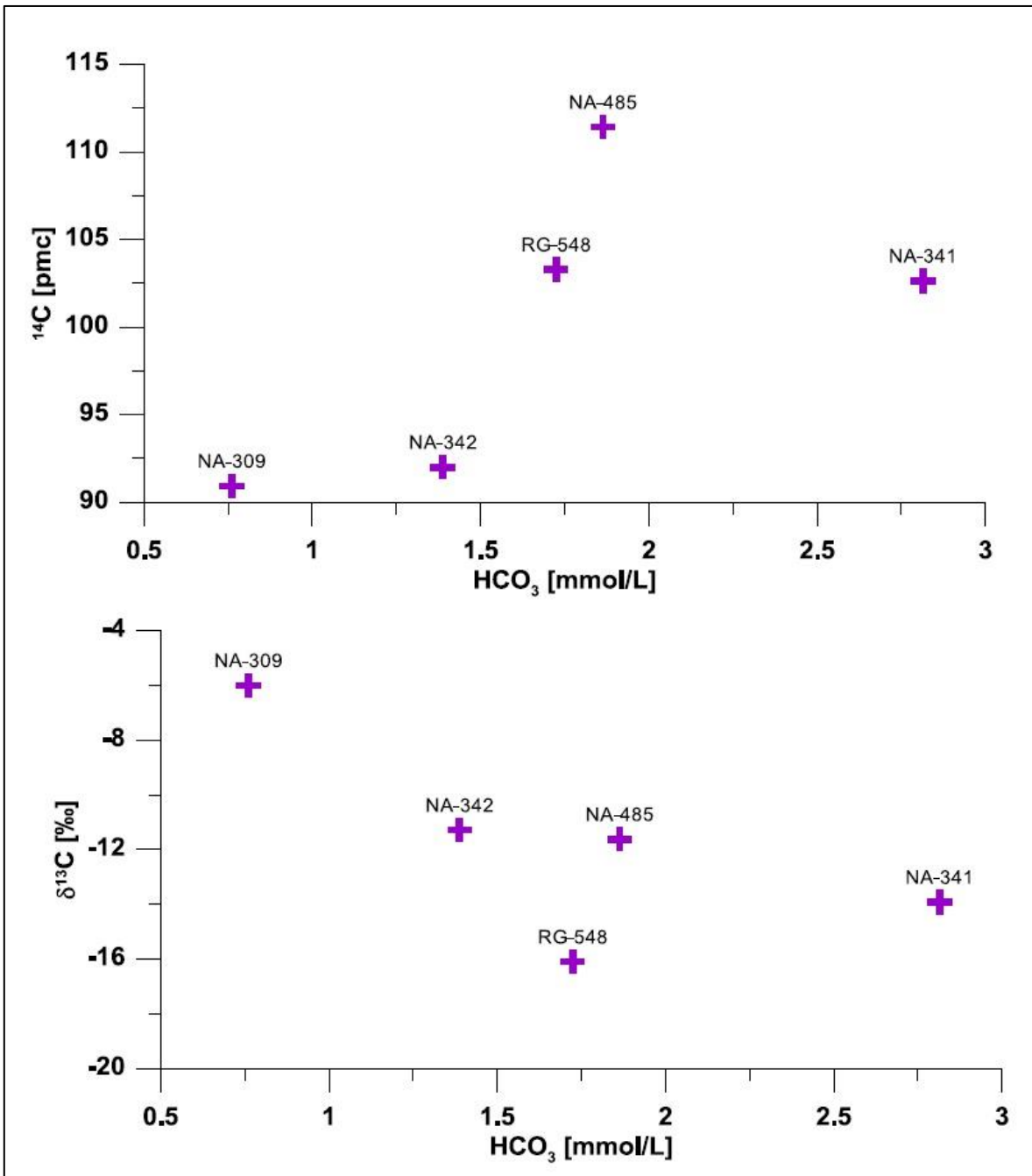


Figura 5.24: Valores de ^{14}C y $\delta^{13}\text{C}$ vs HCO_3^- para cinco muestras de la subcuenca de Río Grande

No hay correlación entre la actividad en ^{14}C y el total de carbono inorgánico disuelto (HCO_3^-). La correlación está mejor entre el $\delta^{13}\text{C}$ y el HCO_3^- .

Las aguas del pozo NA-341 provienen de la formación Aguacate con efecto de hidrotermalismo probable (ver abajo), también una pérdida de CO_2 es posible.

Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $A^{14}\text{C}$ indican una mezcla entre dos orígenes, el CO_2 de los suelos y CO_2 atmosférico.

El $\delta^{13}\text{C}$ de -6 hasta -16,1 ‰ puede corresponder a valores de CO_2 biogénico en el suelo. Sin carbonatos en el subsuelo se podría esperar valores hasta -23/-25‰ (CO_2 biogénico, Fig.5.25). El CO_2 atmosférico tiene valores de $\delta^{13}\text{C}$ alrededor de 1‰.

Valores de $\delta^{13}\text{C}$ de -2,6 / -3‰ fueron medidos en los gases volcánicos de alta temperatura. El CO_2 magmático del volcán Barva tendría valores de -2,6‰ (Genereux et al., 2009).

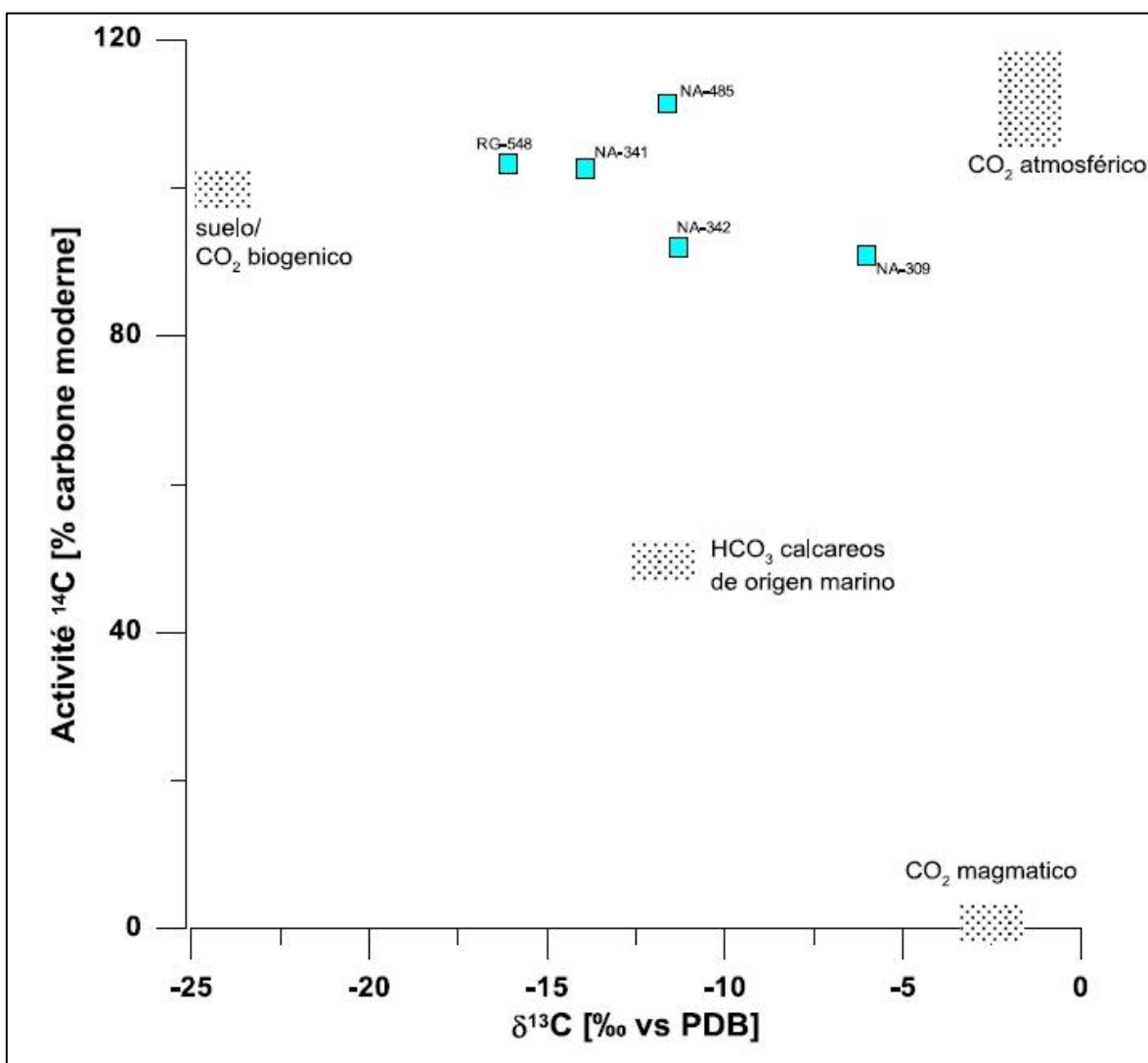


Figura 5.25: Actividad ¹⁴C vs δ¹³C para cinco muestras de la subcuenca de Río Grande

Las aguas de los pozos RG-548, NA-341 y NA-485 se sitúan entre las dos fuentes de CO₂ del suelo y atmosférico.

Dos muestras (NA-309 y NA-342) podrían estar influenciadas por un tercer origen (CO₂ magmático, CO₂ de las emisiones de gases de los volcanes) y así presentar edades un poco mayor. El punto NA-342 presenta valores de tritio inferior al límite de cuantificación, lo que podría confirmar presencia de aguas más antiguas. El contenido en tritio al pozo NA-309 indica, al contrario, aguas recientes entre 45 y 0 años (Fig.5.26) o bien una mezcla entre aguas más antiguas y recientes.

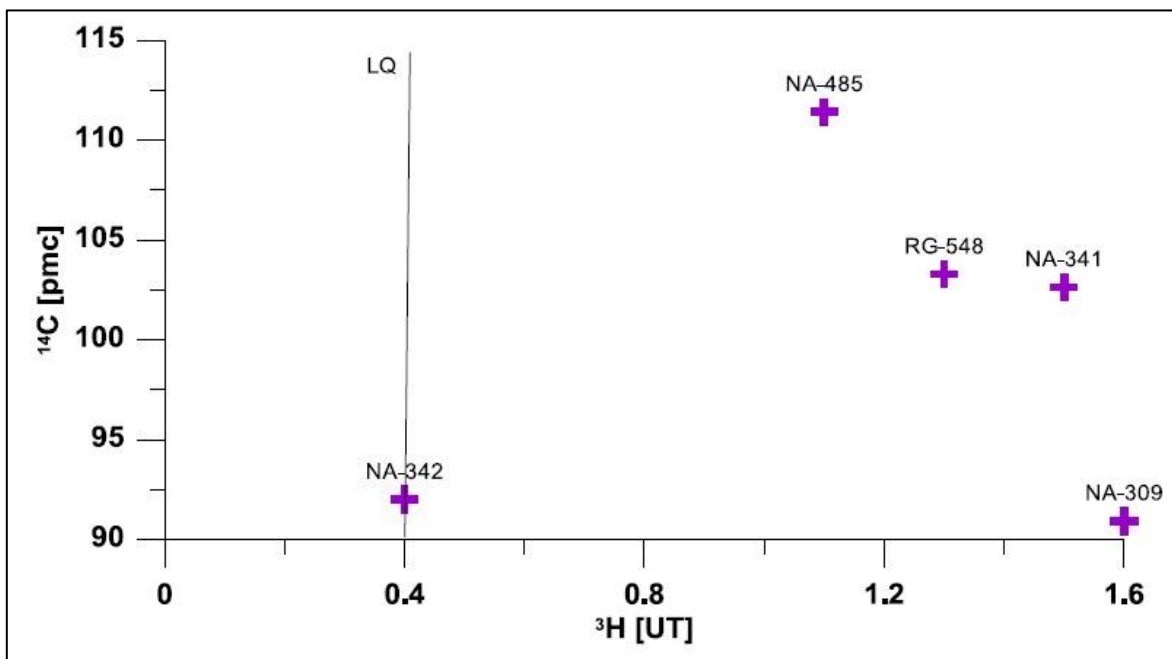


Figura 5.26: Actividad 14C vs 3H para cinco muestras de la subcuenca de Rio Grande (límite de cuantificación del tritio indicada)

No se dispone de suficientes parámetros y puntos de comparación para poder intentar una estimación de la edad de las aguas al punto NA-342. La estabilidad de la química e isótopos estables entre los dos muestreos de septiembre y noviembre 2014 y la ausencia de contaminantes NO₃, NO₂, NH₄ permite confirmar la presencia de una reserva de agua bastante bien protegida de la infiltración directa. En este pozo la rejilla se sitúa entre 65 y 100m lo que podría evitar la influencia de una infiltración de aguas de niveles más superficiales.

5.10 Conclusiones sobre el análisis de los datos isotópicos

La buena correlación de los pozos, manantiales, ríos, entre la altitud y el δ¹⁸O (lo mismo se observa por el δ²H) indica una recarga de los acuíferos de forma regular sobre toda la superficie de la subcuenca. Se exceptúan únicamente el río Colorado y

de la laguna Fraijanes por la alta evaporación que presentan las muestras. Se concluye que cada pozo esta recargado por el agua de lluvia localmente.

No se destaca ningún flujo regional importante que se notaría por valores empobrecidos isotópicamente en aguas de los pozos de baja altitud. Para los pozos de altitud intermedia que podría corresponder a la altitud promedio de recarga no se descarta un posible flujo regional, como podría ser el caso al nivel del pozo NA-342.

Para el pozo NA-673 que capta la formación Colima, existe la incógnita sobre la posibilidad de una recarga local viniendo por el sector este (fuera de la subcuenca de Río Grande). Los datos isotópicos no permiten distinguir un esquema diferente del de las aguas subterráneas en la subcuenca de Río Grande. Una cuenca con funcionamiento (recarga) similar a las de Río Grande daría valores isotópicos similares.

