

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA CENTROAMERICANA DE GEOLOGÍA

**“Modelo conceptual hidrogeológico, recarga y vulnerabilidad a la
contaminación cuenca río Arío, Cóbano, Puntarenas”**

Tesis presentada para optar por el grado de Licenciatura en
Geología

David Chacón Robles

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

Junio, 2016

Hoja de aprobación

Tesis sometida y aceptada por el Comité Evaluador de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado académico de Licenciatura en Geología.

Comité Evaluador



M.Sc. Roberto Ramírez
Director



Lic. Jonathan Chinchilla Cortes
Integrante del Comité Asesor



Dr. Marco Barahona Palomo
Integrante del Comité Asesor



Lic. Marta Chaves Quirós
Miembro del Tribunal



Dr. Javier Trejos Zelaya
Decano Facultad de Ciencias

Sustentante



David Chacón Robles

Sustentante

Derechos de propiedad intelectual

Yo, David Chacón Robles, portador de la cedula No. 1-1188-0595, conocedor de las sanciones legales con que la Ley Penal de la República de Costa Rica castiga el falso testimonio.

DECLARO bajo la fe de juramento lo siguiente: Que soy estudiante de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica y como requisito de graduación debo defender mi Tesis para optar por el grado académico de Licenciatura en Geología, la cual versa sobre el tema: MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLOGICO, RECARGA Y VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO ARIO, CÓBANO, PUNTARENAS. Por lo que manifestó que la misma ha sido elaborada siguiendo las disposiciones exigidas por la Universidad.

Además declaro que la presente Tesis es fruto de mi esfuerzo e investigación en su totalidad, no hay participación de personas ajenas a mi Director, Co-directores y Lector, los documentos utilizados están respectivamente citados. ES TODO.

Firmo en la ciudad de San José a las 17 horas del día 29 de Junio del 2016.



David Chacón Robles

Sustentante

Dedicatoria

Primero a Dios, que es fiel, sin él no soy lo que soy.

A mis padres, Rogelio Chacón Soto, Juana María Robles Acuña y a mis hermanos por siempre apoyarme en cada momento de mi vida.

A Roberto Ramírez, mi director de tesis, gran persona tanto en lo personal como profesional, considerado un gran amigo.

A mis Co-directores, personas ejemplares, quienes me ayudaron y guiaron a lograr este proyecto.

A cada una de las diferentes personas, que de una u otra forma aportaron un grano de arena para lograr cumplir esta meta.

Agradecimientos

Se agradece de todo corazón a las diferentes personas que aportaron de una u otra forma para que la elaboración de este proyecto.

Desde los técnicos de campo hasta el director y los co-directores, por su constante apoyo.

Una mención especial a Pedro Bermúdez y Jonathan Chinchilla por su gran aporte en trabajo de campo.

Al Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), por haber permitido realizar esta investigación, así como financiar el desarrollo de la misma.

Al Instituto de Acueductos y Alcantarillados (AyA), por el aporte de la información de las pruebas de infiltración realizadas en la zona de estudio, así como el aporte de la información geofísica realizada en la zona.

Al Instituto Meteorológico Nacional (IMN), por contribuir con la información climática registrada en la estación meteorológica Paquera.

A la Escuela Centroamericana de Geología (ECG), quien colaboro con la realización de pruebas a las muestras de suelos extraídas en campo.

Al Programa de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (PROGIRH) del Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE), por el apoyo económico y logístico en la realización de la investigación.

A cada una de las personas e instituciones que de una u otra forma colaboraron en la realización de esta investigación.

Resumen

Se realiza un estudio hidrogeológico en la cuenca del río Ario, ubicada al sur de la península de Nicoya, en la provincia de Puntarenas, cantón Puntarenas, distritos Paquera, Lepanto y Cóbano, tiene un área de 205 km². El estudio define el modelo hidrogeológico, el balance hídrico de suelos y la vulnerabilidad de la cuenca del río Ario.

Se determina que la cuenca geológicamente está compuesta por un basamento ígneo, que corresponde al Complejo de Nicoya, posteriormente se depositaron varias formaciones de carácter sedimentario, entre las que encontramos: Formación Sabana Grande, Formación Piedras Blancas, Formación río Arío, Formación Calizas Arío, Formación Curú, Formación Montezuma, Formación Cóbano, la unidad coluvial y la unidad aluvial.

Los sondeos geofísicos indican resistividades menores a los 50 Ohm-m para las unidades sedimentarias y entre 100-300 Ohm-m para la unidad ígnea.

El inventario de pozos determina la existencia de 23 pozos excavados, 22 pozos registrados en base de datos de SENARA y se perforaron 18 piezómetros de investigación.

Los resultados de sondeos geofísicos, la geología, y la información de perforación de pozos y piezómetros se determinan tres zonas donde se puede realizar una caracterización hidrogeológica, la zona 1 y la zona 2 corresponde a un acuífero presente en la unidad aluvial, la zona 3 corresponde a un acuífero presente en la formación Montezuma.

Los acuíferos presente en la unidad aluvial, presenta niveles freáticos someros alrededor de los 5 m de profundidad, con caudales de hasta 15 l/s, transmisibilidades superiores a los 200 m²/día, con un flujo del agua hacia el cauce del Río Ario, el espesor de la zona saturada se estima en 50 m.

El acuífero presente en la Formación Montezuma, presenta niveles en el rango 20 m, con caudales menores a 1 l/s, transmisibilidades de 0,5 m²/día, el espesor de la zona saturada es de 30 m, el flujo del agua es principalmente hacia el cauce del Río Negro.

Se estima una recarga anual de 2190 l/s, lo que corresponde al 16 % de la precipitación para la zona, se establece que las unidades geológicas que presentan mayor recarga corresponde al Complejo de Nicoya, la formación Piedras Blancas y la formación Cóbano, cada una presenta una recarga cercanas a los 20% respecto al total, la gran extensión de estas unidades permiten este porcentaje alto de infiltración, en comparación con las otras unidades.

De los 2190 l/s de recarga potencial en la cuenca del río Arío, son utilizados según registros de caudales un total de 70 l/s, con lo hay un disponible de 2120 l/s.

La poca información no permite realizar el mapa de vulnerabilidad en toda la cuenca, se determina zonas de vulnerabilidad alta a la contaminación asociadas al acuífero presente en la unidad aluvial.

Para el acuífero presente en la formación Montezuma, se determina una vulnerabilidad baja a la contaminación.

Los resultados obtenidos, constituyen un vital insumo en la gestión de las aguas subterráneas, que permitirá a las instituciones gubernamentales una mejor gestión y manejo del recurso hídrico presente en la cuenca del río Arío.

Índice

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Ubicación del área de estudio	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos del proyecto	3
1.4 Antecedentes:	3
1.5 Alcances y limitaciones	6
1.6 Marco Teórico	7
1.7 Actividades	12
1.8 Metodología:	13
CAPITULO 2: MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLOGICO.....	15
2.1 MARCO GEOLOGICO.....	15
2.1.1 Geología Regional	15
2.1.2 Tectónica	22
2.1.3 Geología local	22
2.1.4 Información pozos y piezómetros	32
2.1.5 Exploración geofísica.....	39
2.1.6 Perfiles geológicos.....	47
2.2 CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS.....	51
2.2.1 Red de monitoreo	51
2.2.3 Flujo subterráneo y Gradiente	58
2.2.4 Parámetros Hidráulicos	61
2.2.5 Perfiles Hidrogeológicos.....	63
2.2.6 Modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca del río Arío	66
CAPITULO 3: BALANCE HÍDRICO DE SUELOS.....	68

3.1 Clima.....	68
3.1.1 Datos climatológicos de la zona	68
3.1.2 Evapotranspiración Potencial:.....	70
3.2 Análisis de los suelos	71
3.2.1 Capacidad de campo (CC).....	72
3.2.2 Punto de marchitez (PM)	73
3.2.3 Densidad aparente (DA)	74
3.2.4. Contenido de humedad.....	74
3.2.5 Peso unitario húmedo	75
3.2.6 Gravedad específica	75
3.2.7 Límites de Attemberg.....	76
3.3. Pruebas de Infiltración	77
3.4 Uso del Suelo:.....	79
3.5 Mapa de pendientes:	80
3.6. Recarga potencial del Acuífero:	81
CAPITULO 4: VULNERABILIDAD INTRINSECA A LA CONTAMINACIÓN	91
MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO FINAL.....	96
CONCLUSIONES:	97
RECOMENDACIONES:.....	98
ANEXOS	103

Índice de Figuras

Figura 1: Ubicación Cuenca río Arío.	1
Figura 2: Potencial acuífero río Arío.....	5
Figura 3: Elementos para la determinación de un modelo conceptual hidrogeológico..	8
Figura 4: Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos..	12
Figura 5: Mapa geológico regional cuenca Río Arío.	20
Figura 6: Columna estratigráfica Cuenca río Arío.....	21
Figura 7: Mapa afloramientos cuenca del río Arío.	31
Figura 8: Mapa geológico local Cuenca río Arío.	32
Figura 9: Fuentes Hídricas Cuenca río Arío.	39
Figura 10: Ubicación SEV's Cuenca río Arío.....	40
Figura 11: Ubicación perfiles cuenca río Arío.....	47
Figura 12: Perfil geológico A-A'	48
Figura 13: Perfil geológico B-B'	48
Figura 14: Perfil geológico C-C'	49
Figura 15: Perfil geológico D-D'	49
Figura 16: Perfil geológico E-E'	50
Figura 17: Perfil geológico F-F'	50
Figura 18: Perfil geológico G-G'	51
Figura 19: Red de monitoreo cuenca Arío.....	52
Figura 20: Aforos y conexión hidráulica río Arío.	57
Figura 21: Sectores dentro de la cuenca con información para realizar equipotenciales.	58
Figura 22: Equipotenciales sector 1, cuenca río Arío.	59
Figura 23: Equipotenciales sector 2, Cuenca río Arío.....	60

Figura 24: Equipotenciales sector 3, cuenca río Arío.	60
Figura 25: Pozos con parámetros hidráulicos.	62
Figura 26: Perfil hidrogeológico A-A´.	63
Figura 27: Perfil hidrogeológico B-B´.....	64
Figura 28: Perfil hidrogeológico C-C´.....	65
Figura 29: Perfil hidrogeológico D-D´.	65
Figura 30: Perfil hidrogeológico E-E´.	66
Figura 31: Perfil hidrogeológico E-E´.	66
Figura 32: Sitios de Muestreo suelos Cuenca río Arío.....	72
Figura 33: Clasificación suelos Cuenca río Arío.	77
Figura 34: Ubicación pruebas de infiltración Cuenca río Arío.....	78
Figura 35: Uso de suelos cuenca Río Arío.	80
Figura 36: Clasificación pendientes por porcentaje, Cuenca río Arío.	81
Figura 37: Parámetro G de la metodología G.OD. Cuenca río Arío.....	92
Figura 38: Parámetro O de la metodología G.OD. Cuenca río Arío.....	93
Figura 39: Parámetro D de la metodología G.OD. Cuenca río Arío.....	94
Figura 40: Vulnerabilidad G.O.D. cuenca río Arío.	95
Figura 41: Modelo conceptual hidrogeológico cuenca río Arío.....	96

Lista de Cuadros

Cuadro 1: Pozos excavados levantados en campo.....	33
Cuadro 2: Pozos en base de datos que se ubican en la cuenca Río Arío.	35
Cuadro 3: Piezómetros perforados por SENARA en la cuenca Arío.....	37
Cuadro 4: Resultados sondeo geofísico 1.	41

Cuadro 5: Resultados sondeo geofísico 2.	42
Cuadro 6: Resultados sondeo geofísico 3.	43
Cuadro 7: Resultados sondeo geofísico 4.	44
Cuadro 8: Resultados sondeo geofísico 5.	45
Cuadro 9: Resultados sondeo geofísico 6.	46
Cuadro 10: Resultados sondeo geofísico 7.	46
Cuadro 11: Resultados de mediciones de la profundidad del nivel freático en el tiempo.	53
Cuadro 12: Pozos seleccionados para mostrar las variaciones del nivel en tres zonas específicas de la cuenca.....	54
Cuadro 13: Resultados de aforos realizados en la cuenca del Río Arío..	56
Cuadro 14: Parámetros hidráulicos de pozos presentes en la cuenca Arío.....	61
Cuadro 15: Parámetros hidráulicos obtenidos de pruebas realizadas a los piezómetros.	62
Cuadro 16: Resumen de las características climáticas en zona donde se encuentra la cuenca del río Arío.....	68
Cuadro 17: Registro parámetros climáticos estación Paquera.	69
Cuadro 18: Parámetros utilizados en el cálculo de la evapotranspiración potencial.	70
Cuadro 19: Resultados de Capacidad de Campo (CC), muestras suelos Cuenca Arío.....	73
Cuadro 20: Resultados Punto Marchitez (PM), muestras suelo cuenca río Arío.	73
Cuadro 21: Resultados Densidad Aparente (DA), muestras suelo cuenca río Arío.....	74
Cuadro 22: Resultados Contenido Humedad (CH), muestras suelo cuenca río Arío.	75
Cuadro 23: Resultados Contenido Humedad (CH), muestras suelo cuenca río Arío.	75
Cuadro 24: Resultados Gravedad Especifica, muestras suelo cuenca río Arío.	76
Cuadro 25: Resultados Límites de Attemberg, muestras suelo cuenca río Arío.....	76
Cuadro 26: Infiltración promedio para cada una de las formaciones presentes en la cuenca Arío.	79
Cuadro 27: Componentes del coeficiente de infiltración por pendiente.	82

Cuadro 28: Componentes del coeficiente de infiltración por vegetación.	82
Cuadro 29: Valores de f_c , K_v , K_p y profundidad de raíces a utilizar en el balance de suelos.	84
Cuadro 30: Valores de capacidad de campo, punto de marchitez y densidad aparente a utilizar en el balance de suelos.	85
Cuadro 31: Recarga potencial total y para cada una de las formaciones presentes en la cuenca Arío.	87
Cuadro 32: Porcentaje de recarga por unidad geológica, cuenca río Arío.	89

Lista de gráficos

Gráfico 1: Variación de los niveles freáticos en el tiempo en los pozos seleccionados.....	54
Gráfico 2: Relación precipitación y temperatura máxima registros estación Paquera.	69
Gráfico 3: Relación Evapotranspiración mensual, precipitación y temperatura promedio para la estación Paquera.....	71
Gráfico 4: Recarga en porcentaje por unidad geológica.	89

Lista de anexos

Anexo 1: Información pozos presentes en la base de datos.....	104
Anexo 2: Ubicación nacientes presentes en la zona de estudio.	105
Anexo 3: Información piezómetros perforados por SENARA.....	106
Anexo 4: Ubicación y curvas de resistividades obtenidas en los sondeos geofísicos	107
Anexo 5: Pruebas de bombeo realizadas en la cuenca Arío.	112
Anexo 6: Polígonos definidos para determinar el balance hídrico de suelos	114

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Ubicación del área de estudio

La zona de estudio se ubica al sur de la península de Nicoya, en la provincia de Puntarenas, cantón Puntarenas, distritos Paquera, Lepanto y Cóbano, específicamente en la cuenca del río Arío y presenta un área de 205 km².

Se encuentra delimitada aproximadamente entre las coordenadas Lambert Norte 180.500 – 204.000 latitud norte y 402.000 – 423.000 longitud este, de las hojas cartográficas Cabuya, río Arío y Venado, escala 1:50000, editadas por el Instituto Geográfico Nacional. (Figura 1).

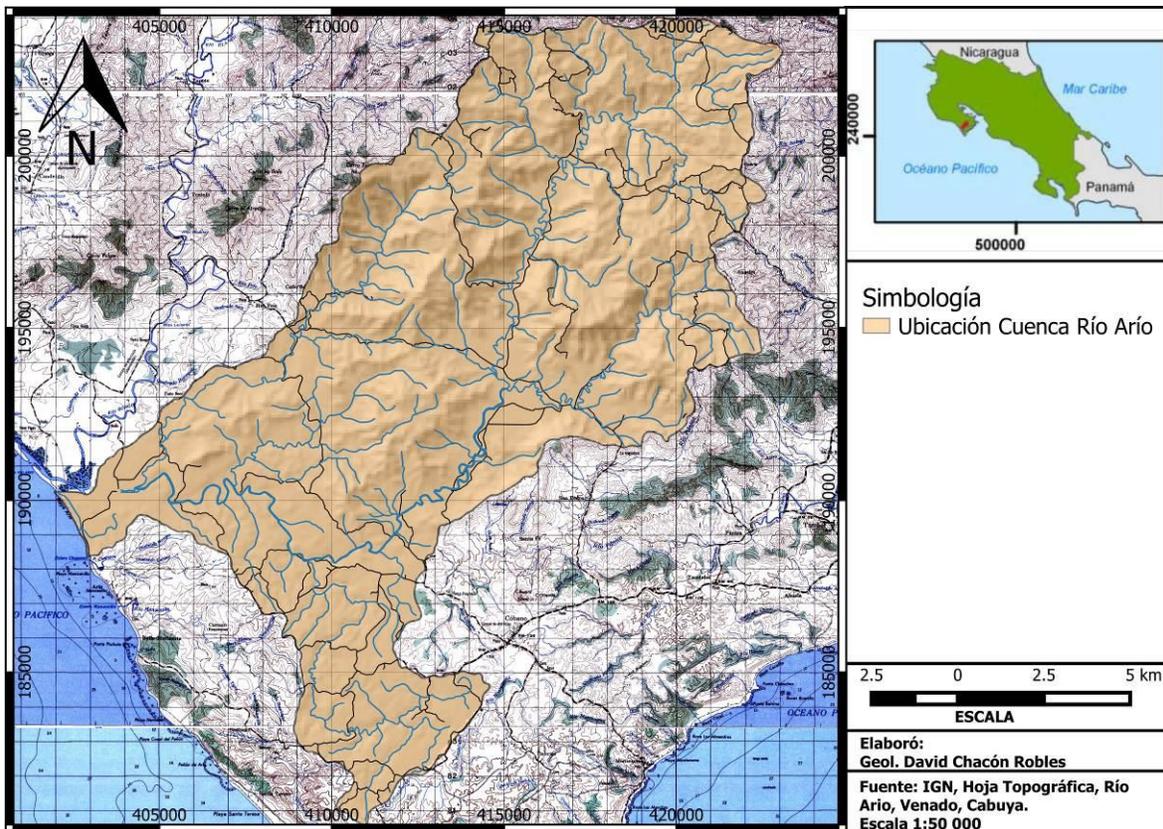


Figura 1: Ubicación Cuenca río Arío.

Presenta un alargamiento NE-SE, el cauce principal corresponde al Arío, sus principales afluentes corresponden al cauce del río Caño Negro y el río Seco.

1.2 Justificación

El crecimiento demográfico, unido al incremento de la actividad turística y desarrollo inmobiliario en el sector sureste de la Península de Nicoya, ha propiciado un aumento en la demanda de agua para el abastecimiento de las distintas necesidades de la población. (MINAE, SENARA, AyA, ICE, BN, 2008)

La demanda de agua por parte de la población se ha venido cubriendo mediante la captación de manantiales o perforación de pozos para el aprovechamiento del agua almacenada en los acuíferos del área. (Chinchilla, J., 2012).

Al año 2012 se contabilizan un total de 81 captaciones de aguas subterráneas en la cuenca en estudio, sin embargo solo se tiene registro en la base de datos del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA) de un total de 27 pozos (Chinchilla, J., 2012).

La perforación de pozos ilegales para la extracción de agua subterránea es muy común en los acuíferos costeros de Guanacaste y sur de la península de Nicoya, esto impide a las autoridades competentes controlar efectivamente la cantidad de caudal que se extrae de dichos acuíferos (Estado de La Nación, 2008).

La problemática respecto al recurso hídrico en la región, ha sido reflejada en las diversas denuncias que se han interpuesto en las instituciones del estado, ejemplo de ello, es el recurso de amparo con expediente No. 08-011530-0007-CO, en el que la Sala Constitucional ordenó al Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), Acueductos y Alcantarillados (AYA) y Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), a realizar los estudios necesarios para determinar si hay afectación al recurso hídrico en la cuenca del río Montezuma, la cual se encuentra contigua a la cuenca del río Arío.