En general la perforación de los pozos se detiene cuando se ha encontrado el primer nivel de agua, por esto los otros pozos muestreados de más pequeña profundidad no pueden mostrar un flujo regional que podría existir pero queda por confirmar.

El pozo NA-342 tiene la rejilla entre 65 y 100m y podría captar en parte un flujo regional con mayor tiempo de residencia.

Del estudio de la variación temporal de los valores isotópicos en los pozos y manantiales, para los meses de septiembre y noviembre 2014, (pocas épocas contrastadas de punto de vista climatológico), se puede deducir que los acuíferos presentan un tiempo de renovación promedio de las aguas de algunos meses (o años) ya que no presentan variaciones isotópicas entre los dos periodos comparados. La laguna y los ríos contrastan ya que se recargan directamente de lluvia. También se presenta la excepción del pozo NA-805 que muestra fuertes contrastes isotópicos y podría ser bastante vulnerable a la influencia antrópica.

Aunque el efecto de altitud es el mecanismo que dirige las variaciones isotópicas en la subcuenca y prácticamente no hay variaciones estacionales, se nota la influencia de un fenómeno local que podría ser relacionado a la existencia de un corredor (o depresión) entre el volcán Poas y el volcán Barva. En este sector las masas de aire podrían venir del Atlántico. Este efecto se ha visto en las nacientes de Prendas, Chayotera y la Laguna de Fraijanes.

Otra característica que se podría destacar, es un exceso en deuterio más alto para las aguas de los pozos en las subcuencas de Río Grande que para las otras subcuencas a altitud similares. Este podría ser el reflejo de un origen distinto de las masas de aire. Los Montes del Aguacate podrían formar una barrera.

5.11 Origen de la contaminación en nitratos en las aguas de la subcuenca de Río Grande

El origen de los nitratos en las aguas subterráneas fue investigado por técnicas isotópicas para algunos puntos de la subcuenca de Río Grande. Los puntos seleccionados son los que presentan altos niveles de nitratos y puntos nuevos sin información previa pero por los cuales se suponía una presión fuerte que podía permitir la contaminación de las aguas. Quince análisis de $\delta^{18}\text{O}$ del NO_3 y $\delta^{15}\text{N}$ del NO_3 fueron realizados, 7 de manantiales y 7 de pozos. Las muestras presentan concentraciones en nitratos de 1,6 mg/L hasta 36,9 mg/L. No se ha encontrado amonio en ninguna muestra.

Para los pozos NA-485, NA-652 y NA-765 y el río Grande se ha detectado presencia de nitritos a un máximo de 0,026 mg/L. Una muestra tiene un nivel más alto en nitritos, de 0,106 mg/L (laguna Fraijanes).

En general se nota en las aguas muestreadas del 2012 al 2014 un bajo contenido en cloruro, sin embargo en algunas muestras tienen una mayor concentración de Cl, el cual aumenta conforme aumentan las concentraciones de nitratos (Fig.5.27), en el caso del pozo NA-485, este podría indicar una fuente de nitratos diferente, ya sea por la influencia de aguas residuales, ya que localiza en una industria alimenticia, cerca del sistema de tratamiento de aguas residuales o bien podría indicar una desnitrificación parcial. En este caso la concentración en nitrato sería mucho más alta antes del proceso de desnitrificación. Otros elementos como el boro podrían informarnos sobre el origen de estos nitratos. De los elementos medidos (que no incluye el B) solo el potasio se encuentra bastante alto en el pozo NA-485.

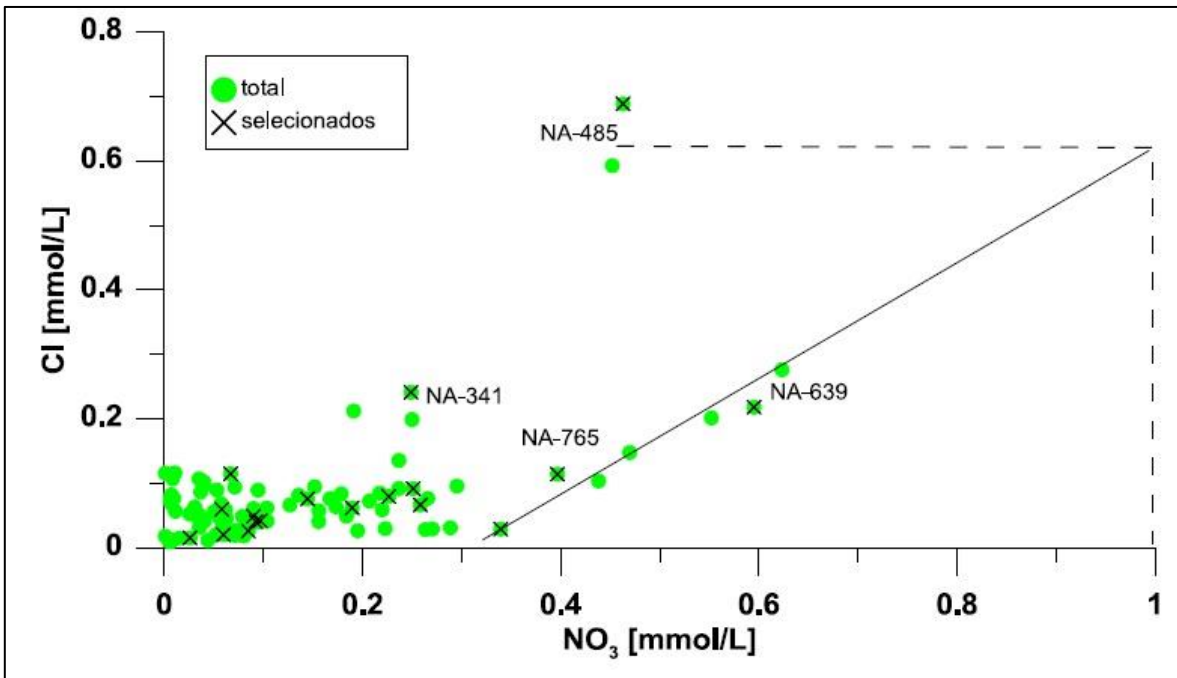


Figura 5.27: Cl vs nitratos para las muestras del acuífero del Río Grande

Para los puntos con concentraciones en nitratos encima de 0,3 mmol/L (o sea 18,5 mg/L) una correlación entre NO_3 y Cl se destaca. Esto podría indicar un origen de los contaminantes similar para estos puntos. Si se considera la recta indicada en la Fig.5.27, la concentración en nitrato del agua del pozo NA-485 antes de desnitrificación sería de 1 mmol/L (o sea 62 mg/L). Par confirmar la existencia de un proceso de desnitrificación se podría utilizar los datos de otros elementos sensibles a las variaciones de óxido-reducción. Para este muestreo se dispone solamente del valor de oxígeno disuelto que es de 4 mg/L.

Para los puntos con una concentración de nitrato superior a 15 mg/L, una muestra (NA-585) tiene también una concentración alta en bromuro (0,76 mg/L) y potasio (>7 mg/L) y una (NA-765) tiene alto contenido en hierro y manganeso. La muestra del pozo BA-876 tiene una concentración significativa en potasio (4 mg/L).

El grafico NO_3 vs $\delta^{15}\text{N}$ (Fig. 5.28) muestra que los fertilizantes minerales marcan poco las aguas. Así esta fuente de contaminación se puede descartar.

Las aguas tienen composición isotópica del nitrógeno de los suelos (origen natural) o de origen orgánico (aguas usadas o estiércol).

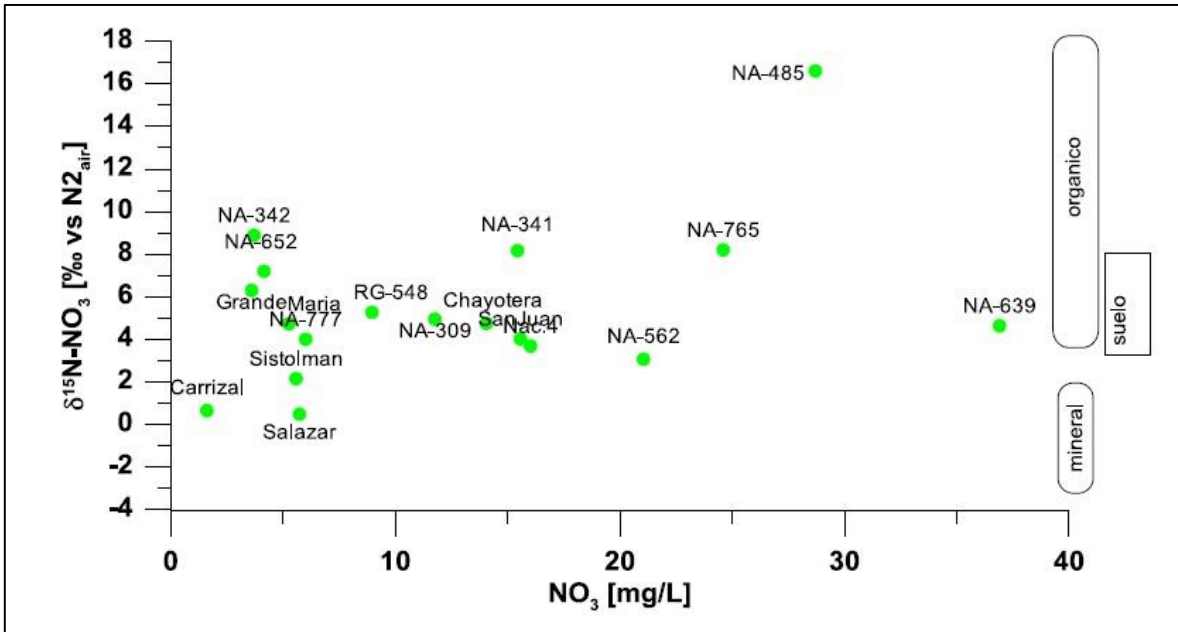


Figura 5.28: Concentraciones de $\delta^{15}\text{N}$ vs nitratos para las muestras del acuífero del Río Grande.

Las aguas del punto NA-485 están claramente marcadas por influencia de tipo orgánico según los datos existentes en la literatura. Este pozo se encuentra en contexto urbano, dentro de una fábrica de bizcocho.

El $\delta^{18}\text{O}$ del NO_3 nos puede dar una información complementaria (Fig.5.29).

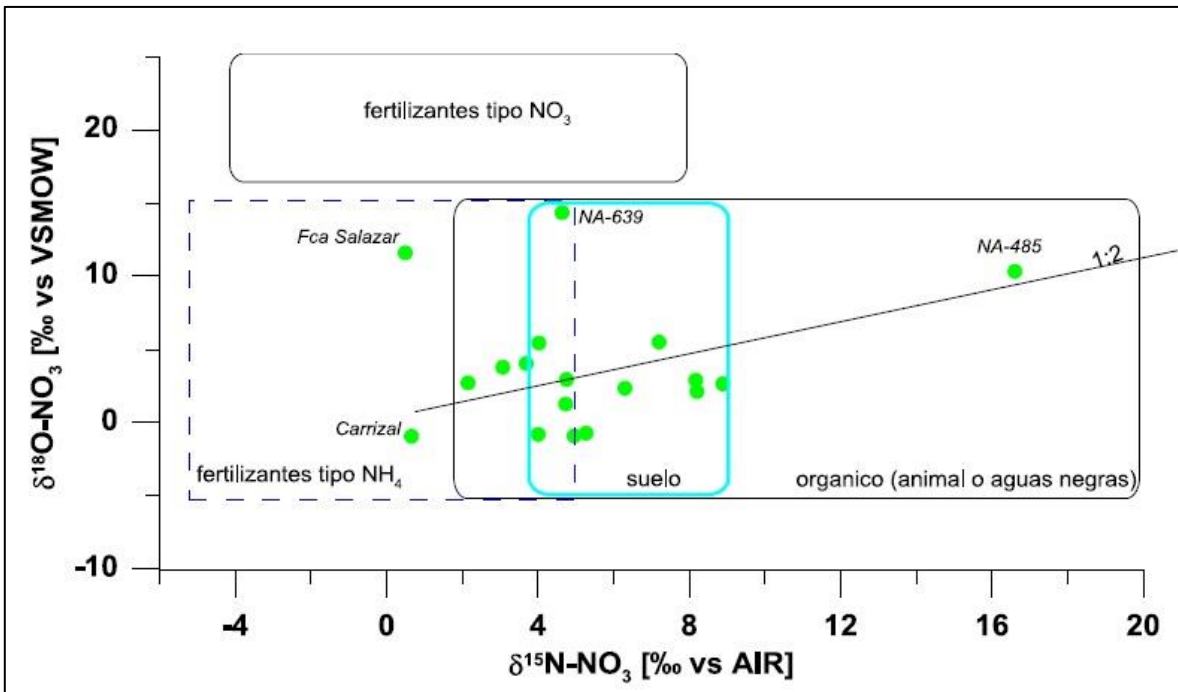


Figura 5.29: Concentraciones de $\delta^{15}\text{N}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ de nitratos para las muestras del acuífero del Río Grande.

En la Fig.5.29 se confirma que la mayoría de los puntos se encuentran en el dominio de los suelos e influencia de N de origen orgánico (animal o aguas negras). El punto NA-639 podría también ser influenciado por fertilizantes de tipo NO_3 . Este punto se encuentra en un medio urbano poco denso y cerca de campos de café.

También una influencia de fertilizantes de tipo NH_4 es posible aunque las dos muestras que caben en este dominio tienen una concentración en nitrato inferior a 6 mg/L o sea no o poco marcado por presiones antrópicas.

Las aguas del pozo NA-485 están influenciadas por contaminación orgánica que podría provenir de aguas negras o residuales de una industria alimenticia cercana al pozo o bien esta agua está parcialmente desnitrificada. El hecho de que la muestra quede sobre una línea de ecuación 1:2 indicaría un fenómeno de desnitrificación.

Teniendo en cuenta las prácticas y la ocupación de los suelos se puede decir que el origen dominante de los nitratos en las aguas de los puntos muestreados es de tipo orgánico, animal o de aguas negras. Un punto muestra posiblemente influencia de desnitrificación parcial. Los procesos de desnitrificación son muy importantes al nivel de los suelos de formaciones volcánicas y de clima tropical. Eso ha sido estudiado en otros lugares, por ejemplo en las islas de Guadalupe y Martinica.

Eso procesos hacen que las concentraciones en nitratos en las aguas subterráneas en zonas de fuerte presión agrícola quedan a niveles no superiores a las normas internacionales (50 mg/L).

El contexto de los puntos con más fuerte contaminación en nitrato da índices que las aguas negras podrían ser responsable de una gran parte de la contaminación. Pero no se dispone de ningún otro trazador (como el boro o el $\delta^{11}\text{B}$) para confirmar la predominancia de las fuentes animales o humanas.

6. USO DE SUELO

Lissett Salas Porras

Se toma como elemento principal las fotografías aéreas correspondientes al proyecto Misión Carta 2005.

Luego se procede a la georreferenciación, para la posterior elaboración de un mosaico con las fotografías con la información que corresponde parte de la subcuenca del río Grande, esto mediante la fotointerpretación para el cual se utiliza el Sistema de Información Geográfica (SIG). A partir de ello se realizó la digitalización para obtener los usos del suelo para el año 2005, que dio como resultado un mapa de uso del suelo 2005 de parte de la subcuenca del río Grande.

Para determinar el uso de la tierra hasta el 2012 se programó una gira de campo para realizar la comprobación del uso y ofrecer datos y seguros sobre el uso actual; además de la identificación de las fuentes potenciales de contaminación del recurso hídrico.

Una vez obtenidos los datos se procedió a la creación de un mapa de uso actual y a partir de ellos se identificaron los conflictos de uso en la subcuenca, para ello se utilizaron las hojas topográficas de capacidad de uso de la Fundación Neotrópica.

Cuando la información fue recolectada y los mapas creados se realizó un análisis de las fuentes potenciales de contaminación además comparando los cambios ocurridos entre los dos años en estudio, observando la tendencia que se siguió en el uso de la tierra e interpretando las posibles razones de estos cambios.

6.1 Uso de la tierra 2005

La subcuenca del Río Grande desde el punto de vista de contaminación de aguas subterráneas y conservación, cuenta con usos de la tierra que podrían fomentar la contaminación, pero estos mismos usos son los que le ha permitido a la población tener ingresos económicos, ya que cantones como Naranjo, San Ramón y parte de Poás son cafetaleros, basando su principal ingreso en la agricultura.

Caso diferente a lo que ocurre en Atenas, esto porque su población ha optado por dejar de trabajar las tierras, por lo que han optado por migrar al centro del país. La cuenca cuenta con diversos usos, dando prevalencia a los cultivos agrícolas como el café y la caña que son las coberturas de mayor porcentaje, y de menor área cultivos como yuca, maní o frutales.

El bosque secundario está presente en la parte alta de la subcuenca que corresponde a Poás, en toda el área de estudio no se identificó bosque primario, ya que está

intervenido por otros cultivos o pasto con árboles. La presencia de este bosque secundario puede reducirse ya que alrededor de estos lo que se puede encontrar son plantaciones de café, aunque en algunos casos se ha conservado en pequeña medida con la presencia de pastos arbolados, que aunque el área en estudio no es de gran importancia ganadera hay presencia de la misma pero es más de subsistencia que para comercialización.

El café ha sido un producto que siempre ha sido de gran importancia para el país, y que actualmente juega un papel muy importante en la economía, ya que se encuentra entre los principales productos de exportación. Los cantones de Naranjo y San Ramón por su posición geográfica, su clima y suelo se ha favorecido para la producción de uno de los mejores cafés del mundo, razón por la cual muchos pueblos occidentales han surgido en torno a la caficultura. Por esta razón es que el mayor uso de la tierra que se da en la subcuenca corresponde a este cultivo porque los cantones del occidente según el censo cafetalero del 2004 el 78,5% del área (cantones del Valle Central occidental) dedican sus tierras a la producción cafetalera. Hay que tomar en cuenta que según el censo cafetalero muy poco porcentaje del área total de café se utiliza prácticas de conservación de suelos y utilización de fertilizantes orgánicos como la gallinaza, gusanos o broza. En el caso de la gallinaza, no es el mejor fertilizante agroecológico, ya que lo que se utiliza son desechos de aves, las cuales tiene altos niveles de nitratos, de los cuales no todos son absorbidos por las planta, sino que gran parte es filtrada al suelo.

Cuadro 6.1: Hectáreas plantadas de café, en subcuenca río Grande

Cantón	Hectáreas
Grecia	4268
Valverde Vega	1558
Atenas	1630
Naranjo	6881
Palmares	1904
Poás	No Dato
San Ramón	5025
Alajuela	No Dato

Fuente: INEC. Censo Cafetalero 2004

En cuanto a la caña de azúcar, al igual que el café representa un importante producto de exportación del país, Grecia es el que presenta la mayor área de terreno dedicado a la caña, y en los últimos años ha optado por la ampliación de áreas cultivadas de caña.

La agroindustria azucarera en Costa Rica, juega un rol importante desde el punto de vista productivo, agrícola y comercial, además de ser una fuente importante de empleo, esto permitió, que se incrementara la cantidad de caña procesada (Chávez et al, 2001).

En Costa Rica, la principal zona productora de caña de azúcar lo constituye la zona de Guanacaste. Esta región contribuye al total de la producción de caña de azúcar del país, en un 57% aproximadamente. Además, en ella se concentran la mayor cantidad de hectáreas cultivadas (54.5%), luego le sigue en orden, Pérez Zeledón con el 16.8%, Valle Central con el 8.8%, Turrialba con el 8.4%, San Carlos con el 5.0% y Puntarenas con el 4.4% restante. (Chávez et al, 2001).

Cuadro 6.2: Uso de la tierra subcuenca río Grande 2005

Uso 2005	Área km ²	Porcentaje
Bosque	150,121	23,43
Café	228,73	35,59
Caña	42,038	6,56
Charral	24,138	3,76
Forestal	2,296	0,35
Frutal	2,479	0,38
Otros Cultivos	55,897	8,72
Pastos	93,475	14,59
Terreno no Cultivable	0,692	0,10
Urbano	41,431	6,46
Total	641,32	100

Fuente: Elaboración propia

El cuadro 6.2, muestra la extensión de los usos de la tierra que poseía la subcuenca para el año 2005, estos se presentan en datos porcentuales y absolutos en km², ya que utilizando esta unidad se presenta la ventaja de que los datos con mayor extensión son más manejables, pero los usos con una extensión más pequeña, presentan datos que no son de fácil visualización. El siguiente gráfico representa los datos obtenidos:



Figura 6.1: Uso de la tierra subcuenca río Grande 2005

Los resultados del estudio para este año, muestran una subcuenca con una alta intervención humana, ya que la agricultura y el uso urbano ocupan un área importante de la subcuenca, la cual por sus características posee una vocación más agrícola que de conservación, esto podría generar indicios de afectación al recurso hídrico, sin embargo, existen algunos usos agrícolas y pastos principalmente, que provocan una contaminación difusa a las aguas subterráneas.

Los usos de mayor porcentaje que se observan en la figura 6.1, son café con un 36%, bosque secundario con un 23% y pastos con 15%, esto hace reconocer que la subcuenca no posee un buen manejo con respecto a la regeneración natural, ya que al unir el bosque secundario y el charral, no se supera al área con actividad agrícola; se hace esta comparación entre bosque y charral ya que estos son un área de sucesión ecológica, y corresponde a la primera etapa de la sucesión secundaria, es decir, un charral o tacotal puede clasificarse como un bosque secundario en la primera etapa, pero aun así no se logra un equilibrio entre el área cultivada y la de conservación.

Este factor tan importante, es lo que señala el potencial de contaminación que posee la subcuenca a excepción de los bosques y charrales que no presentan una incidencia sobre el recurso hídrico. La importancia de realizar estudios de uso de la tierra en una cuenca o subcuenca en este caso es para determinar cuáles de los usos que

actualmente se presentan puede poner en riesgo la disponibilidad o calidad del recurso.

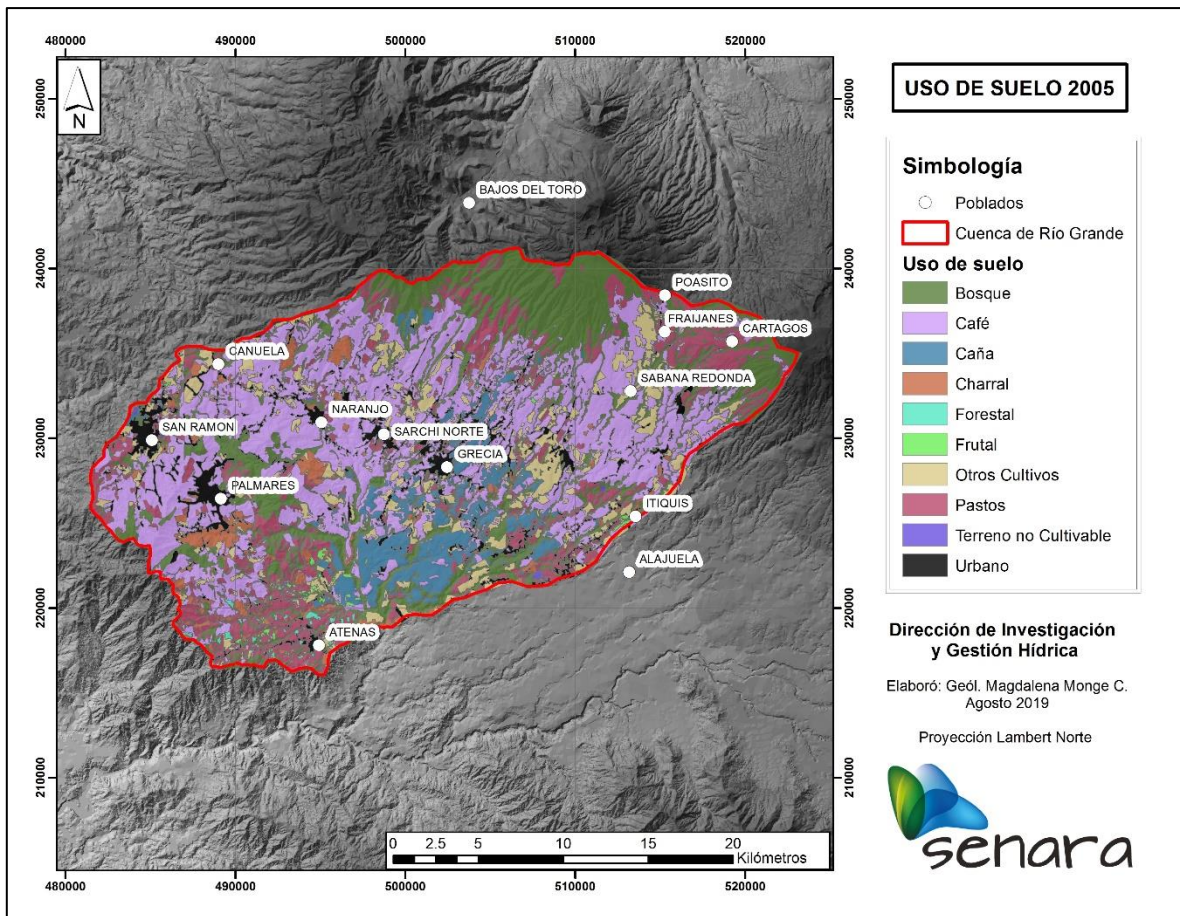


Figura 6.2: Mapa de uso de la tierra subcuenca río Grande 2005

6.2 Uso de la tierra 2012

Luego de observar la dinámica de los usos de la tierra en la subcuenca durante los últimos 7 años, el café es el que ha presentado un mayor incremento de 3,97 km², el bosque también presentó un pequeño aumento, debido a la tendencia de la subcuenca a la regeneración y sucesión ecológica, ocasionado por la iniciativa de reforestar las partes altas para proteger las reservas de agua. Las áreas dedicadas al pasto tuvo un aumento en la subcuenca, esto porque los dueños de esas tierras comenzaron a reducir las áreas con charral abriendo espacio a pastos o preparación de terrenos para cultivos. El mapa muestra cambios en el uso de la tierra para el año 2012 en comparación con el 2005 tuvieron pocos cambios, esto porque en siete años al ser un periodo corto no se van a generar cambios drásticos en el uso de la tierra.

Cuadro 6.3: Uso de la tierra subcuenca río Grande 2012

uso	Área km ²	Porcentaje
Bosque	150,45	23,46
Café	232,70	36,29
Caña	42,64	6,65
Charral	19,95	3,11
Forestal	2,30	0,36
Frutal	2,44	0,38
Otros Cultivos	52,30	8,15
Pastos	96,41	15,03
Terreno no Cultivable	0,69	0,11
Urbano	41,43	6,46
Total	641,32	100

Fuente: propia

El uso urbano que posee la subcuenca es reducido en comparación con el área total de la subcuenca, ya que lo que ocupa es el 7% por lo tanto su incidencia en el recurso hídrico se podría pensar como pequeña, pero no lo es ya que corresponde a una alta densidad de población, la cual se puede clasificar como una fuente puntual de contaminación, ya que se sabe que los tanques sépticos existentes en estas infraestructuras contaminan las aguas subterráneas con nitratos y de existir una fuente de agua, o un manantial, la misma podría sufrir una contaminación bacteriológica, si no se toman las precauciones correspondientes.

La agricultura es un uso que contamina en gran medida las aguas subterráneas, debido al mal manejo de agroquímicos como fertilizantes, pesticidas, insecticidas, entre otros, los cuales en muchas ocasiones se infiltran en el suelo, y llegan a los niveles freáticos de los acuíferos, contaminando este recurso en gran medida. La subcuenca posee una agricultura de monocultivos de grandes extensiones, por lo tanto ocasiona problemas con respecto al agua, por la infiltración de productos químicos.