La falta de recurso hídrico en la región, ha provocado que la cuenca del río Arío sea reconocida como posible fuente de abastecimiento para comunidades como: Manzanillo, Santa Teresa, Río Negro, entre otras. Este acuífero ha sido definido como prioritario para investigación dentro del Programa de Gestión Integrada del Recurso Hídrico – SENARA, según Ley No. 8685 del 11 de diciembre del 2008. (SENARA, 2009).

El Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), desarrolla el Programa de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (PROGIRH), con la finalidad de obtener información relevante sobre el acuífero, por lo cual esta tesis genera nueva información técnica que permitirá cumplir con objetivos estatales relacionados con la caracterización del recurso hídrico subterráneo.

En esta cuenca se ubica el Centro de Investigaciones de Recursos Naturales y Sociales (CIRENAS), para el cual la información generada representaría un insumo importante de consulta para las diversas labores que realizan.

El estudio del acuífero existente en la cuenca del río Arío corresponde con una necesidad de conocimiento técnico que debe ser cubierta lo más pronto posible, de tal forma que se conozcan aspectos tales como la disponibilidad del recurso hídrico, características del acuífero y vulnerabilidad hidrogeológica, de tal forma que se pueda garantizar no solamente su protección, sino también el aprovechamiento racional de este recurso.

El estudio que se plantea desarrollar en la cuenca del río Arío abarcará aspectos tales como modelado hidrogeológico, balance hídrico de suelos y vulnerabilidad acuífera, de tal forma que también representa un insumo importante para la municipalidad de Puntarenas y los Concejos de Distrito de Paquera, Lepanto y Cóbano, que podrán tomar los resultados obtenidos e incorporarlos dentro de los planes reguladores y de ordenamiento territorial, de manera tal que podrán controlar y administrar adecuadamente el desarrollo de las actividades que se desarrollan en esta cuenca.

1.3 Objetivos del proyecto

Objetivo general:

Determinar el modelo conceptual hidrogeológico, la vulnerabilidad a la contaminación y la recarga, en el acuífero presente en la cuenca río Arío, para generar información que permita conocer las características del acuífero y ayude a desarrollar una gestión a futuro.

Objetivos específicos:

- Determinar las propiedades hidráulicas de los diferentes tipos de suelos, para ser utilizados en el balance hídrico y calcular la recarga potencial de los acuíferos.
- Conocer los parámetros hidráulicos de los acuíferos presentes en el área de estudio, para definir el modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca.
- Elaborar el mapa de vulnerabilidad del acuífero presente en la zona, que permita definir una zonificación de uso de suelo por los tomadores de decisiones.

1.4 Antecedentes:

Astorga (1987), ubicó el área de estudio dentro de la cuenca geológica Sámara – Cabo Blanco, describiendo una serie de formaciones geológicas ígneas y sedimentarias, cuyos rangos de edades van desde el Jurásico Medio al Pleistoceno. Lo cual representa un aporte de gran importancia en cuanto al entendimiento de los procesos sedimentarios que dieron origen a las formaciones geológicas del área.

Chinchilla, A. (1989), realizó una caracterización geológica detallada de la Formación Montezuma y sus relaciones estratigráficas, lo cual representó un avance importante en cuanto a la delimitación del área abarcada por esta formación.

Aguilar et al. 2014, realizaron un cartografiado geológico a escala 1:50 000 de toda la Península de Nicoya incluyendo el área de la cuenca del río Arío, propiciando un punto de partida adecuado para cualquier estudio hidrogeológico que se desarrolle en la zona.

Respecto a estudios hidrogeológicos en la zona de estudio se indican los siguientes:

Arellano & Vargas (2001), indican que el acuífero en la cuenca del río Arío es de tipo aluvial, con caudales promedio de 1 - 5 l/s, un espesor promedio de 15 m, con profundidades promedio del nivel freático de 4,47 m.

Astorga & Arias (2003), realizó un análisis de la geopotitud de los acuíferos de Costa Rica en el cual indica que la zona norte de Costa Rica posee un potencial hidrogeológico calificada como alta. Según el mapa presente en su estudio, la cuenca del río Arío- corresponde a una zona de alto potencial acuífero, sin embargo se debe tener presente que el estudio se realizó a una escala muy amplia.

Según, MINAE, SENARA, AyA, ICE, BN, (2008), el cual presenta el mapa hidrogeológico para Guanacaste (ver figura 2), la cuenca del río Arío presenta un potencial acuífero mediano a alto.

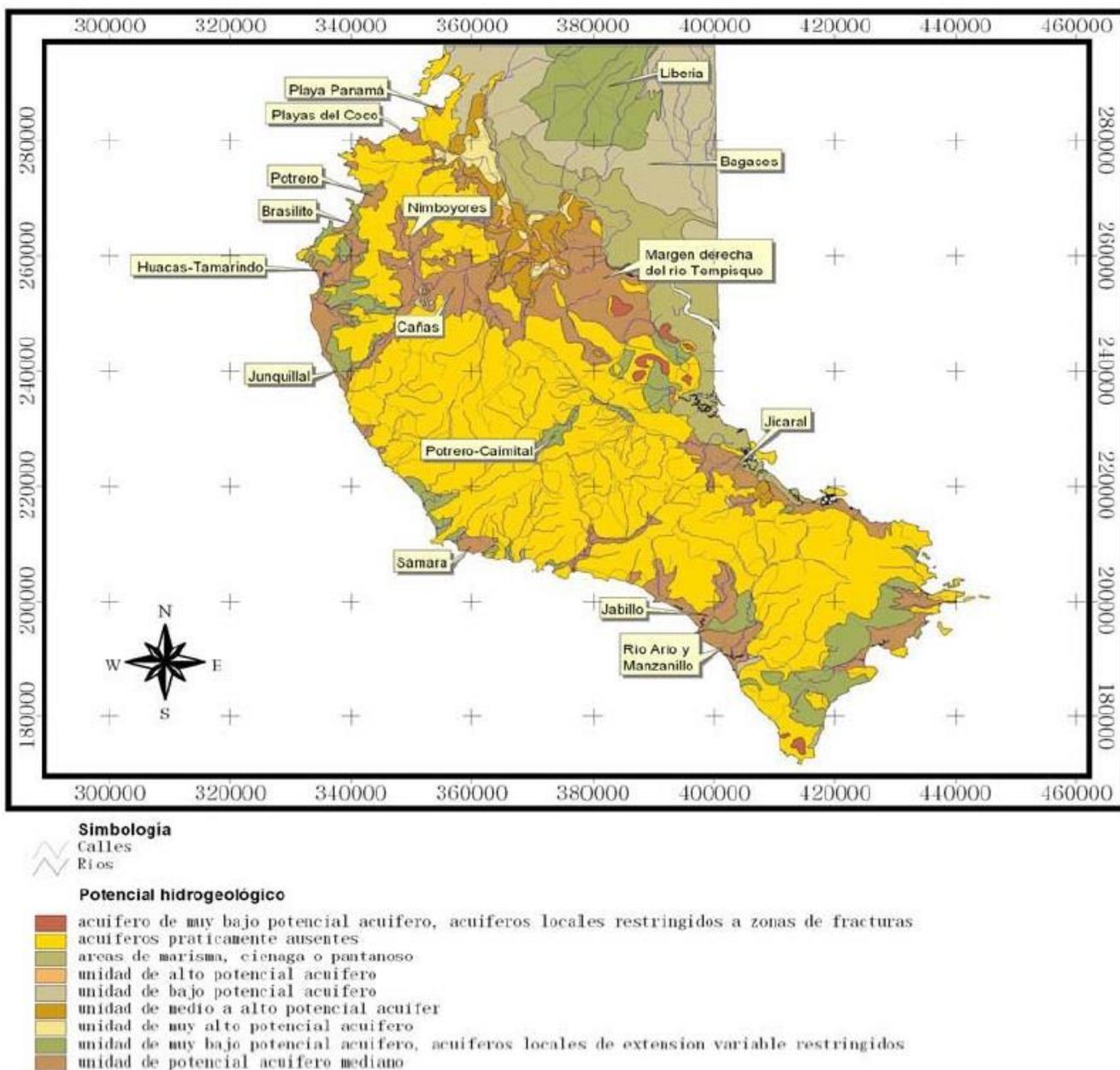


Figura 2: Potencial acuífero río Arío. Fuente MINAE, SENARA, AyA, ICE, BN, (2008).

Chinchilla & Ramírez (2011), realizan el estudio hidrogeológico en la cuenca del Río Montezuma, la cual es la cuenca que se encuentra aledaña a la cuenca en estudio, determinando una recarga de 472,45 l/s por medio del balance hídrico, y de 459 l/s por medio de análisis de hidrogramas de pozos. Asimismo se determina que hay una disponibilidad de 183 l/s, ya que se considera que un 40% de la recarga se está utilizando.

Orozco, (2011), determina los usos de suelos presentes en la cuenca de interés, para lo cual realiza una comparación del uso del suelo entre los años 2005 y el año 2011, enfocado hacia el recurso hídrico.

Hidroterra (2012), llevó a cabo un estudio hidrogeológico geofísico en la cuenca del río Arío con el objetivo de caracterizar el acuífero aluvial de la zona. Los sectores montañosos no se profundizan mucho ya que los objetivos del estudio se enfocaban hacia el potencial de las zonas bajas.

En el año 2013, el SENARA desarrolló una campaña de perforación exploratoria en toda la cuenca del río Arío, que incluyó 18 piezómetros de exploración distribuidos uniformemente, en los cuales se realizaron pruebas geofísicas, hidráulicas, Rock Quality Designation (RQD), y descripciones de secciones delgadas. Esta información es pública y representa un insumo indispensable y de calidad para establecer el modelo hidrogeológico del sitio.

Se realizó búsqueda en la base de datos del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento, de información hidrogeológica sobre pozos, manantiales y aflujos en ríos. Se estableció que para el caso de aflujos diferenciales en ríos, se tienen datos de caudales del río desde el año 1967, aunque no en forma continua. A partir del año 2011 se registran continuamente los caudales del río en las épocas de estiaje mediante la utilización de equipos muy precisos como lo son los molinetes Gurley.

Se realizó la búsqueda en campo y en la base de datos del SENARA, para conocer la cantidad de pozos y nacientes presentes en la zona de estudio, permitiendo realizar un inventario de 81 pozos y nacientes en la cuenca del río Arío (Chinchilla, 2012). De estos 81 sitios, se seleccionaron junto con el personal del SENARA 37 pozos, que constituyen una red para el monitoreo de niveles de agua en la cuenca.

1.5 Alcances y limitaciones

- Alcances:

El estudio generará conocimiento sobre la disponibilidad de recurso hídrico en la cuenca del río Arío, las instituciones encargadas de gestionar las aguas subterráneas contarán con información técnica que les permitirá tomar decisiones acertadas en cuanto a su gestión.

El conocer las características de los acuíferos permitirá generar información importante que será insumo para futuras investigaciones en el área de estudio.

La generación de información de vulnerabilidad de los acuíferos permitirá tomar acciones a mediano y corto plazo a nivel cantonal orientadas a la protección del recurso hídrico.

- Limitaciones:

Las principales limitaciones que podrían entorpecer el desarrollo de este trabajo son siguientes:

1. Acceso al área: la falta de caminos y el incremento en los niveles de los ríos durante la época de invierno dificulta el ingreso a muchos sitios del área de estudio por lo cual se retrasó diversas actividades como medición de niveles y toma de muestras en fechas definidas, entre otros.
2. Disponibilidad de tiempo: Por cuestiones de tipo laboral, no es posible dedicarse de lleno al desarrollo de este proyecto de investigación, de tal manera que en ciertas ocasiones el proyecto pudo sufrir ciertos atrasos con respecto al cronograma propuesto.

1.6 Marco Teórico

Modelo conceptual hidrogeológico

La naturaleza está formada por un conjunto de sistemas complejos que siguen leyes particulares de funcionamiento. Para poder estudiarla, el hombre necesita realizar simplificaciones que le permitan identificar sus características principales y su comportamiento de manera cualitativa, logrando así una mejor comprensión del sistema real y pasando según los objetivos del estudio, a la fase cuantitativa. A esa simplificación cualitativa se le denomina Modelo Conceptual (Betancur et al., 2003).

Si el objeto real de estudio es un acuífero se habla entonces de Modelación Hidrogeológica Conceptual.

El proceso de modelación conceptual hidrogeológica, constituye la fase de identificación y caracterización de un acuífero. Por lo tanto se requiere definir una serie de parámetros que describan los componentes geométricos, físicos, así como variables que describen la situación del sistema en cada momento (Custodio & Llamas., 1996).

El propósito de construir un modelo conceptual es simplificar el problema de campo y organizar los datos de manera que el sistema pueda ser analizado de manera efectiva. Un modelo conceptual es la idea básica de cómo operan los sistemas y procesos. (Betancur et al., 2003).

El conocimiento de la naturaleza de los medios subterráneos se logra a partir de información cuantitativa pero también cualitativa, y es posible incluso para un mismo sistema elaborar varios modelos conceptuales (Betancur et al., 2003).

El modelo conceptual hidrogeológico presenta metodologías bien definidas que tienen un orden lógico en su realización, ya que cada fase aporta información fundamental e indispensable para las etapas posteriores, como se indica en la figura 3. (INGEOMINAS, 2004).

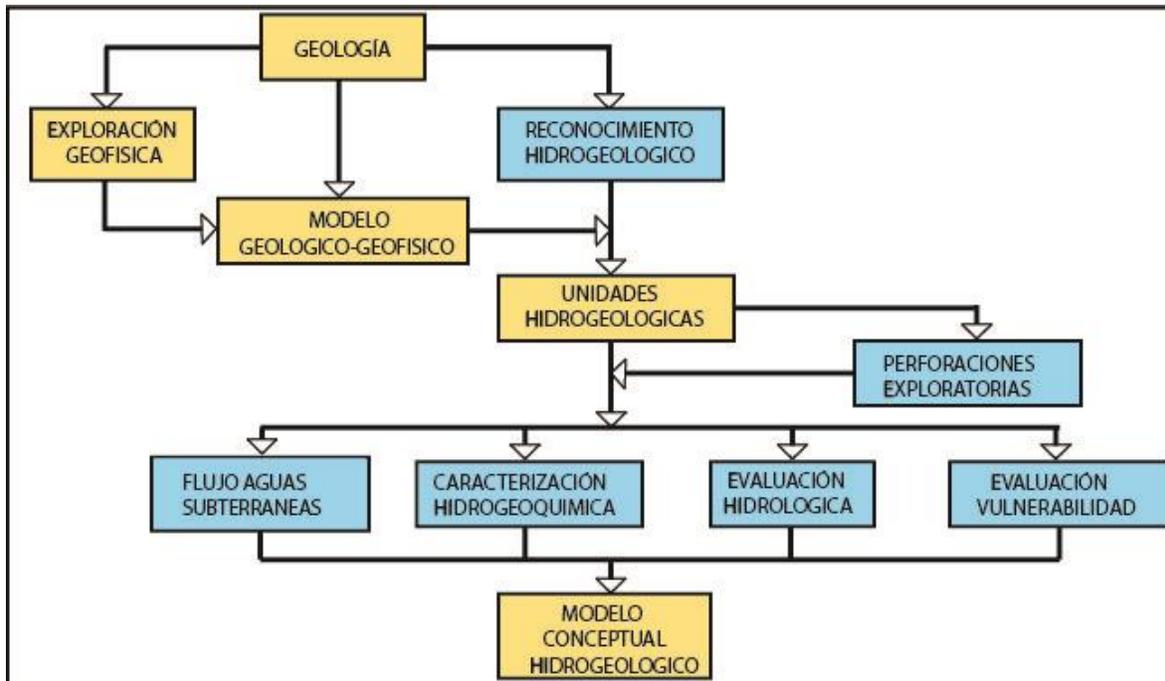


Figura 3: Elementos para la determinación de un modelo conceptual hidrogeológico. Tomado y modificado de INGEOMINAS, 2004.

A continuación se describe cada uno de las fases necesarias para elaborar este modelo hidrogeológico:

Geología:

La geología es la información base para los estudios hidrogeológicos ya que define las propiedades de las rocas y las estructuras geológicas favorables para almacenar aguas subterráneas (INGEOMINAS, 2004).

Exploración geofísica:

La geofísica estudia las propiedades físicas del subsuelo y permite correlacionarlas con la geología, lo cual en el caso de la exploración de aguas subterráneas contribuye a determinar la presencia y la geometría de los acuíferos o zonas acuíferas y la obtención de un modelo conceptual, que a su vez se valida con perforaciones exploratorias. Se debe hacer uso de las metodologías convencionales tales como resistividad, registros geofísicos de pozos (INGEOMINAS, 2004).

La exploración geofísica se utiliza también para:

- Estimación del nivel de la profundidad del agua subterránea.
- Estimación del espesor de la zona no saturada.
- Localización de fracturas.

Reconocimiento hidrogeológico:

El reconocimiento hidrogeológico es la fase esencial e inicial en exploración de aguas subterráneas y comprende las siguientes etapas (INGEOMINAS, 2004):

- Recolección de datos en el campo mediante el inventario de puntos de agua, discriminados en manantiales, pozos y humedales.
- Diseño y desarrollo de la red de monitoreo para confirmar el modelo conceptual.

Los datos obtenidos en esta fase son la base para clasificar y caracterizar las unidades geológicas y así determinar las características hidrogeológicas preliminares del área.

Perforaciones exploratorias:

Las perforaciones exploratorias son necesarias para validar los modelos geológico, geofísico e hidrogeológico obtenidos en las fases de trabajo anterior y para la caracterización de los acuíferos desde el punto de vista hidráulico y químico. La ubicación y diseño de estas perforaciones dependerá de las particularidades hidrogeológicas de cada área (INGEOMINAS, 2004).

Flujo del agua subterránea:

El flujo del aguas subterráneas se refiere al estudio de su movimiento en las rocas y sedimentos, desde las zonas de recarga hacia las de descarga (dirección del flujo subterráneo). Los principales elementos hidrodinámicos son: la presión piezométrica, el gradiente y los parámetros hidráulicos del acuífero (conductividad hidráulica, transmisividad) que caracterizan el flujo y almacenamiento de agua en los diferentes acuíferos (INGEOMINAS, 2004).

Los parámetros hidráulicos se determinan a partir de ensayos de acuífero (pruebas de bombeo).

Evaluación hidrológica:

Las aguas atmosféricas, superficiales y subterráneas hacen parte del mismo ciclo hidrológico y se encuentran constantemente en interacción. Además, la principal fuente de alimentación de las aguas subterráneas son las aguas meteóricas. Por lo anterior, es de gran importancia la evaluación de las condiciones meteorológicas e hidrológicas, para contribuir al modelo hidrogeológico con la siguiente información (INGEOMINAS, 2004):

- Posibles fuentes y zonas de recarga y descarga de aguas subterráneas.
- Disponibilidad del agua para la recarga (balance hídrico superficial).

Evaluación de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación:

La vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación por el método G (Grado de confinamiento). O (Ocurrencia del sustrato). D (Distancia al nivel de agua), depende de las características litológicas de la zona no saturada, del tipo de acuífero, de la profundidad del nivel

del agua para el acuífero libre o de la profundidad del techo del acuífero confinado. La vulnerabilidad debe ser revisada periódicamente ya que algunas de las variables involucradas son temporales (INGEOMINAS, 2004).

Balance Hídrico de Suelos

El concepto de balance hídrico es el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado.

Existen gran variedad de métodos para determinar el balance hídrico de las aguas subterráneas, en este estudio se utilizara el método de Schosinky (2006), en el cual se logra determinar la cantidad de agua que recarga los acuíferos, mediante un balance de suelos.

El método consiste en que conocida la infiltración se puede realizar un balance de suelos para estimar el agua que queda libre para recargar el acuífero

El estudio del balance de suelos se basa en el principio de la conservación de la materia. O sea, el agua que entra a un suelo, es igual al agua que se almacena en el suelo, más el agua que sale de él.