Figura 6.3: Uso de la tierra subcuenca río Grande 2012

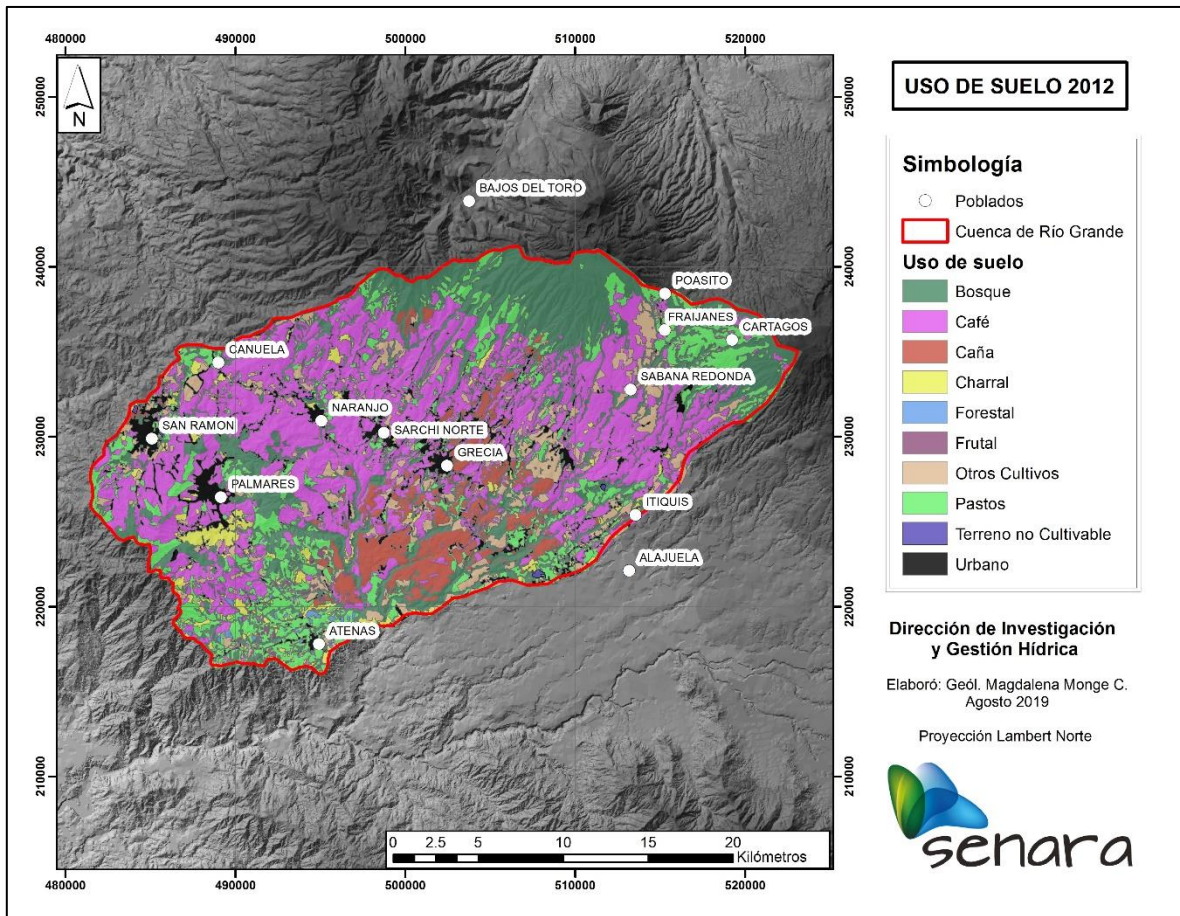


Figura 6.4: Mapa de uso de la tierra subcuenca río Grande 2012

6.3 Descripción del uso de la tierra en la subcuenca del río Grande 2005 y 2012

- Bosque secundario: son áreas que corresponden a fracciones de bosque intervenido, que por alguna condición física o geográfica del terreno no fueron cortados, y estos han sido regenerados o con el paso del tiempo al dejar de intervenir se ha regenerado. Para los años 2005 y 2012 abarcan un 24% de los 640 km² del área total.
- Plantación cafetalera: En la subcuenca del río Grande, el cultivo de mayor cobertura es el café, entre los años 2005 y 2012 hubo pocos cambios. En esta área se puede encontrar café con sombra que por efectos prácticos no fueron representados en las coberturas de uso de la tierra.
- Caña de azúcar: La caña de azúcar en menor medida que el café representa gran importancia, ya que es el segundo con mayor área dedicada a este cultivo.
- Pastos: Las áreas de pastizales corresponden a áreas destinadas a la ganadería o pastoreo, algunos terrenos con pasto que ya no se utilizan, para este fin, sino han sido cambiados a algún cultivo, en la subcuenca se puede

observar pastos con árboles y con agricultura en algunos casos. Abarcan un 15% que corresponde a un poco más de 90 km².

- Charral: Las áreas correspondientes de charral constituyen un estado de áreas de recuperación, en el que la mayoría de las especies son colonizadoras.
- Otros cultivos: Los cultivos identificados en menor área corresponden a yuca, maní, camote, tomate, maíz. En esta categoría también se incluyeron plantaciones ornamentales que en su mayoría son helechos y caña india.
- Plantaciones forestales: Estas áreas no representan una extensión considerable ya que de los 640 km² no representan ni un 1%. Las especies encontradas corresponden a teca y eucalipto.
- Plantaciones frutales: Al igual que las plantaciones forestales estas no representan menos de 1% del área total de la subcuenca. La especie encontrada corresponde a árboles frutales de naranja.

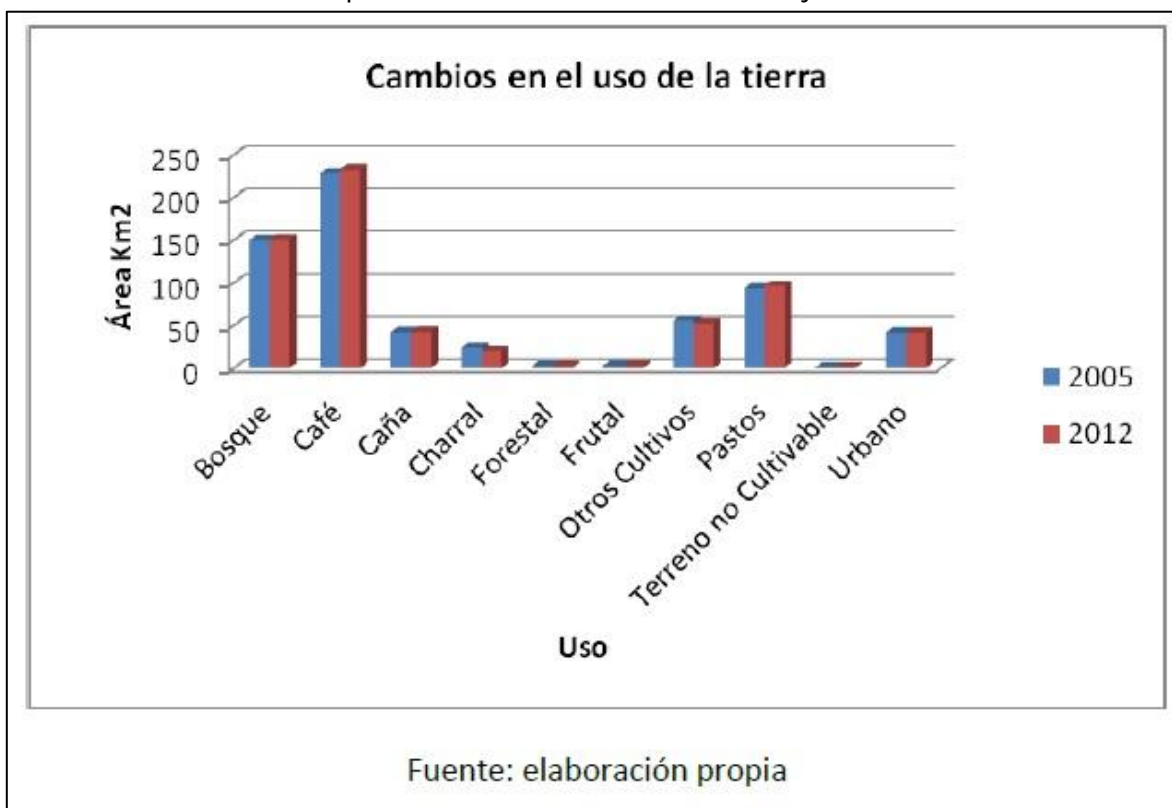


Figura 6.5: Cambios en el uso de la tierra subcuenca río Grande 2005-2012.

6.4 Divergencias de uso de la tierra

La subcuenca del río Grande a pesar de ser más del 50% de uso agrícola o plantaciones, el 73,5% se ubica dentro de un uso conforme según la clasificación de la Fundación Neotrópica, esta característica se presenta porque de acuerdo a la clasificación, la mayoría del área en estudio se encuentra dentro de la categoría A que

corresponde a tierras aptas para la agricultura y pastos y como se ha visto anteriormente el uso de mayor cobertura es el de café por lo que todas esas áreas de van a encontrar en uso conforme. Las áreas de sub uso son las correspondientes a terrenos con charral, donde por pendiente deberían ser de bosque.

Cuadro 6.4: Divergencias de uso subcuenca río Grande 2005

Uso	Área Km ²	Porcentaje
Conforme	471,2	73,5
Sub Uso	61,8	9,6
Sobre Uso	66,1	10,3
Urbano	41,4	6,5
Terreno no cultivable	0,7	0,1
Total	641,3	100

Fuente: Elaboracion propia

Cuadro 6.5: Divergencias de uso subcuenca río Grande 2012

Uso	Área Km ²	Porcentaje
Conforme	470,8	73,4
Sub Uso	60,9	9,5
Sobre Uso	67,4	10,5
Urbano	41,4	6,5
Terreno no cultivable	0,7	0,1
Total	641,3	100

Fuente: Elaboracion propia

7. BALANCE HÍDRICO

María Magdalena Monge Cordero

7.1 Balance de humedad de suelos

La estimación de recarga potencial al acuífero se obtiene mediante un balance hídrico de suelos, a partir de la metodología de Schosinsky (2006).

El balance consiste en determinar la lluvia que recarga el acuífero, a partir de la parte de lluvia infiltrada, y que una vez completado su ciclo en el suelo se convierte en agua de percolación. Para poder aplicar este método, se necesitaron los siguientes datos:

Cuadro 7.1: Datos necesarios para la metodología de Schosinsky (2006)

Datos necesarios	Fuente de los datos
Capacidad de infiltración Factor por infiltración	Pruebas de infiltración en campo
Capacidad de campo Punto de marchitez Densidad del suelo Humedad de suelo inicial	Análisis de muestras de suelo
Profundidad de raíces	Observación en campo y uso de suelo
Factor por pendiente	Modelo de elevación digital y reclasificación
Factor por vegetación	Uso de suelo y reclasificación
Precipitación media mensual	Datos estaciones meteorológicas IMN y SENARA
Evapotranspiración potencial	Metodología de Hargreaves y Samani (1985)

Algunas consideraciones importantes que se deben tomar en cuenta sobre los datos utilizados para el balance hídrico de humedad de suelos son:

- El balance hídrico de humedad de suelos se realiza por litologías.
- En las zonas urbanas grandes, se asume un valor de 0 en la recarga potencial.
- Para asignar el valor de f_c en litologías, se utiliza un promedio de los valores de infiltración, en los casos que se tienen varios datos de f_c . En el caso de que solo exista 1 dato de f_c , se utiliza este para esa litología.
- En los casos en que existan polígonos de una misma litología que no tengan datos de f_c , se utilizaron los datos más cercanos o un promedio de la misma litología.
- Para asignar los datos de precipitación, temperatura y ETP, se hacen polígonos de Thiessen para definir la influencia de cada estación. Dado que no todas las

estaciones tienen temperatura, entonces los polígonos de Thiessen para precipitación y ETP son diferentes.

- Para la estación Fabio Baudrit se tenía estación mecánica y automática en 2 períodos diferentes, por lo que se realizó un promedio entre las 2 estaciones, para precipitación y temperatura.
- En la asignación de la ETP, en los casos que las estaciones meteorológicas no tengan temperatura, se les asignó una temperatura de otra estación con similar elevación.
- Para los datos de Capacidad de campo que son mayores a 50, se obtiene el promedio de los datos entre 50 y 100, y se asigna ese valor a todos los datos mayores a 50.

Se delimitaron 175 polígonos diferentes, de los cuales 27 son considerados como zona urbana. Esta delimitación responde en primera instancia a las diferentes litologías, las estaciones meteorológicas de la zona, las características de los suelos, el uso del suelo y las pendientes en el área de estudio.

En el capítulo 4: Hidrogeología, se describe la información de pruebas de infiltración y el estudio de suelos en la zona de Río Grande.

La humedad inicial del suelo se asume como la capacidad de campo en mm, para el mes de inicio del balance hídrico. Se escoge el mes de noviembre como mes de inicio para el balance hídrico, ya que setiembre y octubre son los meses más lluviosos en la subcuenca, y por consiguiente, en noviembre se considera que el suelo está a capacidad de campo.

Para la profundidad de raíces se asignaron los siguientes valores:

Cuadro 7.2: Datos de profundidad de raíces

Cultivo	Profundidad de raíces
Bosque	2,5m
Pastos	0,4m
Café	1m
Caña	1,6m (promedio)
Mezcla de caña y café	1,6m (más desfavorable)

En el área de estudio se identifican las siguientes pendientes:

Cuadro 7.3: Datos de pendientes y Kp

Pendiente	% Pendiente	Kp
Promedio	2% y 7%	0,10
Fuerte	>7%	0,06

Según la información descrita en el capítulo 6: Uso de suelo, se asignaron los siguientes Kv:

Cuadro 7.4: Datos de vegetación y Kv

Cobertura vegetal	Kv
Terrenos cultivados	0,10
Cobertura con pastizales	0,18
Bosques	0,20

En este cálculo, para los bosques ribereños, se asume el mismo Kv de la vegetación que está alrededor, y se mezclan.