Las entradas corresponden a infiltraciones, las salidas a evapotranspiración más las descargas de acuíferos.

Inicialmente es necesario conocer la cantidad de precipitación, y determinar si esta se queda en el follaje o algún porcentaje puede infiltrar.

Posteriormente, se realizan pruebas de infiltración que junto al mapa de pendientes y el mapa de uso de suelo, nos ayudaran a determinar la precipitación que infiltra, así como la humedad al inicio y final del mes.

Luego conociendo el porcentaje de luz solar, y la temperatura media mensual, se obtiene la evapotranspiración potencial, esto mediante la fórmula de Hagreaves y Samani (1985).

Propiamente en el área de estudio, se obtienen los datos de capacidad de campo y punto de marchitez, así como densidad del suelo y las profundidades de las raíces, con estos datos y el valor de la evapotranspiración potencial, se obtendrá el valor de evapotranspiración real.

El valor de evapotranspiración real, lo aplicamos en la siguiente formula **$R_p = P_i + H_{Si} - H_{Sf} - ETR$**

donde:

R_p = Recarga potencial mensual en mm/mes.

P_i = Precipitación que infiltra en mm/mes.

H_{Si} = Humedad del suelo al inicio del mes en mm.

H_{Sf} = Humedad del suelo al final del mes en mm.

ETR = Evapotranspiración real en mm/mes.

Lo cual nos dará como resultado, la recarga potencial al acuífero, en el sitio de interés.

Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos

El conocer las condiciones hidrogeológicas en un sitio, permite determinar el grado de vulnerabilidad que presenta al estar expuesto a factores antrópicos que en cierto grado le pueden perjudicar.

La vulnerabilidad es intrínseca de acuerdo a las características hidrogeológicas del terreno y específica si se tienen en cuenta otros factores como la climatología o el propio contaminante en sí (Díaz & Yory., 2008).

Según (Foster et al., 2002) la definición de vulnerabilidad corresponde con la característica intrínseca de la zona no saturada, que determinan la susceptibilidad de ser afectado el acuífero por una carga contaminante aplicada en la superficie (Foster, 1987 en Foster, 2002).

La vulnerabilidad a la contaminación está en función de (Foster et al, 2002):

- Accesibilidad a la penetración de contaminante en la zona saturada desde un sentido hidráulico.
- Capacidad de atenuación de la zona no saturada resultantes de la retención o reacción físico-química de los contaminantes.

En nuestro país se recomienda el uso de los siguientes métodos de vulnerabilidad, según las condiciones hidrogeológicas del medio y de la información existente en la zona: Drastic, Sintacs, Epik, GOD, BGR.

Para el caso de la presente investigación la vulnerabilidad se obtendrá mediante el método GOD.

METODO GOD (Foster et al., 2002):

Considera dos factores Básicos:

- El grado de inaccesibilidad hidráulica de la zona saturada.
- Capacidad de atenuación de la zona no saturada.

Basados en esas consideraciones, el índice G.O.D. caracteriza la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero en función de los siguientes parámetros (ver figura 4):

- **G**rado de confinamiento del acuífero.
- **O**currencia del sustrato suprayacente (Características litológicas y grado de consolidación).
- **D**istancia al agua determinada. (Profundidad nivel de agua en acuífero confinado y profundidad al techo del acuífero en acuífero libre).

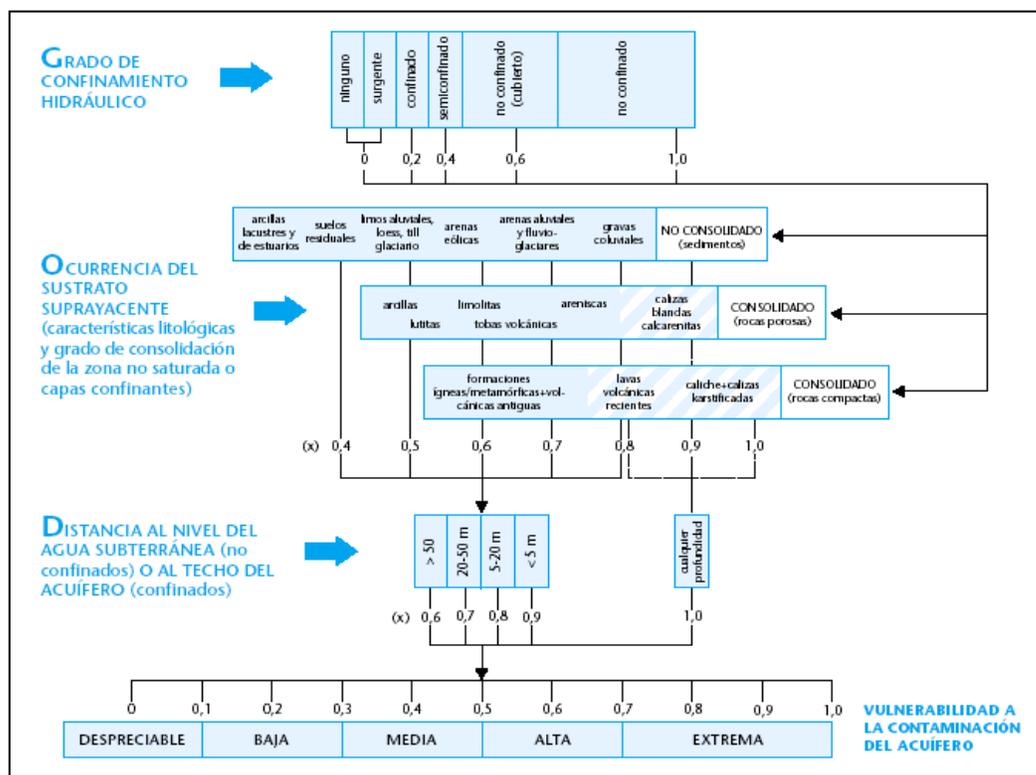


Figura 4: Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos. Tomado de Foster et al. (2002).

Para la obtención del índice de vulnerabilidad del sitio, se realiza la multiplicación de los valores correspondientes para los parámetros, como se indica a continuación $iV_{GOD} = G * D * O$, el resultado obtenido indicara el tipo de vulnerabilidad del área en estudio.

1.7 Actividades

Para el cumplimiento de los objetivos planteados, se realizaron de las siguientes actividades, algunas se ejecutaron en conjunto con los funcionarios del SENARA:

- Recopilación de información en bases de datos, trabajos de investigaciones en geología, hidrogeología, etc., que se encuentren en las distintas instituciones como la Escuela Centroamericana de Geología (ECG), el SENARA, entre otras.
- Se obtuvo información climatológica a partir de estaciones meteorológicas presentes o cercanas al lugar de estudio.
- Se corrobora la información geológica de la zona de interés por medio de giras de campo, confirmando la geología de trabajos anteriores.
- Revisión de la información generada con los piezómetros exploratorios.
- Se elaboró un registro con las diferentes mediciones de la profundidad del nivel freático del agua subterránea para cada uno de los pozos definidos en la red de monitoreo.

- Se elaboró perfiles geológicos e hidrogeológicos con base en la información que se encuentra en el archivo nacional de pozos y nacientes del SENARA, y los piezómetros construidos.
- Se obtuvo la dirección del flujo de las aguas subterráneas y generar el mapa correspondiente, cuando la cantidad de información lo permita.
- Se determinó las características hidráulicas de los tipos de suelo presentes en el área de estudio, las cuales son: Contenido de humedad, peso unitario, gravedad específica, análisis granulométrico, límites de Atterberg, porosidad y clasificación geotécnica de suelos utilizando la norma ASTM; además se determinará densidad aparente, capacidad de campo y punto de marchitez. Los resultados se utilizarán para obtener parámetros necesarios para la metodología de balance hídrico de suelos propuesto por Schosinsky (2006).
- Se realizó un inventario de pozos y manantiales para el área de estudio, con el fin de estimar el caudal total de descarga en el área de estudio.
- Se obtuvo el volumen de recarga en el área de estudio.
- Se definió los parámetros hidráulicos de los acuíferos presentes.
- Se elaboró un mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de los acuíferos del área en estudio a partir del método GOD.

1.8 Metodología:

- Búsqueda y selección de información correspondiente a geología, hidrogeología, tanto de estudios presentes en el SENARA así como en la ECG, con la finalidad de conocer los antecedentes presentes en la zona de interés.
- Solicitud de información meteorológica de las estaciones presentes y cercanas al sitio de estudio, la información a solicitar corresponde a: temperatura máxima, mínima, media, precipitación, días de lluvia, horas sol. Dicha información será analizada para obtener la evapotranspiración del área, la cual será utilizada posteriormente en el balance hídrico de suelos.
- Realización de giras de campo para corroborar la información geológica del área interés y determinar si el mapa geológico regional del sitio presenta alguna variación con respecto a lo observado en campo.
- Medición de niveles estáticos mediante una red de monitoreo, con lo cual se genera una base de datos que permite observar las variaciones del nivel a lo largo del tiempo, así como determinar las profundidades del nivel para cada unidad acuífera.
- Solicitar, revisar y analizar, la información hidrogeológica presente en los registros de pozos presentes en la base nacional de pozos y nacientes del SENARA que se ubiquen en el área de estudio, así como de los piezómetros construidos, con la finalidad de conocer litologías y niveles, permitiendo una mejor comprensión de la hidrogeología de la zona.
- Tomas de muestras de suelo para su posterior análisis en el laboratorio de geotecnia de la UCR y el laboratorio de suelos de la Ciudad de la investigación, con el objetivo de obtener parámetros como: capacidad de campo, punto de marchitez, contenido de humedad, porosidad, clasificación límites de atterberg, para posteriormente ser utilizados en la determinación del balance hídrico del suelos.

- Giras de campo para localizar, ubicar los pozos perforados y excavados que no se encuentren en la base de datos del SENARA, para incorporar a la red de monitoreo que se define para el sitio.
- Estudiar las pruebas de bombeo realizadas a los pozos que se encuentren dentro del área de estudio, cuya información se encuentre en la base nacional de pozos y nacientes del SENARA, para definir los parámetros hidráulicos que presentan cada uno de los diferentes acuíferos presentes en la cuenca.
- Revisar las pruebas de infiltración realizadas en la zona de estudio para determinar un promedio por unidad litológica para posteriormente ser utilizadas en el balance hídrico de suelos.

CAPITULO 2: MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLOGICO

2.1 MARCO GEOLOGICO

2.1.1 Geología Regional

El área de estudio está comprendida dentro de la cuenca sedimentaria Sámara-Cabo Blanco, la cual corresponde a una cuenca de antearco (Astorga, 1987), su basamento corresponde con el Complejo de Nicoya y una cobertura sedimentaria generada como consecuencia de la actividad volcánica del arco de Islas ancestral (Galli, 1979).

Complejo de Nicoya

Fue definida por Dengo (1962a), quien incluye varias litologías como pedernales, calizas silíceas, basaltos, aglomerados, diabasas, gabros y dioritas, posteriormente Kuijpers (1980) redefine al Complejo de Nicoya, preservando la secuencia oceánica (basaltos, gabros, diabasas y radiolaritas) y excluye la cobertura sedimentaria.

Denyer & Arias (1993), subdividen las rocas ígneas del Complejo de Nicoya en una unidad de basaltos que conserva el nombre original de Complejo de Nicoya y otra unidad intrusiva, formada por gabros, microgabros y doleritas denominada Intrusito Potrero.

Los basaltos y los intrusivos, representan las dos unidades dominantes del Complejo de Nicoya.

A CONTINUACION SE DESCRIBE LAS DIFERENTES UNIDADES LITOLOGIAS QUE CONFORMAN EL COMPLEJO DE NICOYA:

Basaltos

Representan el basamento local y regional, corresponden fundamentalmente a parte de la Unidad Matapalo y la unidad Esperanza (Kuijpers, 1979-1980).

Presentan una coloración verde a gris oscuro, granulometría fina, afíricos, la composición mineralógica es la siguiente: plagioclasa, augita, clorita, óxidos de hierro y titanio, englobados en una matriz afanítica. En algunas situaciones se encuentran vetillas de calcedonia, ceolitas, ópalo, y en algunas ocasiones calcita (Aguilar et. al., 2014).

Radiolaritas

Rocas pelágicas, de granulometría fina, estratificación milimétrica a centimétrica, duras, se encuentran en las siguientes coloraciones: rojo, verde, amarillo, blanco, gris hasta negro, con presencia de meteorización de Fe-Mn (Aguilar et. al., 2014).

Sobreyace disconformemente la Unidad Basaltos, pero es intruida por gabros y diabasas de la unidad Potrero, la intrusión ha alterado esta unidad por lo cual es difícil determinar su espesor (Aguilar et. al., 2014).

Intrusivo Potrero

Compuesta por gabros, diabasas, doleritas y en menor proporción de plagiogranitos.

Los gabros presentan una coloración oscura, textura porfirítica, con abundancia de minerales máficos. (Burgois et al., 1984).

A nivel microscópico su textura es holocristalina hipidiomórfica- intergranular a ligeramente subofítica con presencia de plagioclasa, augita y algunos opacos (Denyer & Arias, 1993).

La doleritas se presenta como diques, los cuales presentan como característica un aumento en el diámetro de los cristales, el aumento se presenta de las paredes al centro. (Denyer & Arias, 1993).

Los plagiogranitos se presentan como intrusivos de coloración blanquizca, con textura holocristalina, con abundancia de minerales de cuarzo y feldespatos en menor proporción maficos (Denyer & Arias, 1993).

COBERTURA SEDIMENTARIA

Inicialmente Dengo (1962), indica que las rocas sedimentarias que sobreyacen el complejo de Nicoya se dividen en:

1. Serie Campaniano-Eoceno Medio: Posee fuerte plegamiento.
2. Serie Mioceno- (Plioceno?): Posee un plegamiento suave.

Kuijpers (1979), integra en la serie Campaniano-Eoceno Medio, las formaciones Sabana Grande, Rivas y las Palmas, que corresponden a rocas depositadas en aguas profundas, incluye calcilitas, radiolaritas, lutitas, calcarenitas, areniscas y conglomerados, las cuales tienen como origen corrientes de turbidez y flujos de gravedad.

La serie Mioceno, incluye las formaciones Punta Carballo, Montezuma y parte de Barra Honda, cuyas litologías corresponden a arrecifes (Kuijpers, 1979).

Baumgartner (1987), define una clasificación relacionados con los niveles estructurales de la región, así define que la península de Santa Elena y el Norte de la península de Nicoya están formados por conglomerados basales y por facies carbonatadas neríticas someras sobrepuestas. El resto de la Península de Nicoya corresponde a conglomerados mal redondeados, lutitas silíceas y calizas pelágicas.

Baumgartner et al. (1984), clasifica la cobertura sedimentaria, basados en criterios genéticos y stratigráficos:

1. Súper grupo Garza: Depósitos de cuenca Oceánica y zonas de Talud. Cretácico al Terciario. Se clasifica en:

- A. Formación Brecha Puerto Carrillo.
 - B. Grupo Sabana Grande.
 - C. Grupo Samara.
2. Súper grupo Mal País: Abarca litologías carbonatadas y silicoclásticas. Entre las formaciones encontramos: Formación Punta Carballo y Formación Montezuma.

Astorga (1987), realizó un estudio de las secuencias de edad Cretácica- Paleógeno de la cuenca sedimentaria Samara-Cabo Blanco. Basados en el sistema deposicional profundo, clasifico las series sedimentarias en cinco tipos:

1. Tipo Puerto Carrillo: Brechas de escarpes submarinos profundos e insulares.
2. Tipo Sabana Grande: Sedimentación pelágica.
3. Tipo Curú: Sedimentación turbidítica que refleja una paulatina madurez de la corteza que compone el arco de islas volcánico.
4. Tipo Descartes: Sedimentación clástica andesítica y carbonatada de la serie Rivas-Tempisque.
5. Tipo Arío: Sedimentación de grano fino y composición carbonatada,

Regionalmente para el área de interés, se determina la existencia de las siguientes unidades litológicas.

Formación Sabana Grande

Compuesta por sedimentos finos, intercalado por areniscas turbidíticas y pelitas tobáceas, del Cretácico inferior al Campaniano inferior y del Campiano medio al Maastrichtiano (Astorga, 1988).

Es dividido en 3 unidades de depositación pelágicos, dos unidades basales silíceas y la superior carbonatada (Astorga, 1988).

Flores, (2003), redefine la composición de esta formación indicando que está compuesta por: lutitas silíceas, calcilutitas parcialmente silicificadas, intercalación de areniscas medias y finas ligeramente calcáreas.

Según Aguilar et al. (2014), está formado por tres tipos de litología: Lutitas calcáreas, lutitas silíceas, areniscas finas calcáreas.

Formación Piedras Blancas

Flores et al. (2003), indica que la formación piedras Blancas está compuesta por calcilutitas rojizas, blancuzcas con intercalaciones de areniscas medias a finas rojas y grises carbonatadas, ligeramente silíceas.

Flores (2003) y Flores et al. (2003), mencionan que las rocas que se definen dentro de esta formación, fueron anteriormente asociadas a la Formación Rivas (Dengo, 1962), a la unidad Cuajiniquil (Protti, 1981), la Formación Caliza Pelágica Golfito (Baumgartner et al., 1984) y al Miembro Lutita Calcárea Punta Blanca de la Formación Sabana Grande (Astorga, 1987).

Aguilar et al. (2014), define que esta formación está conformada por sedimentos hemipelágicos que presentan globotruncanas del Cretácico Superior, esta unidad evidencian una sedimentación carbonatada hemipelágica que ocurrió durante el Campaniano Superior terminal hasta el Maastrichtiano Inferior basal.

Formación Curú

Fue denominada por Astorga (1987), corresponde con una secuencia de origen turbidítico, depositada durante el Maastrichtiano al Paleoceno Inferior.

Astorga (1987), indica que esta unidad está conformada por una mezcla de arena y lodo en proporciones variables y algo de gravas. Presenta cinco tipos de facies:

1. Flujos turbulentos lodo-arenosos
2. Flujos turbulentos arenosos.
3. Turbidíticos retrabajados.
4. Flujos turbulentos gravosos.
5. Flujos de escombros.

Astorga (1987), menciona espesores promedios de 600 a 800 m. Flores (2003), asignan un espesor máximo de 800 m.

Se formó por grandes volúmenes de sedimento terrígeno que se depositó por gravedad e ingreso a la cuenca a través de varios puntos, a partir de los cuales es dispersado en forma longitudinal (Astorga, 1987).

Sobreyace discordantemente a las formaciones Loma Chumico, Nambí y Piedras Blancas. Los contactos son erosivos y tectónicos (Aguilar et. al., 2014).

Formación Arío

Astorga (1987), describe que la formación está conformada por turbiditas de grano fino e intercalaciones de sedimentos pelágicos, así como mezcla de lodos micríticos y terrígenos intercalados con arenas detríticas silicoclásticas.

Esta formación se formó a consecuencia de depósitos de turbiditas de grano fino e intercalaciones de sedimentos pelágicos depositados por asentamiento pelágico en un ambiente de planos de cuenca, cuando disminuye el aporte turbidítico. (Astorga, 1987)

Formación Montezuma

Dengo (1962), le asigna rango de formación, indica que está conformada de conglomerados y areniscas en la parte inferior, pasando gradualmente a limolitas y areniscas finas de color gris azulado y pardo claro.

Mora (1985), indica que esta formación se caracteriza por areniscas calcáreas, finas, oscuras, macizas, con fragmentos de moluscos, micromoluscos y escasos microforaminíferos bentónicos.

Chinchilla (1989), menciona dos ambientes de sedimentación diferente, uno marino asociado a depósitos de bahía y otro de origen continental asociado a depósitos de abanico aluvial.

Formación Cóbano

Para esta formación (Aguilar et. al., 2014), realiza su caracterización, misma que se resume continuación:

Sedimentos de origen continental que afloran cercanos del poblado de Cóbano, asociados a depósitos de abanicos aluviales, los cuales están conformados por conglomerados, con clastos volcánicos del Complejo de Nicoya, pedernales rojos y amarillos, en una matriz arenosa o arcillosa de colores rojizos.