Para los cultivos de café, caña y otros cultivos se asigna el mismo Kv. La categoría de “otros cultivos” corresponde a yuca, maní, camote, tomate, maíz, helechos y caña india.

Si se tiene pasto y bosque mezclado, se utiliza un Kv de pastizal, para ser más conservadores. El charral también se consideró como pasto.

Se considera que los bosques son secundarios (según Salas, 2012).

Para la información meteorológica, se utilizaron 14 estaciones distribuidas en toda la subcuenca, de las cuales, 14 contaban con información de precipitación y 8 con información de temperatura, cuyos períodos de medición varían entre 6 y 73 años. Los datos meteorológicos se describen en el capítulo 3: Hidrología Superficial.

La estación de la UCR en San Ramón tiene un período de medición de 6 años, pero se utilizó debido a que en este sitio no se tenían otras estaciones meteorológicas.

A continuación se muestra la ubicación de cada uno de los polígonos definidos para el cálculo del Balance Hídrico de Suelos (fig. 7.1), así como los valores obtenidos para cada litología (cuadro 7.5). En la figura 7.2 se muestra la clasificación de la recarga en el área de estudio, utilizando 5 categorías.

En el **Anexo F** se muestran todos los datos utilizados para cada uno de los polígonos, así como los valores de recarga para cada uno de ellos.

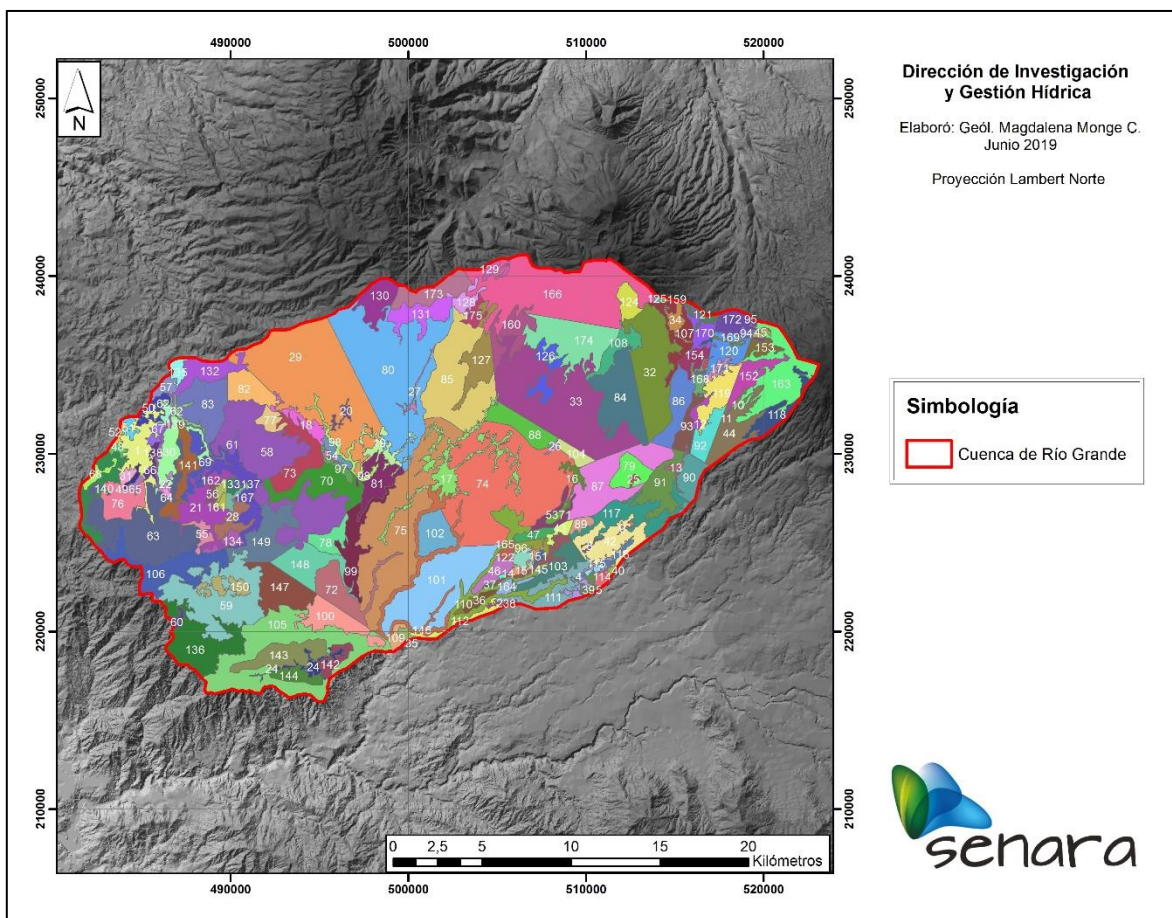


Figura 7.1: Ubicación de los polígonos para el Balance Hídrico de Suelos.

Cuadro 7.5: Datos de recarga potencial obtenidas en el área de estudio

Unidad Asociada	Área (m ²)	Recarga potencial (mm/año)	Volumen (m ³ /año)	Volumen (L/s)
Fm. Tiribí	89167540,21	15679,84	53783548,51	1705,46
Grupo Aguacate	109336576,46	11860,47	68487668,21	2171,73
Paleopoás	209339953,49	40196,16	263188750,8	8345,66
Tobas y tobitas Grupo Aguacate	15426696,57	7004,55	8543765,27	270,92
Bajos del Toro-Viejo	95309203,96	11059,33	108164037	3429,86
Poasito	29926001,54	9457,26	56544346,98	1793,01
Volcán Barva	85965610,67	65014,52	124086035,5	3934,74
TOTAL	634471582.81		682798152.3	21651.388

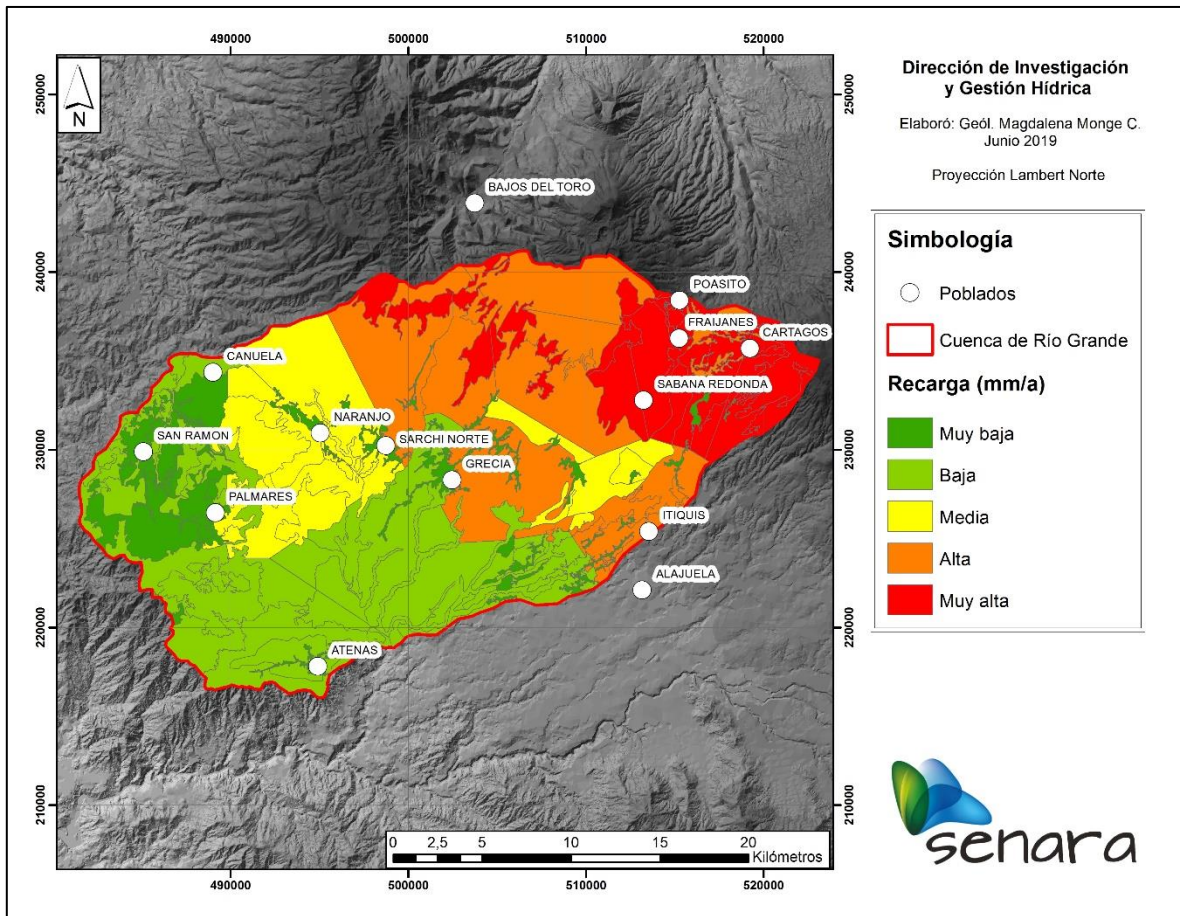


Figura 7.2: Clasificación de la recarga potencial.

Cuadro 7.6: Rangos para clasificación de la recarga

Recarga	Rangos en mm/a
Muy baja	0 - 235,96
Baja	235,96 - 719,72
Media	719,72 - 1207,94
Alta	1207,94 - 1687,15
Muy Alta	1687,15 - 2146,89

7.2 Estimación de la extracción y la descarga, caudal utilizable

El cálculo de extracción de agua subterránea se realiza a partir de la información de la Base de Datos del SENARA, así como el inventario de pozos registrados y no registrados en la zona. Se utilizó información de caudales otorgados por la Dirección de Agua del MINAE, pero no se contaba con esta información para todos los pozos, por lo que se utilizó la información del cuadro 7.7 para completar los datos de extracción. A partir de estos datos, se toma en cuenta el caudal explotado por los pozos, su uso y el período de bombeo.

Cuadro 7.7: Variables para la estimación de caudal de extracción por pozo según uso reportado (SENARA, 2006).

Uso agua MINAET	Uso agua SENARA	Horas por día bombeo	Meses por año	Caudal medio (L/s)
Industrial	Industrial	24	12	5.8
Abastecimiento Público	Abastecimiento Público	24	12	9.5
Consumo Humano	Doméstico	8	12	0.50
	Urbanístico	24	12	4.50
	Varios	12	12	3.30
	Riego - Doméstico	24	12	1.80
	Riego - Doméstico Turismo	24	12	7
Agrícola	Riego	16	7	7
	Agroindustrial	24	12	3.80
	Abrevadero	6	12	2.80
Turismo	Turismo	24	12	4
	Riego Turismo	24	7	7

Se aclara que para los pozos cuyo uso no se conoce, se asumió un uso doméstico, y un régimen de bombeo de 24 horas. También se indica que para los usos que no se encuentran contemplados en el cuadro anterior, se utilizó un uso de "Varios".

Para el cálculo de extracción se utilizaron 1143 pozos registrados en la Base de Datos de SENARA, y adicionalmente se integraron 172 pozos inventariados en el campo, para un total de 1315 pozos.

El total de la extracción se distribuye en los siguientes usos:

Cuadro 7.8: Caudales según el uso del agua

Uso de agua	Caudales (L/s)
Riego	2694,46
Abastecimiento público	589,39
Doméstico (+ otros)	564,94
Industrial	183,42
Turístico	39,42
Agrícola, agropecuario y agroindustrial	30,72
Urbanístico	23,82
Granjas y abrevaderos	20,24
Autolavados	17,78
Abastecimiento hospitalario	13,42
Embotellamiento	4
Comercial	1,65
Alimenticio	0,375
TOTAL	4183,63

La extracción total corresponde a 4183,63 L/s.

En cuanto a la descarga de los manantiales, se encontraron 1510 manantiales registrados en la Base de Datos de SENARA. Para los casos en que no se conocía el caudal, se asumió un caudal de 0,1 L/s.

En total, se obtiene una descarga de 3518,15 L/s.

A partir de los datos anteriores, se realiza el cálculo de caudal disponible en la subcuenca de Río Grande. El siguiente cuadro muestra los datos utilizados:

Cuadro 7.9: Datos para estimación de caudal disponible

Recarga potencial (L/s)	21651
Descarga de manantiales (L/s)	3518,16
Extracción de pozos (L/s)	4183,99
Caudal disponible (L/s)	13949
40% del caudal disponible (L/s)	5580

Ponce (2007), indica que el rendimiento sostenible puede expresarse como un porcentaje de la recarga, en el que los valores medios pueden ser de alrededor del 40%. Por lo que para toda la subcuenca de Río Grande se estima un caudal utilizable de 5580 L/s.

8. MAPA DE VULNERABILIDAD

María Magdalena Monge Cordero

Para la elaboración del mapa de vulnerabilidad se utilizó el método de índice de vulnerabilidad GOD (por sus siglas en inglés) propuesto por Foster (1987) y modificado por Foster e Hirata (1988), el cual considera tres parámetros: grado de confinamiento del acuífero, tipo de litología que cubre el acuífero y la profundidad del agua subterránea. Los primeros dos parámetros se obtuvieron a partir de la revisión de litología de todos los pozos registrados en la Base de Datos de SENARA ubicados dentro de la cuenca, y la profundidad del agua se determinó a partir de los datos de niveles de estos mismos pozos.

Cada parámetro varía entre 0 y 1 y el índice de vulnerabilidad se obtiene multiplicando los 3 valores elegidos con extremos de 0 (vulnerabilidad despreciable) y 1 (vulnerabilidad extrema).

Se hace la aclaración que en los sitios donde no se contaba con información suficiente de pozos, no se determinó la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos.

A continuación se muestra la tabla de Foster & Hirata (1991) modificada de Ramírez (2013), la cual se utilizó para la asignación de los valores de cada parámetro.