La formación es el resultado de la denudación de las rocas del Complejo de Nicoya, durante el final del Plioceno e inicios del Pleistoceno.

Debido a un fuerte proceso de erosión, posterior al levantamiento de la región, se favoreció la depositación de materiales gruesos, la alteración y denudación de las rocas preexistentes del Complejo de Nicoya y de la cobertura sedimentaria del Paleógeno.

La distribución de las diferentes unidades geológicas presentes en la cuenca del río Arío se observa en la figura 5 y la relación estratigráfica de las diferentes unidades se observa en la figura 6.

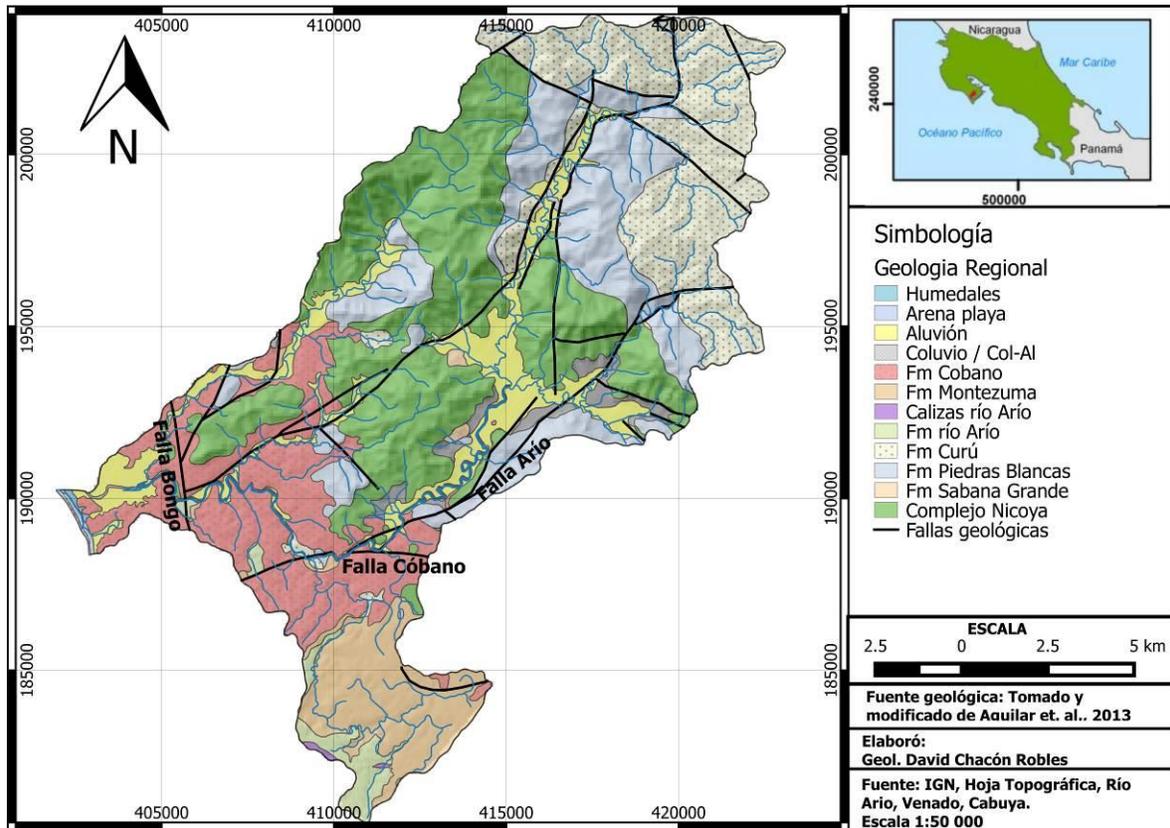
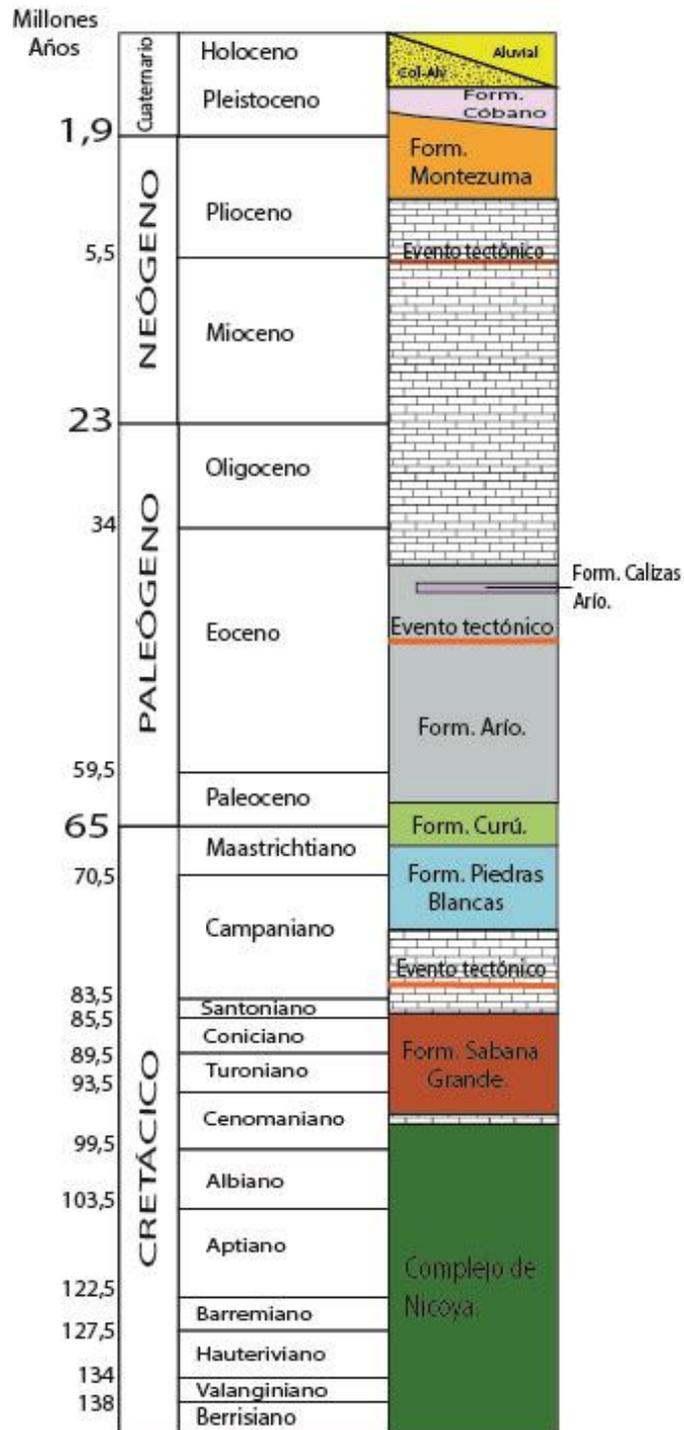


Figura 5: Mapa geológico regional cuenca Río Ario. Fuente: Aguilar et. al., 2011.

Figura 6: Columna estratigráfica Cuenca río Arío.



Fuente: Modificado de Aguilar et. al., 2011.

2.1.2 Tectónica

Según (Aguilar et. al., 2014), para la zona de interés se determina la presencia de fallas de componente lateral.

La falla Bongo de componente dextral, tiene un rumbo entre NNW a NNE, se divide en dos ramales hasta la falla Cedro.

El ramal W, se localiza a lo largo del valle superior y medio del río Bongo, se interpreta que define el *pull-apart* Bongo.

El ramal E se localiza a lo largo del valle del río Frío. La unión de ambos ramales se unen al W del cerro Villalta, desviando 800 m a la derecha en el río Arío.

La falla Arío, presenta movimiento sinistral, inicia al E de la falla Bongo, posee rumbo NE cortando las estribaciones NW de la fila Pando, donde se observa sillas de falla, escarpes, contraescarpes, así como quebradas desviadas.

Se presenta además parte de la falla Cóbano, la cual es de componente sinistral, posee rumbo E-W, dentro de la cuenca de estudio se une con la falla Arío.

2.1.3 Geología local

La realización de la geología local se basa en las observaciones de afloramientos en campo, así como en las diferentes descripciones realizadas a los núcleos de perforación.

Las diferentes unidades litológicas observadas de la cuenca de interés se indican a continuación:

Complejo de Nicoya:

Esta unidad se encuentra distribuida en gran parte de la zona de estudio, los afloramientos se presentan masivos (ver fotografía 1), la roca presenta textura afanítica, presencia de minerales de plagioclasas y máficos, coloración gris en superficie sana, las rocas meteorizadas presentan una coloración parda rojiza a gris claro.



Fotografía 1: Afloramiento Complejo de Nicoya (Coord. Izq. 413929 E, 196274 N / Der. 411703 E, 194679 N m).

Presentan fracturas de tamaño centimétrico, las mismas se encuentran rellenas, en algunos sectores presenta alteración hidrotermal.

La descripción de los núcleos de perforación se indica a continuación:

Macroscópicamente corresponde a basaltos, basaltos andesíticos, las cuales presenta vetas de cuarzo y xeolitas milimétricas hasta centimétricas, fracturas no rellenas, presentan una coloración gris azulado, textura afanítica porfirítica.

Para la clasificación microscópica, se realizó secciones delgadas en diversos sectores del núcleo de perforación, las diversas secciones presenta una descripción muy similar a la que se indica a continuación:

La textura es holocristalina, porfirítica, hipidiomórfica en algunos casos xenomórfica, con presencia de plagioclasa en un 40%, augita en un 35%, magnetita en un 25%, se determina la presencia de calcita como mineral secundario, así como algunas vetas de cuarzo, se clasifica como un leucogabro.

Esta unidad fue posible ubicarse en las perforaciones piezométricas: PSA-5, PSA-6, PSA-1, PSA-12, PSA-17, PSA-10, PSA-11, PSA-14, PSA-2 y PSA-3.

Al encontrarse en 9 de los 17 piezómetros perforados, se corrobora que presenta una gran distribución en la zona de estudio, encontrándose principalmente en las zonas altas de la cuenca de interés.

Formación Piedras Blancas

Se presenta principalmente en las zonas altas de la cuenca en estudio.

Se determina como unas lutitas calcáreas, de color beige a blancas, reacción al HCL, fractura concoide, en algunos sectores se presenta muy meteorizada, fracturas rellenas de calcita, textura muy fina asociada a lutitas, en superficie se observa pátinas.

Se observa en el sector del Balso, así como el camino que va del Balso a pueblo de Once Estrellas.

Se perforo en el piezómetro PSA-14, en la cual se le describe como lutitas calcáreas de color cremas.

En algunos afloramientos se observa muy meteorizada, fallada, alterada, en otros se encuentra sana y masiva (ver fotografía 2), en ambos casos muestra la coloración blanca característica.



Fotografía 2: Afloramiento Formación Peñas Blancas. (Izq. 409520 E, 190605 N / der. 416348 E, 198591 N).

Formación Curú:

Según los afloramientos en los que se pudo observar se presenta muy meteorizada, coloración grisácea a café, con presencia de patina de manganeso, alterado, en algunos puntos se observa, masiva, en otros estratificada, con estratos centimétricos a métricos, con secuencia de arena fina media a lutitas, además se encuentran plegados, formando incluso anticlinales (ver fotografía 3).

Se observan afloramientos en cortes de carretera, con alturas de 10 m.



Fotografía 3: Afloramientos Formación Curú (Coord. 422730 E / 196750 N).

Además, se observan afloramientos donde se presenta como una vulcanerita, matriz grisácea, con presencia de muchas plagioclasas, textura arenosa, por las características que posee se presenta como una andesita, en algunas muestras se observan dentro de la matriz clastos centimétricos de otros materiales entre ellos tobas.

Se observaron varios pliegues asociados a esta formación, asimismo, en algunos estratos se midieron los siguientes buzamientos: S30W/30 (Coord. 409819 E/ 185848), N60E/30 (Coord. 414034 E/ 200375 N), N70E/35 (Coord. 413296 E/ 199356N).

Se ubicó en los piezómetros, PSA-2, PSA-3 en los cuales se describe como una secuencia de estratos descimétricos a métricos de areniscas de grano medio a fino alternada con estratos centimétricos a decimétricos de lutitas.

Formación río Arío:

En afloramiento se presentan con coloración verdosa, deleznable, textura muy fina, asociado a limos lodos, se observó afloramiento de máximo 4 m de espesor, muy fracturado y fallado (ver fotografía 4), estratos decimétricos, con presencia de pátinas de manganeso cuando se encuentra meteorizada.

Así mismo se observó dos pozos excavados, con profundidades de 25 m, donde se logró ubicar el material.

Se perforó en el piezómetro PSA-16, se localizó a una profundidad de 7 m, donde se describe como depósitos de lutitas arcillosas, intercalado con arenisca café claro, lutitas café y lutitas café grisáceas.



Fotografía 4: Afloramiento form. río Arío (Izq. 410379 E, 181759 N / Der. 410476 E, 180737 N).

Formación Calizas Arío:

En afloramiento se presenta, con una coloración gris cremoso, con textura arenosa, presenta meteorización por posible desilusión, presencia de fósiles milimétrico a centimétricos, entre ellos bivalvos y erizos (ver fotografía 5).

El afloramiento se observa blocoso, sin embargo se mide pseubuzamientos de S15E/25 y S20E/30.



Fotografía 5: Afloramiento formación Calizas Arío (Coord. 409364 E / 182867 N).

La fotografía de la derecha corresponde a ostras, además se puede observar la presencia de corales incrustados dentro de la roca (Denyer, com. Pers., 2016).

Unidad de Montezuma

Se perforó en los piezómetros PSA-18 y PSA-19, donde se describe que presenta una matriz de coloración café y azul griseo, con presencia de estratos centimétricos de material fino (lutitas lodosas) y estratos delgados de material de granulometría media, en algunos casos se observa presencia de gravas en matriz arcillosa, así como, fragmentos de madera, conchas, caracoles, bivalvos en una matriz arcillosa.

De características calcáreas, con presencia de ripples en las arenas, poco consolidados, alterados.

Se ubica principalmente en el sector SE de la cuenca de estudio, en el sector del poblado de Río Negro.

En campo se logró observar un pozo recién excavado, el material extraído presenta una coloración grisácea, muy deleznable, textura arenosa (ver fotografía 6).



Fotografía 6: Pozo excavado donde se observó la formación Montezuma (coord. 409851 E / 184440 N).

Formación Cóbano

Se encuentra distribuida principalmente en la parte baja de la cuenca del río Arío, en el sector de Caño seco, bajos de Arío, y San Jorge.

En campo se observa la presencia de una material arcilloso de coloración muy rojiza, la cual es una característica para su reconocimiento, dentro de este material se encuentran englobados bloques sub angulares de material ígneo y sedimentario (principalmente de la formación Piedras Blancas), los tamaños de los bloques van desde milimétricos a centimétricos, los espesores en campo son de hasta 2,5 m (ver fotografía 7).

Se ubicó en las perforaciones PSA-13, PSA-14 y PSA-17, en las cuales se describe como cantos de material ígneo y sedimentario englobados en una matriz arcillosa.



Fotografía 7: Afloramiento Formación Cóbano (Izq. 409458 E, 194982 N / der.411403 E, 187888 N).

Unidad Coluvio-Aluvial

Se presenta en diversos puntos de la cuenca en estudio, en la mayoría de casos se observa presencia de bloques centimétricos a métricos de material del Complejo de Nicoya (ver fotografía 8), aunque en algunos sitios se logró observar además bloques de la formación Piedras Blancas.

Los bloques observados se encuentran dentro de una matriz de coloración gris, los mismos se presentan angulares a sub angulares.



Fotografía 8: Afloramiento Unidad Coluvio-Aluvial (Coord. 419057 E/ 192688N).

Unidad Aluvión

Se presenta principalmente en las zonas bajas de la cuenca, en las cercanías del cauce principal del río Arío.

Como característica principal, se observan cantos sanos y meteorizados de lava, y otros materiales sedimentarios, los cuales se presentan redondeados a sub angulares, de tamaños milimétricos a centimétricos, englobados en una matriz de arena.

Además, en algunos sectores se observa una capa de arcilla con espesores de hasta un metro que sobreyace la unidad aluvión (ver fotografía 9).

Según las perforaciones y la geofísica realizada, presenta espesores de hasta 50 m para la zona de estudio.

Las muestras de suelo para esta unidad la clasifican con limos, aunque se debe dejar claro que las muestras se tomaron en puntos donde posiblemente existe una capa de este material, la cual no es constante para toda la extensión de la unidad.

Se encontró en los piezómetros PSA-8, PSA-9, PSA-1, PSA-12, PSA-15 y PSA-16.



Fotografía 9: Afloramiento unidad Aluvión (izq. 416786 E, 199942 N).

Mapa afloramientos

Con la búsqueda realizada en campo y el levantamiento de los diferentes afloramientos, se genera el mapa de afloramientos de la zona de estudio, misma que se observa en la figura 7.

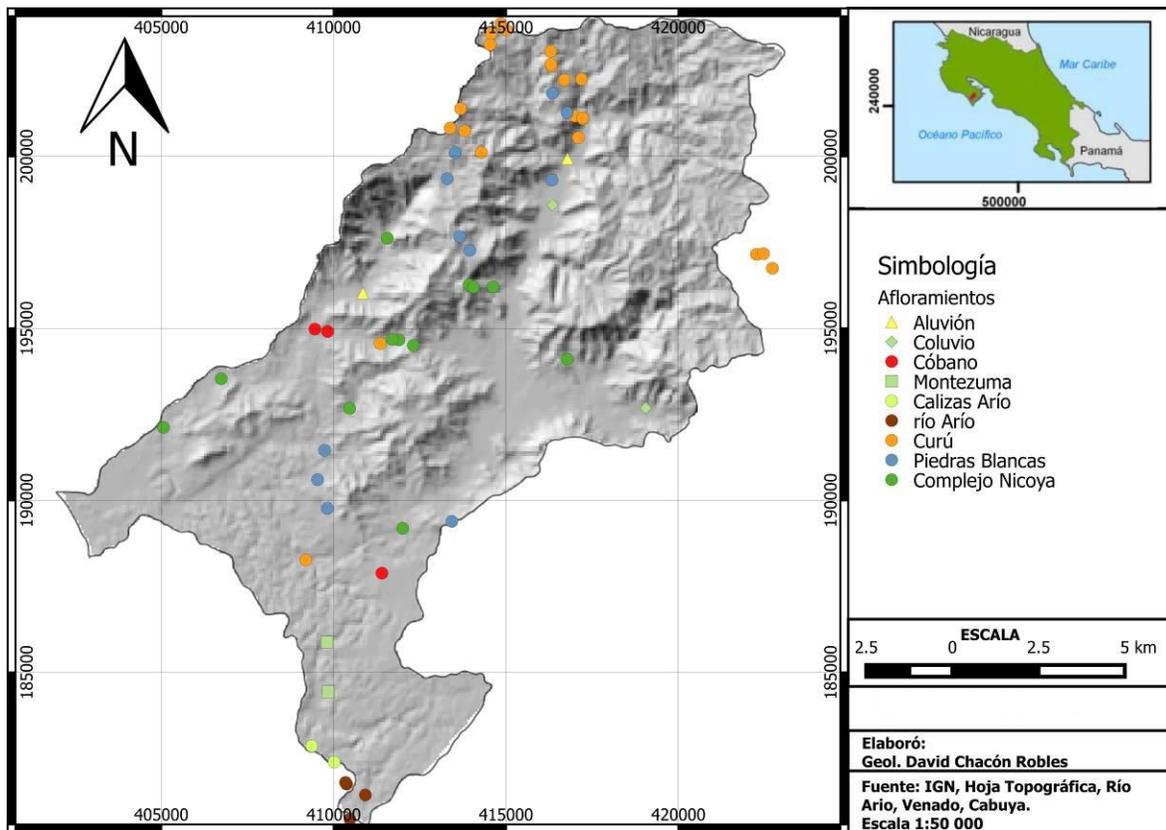


Figura 7: Mapa afloramientos cuenca del río Arío.

Mapa geología local

Con la información obtenida en campo se corrobora las diferentes unidades geológicas presentes en el mapa de geología regional, aunque se observa pequeñas modificaciones en la litología, ya que algunos afloramientos levantados contrastan con lo indicado en el mapa regional, por lo cual se genera el mapa geológico para la zona de estudio (Ver figura 8).

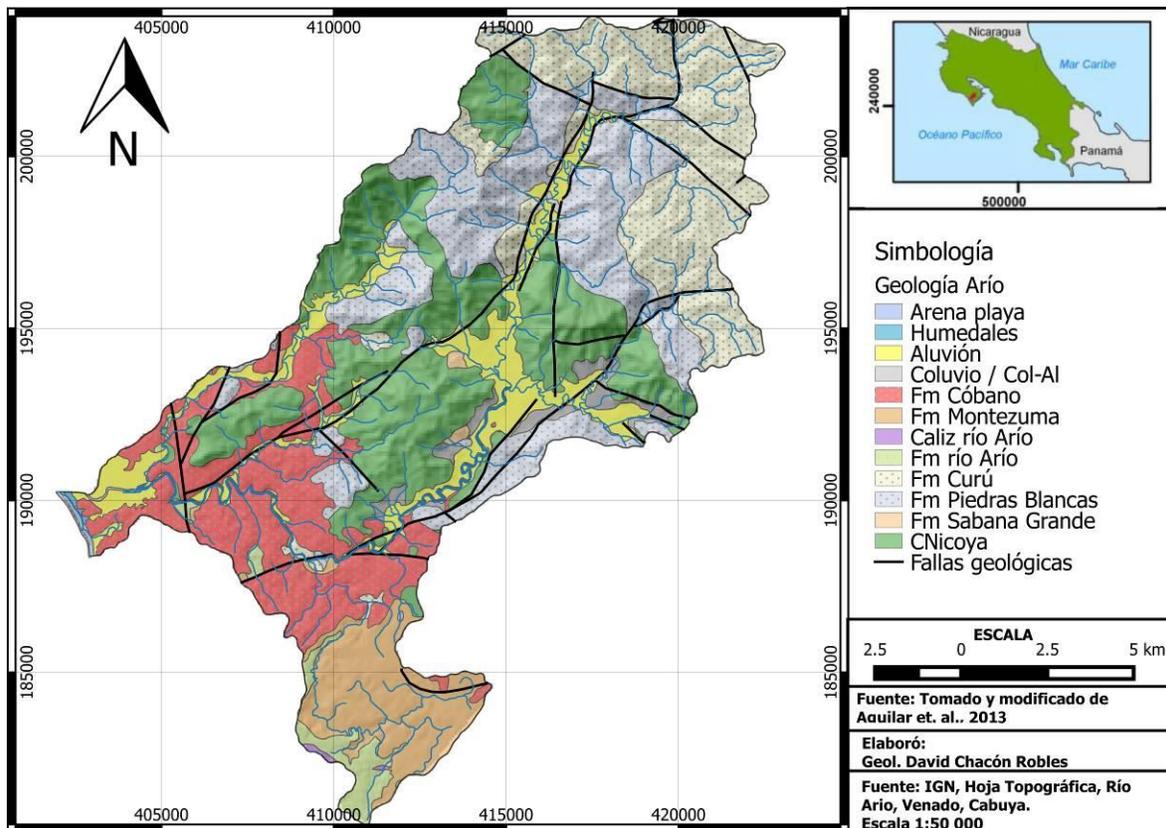


Figura 8: Mapa geológico local Cuenca río Ario. Fuente: tomado y modificado de Aguilar et. al., 2013.

2.1.4 Información pozos y piezómetros

Como parte del conocimiento de las características hidrogeológicas de la cuenca en estudio, se realiza levantamiento de los diferentes elementos hidrogeológicos presentes en la zona de interés.

Bajo esta premisa, se realizó una búsqueda en la base nacional de pozos y nacientes del SENARA de todos los pozos perforados presentes en la cuenca del río Ario, además se realiza giras de campo para realizar un levantamiento de pozos excavados.

La información de pozos presentes en base de datos, el levantamiento de campo y los piezómetros perforados por el SENARA, permitirán conocer de una forma más clara la geología presente en la zona de interés, así como características hidrogeológicas de la cuenca.

Los resultados del levantamiento e investigación de las fuentes hídricas se indican a continuación:

Pozos Excavados:

Como parte de conocer la hidrogeología de la cuenca en estudio, se definieron giras con el fin de buscar y ubicar pozos excavados.

Los resultados obtenidos son un total de 23 pozos, a cada pozo se le asignó un código y se hizo levantamiento de las coordenadas, cuando las condiciones los permitían se realizó la medición de nivel, los resultados obtenidos se indican en el cuadro 1.

Con la información de las coordenadas de los pozos y el mapa geológico de la zona, se hizo una proyección utilizando el programa Qgis, lo que permite conocer la información de la unidad geológica en la que se encuentran ubicados, mismas que fueron corroboradas en campo.

Cuadro 1: Pozos excavados levantados en campo.

Codigo Pozo	Latitud Y	Longitud X	Formación	Profundidad (m)	N.E.
Exc_Arío-1	188044	412668	Cóbano	8	NI
Exc_Arío-2	192232	417806	Aluvión	6,55	2,65
Exc_Arío-3	193525	415483	Aluvión	NI	NI
Exc_Arío-4	193900	415089	Aluvión	NI	0,45
Exc_Arío-5	194266	415107	Aluvión	NI	0,67
Exc_Arío-6	195904	415305	Aluvión	4,35	1,85
Exc_Arío-7	198591	416348	Aluvión	6,04	2,43
Exc_Arío-8	198007	416433	Aluvión	3	NI
Exc_Arío-9	197924	416432	Aluvión	9	0,07
Exc_Arío-10	194537	415141	Aluvión	7,44	2,83
Exc_Arío-11	192644	415657	Aluvión	6	NI
Exc_Arío-12	192659	414851	Aluvión	NI	NI
Exc_Arío-13	189448	410211	C.N.	12,69	10,55
Exc_Arío-14	181983	412045	Montezuma	7,49	5,2
Exc_Arío-15	185645	410428	Montezuma	NI	NI
Exc_Arío-16	189300	402808	Aluvión	6	3
Exc_Arío-17	190807	403670	Aluvión	9	6
Exc_Arío-18	191016	404509	Aluvión	NI	NI
Exc_Arío-19	193463	406307	Aluvión	NI	NI
Exc_Arío-20	194853	408989	Aluvión	NI	NI
Exc_Arío-21	203548	414668	Curú	NI	NI
Exc_Arío-22	192969	417130	Aluvión	9	NI
Exc_Arío-23	192953	417123	Aluvión	5	NI

Fuente: levantamiento de campo.

La mayoría de los pozos se encuentran en material sedimentario, principalmente en la unidad aluvial, además algunos se encuentran en la formación Montezuma y Cóbano.

Los pozos ubicados en la unidad aluvial, mayormente se encuentran ubicados en las cercanías al cauce principal del río Arío.

Las profundidades y los niveles estáticos medidos son muy someros, para el caso del aluvión los niveles freáticos se presentan alrededor a los 5 m.

Entre los usos principales se encuentran: domésticos, agrícolas y algunos se encuentran abandonados.

Es difícil la determinación de un caudal de extracción, por lo cual se asigna a cada uno de los diferentes pozos un caudal teórico de 0,05 l/s.

Pozos perforados:

Como parte del levantamiento de las fuentes hídricas presentes en la cuenca de interés, se realizó la búsqueda en la base nacional de pozos y nacientes del SENARA, de todos los pozos perforados presentes dentro de la cuenca.

Según la revisión realizada, hay un total de 22 pozos perforados y registrados en la base nacional de pozos y nacientes del SENARA.

A cada uno de los pozos se le documenta: la información de litologías, niveles estáticos, ubicación de las rejillas, caudal de explotación, usos.

Además, con la información de las coordenadas y el mapa geológico, se extrapolan cada uno de los pozos para determinar la unidad geológica donde se encuentran perforados, mismas que se corroboran en campo.

Se compara la información presente en el informe de perforación con la unidad geológica donde se determina que aflora.

La información obtenida para cada uno de los diferentes pozos se indica en el cuadro 2.

Cuadro 2: Pozos en base de datos que se ubican en la cuenca Río Arío. Fuente: Base datos SENARA

Codigo_Pozo	Latitud	Longitud	Prof. Nivel (m)	Rejilla	Caudal	Formación	Uso
CY-69	182760	413249	3	de 12 a 44 m	0,85 l/s	Montezuma	Doméstico-Riego
CY-98	183200	410500	NI	NI	NI	Montezuma	Doméstico-Riego
CY-112	182350	412525	15,22	de 30 a 59 m	0,74 l/s	Montezuma	Doméstico-Riego
CY-128	182275	412700	NI	NI	NI	Montezuma	Doméstico-Riego
CY-140	182614	413178	NI	NI	NI	Montezuma	Doméstico-Riego
RA-25	184850	411050	11,37	de 58 a 64 m	NI	Montezuma	Abast. Publico
RA-35	185300	411650	29,15	de 10 a 58 m	0,4 l/s	Montezuma	Turístico
RA-59	184500	411500	NI	NI	NI	Montezuma	Abast. Publico
RA-69	190100	403850	5	NI	11 l/s	Aluvión	Doméstico-Riego
RA-80	186300	410200	9,25	de 18 a 24 m	2 l/s	Montezuma	Abast. Publico
RA-86	193530	420295	40	de 40 a 90 m	0,5 l/s	Piedras Blancas	Doméstico
RA-94	193407	415565	4	de 6 a 30 m	15 l/s	Aluvión	Riego
RA-95	193390	415465	3	de 6 a 30 m	11 l/s	Aluvión	Riego
RA-115	184700	413525	15	de 50 a 80 m	1 l/s	Montezuma	Doméstico-Riego
RA-122	184662	413739	24	de 27 a 63 m	0,7 l/s	Montezuma	Doméstico-Riego
RA-135	190180	404111	0,7	de 2 a 14 m	1,1 l/s	Aluvión	Doméstico-Riego
RA-148	190300	413220	11	de 11 a 20 m	7 l/s	Aluvión	Abast. Publico
RA-149	190230	413520	11	de 14 a 23 m	8 l/s	Aluvión	Abast. Publico
RA-172	186700	408300	20	de 30 a 60 m	0,5 l/s	Cóbano	Doméstico-Riego
RA-178	194150	421622	58	de 60 a 82 m	1,5 l/s	Curú	Doméstico
RA-180	192148	415480	19,5	de 12 a 36 m	1,1 l/s	Col-Aluv	Doméstico
RA-195	184779	411279	15	de 42 a 60 m	NI	Montezuma	Doméstico-Riego

La información completa de los pozos presente en la base de datos se indica en el anexo 1.

Del cuadro anterior se extrae, que la mayoría de los pozos se encuentran asociados a material sedimentario, principalmente la formación Montezuma y la unidad aluvial, geográficamente se ubican al norte, cerca del poblado de Río Negro y en las cercanías al cauce principal del río Arío.

Una característica importante de notar corresponde a los caudales de explotación, los pozos perforados en los aluviones presentan caudales de explotación muy altos, van de los 7 l/s (R-148) hasta los 15 l/s (RA-94), caso contrario a los pozos presentes en la formación Montezuma, los cuales presentan caudales de explotación bajos, van desde los 0,7 l/s (RA-122) hasta los 2 l/s (RA-80)

Referente a los usos, estos son variados, del total de pozos, 11 se utilizan para riego y uso doméstico, 5 para abastecimiento público (estos pozos se encuentran en los bajos de Arío, asociado a material aluvial), para uso doméstico 3, 2 para riego y 1 para uso turístico.

Algunos pozos presentan una mayor profundidad del nivel, esto puede ser influenciado por el hecho de que se perforaron en las zonas altas de la cuenca, captando un nivel asociado a la Formación Curú y Piedras Blancas.

Para el caso de los pozos que captan el acuífero presente en el aluvión, las profundidades máximas del nivel freático corresponden a 11 m, los pozos que captan el acuífero presente en la formación Montezuma, presentan niveles freáticos máximos de 29 m, estos valores de profundidad fueron

los reportados en los informes de perforación, en las mediciones de nivel realizadas se determina profundidades alrededor de los 5 m para la unidad aluvión y 20 m para la formación Montezuma.

Nacientes:

En conjunto a las giras realizadas para el levantamiento de los pozos excavados, se realizó el levantamiento de nacientes presentes en la cuenca de interés, obteniéndose como resultado, la ubicación de un total de 13 nacientes.

Del total de nacientes ubicadas, se determinó que 3 son utilizadas para abastecimiento de casas, y las restantes 10 aportan su caudal hacia las quebradas y ríos.

La ubicación de las nacientes se da principalmente en la zona de Río Negro, así como en zonas de altas de la cuenca Arío.

Con la información de las coordenadas de las diferentes nacientes y la información del mapa geológico, se realizó una proyección utilizando el programa Qgis, lo que permite extraer la información de la unidad geológica en la que se encuentran ubicadas.

La información para cada una de las nacientes ubicadas en la cuenca del Río Arío, se indican en el anexo 2.

Piezómetros de exploración:

Como parte de la investigación que se realiza en la cuenca del río Arío, el SENARA por medio del PROGIRH, ejecuto el proyecto de perforación exploratoria del sub-suelo y armado de piezómetros para la investigación del acuífero presente en la cuenca del río Arío, Puntarenas.

Para la realización de dicho proyecto, se realizó la licitación pública nacional No 2011-LN-000008-OC, la cual consistía en la perforación de un total de 18 piezómetros de exploración, con profundidades que varían entre los 50, 100 y 150 m de profundidad.

La perforación de los piezómetros ayuda a caracterizar de una forma más clara las condiciones geológicas e hidrogeológicas presentes en la zona de estudio.

Los puntos seleccionados para la realización de los piezómetros se basa principalmente a:

- Buena distribución en la cuenca, que permita una mejor caracterización de las diferentes unidades geológicas.
- Facilidad de acceso.

Cuando las condiciones lo permiten, a los piezómetros perforados, se realizó: descripción de la columna litológica, pruebas geofísicas, medición de niveles, porcentaje de recuperación y pruebas de lugeon para determinar la conductividad hidráulica, así como análisis petrográfico, los diversos resultados obtenidos se indican en el cuadro 3.

Cada uno de los piezómetros fue entubado con tubería PVC SCH-80 de 2 pulgadas de diámetro y rejillas ranurada Slot 40 de 2" de diámetro, lo cual permitiera la medición de los niveles a futuro.

Cuadro 3: Piezómetros perforados por SENARA en la cuenca Arío. Fuente: SENARA.

Codigo_Piez	Latitud	Longitud	Prof. (m)	Prof. NE (m)	Rejilla	Análisis petrográfico	% Recup.	RQD	Prueb. hidráulicas	Pruebas geofísicas	Formación
PSA-1	194228	415096	100	2,8	de 37 a 76 m	Basalto					Aluvión/ CN
PSA-2	203609	415172	150	3,8	de 84 a 144 m	Leucogabro	75%	50%		0-97 m--> 20 Ohm-m 97-130 m--> 40 Ohm-m 130 - 150 m--> 10 Ohm-m	Curú
PSA-3	198324	421404	100	3,5	de 50 a 92 m		60%	35%		10 Ohm-m	Curú
PSA-5	197832	416411	50	20	de 26 a 44 m	26,75 m y 50 m: Leucogabro 35,75 m: Basalto	0-20,65 m --> 90 % 20,65-50 m --> 40%	entre 6% y 31%	No se realizo	No se realizo	Aluvión/ CN
PSA-6	195854	415436	50	3,6	de 23 a 44 m	6,25 m y 24,85 m Leucogabro 49,25 m Basalto.	90%	90%	No se realizo	No se realizo	Aluvión / CN
PSA-7	194666	411896	100	6,3	de 43 a 76 m						C.N.
PSA-8	192984	417145	50	2,5	de 8m a 11 m, de 17 a 26 m, de 38 a 50 m	No se realizo	entre 0 a 70 %	No se realizo	No se realizo	No se realizo	Aluvión
PSA-9	192821	415161	50	3,5	de 23 a 44 m	No se realizo	entre 0 y 50 %	No se realizo	No se realizo	No se realizo	Aluvión
PSA-10	192918	410588	50	2,35	de 23 a 44 m			21,60- 50m - 75 %		21,60-50 m--> superior a 100 Ohm-m	Aluvión/ C.N.
PSA-11	190256	413520	50	5,35	de 23 a 44 m	Leucogabro	95%	75%		Superior a los 200 Ohm-m	Aluvión/ CN
PSA-12	194770	408970	50	6,5	de 11 a 17 m, de 29 a 44 m						Aluvión / CN
PSA-13	190573	405695	100	7,5	de 52 a 94 m	42,50 m, 62 m, 75,50 m,98 m Leucogabro	0-20 m --> 50 % 20-60 m --> 90%	0-20 m --> de 0 a 50 % 20-60 m --> 50 a 90%	entre 1,3 e-8 m/s y 9,8 e-8 m/s	0-20 m --> no se realizo 20-60 m --> 70-100 ohm- m	Cóbano / CN
PSA-14	190162	409514	100	24	de 52 a 94 m	11 m-->Roca calcarea 45 m--> Andsita-Bas. 56 m --> andesita 92 m--> Leucogabro	95%	50%	No se realizo	Superior a los 200 Ohm-m	Cóbano/ Pied Blancas/ CN
PSA-15	190590	403881	50	7,5	de 11 a 29 m	No se realizo	entre 0 y 50 %	entre 0 y 50 %	No se realizo	No se realizo	Aluvión/ Fm. Arío
PSA-16	189726	403556	50	2,8	de 23 a 44 m	No se realizo	entre 50 y 100 %	entre 0 y 50 %	No se realizo	5 Ohm-m	Aluvión/ Fm. Arío
PSA-17	188087	410870	100	2,8	de 28 a 43 m, de 73 a 94 m	Leucogabro					Cóbano/ CN
PSA-18	185462	410714	50	3,95	de 47 a 50 m	No se realizo	95%	15,50-50m 70%		35.50 m--> 30 Ohm-m	Fm Mont/ Fm Arío
PSA-19	183844	413578	50	6,2	de 23 a 44 m	No se realizo	entre 50-90%	entre 0 y 80%	1,82 e-8 m/s	10 Ohm-m	Fm Mont/ Fm Arío

Como se observa del cuadro anterior, los piezómetros presentan niveles estáticos someros, con profundidades que varían entre los 2 y 8 m, únicamente el PSA-14 posee nivel estático con una profundidad de 24 m.

Se infiere que en algunos piezómetros los niveles medidos posiblemente sean un aporte de diferentes capas, ya que en algunos casos las rejillas captan dos unidades geológicas diferentes.

Los piezómetros PSA-8 y PSA-9, los cuales presentan profundidades de 50 m, perforan en su totalidad la unidad Aluvial, obteniéndose niveles freáticos de 2,5 m y 3,5 m respectivamente, corroborando que esta unidad presenta niveles someros.

Para el caso del piezómetro PSA-3, el cual presenta una profundidad de 100 m, en su totalidad perfora la Formación Curú con profundidad del nivel estático de 3,5 m.

El piezómetro 7 (PSA-7), el cual presenta una profundidad de 100 m y perfora en su totalidad el Complejo de Nicoya, se indica el nivel a los 6,3 m.

En 11 de las 19 perforaciones realizadas se localizó el basamento rocoso, correspondiente al Complejo de Nicoya, los análisis petrográficos realizados clasifican la roca principalmente como leucogabros, algunas descripciones la clasifican como andesitas o basaltos, esto debido a la profundidad donde se realizó la sección delgada.