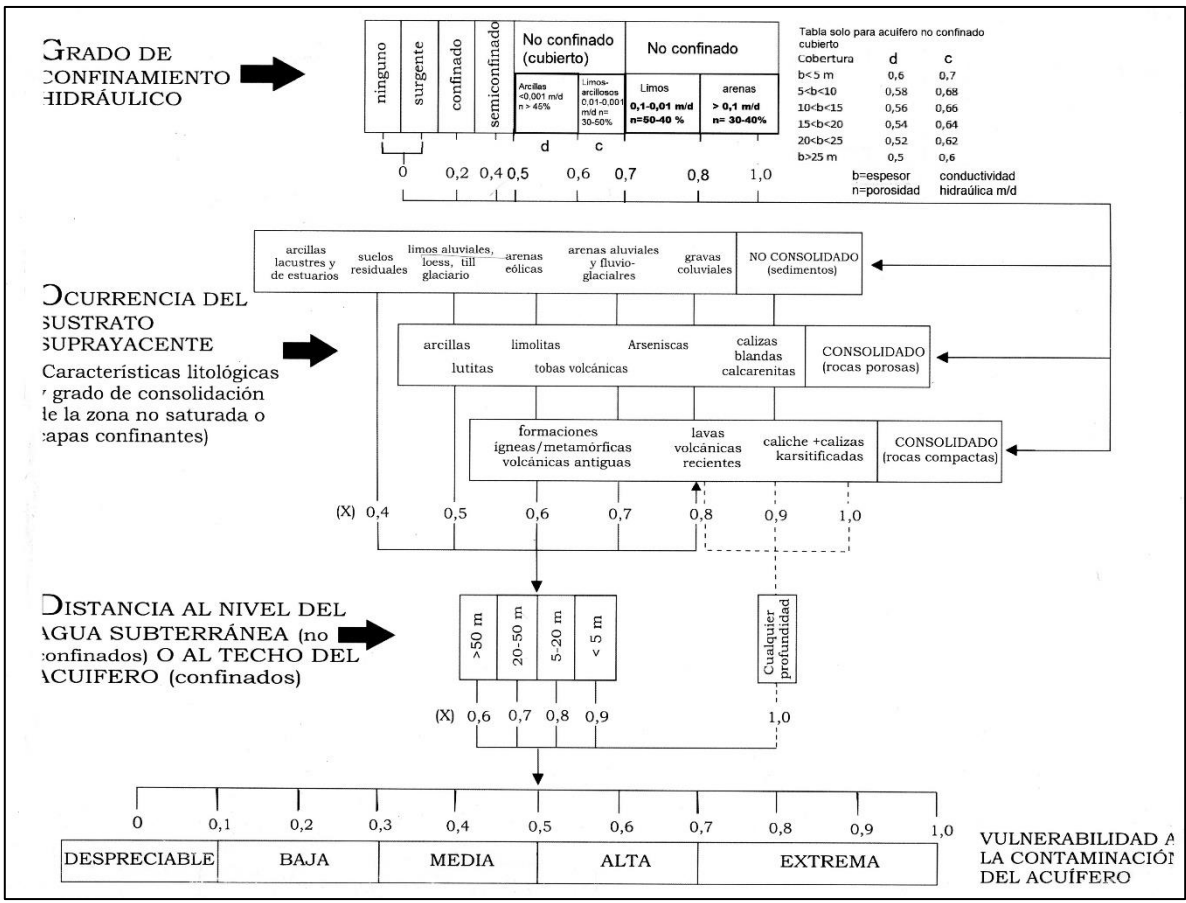


Figura 8.1: Diagrama del método de GOD para determinar vulnerabilidad.

Se realizaron las 3 capas, correspondientes a cada 1 de los parámetros del GOD. A continuación se muestran los mapas utilizados:

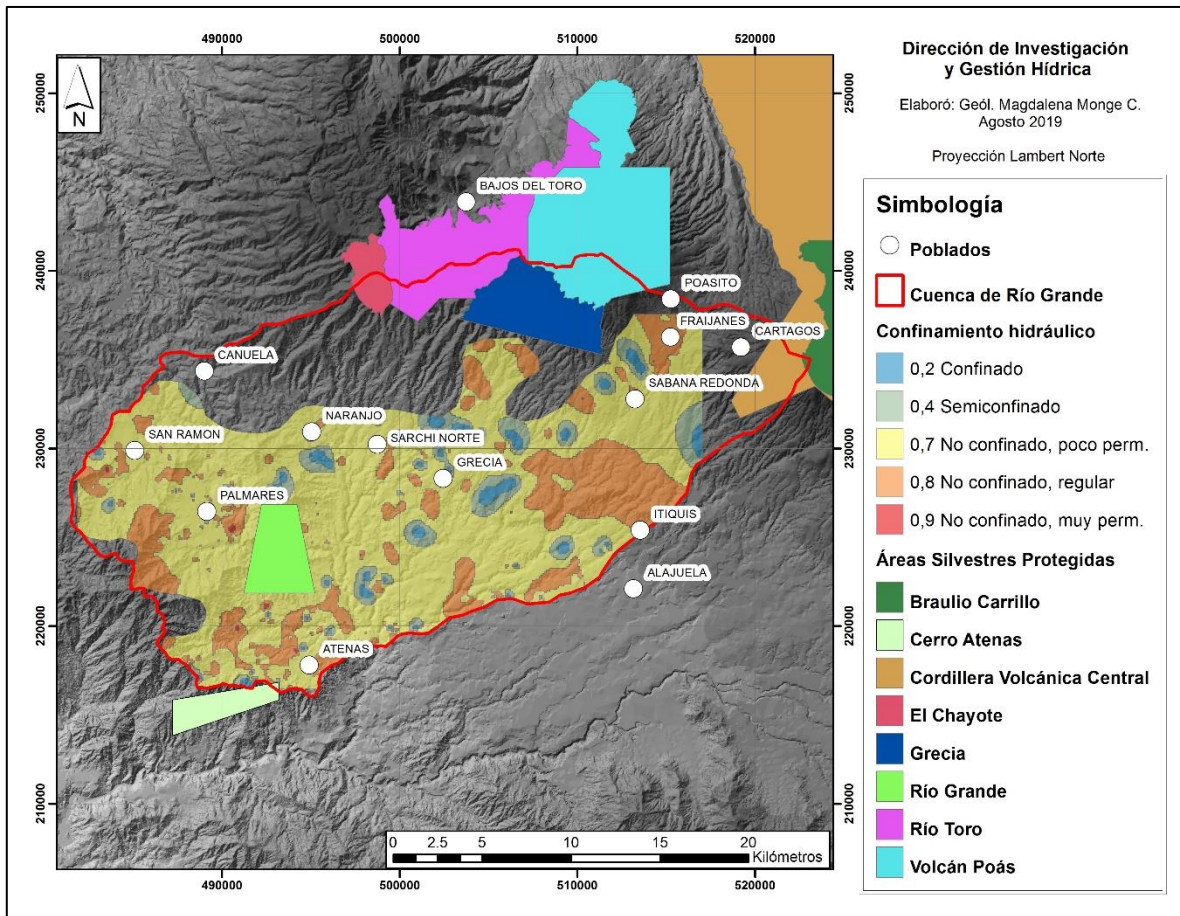


Figura 8.2: Parámetro G: Confinamiento hidráulico.

Para la asignación del parámetro G se consideraron las siguientes condiciones:

Cuadro 8.1: Datos de parámetro G

Parámetro	Valor asignado
Confinado	0,2
Semiconfinado	0,4
No confinado (materiales con poca permeabilidad)	0,7
No confinado (con permeabilidad regular o sin información adicional)	0,8
No confinado (materiales muy permeables)	0,9

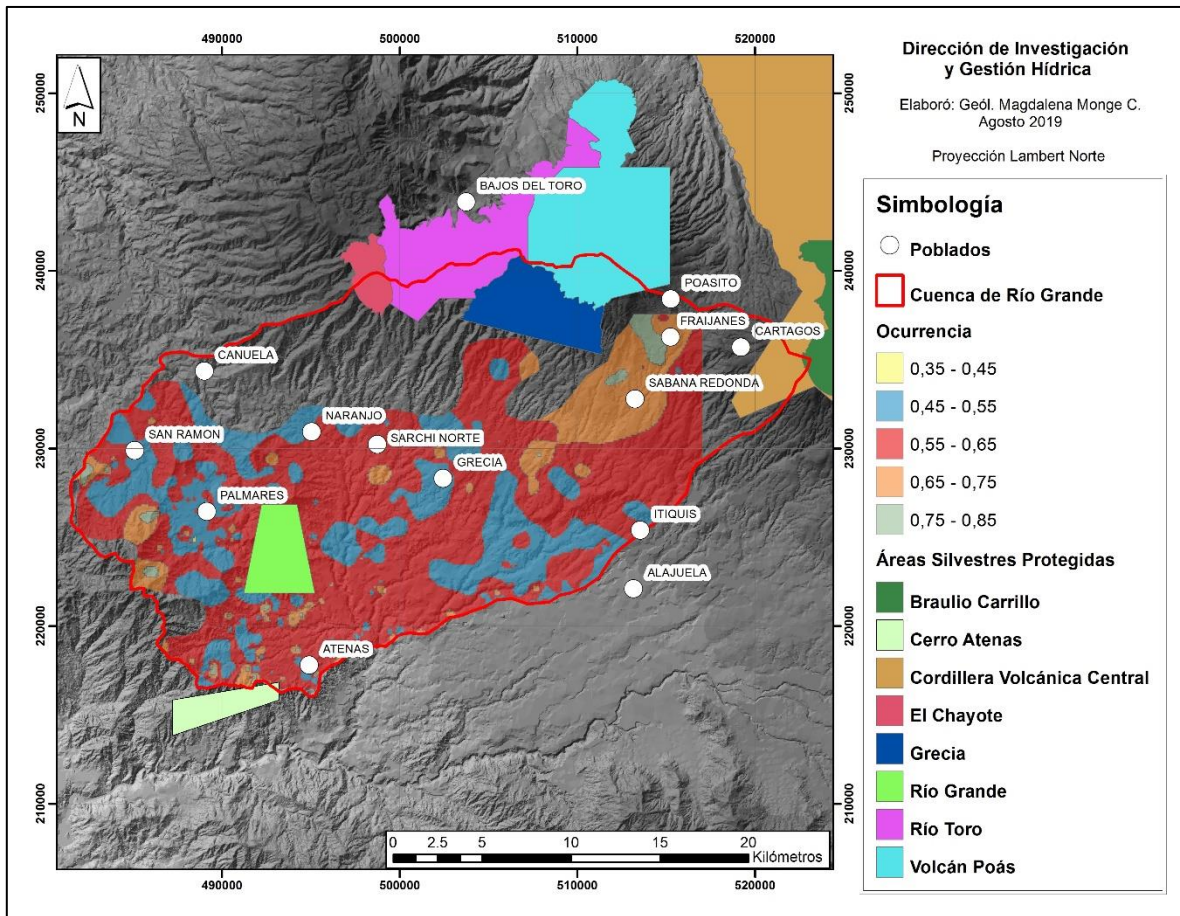


Figura 8.3: Parámetro O: Ocurrencia del sustrato suprayacente.

Para la asignación del parámetro O se consideraron las siguientes condiciones:

Cuadro 8.2: Datos de parámetro O

Parámetro	Valor asignado
Arcillas lacustres, suelos residuales	0,35-0,45
Limos aluviales, arcillas	0,45-0,55
Arenas eólicas, limolitas	0,55-0,65
Tobas volcánicas, formaciones ígneas antiguas, arenas aluviales	0,65-0,75
Areniscas, lavas volcánicas recientes, gravas	0,75-0,85

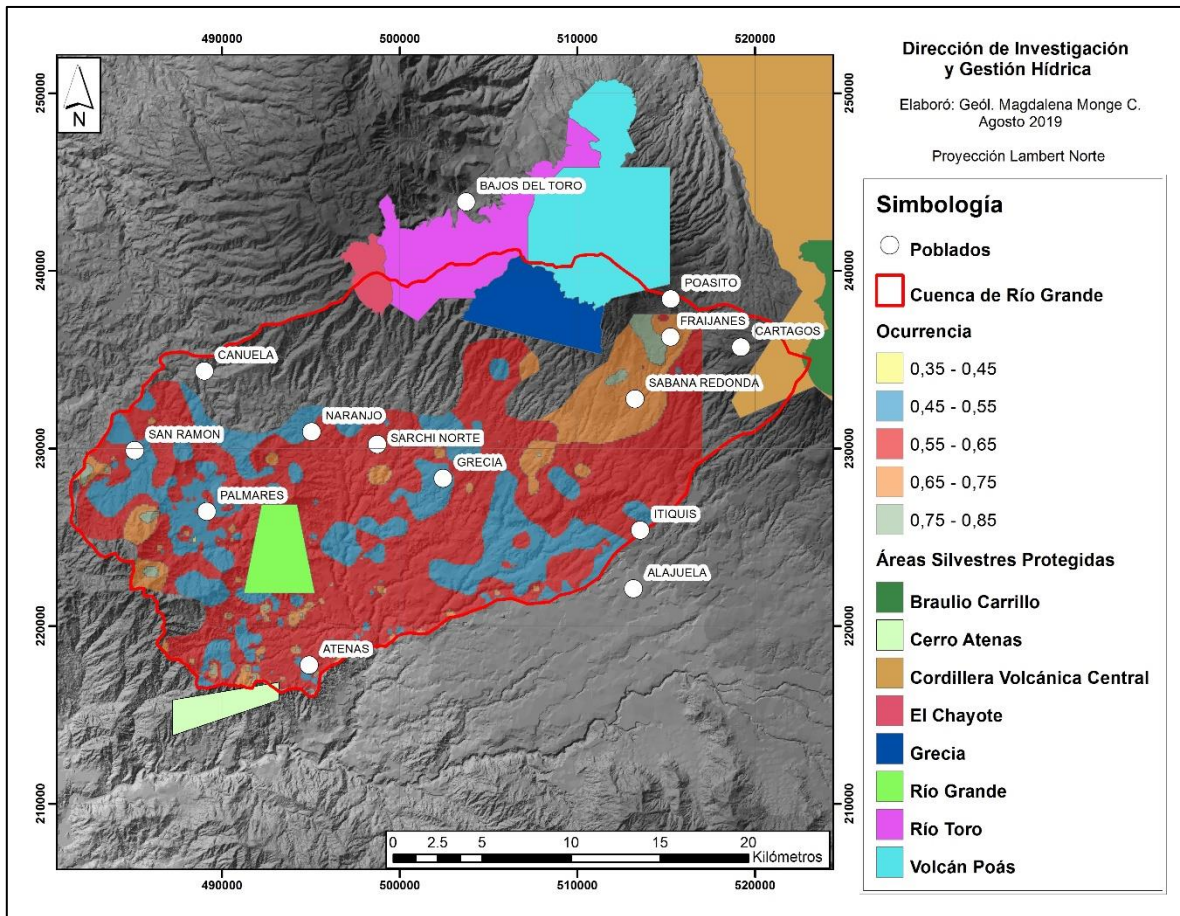


Figura 8.4: Parámetro D: Distancia al nivel de agua subterránea o al techo del acuífero.