Por la presencia de fracturas en las lavas o material sedimentario muy blandos, los cuales pueden colapsar o lavar, no se pudo realizar pruebas de conductividad hidráulica en la mayoría de los piezómetros, únicamente se pudo realizar pruebas a los piezómetros PSA-13 y PSA-19, asociados al complejo de Nicoya y a la formación Montezuma respectivamente, obteniéndose permeabilidades muy bajas, en el rango de los 1,3 m/s y 1,8 m/s.

Todas las perforaciones presentan altos porcentajes de recuperación y RQD, los sondeos geofísicos indican resistividades superiores a los 100 ohm-m para las lavas del Complejo de Nicoya y resistividades menores a los 50 ohm-m para las unidades sedimentarias.

La información completa de los diversos piezómetros perforados se indica en el anexo 3.

Fuentes Hídricas

Con la totalidad de la información de pozos, nacientes y piezómetros, se genera el mapa de fuentes hídricas presentes en la cuenca de interés, mismas se indican en la (ver figura 9), con lo cual se comprende mejor la distribución de los mismos en la zona de interés.

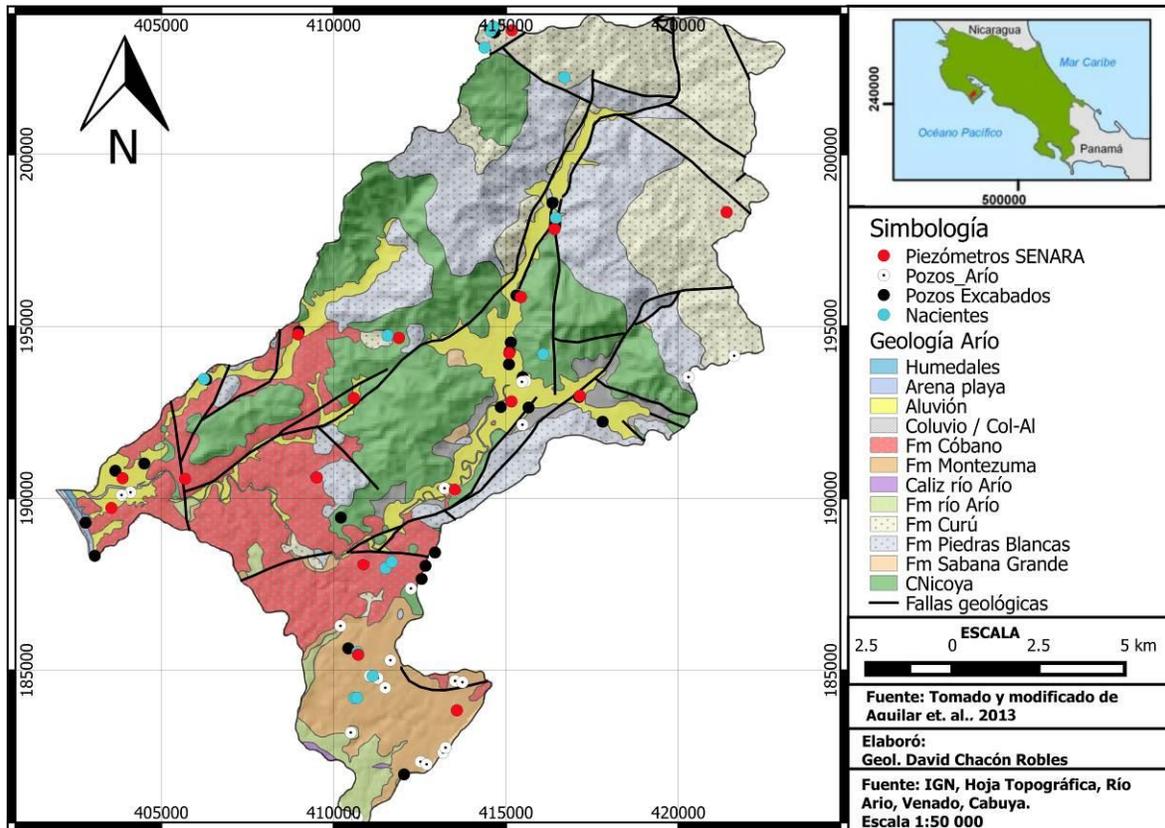


Figura 9: Fuentes Hídricas Cuenca río Arío.

Como se observa, la mayoría de las fuentes hídricas se asocian principalmente a la unidad aluvional como en la formación Montezuma, principalmente Bajos de Arío (SW), el sector de Caño Negro (S), San Ramón y Bijagua (parte central), así como en las cercanías de los ríos principales, río Arío y río Caño Negro.

2.1.5 Exploración geofísica

Para conocer mejor las condiciones geológicas presentes en la zona de estudio, se realizó estudio geofísico bajo la contratación directa 2012CDS-000065-PRI del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA).

La empresa adjudicada del contrato corresponde a Hidrotierra consultores ambientales SRL, misma quien realizó 21 sondeo eléctricos verticales (SEV's), en siete sitios previamente escogidos por personal de la Unidad de Hidrogeología del AyA y de la Unidad de Investigación del SENARA, la ubicación de los sondeos se pueden observar en la figura 10.

El método geofísico empleado corresponde a sondeos eléctricos verticales de Schlumberger, la cual utiliza 4 electrodos colineales en superficie; los 2 exteriores, conectados a una fuente de poder, son los electrodos de corriente, en tanto que los interiores se denominan electrodos de potencial.

Para la interpretación de los datos, se utilizó el programa RESIXP, el equipo usado corresponde a un resistivímetro marca Tigre de la Compañía inglesa Allied Associates.

La interpretación para cada uno de los sondeos realizados por la empresa consultora, se basa únicamente en los pozos perforados cercanos, ya que los piezómetros perforados por SENARA son posteriores a la fecha de ejecución, de igual forma los sondeos 4,6 y 7 presentados por hidroterra, no presentan pozos cercanos, por lo cual no hay información para interpretación.

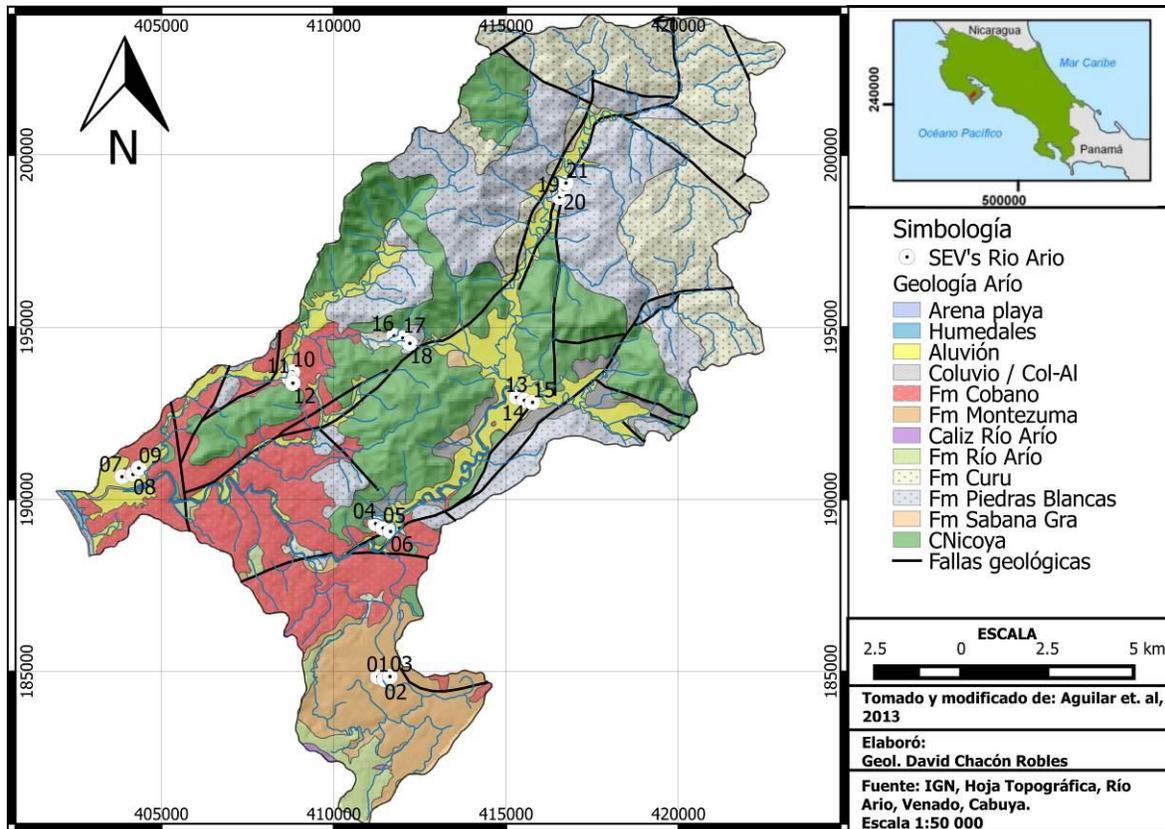


Figura 10: Ubicación SEV's Cuenca río Arío.

Los resultados de cada una de los sondeos eléctricos realizados se muestran a continuación:

Perfil geo-eléctrico 1 (Sondeos S-1, S-2 y S-3)

Se ubica a 3.5 km al suroeste del poblado de Cóbano, con una orientación oeste – este y longitud de 400 m (Hidroterra, 2012).

Presenta resistividades que varían de los 15 hasta los 60 Ohm-m, asociado principalmente a litologías correspondientes a Coluvio (15-30 Ohm-m) y a la formación Arío meteorizada (40-60 Ohm-m) (Hidroterra, 2012).

Para la interpretación de los resultados de resistividad se utilizaron los pozos: RA-118, RA-35, RA-80 y RA-195 (Hidroterra, 2012), los cuales indican según su registro, la presencia de material sedimentario, principalmente arcillas y limonitas.

Sin embargo, la perforación de los piezómetros PSA- 19 y PSA-18, los cuales se ubican cerca del sitio donde se realizaron los SEV's, describe la presencia de material fino con presencia de conchas e incluso de madera, lo cual se define la existencia de la formación Montezuma.

Sin embargo, las perforaciones solo poseen 50 m de profundidad, y los sondeos tienen una profundidad mucho mayor, por lo cual se reinterpreta que los primeros 50- 60 m corresponden a la formación Montezuma y a profundidad se encuentre la formación río Arío, ya que en la zona donde se realizó el sondeo afloran estas dos unidades geológicas.

Una vez analizado la información de los piezómetros, el mapa geológico y la re-interpretación de los valores de resistividad obtenidos, los resultados del perfil geo eléctrico 1 se indican en el cuadro 4:

Cuadro 4: Resultados sondeo geofísico 1.

Capas	Ohm-m	Espesor (metros)	Correladón
	15-30	50-60	Form. Montezuma.
	40-60	-	Form. río Arío

Fuente: Modificado de hidroterra, 2012.

Con la información de los pozos, piezómetros y los sondeos geofísicos realizados, y la respectiva correlación realizada, se determina que la formación Montezuma presenta resistividades entre los 15-30 ohm-m, con espesores entre los 50 y 60 m, la formación rio Arío presenta resistividades entre 40 – 60 Ohm-m, no se logra determinar su espesor.

Se infiere por los diferentes métodos realizados, que la unidad Montezuma presenta potencial acuifero.

Perfil geo-eléctrico 2 (Sondeos S-4, S-5 y S-6)

Se ubica a 3.2 km al noroeste del poblado de Cóbano en el sitio conocido como Santa Clemencia - San Jorge. La distancia total del perfil es de 500 m con una dirección noroeste – sureste (Hidroterra, 2012).

Se determinan resistividades entre los 8 y los 300 Ohm-m, asociados a Aluviones (8-30 Ohm-m) y lavas del complejo de Nicoya (80-300 Ohm-m) (Hidroterra, 2012).

Para la correlación e interpretación de la información la empresa Hidrotierra utilizó únicamente el pozo RA-187 (Hidrotierra, 2012), el cual se encuentra alejado del punto donde se realizó los sondeos.

La posterior perforación de los piezómetros PSA-14 y PSA-17, los cuales se encuentran cercanos al sitio donde se desarrollaron los SEV's, permiten realizar una mejor interpretación de los resultados obtenidos.

Los piezómetros perforados, indican la presencia de la formación Cóbano y el Complejo de Nicoya, con lo cual las resistividades que inicialmente Hidrotierra asocio como la unidad aluvial corresponden en realidad a la formación Cóbano.

Con la ayuda de la información del mapa geológico y las descripciones de los piezómetros, la re-interpretación del perfil geo-eléctrico 2, los resultados de la re-interpretación se indica en el cuadro 5.

Cuadro 5: Resultados sondeo geofísico 2.

Capas	Ohm-m	Espesor- (metros)	Correlación
	20-30	27	Formación Cóbano
	80-300	-	Complejo de Nicoya

Fuente: Modificado de hidrotierra, 2012.

Perfil geo-eléctrico 3 (Sondeos S-7, S-8 y S-9)

Se ubica en el sitio conocido como Bajos de Arío, con una orientación suroeste – noreste y con una longitud de 575 m (Hidrotierra, 2012).

Presenta resistividades entre los 4 a 30 Ohm-m, asociado a material coluvio-aluvial (20-30 Ohm-m) y la formación río Ario (8- 9 Ohm-m) (Hidrotierra, 2012).

Para la interpretación y correlación de la información, hidrotierra se basó en la información aportada en los informes de perforación de los pozos RA-134 y RA-135 (Hidrotierra, 2012).

Se compara la información obtenida en el sondeo con los resultados de los piezómetros PSA-16, PSA-15, así como la información del mapa geológico de la zona, el piezómetro 15 se perforó cercano al punto donde se encuentra el sondeo 7, en el piezómetro realizado se determinó 50 m de aluvión, los resultados de espesores obtenidos por la perforación respaldan los obtenidos por la geofísica.

Los piezómetros realizados indican la existencia de la capa de aluvión en la parte superior y la existencia de la formación río Arío en profundidad, formación que se ubicó en el piezómetro PSA-16.

Por tanto, la interpretación de los sondeos geofísico para la zona de interés se indica en el cuadro 6:

Cuadro 6: Resultados sondeo geofísico 3.

Capas	Ohm-m	Espesor-(metros)	Correlación
	20-30	44.1- 64.1	Aluvión
	8-9	-	Form. río Arío

Fuente: Modificado de hidrotterra, 2012.

Según los resultados de las diferentes pruebas realizadas, el espesor de la capa de aluvión encontrado en esta zona es de hasta 64 m y no menos de 44m. El acuífero coincide prácticamente con el espesor indicado, con un aumento de espesor hacia el NW, no es posible determinar por geofísica la ubicación del nivel freático en esta capa (Hidrotterra, 2012), sin embargo los piezómetros realizados indican niveles entre los 4,5 y 6 m.

La formación río Arío, presenta una disminución de hacia el NW, con espesores mayores a los 40 m, subyaciendo la unidad aluvial.

Perfil geo-eléctrico 4 (Sondeos S-10, S-11 y S-12).

Presenta una longitud de 400 m, con una orientación norte – sur, aproximadamente a 3 km al suroeste del poblado de Ángeles (Hidrotterra, 2012).

En la prospección realizada, se determinó resistividades entre los 4 y los 300 Ohm-m, para la interpretación y correlación de los resultados obtenidos, la empresa Hidrotterra no contó con información de pozos cercanos, por lo cual los resultados presentados son meramente interpretativos.

El resultado de la prospección indica que la capa superior presenta resistividades entre los 4 y 20 Ohm-m, la misma se asocia a material aluvial, luego se encuentra una capa con resistividades entre los 80-300 Ohm-m asociada al Complejo de Nicoya.

Para el sitio donde se realizó esta prospección, el SENARA realizo posteriormente dos piezómetros, el PSA-12 y PSA-10, a una distancia no menor a los 1000 m, mismos que se utilizan para la re-interpretación de los resultados obtenidos inicialmente.

En los piezómetros realizados, se obtiene una capa superior de material coluvio-aluvial y una capa a profundidad conformada de lavas, asociada al Complejo de Nicoya.

Con la ayuda de las perforaciones se re-interpreta la información indicada por Hidrotterra, se mantiene la capa superior de material aluvial, además de la formación Cóbano y subyaciendo a esta se presenta material lávico del complejo de Nicoya, misma que puede presentar resistividades altas como las que se obtenidas.

Una vez analizada la información obtenida, y realizada la interpretación con información cercana, el perfil 4 corresponde a como se indica en el cuadro 7.

Cuadro 7: Resultados sondeo geofísico 4.

Capas	Ohm-m	Espesor- (metros)	Correlación
	20-30	50	Unidad Aluvión
	80-300	-	Complejo de Nicoya

Fuente: Modificado de hidrotterra, 2012.

Según las resistividades obtenidas, el nivel saturado se encuentra en la capa que presenta resistividades entre 15-20 Ohm-m (Hidrotterra, 2012), lo cual es concordante con lo que indica el piezómetro PSA-12, el cual se ubica a los 6,2 m.

Perfil geo-eléctrico 5 (Sondeos S-13, S-14 y S-15)

Ubicado a 500 m al sureste del poblado de Esperanza, presenta una longitud de 500 m, con dirección noroeste – sureste. Este perfil se encuentra ubicado en el sitio conocido como Bijagua – Pachanga (Hidrotterra, 2012).

Se obtiene resistividades entre los 5 -30 Ohm-m, asociados a material aluvial y resistividades entre 60-100 Ohm-m, asociados al Complejo de Nicoya, según el grado de meteorización.

Para su interpretación y correlación se utilizó los pozos RA-94, RA-95 y RA-180 (Hidrotterra, 2012), los cuales describen principalmente material sedimentario tipo aluvión.

Posteriormente, se re-evalúa la interpretación realizada utilizando los piezómetros perforados por el SENARA, para este caso el PSA-9, PSA-8 y el PSA-1.

Las descripciones de los piezómetros indican la presencia de material aluvial en la parte superior, como inicialmente determinaron los sondeos, además, el PSA-1 muestra la presencia de material lávico asociado al Complejo de Nicoya, subyaciendo la capa aluvial, con lo cual las altas resistividades se deben asociar al Complejo de Nicoya y no a la formación Arío.

Una vez re-interpretado el perfil geo-eléctrico realizado, los resultados del sondeo 5 se indican en el cuadro 8.

Cuadro 8: Resultados sondeo geofísico 5.

Capas	Ohm-m	Espesor (metros)	Correlación
	5-30	44	Aluvión
	60-100	-	Complejo de Nicoya

Fuente: Modificado de hidrotterra, 2012.

Perfil geo-eléctrico 6 (Sondeos S-16, S-17 y S-18)

Ubicado a 2.5 km al sureste del poblado de Ángeles. Presenta una dirección oeste – este y una longitud de 535 m (Hidrotterra, 2012).

Se obtienen resistividades entre los 15 y los 350 Ohm-m, asociados a lavas del Complejo de Nicoya, para la interpretación y correlación de los resultados obtenidos, la empresa Hidrotterra no contó con información de pozos cercanos, por lo cual los resultados presentados son meramente interpretativos (Hidrotterra, 2012).

El piezómetro PSA-7, fue perforado posteriormente en el mismo sector donde se realizaron los sondeos, la nueva información se utiliza para re-interpretar la geofísica realizada, las descripciones determinan la presencia únicamente de material lávico, lo cual es acorde con la interpretación realizada por Hidrotterra.

Según Hidrotterra (2012), es difícil definir la presencia de un acuífero en este sector, si existiera alguno, el mismo es por permeabilidad secundaria.

Los resultados del sondeos 6, con su interpretación se indican en el cuadro 9.

Cuadro 9: Resultados sondeo geofísico 6.

Capas	Ohm-m	Espesor- (metros)	Correlación
	15-350	65	Complejo de Nicoya

Fuente: Modificado de hidroterra, 2012.

Perfil geo-eléctrico 7 (Sondeos S-19, S-20 y S-21).

Se realizó en el camino Piedades – San Luis. Presenta una orientación norte – sur y longitud aproximada a los 450 m (Hidroterra, 2012).

Presenta resistividades entre los 10 y los 250 Ohm-m, que se asocian a unidad aluvial (10-20 Ohm-m), y lavas del Complejo de Nicoya (5-250 Ohm-m).