Cuadro 8.3: Datos de parámetro D

Parámetro	Valor asignado
<5m	0,9
5-20m	0,8
20-50m	0,7
>50m	0,6

Estos 3 mapas se multiplicaron entre sí para obtener el mapa de vulnerabilidad, que se muestra a continuación:

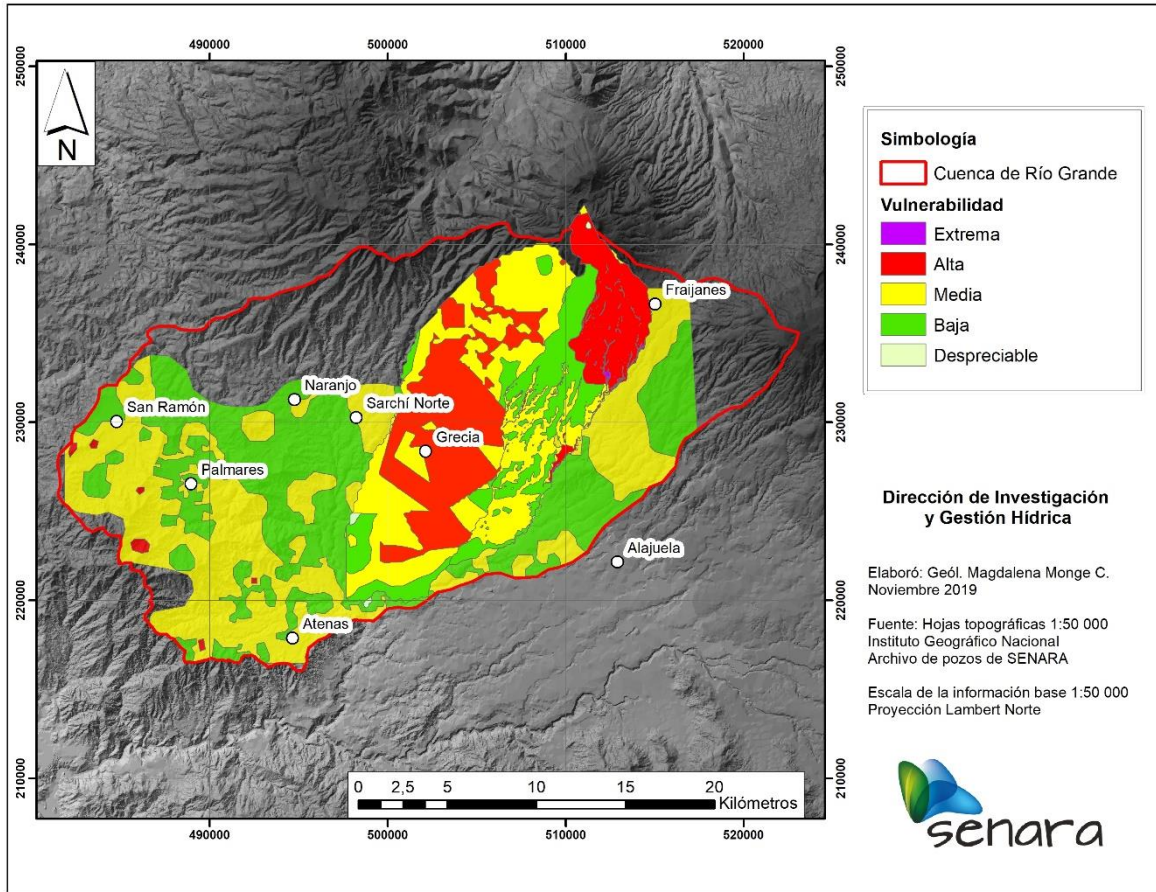


Figura 8.5: Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos.

Debido a que ya existen los mapas de vulnerabilidad para los cantones de Grecia y Poás, los mismos se mantienen vigentes.

10. MAPA DE AMENAZAS

Lissett Salas Porras y María Magdalena Monge Cordero

El mapa de amenazas (fig. 9.1) se compone del mapa de uso de suelo del año 2012, elaborado por Lissett Salas Porras, y por el levantamiento de campo de fuentes potenciales de contaminación, realizado en el año 2016 por parte de SENARA.

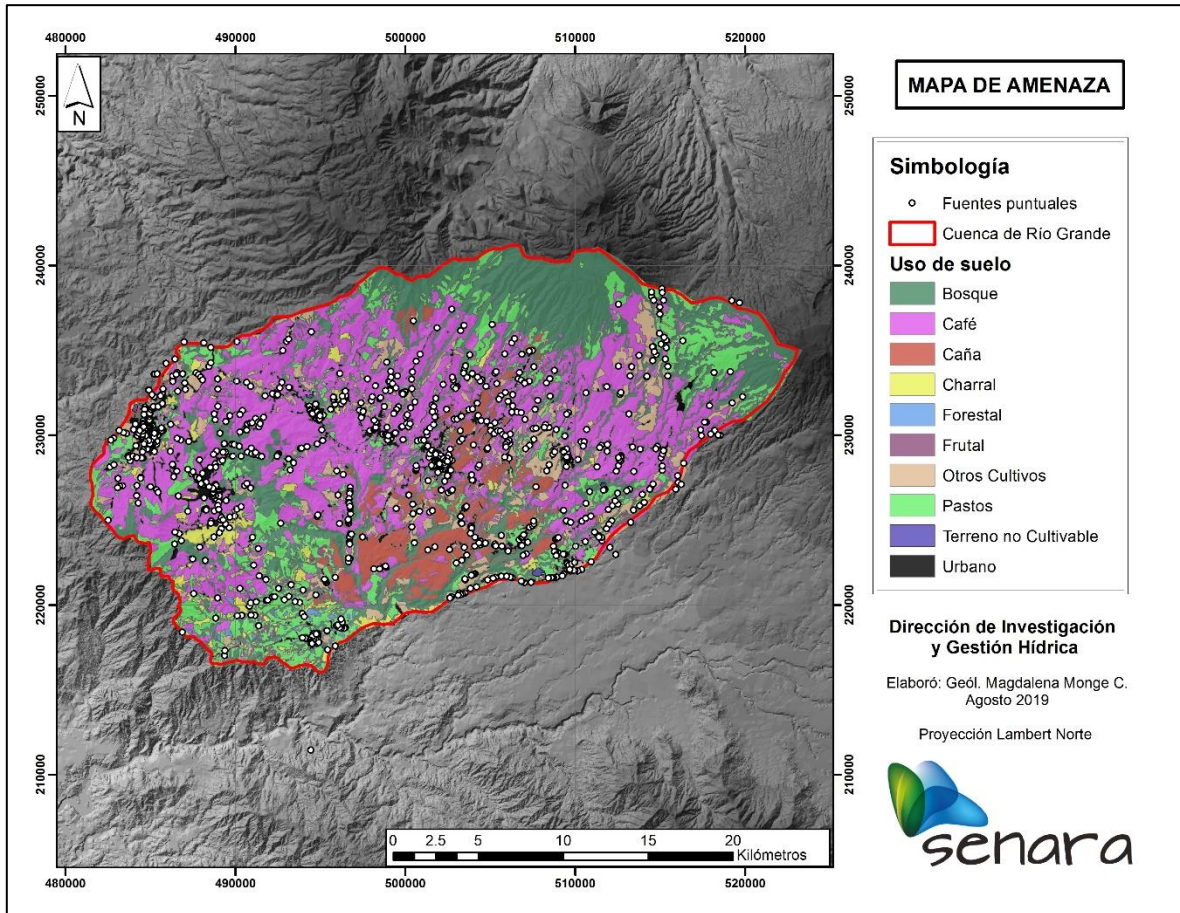


Figura 10.1: Mapa de amenazas en la subcuenca de Río Grande para el año 2016.

Se observa que la mayoría del área de la cuenca se compone de cultivos como café y caña, así como centros urbanos donde se concentran actividades puntuales que son potenciales fuentes de contaminación.

Dentro de estas fuentes potenciales se identifican estaciones de servicio, talleres mecánicos, cementerios, clínicas y hospitales, salones de belleza, fábricas de pintura, beneficios de café, ingenios, hoteles, mueblerías, viveros, entre otros.

11. CONCLUSIONES

Las rocas aflorantes en la subcuenca del río Grande son principalmente de origen volcánico, con excepción de los depósitos lacustrinos ubicados en la zona oeste en las localidades de Palmares y San Ramón de Alajuela.

Se encontraron diferencias en la margen izquierda y derecha del río Colorado, el basamento en la zona oeste del río Colorado pertenece al grupo Aguacate, de edad Terciaria, las cuales son sobreyacidas por la Form. Tiribí mientras que al este y al norte por rocas volcánicas de la Unidad Bajos del Toro. Al este del río Colorado el basamento está constituido por la Form. Colima. Al norte de la margen izquierda del río Grande se tiene una secuencia de coladas y depósitos piroclásticos provenientes de los estratovolcanes de la Cordillera Volcánica Central.

Con la información existente fue difícil determinar con exactitud la extensión de la Fm. Colima hacia el oeste del Valle Central, ya que las descripciones de los pozos en general no son muy detalladas y al noreste del área de estudio los pozos no superan los 80 metros en promedio, además en esta zona en particular, existen coladas provenientes del Volcán Poás y Barva, de manera que para contestar esta incógnita se necesitaría realizar pozos exploratorios profundos (de 200 metros o más), en donde se realicen análisis geoquímicos y dataciones de los distintos flujos de lava existentes.

Se presume que los lineamientos N-S sobre el río Colorado son barreras estructurales que marcan el límite oeste de esta formación, y que juegan un rol importante en el flujo del agua subterránea. Además de las diferencias geológicas, existen diferencias en los rasgos estructurales observados en ambos márgenes del río Grande. La presencia de fallas y lineamientos en direcciones NW-SE y NE-SW, preferencialmente ubicadas en las rocas del Grupo Aguacate, coinciden con el modelo de esfuerzos compresivos S-N vigente. En la margen izquierda se tiene la falla de Alajuela con dirección Este-Oeste aproximadamente, donde aflora el basamento (Form. Colima).

Los suelos de la subcuenca del río Grande se asocian con diversos materiales volcánicos, principalmente cenizas, por lo que desde el punto de vista agronómico se pueden clasificar como Andisoles. Desde el punto de vista geotécnico, los suelos de la subcuenca del Río Grande se clasifican como Limos elásticos con plasticidades desde intermedias hasta extremadamente altas. La alta plasticidad se debe a la presencia de arcillas tales como la alofana las cuales típicamente retienen mucha agua debido a su estructura molecular, por lo que con frecuencia los valores medidos de capacidad de campo y punto de marchitez fueron altos.

Las tasas de infiltración en los suelos varían entre 0,36 y 5,5 m/día, en general se considera que son tasas desde moderadas hasta altas debido a su condición limosa.

En la subcuenca del río Grande existen al menos tres sistemas de flujo de agua subterránea, uno muy rápido en la zona más alta, en las faldas del Poás y Barva, el cual origina la mayor parte de los manantiales muestreados, donde el agua circula por depósitos volcánicos recientes. El flujo intermedio es el predominante en la zona este del río Grande, el agua en esta zona se mueve del noreste hacia el suroeste. En la zona oeste de la subcuenca el flujo es hacia el sureste, hacia el río Grande.

En el centro de San Ramón se encontró un pozo sin tritio lo que indica que se trata de las aguas más antiguas de la zona (<60 años) el cual podría corresponder con un flujo regional. En general la composición química del agua subterránea es tipo bicarbonatada cálcica con algunas variaciones.

Cuatro de las ocho formaciones estudiadas muestran evolución hidrogeoquímica en los diferentes puntos de agua muestreado: Colima, Aguacate, Barva y Paleopoás. Las aguas del Paleopoás tienen una composición química influenciada por los depósitos volcánicos y presentan concentraciones en sulfatos relativamente altas.

Una parte de las aguas que circulan en las rocas del grupo Aguacate muestran claramente una variación química debido a la influencia de la alteración hidrotermal.

Las variaciones del Colima se dan principalmente en las concentraciones de calcio, magnesio y bicarbonato y podría relacionarse al tiempo de residencia de las aguas en el sistema.

Las aguas de las formaciones Achote, Bajos del Toro y Poasito no cambian o cambian muy poco y son pobres en iones. Esto indica una interacción débil con la roca por tiempos de residencia del agua en el acuífero cortos.

A partir de la información de isótopos estables en el agua subterránea se determinó que la mayor parte de los pozos y manantiales reciben recarga directa. Se puede deducir que los acuíferos presentan un tiempo de renovación promedio de las aguas de algunos meses (o años) ya que no presentan variaciones isotópicas entre los dos periodos comparados.

La información de isótopos estables muestra el efecto de altitud en la subcuenca de estudio, donde las aguas recargadas a mayor elevación son más empobrecidas en oxígeno 18 y deuterio, contrario a lo que ocurre con las aguas recargadas a elevaciones intermedias y bajas. A partir del exceso de deuterio se deduce que La

Laguna de Fraijanes, y los manantiales Chayotera y Prendas, situados en el corredor entre el volcán Poás y el volcán Barva, reciben precipitaciones influenciadas por el Atlántico.