Para la interpretación y correlación de los resultados obtenidos, la empresa Hidroterra no contó con información de pozos cercanos, por lo cual los resultados presentados son meramente interpretación (Hidroterra, 2012).

Sin embargo, posteriormente el SENARA realizó un piezómetro cercano a la zona del sondeo, el cual corresponde con el PSA-5, en el que se describe una capa de material aluvial sobreyaciendo al Complejo de Nicoya, lo cual es acorde con la interpretación geofísica presentada por Hidroterra.

En el cuadro 10, se presentan los resultados del sondeo realizado junto con su interpretación.

Cuadro 10: Resultados sondeo geofísico 7.

Capas	Ohm-m	Espesor- (metros)	Correlación
	10-20	9	Unidad Aluvi3n
	5-250	-	Complejo de Nicoya

Fuente: Modificado de hidroterra, 2012.

Se determina un espesor de la unidad aluvi3n de 9 m, el Complejo de Nicoya presenta un espesor de material meteorizado de 13 m, luego se presenta el basamento sano.

En el anexo 4, se presentan las curvas de resistividad para cada sondeo realizado.

2.1.6 Perfiles geológicos

Con la información geológica de la cuenca, la información de los diferentes pozos perforados y la información de los piezómetros, así como la geofísica realizada, se generaron diversos perfiles geológicos en diversos sectores de la cuenca, con la finalidad de conocer mejor las condiciones geológicas presentes.

La ubicación de los perfiles dentro de la cuenca del río Arío se observa en la figura 11, estos perfiles permiten conocer las relaciones estratigráficas, espesores, entre otros, de algunas unidades geológicas presentes en la zona de estudio.

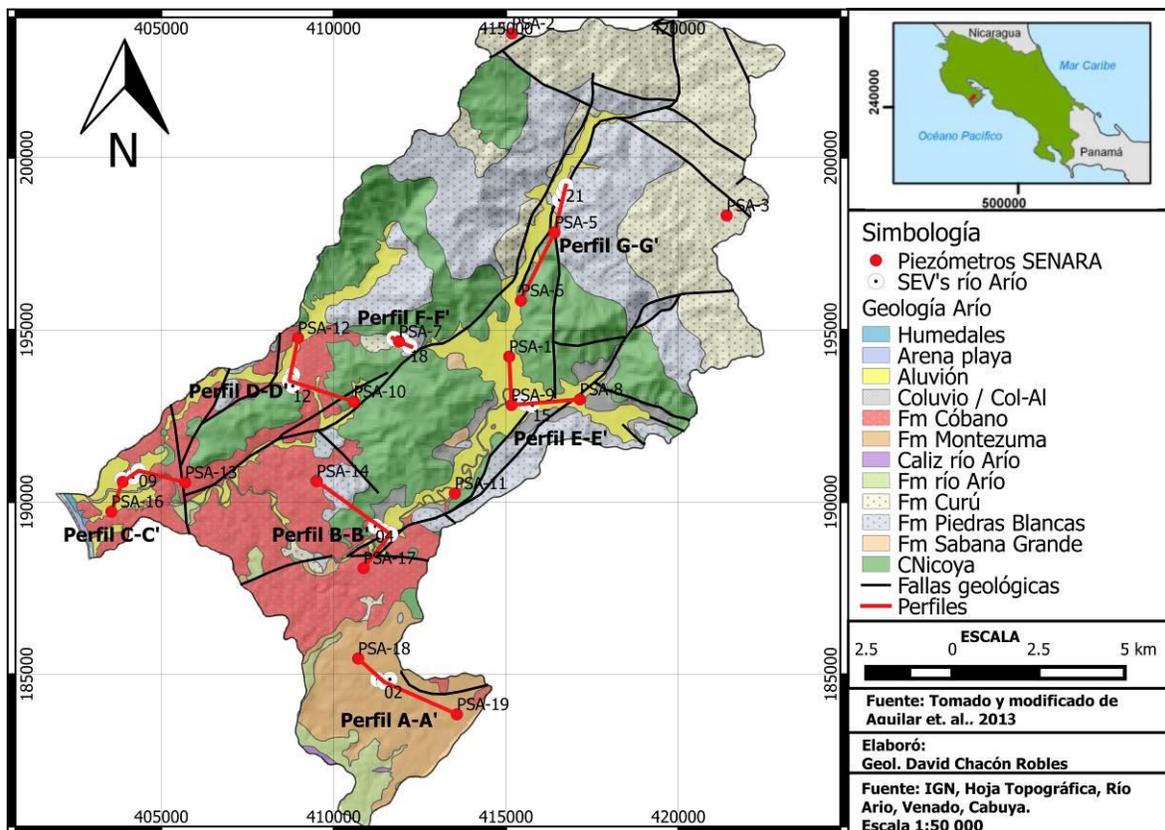


Figura 11: Ubicación perfiles cuenca río Arío.

El perfil A-A' (ver figura 12), el cual se ubica en la parte Norte de la cuenca, muestra que en este sector únicamente se presenta la formación Montezuma, esta unidad presenta espesores de hasta 60 m los cuales se mantienen constantes en la mayor parte del trazo del perfil, subyaciendo a la formación Montezuma se encuentra la formación río Arío de la cual se desconoce el espesor en dicho perfil.

Los perfiles B-B', C-C' y D-D', (figuras 13, 14 y 15, respectivamente), muestran el basamento de la cuenca de interés, correspondiente al Complejo de Nicoya, se determina espesores de hasta 100 m, las áreas de mayor altitud de la cuenca se encuentran conformadas por esta unidad.

Según los perfiles B-B', C-C' y D-D', en las partes bajas se encuentra depósitos de aluvión, con espesores de hasta 50 m, en muchos casos esta unidad está asociada a los ríos principales en la zona, así como algunas quebradas,

Los perfiles muestran que el material aluvial se encuentra sobreyaciendo directamente el Complejo de Nicoya, asimismo se observa gran presencia de la formación Cóbano, la cual puede presentar espesores de hasta 30 m.

Según el perfil B-B', se determina la presencia de la formación Piedras Blancas en las zonas altas, con espesores posiblemente de hasta 50 m, la misma sobreyace al Complejo de Nicoya.

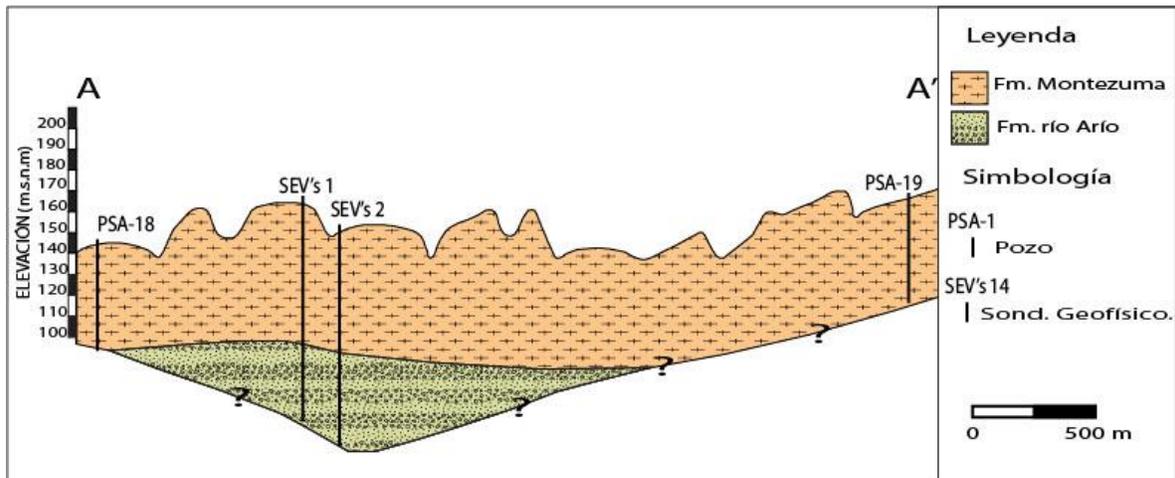


Figura 12: Perfil geológico A-A'.

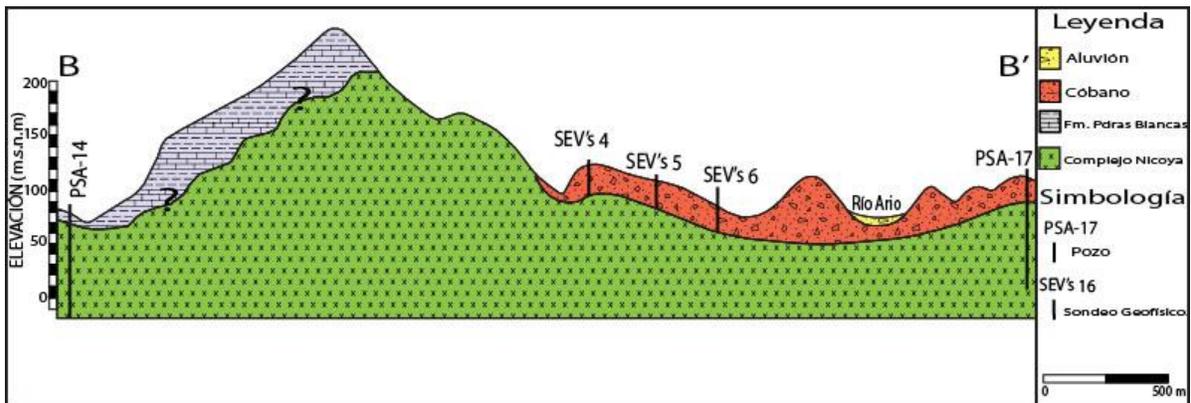


Figura 13: Perfil geológico B-B'.

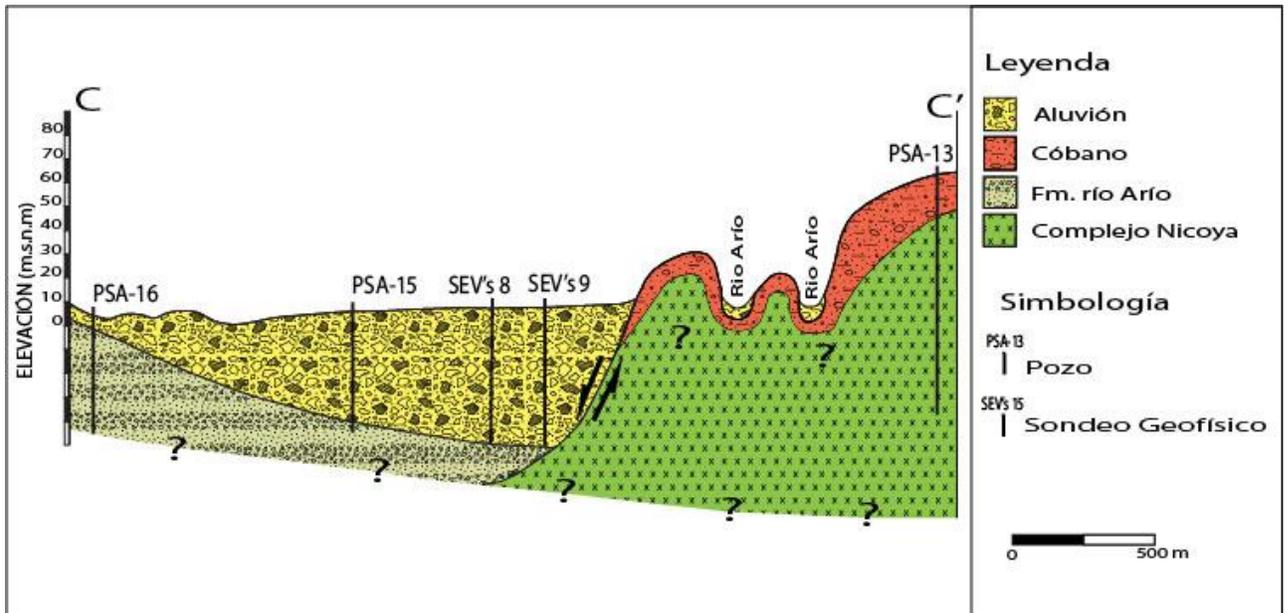


Figura 14: Perfil geológico C-C'.

Como se observa en el perfil C-C', la acumulación del material aluvial se asocia a la presencia de una falla de carácter inverso, la cual se encuentra asociada a la falla Bongo.

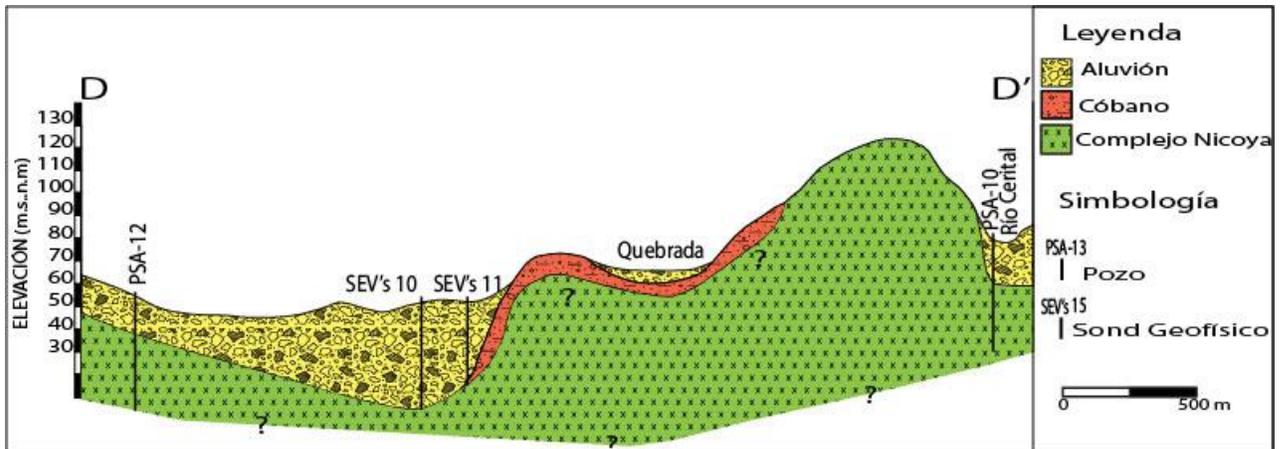


Figura 15: Perfil geológico D-D'.

El perfil geológico E-E' (ver figura 16), muestran espesores de hasta 50 m de la unidad aluvial, la cual sobryace al Complejo de Nicoya, el cual corresponde al basamento de la cuenca, para el sitio del perfil no se puede determinar el espesor del mismo.

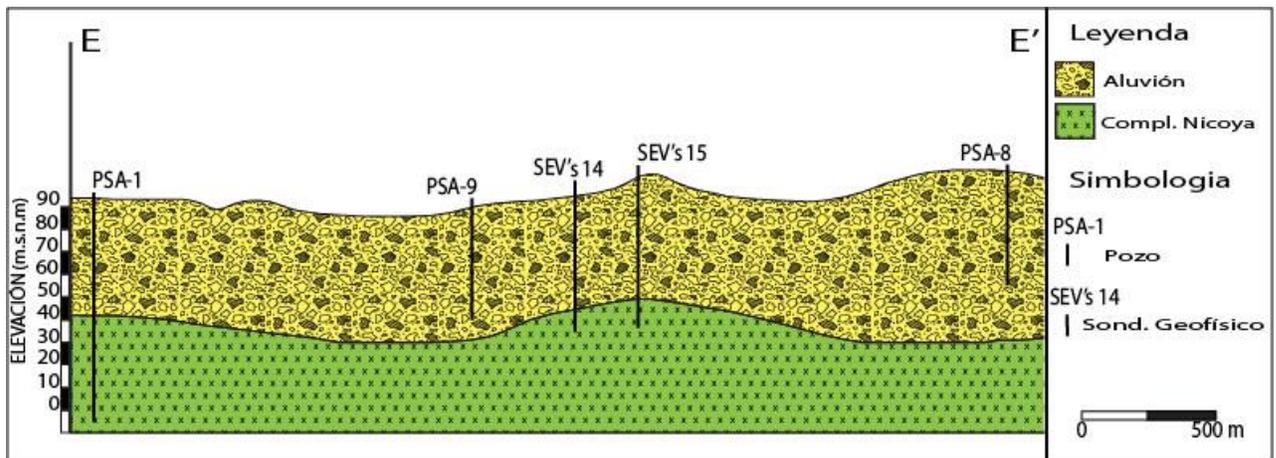


Figura 16: Perfil geológico E-E'.

Los perfiles F-F' y G-G' (figura 17 y 18 respectivamente), muestra la presencia del Complejo de Nicoya en toda la cuenca, principalmente en las zonas más elevadas, se determina espesores de hasta 150 m

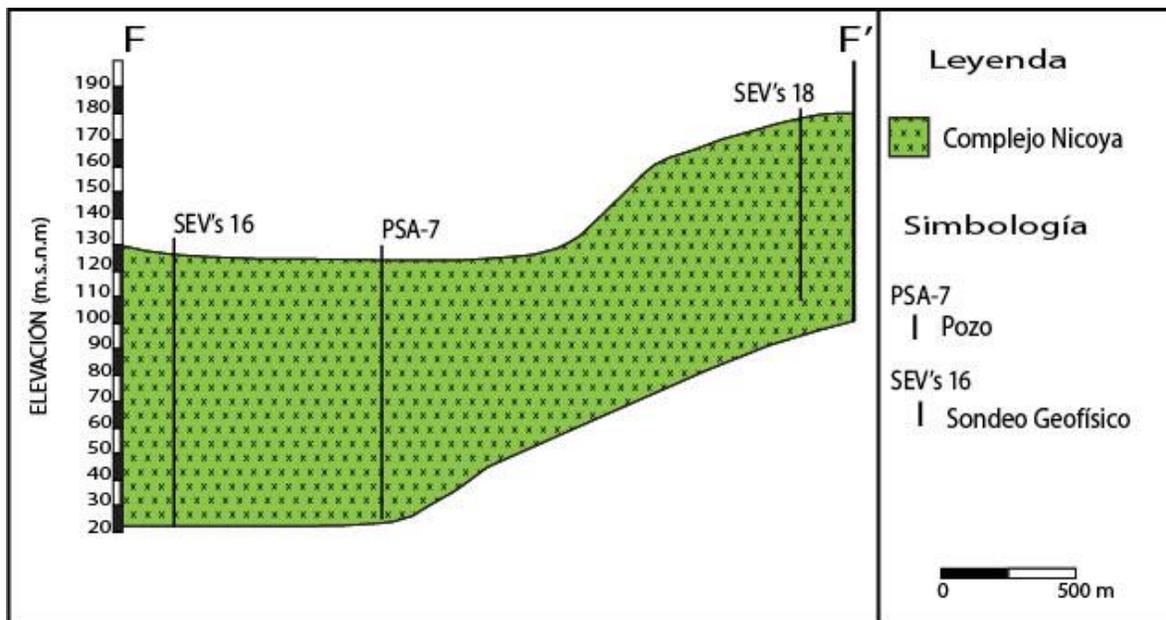


Figura 17: Perfil geológico F-F'.