El principal uso del suelo en la subcuenca del río Grande es agrícola, para el cultivo del café y la caña. Seguidamente el bosque ocupa un 24% del área de estudio y la parte urbana corresponde a un 6,4% del área.

Mediante el balance de humedad de suelos se obtuvo una recarga potencial de 21651.388 L/s para toda la cuenca. La descarga por manantiales se contabilizó en 3518,15 L/s y la descarga de pozos se estimó en 4183,63 L/s, ambos para las fuentes registradas en la Base de Datos de SENARA. En total se estima que existe un disponible 13949 L/s. A este valor se calcula un 40%, quedando 5580 L/s para aprovechamiento en la cuenca.

Se determinó la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos en la subcuenca de Río Grande, siendo que la mayoría del área se determinaron vulnerabilidades medias y bajas. En los cantones de Grecia y Poás ya existían mapas de vulnerabilidad, por lo que se mantienen vigentes. En el sector de Grecia y la zona norte de Poás, se determinaron vulnerabilidades altas.

12. RECOMENDACIONES

1. Se deben ampliar los estudios de suelos y pruebas de infiltración en la subcuenca de Río Grande para detallar el Balance de humedad de suelos.
2. Realizar perforaciones exploratorias de gran profundidad para determinar los límites del acuífero Colima en el sector este de la subcuenca de Río Grande.
3. Mantener actualizado el mapa de uso de la tierra, para evidenciar el desarrollo urbano que se está dando en sectores como Grecia y Naranjo, y al mismo tiempo que permitan actualizar los mapas de recarga de la zona.
4. En cuanto a la estimación del caudal disponible, se recomienda utilizar un 40% de la recarga disponible, una vez que se haya contabilizado la extracción de los pozos y la descarga de los manantiales. De esta manera se puede mantener un caudal ecológico y se tiene un margen de seguridad en cuanto al caudal utilizable, debido a posibles pozos y manantiales que no estén registrados actualmente.
5. Se debe solicitar nuevamente a la Dirección de Agua del MINAE la información de concesiones en el área de estudio, para tener un dato más actualizado de la extracción de agua en la zona.
6. En las zonas donde se determinó vulnerabilidad alta no se recomienda el desarrollo de actividades de alta amenaza, tales como hidrocarburos, industrias químicas, entre otros. En el caso de urbanizaciones o condominios se recomienda el uso de plantas de tratamiento para evitar la contaminación de los acuíferos.
7. Se recomienda elaborar un modelo numérico en la subcuenca de Río Grande, para aplicar diferentes escenarios de cambio climático, principalmente si existe disminución de precipitación en la zona que pueda afectar la recarga.

13. BIBLIOGRAFÍA

- ARIAS, M., 1995: Caracterización geológica de los alrededores de San Juan de Bolívar, distrito 8° del cantón de Grecia y San Pedro de La Unión, distrito 4° del cantón de Valverde, provincia de Alajuela, Costa Rica. – 103 pags. Univ. De Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- ALPÍZAR, R., 1995: Estudio geológico integral del distrito de San Roque y alrededores, cantón de Grecia, provincia de Alajuela, Costa Rica. – 80 pags. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- ALVARADO, E., 1994: Estudio Geológico Ambiental y Estratigrafía de la Región Oeste de San Ramón, Parte de la Hoja San Ramón, escala 1:10000 Alajuela, Costa Rica.- 55 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- ALVARADO, A; BERTSH, F, BORNEMISZA, E, FORSYTHE, W, HENRIQUEZ, C, MATA, R, MOLINA, E, SALAS, R; 2001: Suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) de Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. CIA. Universidad de Costa Rica. P.111.
- ALVARADO G. & CARR, M. 1993: The platanar-aguas zarcas centers, Costa Rica: spatial-temporal association of quaternary calc-alkaline and alkaline volcanism.- bulletin of volcanology. Springer-Verlag (1993) 55:443-453.
- ALVARADO, G, & GANS, P; 2012: Síntesis geocronológica del magmatismo, metamorfismo y metalogenia de Costa Rica.- Rev. Geól. Amér. Central, 46: 7-122.
- ARIAS, O. & DENYER, P; 1991: Estructura geológica de la región comprendida en las Hojas topográficas Abra, Caraigres, Candelaria y Río Grande, Costa Rica. Rev. Geól. Amér. Central 12:61-74.
- ARREDONDO S. & SOTO G. 2006: Edad de las lavas del Miembro Los Bambinos y sumario cronoestratigráfico de la Formación Barva. Revista Geológica de América Central, 34-35: 59-71, 2006.
- BONILLA, J., DE LEMOS, R., & FALLAS, Y., 1993: Estudio Geológico-Ambiental de la Hoja: Topográfica Colorado 3346-III-13, Escala 1:10000 Naranjo, Alajuela.- 89 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- BRENES, J., 2003: Geología y peligros volcánicos del flanco oeste y suroeste del Volcán Barva, Costa Rica. – 83 pags. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].
- BRENES, W., 1995: Estudio integral del sector occidental del cantón de Grecia, provincia de Alajuela. – 144 pags. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].

- BORGIA, A.; BURR, J.; MONTERO, W.; MORALES, L.D.; ALVARADO, G.;1990: Fault propagation folds induced by gravitational failure and slumping on the Central Costa Rica Volcanic range: implications for large terrestrial and martian volcanic edifices. *Journal of Geophysical Research*. 95(B9): 14357-14382. August 30, 1990.
- CAMPOS, A., CASTRO, L., GAZEL, E., JARA, D., MONTES, N., MURILLO, S., RAMÍREZ, S., RUÍZ, P & SEQUIRA, M., 2005: Geología, geomorfología y amenazas naturales del cantón de Poás, Alajuela. - 155 pags. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- CASTILLO, R; 1969: Geología de los mapas básicos Abra y partes de Río Grande, Costa Rica. *Informes Técnicos y Notas Geológicas* 33, 40 pags. Dirección de Geología, Minas y Petróleo, Escuela Centroamericana de Geología. San José, Costa Rica.
- CHAVES, C., & AVILÉS, L., 1993: Estudio geológico integral de la hoja topográfica Cirrí 3346 III 8 (escala 1:10000) Cantón de Naranjo, Provincia de Alajuela, Costa Rica.- 153 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- Chávez et al (2001). Censo de variedades de caña de azúcar de Costa Rica año 2000 y tradicionales en Costa Rica.
- DENYER, P., & ARIAS, O., 1991: Estratigrafía de la Región Central de Costa Rica. – *Revista Geológica de América Central* 12: 1-59. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- DARLING, W.G.; PARKER, J.M.; RODRIGUEZ, H; LARDNER, A.J.,1989: Investigation of a volcanic aquifer system in Costa Rica using environmental isotopes. *Isotope hydrology investigations in Latin America*. 215-228.
- DÓNDOLI, C., 1949: Visión rápida geoagronómica de la Meseta Central.- *Bol. Técnico*, 45-46: 1-3.
- DÓNDOLI, C., 1951: Zona de Palmares, Estudio geoagronómico.- *Min. de Agricultura e Ind.* 5: 1-16.
- ECHANDI, E.; 1981: Unidades volcánicas de la vertiente norte de la cuenca del Río Virilla. Tesis de Licenciatura, Escuela Centroamericana de Geología. Univ. Costa Rica. 123 Págs.
- FAJARDO, H.D., 1994: Geología de una Parte de la Hoja Oratorio (Esc. 1:10000), Cantones Naranjo, Palmares y San Ramón, Provincia de Alajuela.- 45 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- FORSYTHE, W. & VAZQUEZ, O; 1973: Air-drying water retention in Costa Rica. Turrialba: Vol.23, Num.2 Trimestre Abril-Junio.

- GAZEL, S. & RUIZ, P., 2005: Los conos piroclásticos de Sabana Redonda: componente magmático enriquecido del Volcán Poás, Costa Rica.- Rev. Geól. Amér. Central, 33: 45-60.
- GILLOT, P; CHIESA, S; ALVARADO, G; 1994: Chronostratigraphy of upper Miocene-Quaternary Volcanism in northern Costa Rica. Rev. Geól. Amér. Central, 17: 45-53.
- FERNÁNDEZ, M; 1968: Las Unidades hidrogeológicas y los manantiales de la vertiente norte de la cuenca del río Virilla. 45 págs.
- KUSSMAUL, S; 1988; Comparación petrológica entre el piso volcánico del Valle Central y la Cordillera Central de Costa Rica. Ciencia y Tecnología 12(1-2): 109-116, 1988 San José, Costa Rica.
- KUSSMAUL, S., 2000: Estratigrafía de las rocas ígneas. EN: Denyer, P. & Kusmaul, S. (comp.), Geología de Costa Rica: 63-86. Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- HENRIQUEZ, C, & CABALCETA, G; 1999: Guía Práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. Universidad de Costa Rica. P.111.
- HUAPAYA, S. & ROJAS, V. 2012: Mapa geológico 1: 50 000, Hoja 3346-III Naranjo. Dirección de Geología y Minas, MINAET.
- MACIAS, J.E., & ZAMORA, E.M., 1993: Geología de La Topografía Cañuela edición 1 IGNCR escala 1 10000 Cantón de Naranjo, Provincia de Alajuela.- 94 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- MADRIGAL, R., 1970: Geología del mapa básico Barranca, Costa Rica. Inf. Técnico Notas Geológicas MEIC IX (37), 59 p.
- MATTHEWS, S., 1989: Costa Rican diatomite: A review of existing knowledge and future potential.- Rev. Geol. Amér. Central, 10: 3-17.
- MIXA, P; DOBEŠ, P; ŽÁČEK, V, LUKEŠ, P; QUINTANILLA, E, 2011: Epithermal gold mineralization in Costa Rica, Cordillera de Tilarán – exploration geochemistry and genesis of gold deposits. Journal of Geosciences, 56 (2011), 81–104.
- MORA, M., 1995: Estudio geológico de un sector de sureste de Grecia, provincia de Alajuela, Costa Rica. – 107 pags. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- MORERA, J., SOTO, G., ÁVILA, M., LAPORTE, M., CLIMENT, A., BARQUERO, R., TAPI, M., JENKINS, R., ESTRADA, J., RODRÍGUEZ, C., CHÁVEZ, J., ALVARADO, G & ÁVILES, F., 1999: Estudio geológico-geotécnico de avance de la factibilidad del proyecto

- hidroeléctrico Laguna Hule (Vol. 1). – 119 pags. Instituto Costarricense de Electricidad [Informe interno].
- PEREZ, W; Alvarado, G; Gans, P; 2006: The 322 kaTiribíTuff: stratigraphy, Geochronology and mechanisms of deposition of the largest and most recent ignimbrite in the Valle Central, Costa Rica. Bull Volcanol. DOI 10.1007/s00445-006-0053-x.
- PONCE, V.M., 2007: Rendimiento sostenible del agua subterránea.- <http://rendimiento.sdsu.edu/> [Consulta: 20 de agosto del 2019].
- RAMÍREZ, R., 1995: Microzonificación sísmica de San Ramón, Alajuela, Costa Rica. – 130 pág. Univ. Costa Rica, San José [Tesis Lic.].
- REDONDO, S. & SOTO, G; 2006: Edad de las lavas del miembro Los Bambinos y sumario cronoestratigráfico de la Formación Barva, Costa Rica. Rev. Geol. Amér. Central, 34-35:59-71, 2006.
- RODRÍGUEZ, H.V., 1976: Geología de la zona Sur de Palmares. 14 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- ROJAS, V., 2012: Relación entre los procesos volcano-sedimentarios y el neotectonismo de la cuenca lacustrina de Palmares y San Ramón, Costa Rica. – 159 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].
- RUIZ, P., GAZEL, E., ALVARADO, G., CARR, M., SOTO, G., 2010: Caracterización geoquímica y petrográfica de las unidades geológicas del macizo del Volcán Poás, Costa Rica.- Rev. Geol. Amér. Central, 43: 37-66, 2010.
- SALAS, L, 2012: Uso de la tierra, e identificación de fuentes potenciales de contaminación en la subcuenca del río Grande 2005 – 2012. Escuela de Ciencias Geográficas, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar. Universidad Nacional.
- SENARA; 2013: Base Nacional de pozos. Área de Aguas Subterráneas.
- SENARA-BGS; 1985: Mapa hidrogeológico del Valle Central de Costa Rica.
- SHOJI, S., NANZYO, M, DAHLGREEN, D; 1993: Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization. Developments in soil science 21.Elsevier. P. 288.
- TRISTÁN, E., 1994: Estudio geológico integral de la sección Este de la hoja topográfica San Ramón 3346-III-11 (escala 1:10000), Cantón de San Ramón, Provincia de Alajuela, Costa Rica.- 129 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- USDA, 1992: Soil survey laboratory methods manual, USA.

- VARGAS, I., 1995: Estudio Geológico-Ambiental de la zona este-noroeste de la ciudad de Grecia, en las Hojas Sarchí y Gertrudis, Escala 1:10 000 cantón de Grecia, Provincia de Alajuela. [Inf. Campaña Geol.].
- VILLEGAS, A.M., 1994: Geología de una Parte de la Hoja Oratorio 3346-III-12, Provincia de Alajuela, Costa Rica.- 130 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Inf. Campaña Geol.].
- VILLEGAS, A., 1997: Geodinámica de la Cordillera de Tilarán, relación entre la volcanología y la tectónica. - 188 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].
- VILLEGAS, A., 2004: La Formación Alto Palomo: flujos pumíticos de la cordillera volcánica central, costa rica. Rev. Geol. Amér Central, 30: 73-81, 2004.
- ŽÁČEK, V; VOREL, T; KYCL, P; HUAPAYA, S; MIXA, P; GRYGAR, R; HAVLÍČEK, P; ČECH, S; HRAZDÍRA, P; METELKA, V; ŠEVČÍK, J; PÉCSKAY, Z; 2012: Geología y estratigrafía de la hoja 3246-ii Miramar, Costa Rica. Rev. Geol. Amér. Central, 47: 7-54.

14.ANEXOS