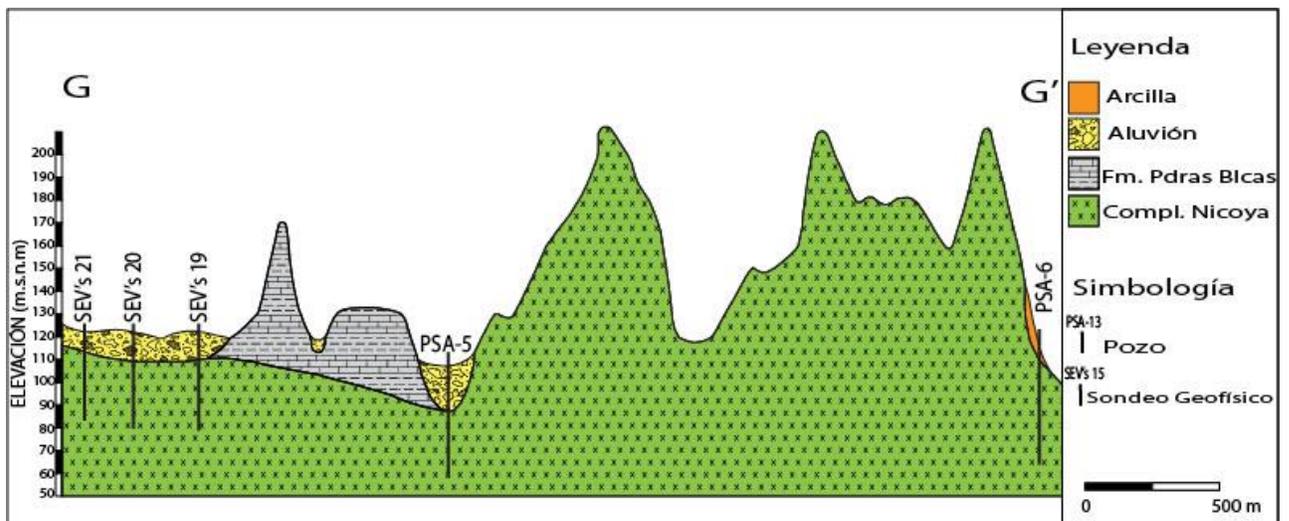


Figura 18: Perfil geológico G-G´.

2.2 CARACTERISTICAS HIDROGEOLOGICAS

2.2.1 Red de monitoreo

Con la información de las diferentes fuentes hídricas presentes en la zona de interés (pozos perforados, pozos excavados y piezómetros), se procedió a definir una red de monitoreo que permitiera conocer a través del tiempo, las variaciones de profundidad del nivel para los pozos seleccionados.

La definición de la red de monitoreo se basó principalmente en las siguientes premisas:

- Distribución en toda la cuenca, que permitiera una buena representatividad litológica de toda la cuenca.
- Acceso en las diferentes épocas del año.
- Combinación de pozos excavados, perforados, así como pozos perforados sin registro.

Basado en lo anterior se seleccionaron un total de 38 pozos, los cuales se midieron en diversos periodos de tiempo, y se realizó un registro de los resultados obtenidos, los cuales se indican en el cuadro 12.

La distribución de la red de monitoreo definida para la cuenca se observa en la figura 19.

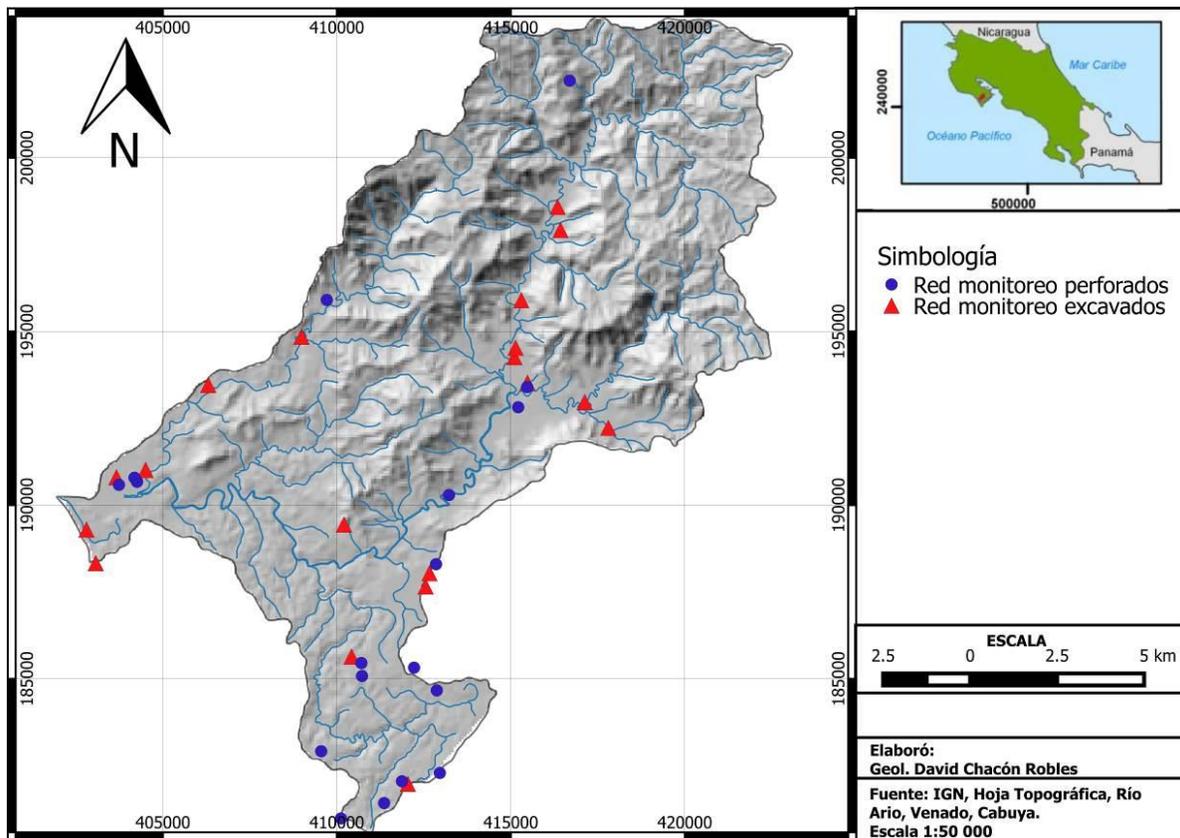


Figura 19: Red de monitoreo cuenca Arío.

La mayoría de los pozos de monitoreo se encuentra en unidades sedimentarias, propiamente en la formación de Montezuma y la unidad aluvial.

Según se indica en el cuadro 11, no se observa grandes variaciones en las diferentes mediciones realizadas, la mayoría de pozos presentes en la unidad aluvial presenta niveles someros y los pozos presentes en la formación Montezuma presenta niveles más profundos.

Cuadro 11: Resultados de mediciones de la profundidad del nivel freático en el tiempo.

Codigo	Propietario	Latitud	Longitud	abr-12		may-12		jun-12		ago-12		oct-12		feb-13		abr-13		jun-13		ago-13		oct-13		dic-13		mar-14		may-15		abr-16		
				NE	ND	NE	ND	NE	ND	NE	ND	NE	ND	NE	ND	NE	ND	NE	ND	NE	ND	NE										
Red_Exc_1	Bernal Barboza Murillo	187663	412555	14,5		13,5		12,2		0				13,7		14,7															14,55	
Red_Exc_2	Silvia Fallas Granados	188044	412668	3,56		0,51		0,06		3,49		0,4		4,45		6,15		0,34		0,4		0,3		0,6		4,42				4,69		
Red_Exc_3	Rony	192232	417806	5,34		5,6		4,9		5,42		5,7		5,25		5,43		0,75		6,4		5,14		5,9		7,02		6,50		5,51		
Red_Exc_4	Pastor	193525	415483	1,7		2,18		1,18		1,92		2,1		1,5		1,7				2,55		1,81		1,78		2,1		2,70		2,09		
Red_Exc_5	Zamora	194266	415107	3,66		2,25		0,91		2,24		4,8		4,03		4,1		0,57		2,05		3,22		3,51		3,42		4,68		4,00		
Red_Exc_6	José María Azofeifa	195904	415305	2,55		2,91		2,25		2,7		3		2,62		2,65		0,55		3,1		2,92		3,5		4,05				3,23		
Red_Exc_7	Holandés	198591	416348	3,16		4,22		3,01		4,02		4		3,05		3,18		1,19		4,22		4,71		4,48		4,4		4,00		3,67		
Red_Exc_8	Juan Ramírez	197924	416432	1,34		0,82				0,41		0,5		0,61		1,41		0,4		0,9		0,6		0,6		1,23		2,00		1,84		
Red_Exc_9	Marcos Ramírez	194537	415141			4,91		3,97		0,4		4,9		6,03		5,73		0,27		5,0		4,49		5,48		5,7		6,40		4,52		
Red_Exc_10	Danilo Solís	189448	410211							7,3								0,6		13,3		1,2										
Red_Exc_11	NI	181983	412045			6,44		6,39									0,85		7,1		58											
Red_Exc_12	Margarita Quesada Cald.	185645	410428	19,9		1,84		1,4		0,34				4,57		6,05		0,5		1,9		0,44										
Red_Exc_13	Nathaniel Grew	188335	403074	3,92		4,75				6,38				6,4		5,46				3,45										4,40		
Red_Exc_14	Gerardo Torres Torres	189300	402808	6,7		2,1		1,1		1,48				3		3,22				2,03		0,98		2,82		3,33		3,9		4,22		
Red_Exc_15	Porfirio Reyes Reyes	190807	403670	2,58		4,79		3,7		3,45				3,85		4,4				3,9		4,61								4,40		
Red_Exc_16	Escuela Bajos de Ario	191016	404509	5,06		5,55								4,4		4,7				1,9		4,16		5,1		5,5		6,45		6,32		
Red_Exc_17	Benito Canales Torreste	193463	406307			0,4		0,1		0,35				0,44		0,18		0,3		0,55		0,44		0,47		0,45		0,45		0,29		
Red_Exc_18	Alberto Pradas Quesada	194853	408989	0,1		7,3		6,36		7,13						6,6						6,4						8,0		6,80		
Red_Exc_19	Victor Segura López	192969	417130	8,72		3,5		3,5		3,32		3,4		4,43		5,93		0,2		3,98		3,59		3,5		4,86		6,98		6,31		
Red_Exc_20	Nathaniel Grew	192969	417130												5,9		0,45		6,55		4,68		5,11		5,3							
Red_Perf_1	Lidier Rodríguez Vázquez	188304	412855	8,34		6,8		6,41		6,07		6,8		8,65		9,45				6,9		7,17		7,85		7,73			9,17	9,10		
Red_Perf_2	Jesús Salamanca Quirós	193403	415474	4,18		3,52		3,22		4,12		3,1		3,35		3,73		0,22		3,12		2,82		2,75		5,92		2,70		3,94		
Red_Perf_3	Rosa Céspedes	192822	415216	10,4		10,9		9,63		10,5		10		10,2		10,6		0,72		11,5		10,1		11,1		12,2		12,30		10,7		
Red_Perf_4	Acueducto San Isidro	182294	412964	12,1		11,7		10,3		12,9		7,1						0,75				12,3										
Red_Perf_5	Acueducto San Isidro	181428	411363	19		14,1		12,8		11,9		8,3		11		19,2				4,45		10,7		17,1		17,2		19,45		19,00		
Red_Perf_6	Hda. Techo del Mundo	180986	410123		14	15,4		14,6		8,3		7		34,9			41,41	0,32		7,9		71			15,2	18,3				13,23		
Red_Perf_7	Comunidad de 4 casas	182918	409554			13,2		10,2		14,5		7,4		14,4		12,7		0,55		9,25		8,35		12,3			12,96					
Red_Perf_8	Gabriel Hernández	184672	412877	21		21,1		20,6		20,8		20		20,2		20,5		0,63		22,4		21,4		23,1		23						
Red_Perf_9	José María Quirós López	185326	412223	23,9		13,5		12,9		13,5								0,38														
Red_Perf_10	Alicia Granados Fernández	185085	410727	13,2		17,9		52,8		16,5		15		21,1		15,1		0,23		21		14,2		18,2			19,08	41,91		15,13		
Red_Perf_11	Manuel Ovares Elizondo	185458	410709	16,4		19,4		20,8		21,5		20		20,1		21,2		0,2		22,5		19,4		21,6		23,5		27,50		23,58		
Red_Perf_12	Bar La Perla India	190588	403742	5,55		4,15		3,62		2,95				4,25		3,9		0,48		3,08		3,18		3,8		4,22		4,90		3,93		
Red_Perf_13	AyA	190676	404262	4		5,4		5,18		3,8				5,32		5,47				5,88		5,77		6,25		6,24		6,70		6,15		
Red_Perf_14	AyA	190792	404188	5,58		6,22		5,79		3,1				5,4		5,21		0,64		5,12		4,41		5,59		5,42		6,50		5,66		
Red_Perf_15	Miguel González	195911	409716	6,46		13,6		13,4		13,2		13		14,6		14				13,3							15,23	15,40		14,50		
Red_Perf_16	Pedro Quirós Vargas	202223	416696	13,8		9,15		6,25		2		3,1		9,04		22,9		0,18		22		2,7		14		15,2		7,73		11,67		
Red_Perf_17	AyA-finca de Oliver Alv.	190296	413227	5,2		5,43		3,93		4,8				4,49		4,24		0,31		4,4		4,32		4,22		4,5		4,79		5,29		
Red_Perf_18	Acueducto San Isidro	182054	411875	4,9		14,8		18		14,9		14				16				17,83				16,3		11,8		12,5				

Fuente: Mediciones de campo.

Con los resultados de las diferentes mediciones, se realiza una selección de 3 pozos donde se represente la variación de los niveles en el tiempo, se toman únicamente estos 3 pozos ya que se ubican en los sectores que presentan mayor información hidrogeológica.

La selección de los pozos, se basa en la siguiente premisa, 2 pozos pertenecen a la unidad aluvial (sector de bajos de Ario y el sector de San Ramón), el tercer pozo se ubica en la formación Montezuma ubicado en el sector de Río Negro.

Los 3 pozos seleccionados se indican en el cuadro 12.

Cuadro 12: Pozos seleccionados para mostrar las variaciones del nivel en tres zonas específicas de la cuenca

Código	Propietario	Latitud	Longitud	abr-12	may-12	jun-12	ago-12	feb-13	abr-13	ago-13	oct-13	dic-13	mar-14	may-15	abr-16
Aluvión_Zona 1	Jesús Salamanca Quirós	193403	415474	4,18	3,52	3,22	4,12	3,35	3,73	3,12	2,82	2,75	5,92	2,70	3,94
Aluvión_Zona 2	Bar La Perla India	190588	403742	5,55	4,15	3,62	2,95	4,25	3,9	3,08	3,18	3,8	4,22	4,90	3,93
Pozo_Montezuma	Manuel Ovares Elizondo	185458	410709	16,37	19,37	20,81	21,49	20,09	21,23	22,45	19,4	21,55	23,48		23,58

Fuente: Mediciones de campo.

Como se observa en el cuadro anterior, los pozos en zonas aluviales presentan niveles someros, con variaciones entre los 3 y 6 m.

Para el caso de los pozos en la formación Montezuma los niveles son más profundos, cercanos a los 20 m, con variaciones entre los 20 y 23 m.

Para una mejor comprensión de la variación del nivel freático en el tiempo para los pozos seleccionados, se representa los resultados en el gráfico 1:

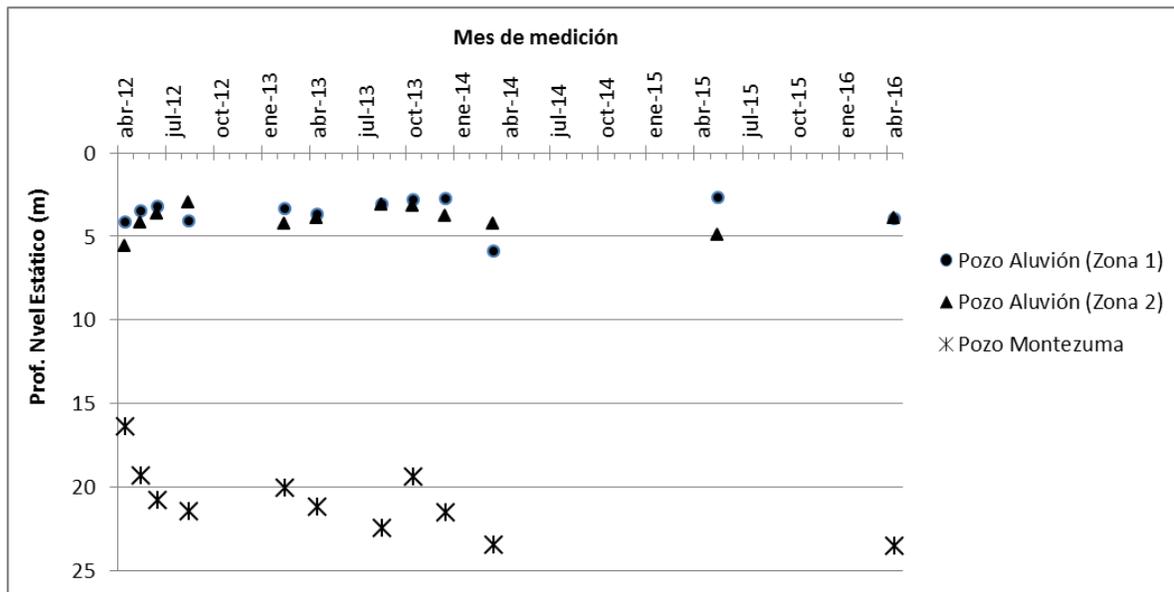


Gráfico 1: Variación de los niveles freáticos en el tiempo en los pozos seleccionados.

La variación de los niveles en los pozos, se asocian con el coeficiente de almacenamiento presente en ambos acuíferos, posiblemente el acuífero presente en la unidad aluvión presenta mayor porosidad lo que se asocia con un mayor coeficiente de almacenamiento.

Para el caso del acuífero presente en la unidad Montezuma, la baja porosidad de esta unidad produce un bajo coeficiente de almacenamiento.

Ambas condiciones, son reflejadas en las diferentes mediciones de campo y representadas de una mejor manera en el gráfico anterior.

Aforos

Se realizaron en los cauces de los ríos principales: río Arío así como en algunos afluentes.

Para la realización de los mismos, se utilizaron molinetes Gurley Precision Instrument N° Model 625 D y 622 F, para la obtención de los valores de caudal se utiliza el programe HidroEstra.

Los aforos fueron realizados en diversos periodos, sin embargo se toma en consideración la última medición ya que toma una mayor cantidad de puntos de aforo, así como algunos efluentes, con lo cual el resultado es más preciso, lo que permite definir de una forma más exacta la conexión hidráulica entre los ríos principales y el acuífero.

Para la realización de los aforos, se sectoriza cada uno de los tramos de los cauces, con la finalidad de obtener el valor de caudal en el sitio de una manera más precisa, se realizaron un total de 17 aforos en toda la cuenca.

Algunas quebradas y ríos afluentes al río Arío se encuentran secos, se procede con el levantamiento de coordenadas y se asigna un caudal de cero.

Los resultados obtenidos de los diferentes aforos realizados se indican en el cuadro 13, los análisis de efluencia e influencia se representan en la figura 20.

Cuadro 13: Resultados de aforos realizados en la cuenca del Río Ario. (Fecha: 04-05-2015).

Aforo	Longitud X	Latitud Y	Caudal (m ³ /s)	Caudal (l/s)
Aforo_1	416861	199605	0,0042	4,2
Aforo_3	416130	197776	0,0353	35,3
Aforo_4	415427	196689	0,0352	35,2
Aforo_5	414791	193674	0,1025	102,5
Aforo_6	416695	192692	0,0053	5,3
Aforo_7	415417	193181	0,0019	1,9
Aforo_8	414627	192708	0,0893	89,3
Aforo_10	413065	190324	0,1353	135,3
Aforo_11	409203	188346	0,6254	625,4
Aforo_12	409198	188279	0,0186	18,6
Aforo_13	403525	190357	0,6908	690,8
Aforo_14	405274	190025	0,6096	609,6
Aforo_15	405093	191581	0,021	21
Aforo_16	405069	192124	0,0096	9,6
Aforo_20	411971	189085	0,0008	0,8
Aforo_21	409637	191653	0,0017	1,7
Aforo_22	409670	192276	0,0046	4,6
Aforo_23	417216	201209	0	0
Aforo_24	415171	194948	0	0
Aforo_25	413981	194409	0	0
Aforo_26	413814	194348	0	0
Aforo_27	414702	193852	0	0
Aforo_28	414144	191414	0	0
Aforo_29	411991	187788	0	0
Aforo_30	405164	191313	0	0
Aforo_31	404486	190835	0	0
Aforo_32	409728	191123	0	0
Aforo_33	409550	196100	0	0

Fuente: Mediciones de Campo.

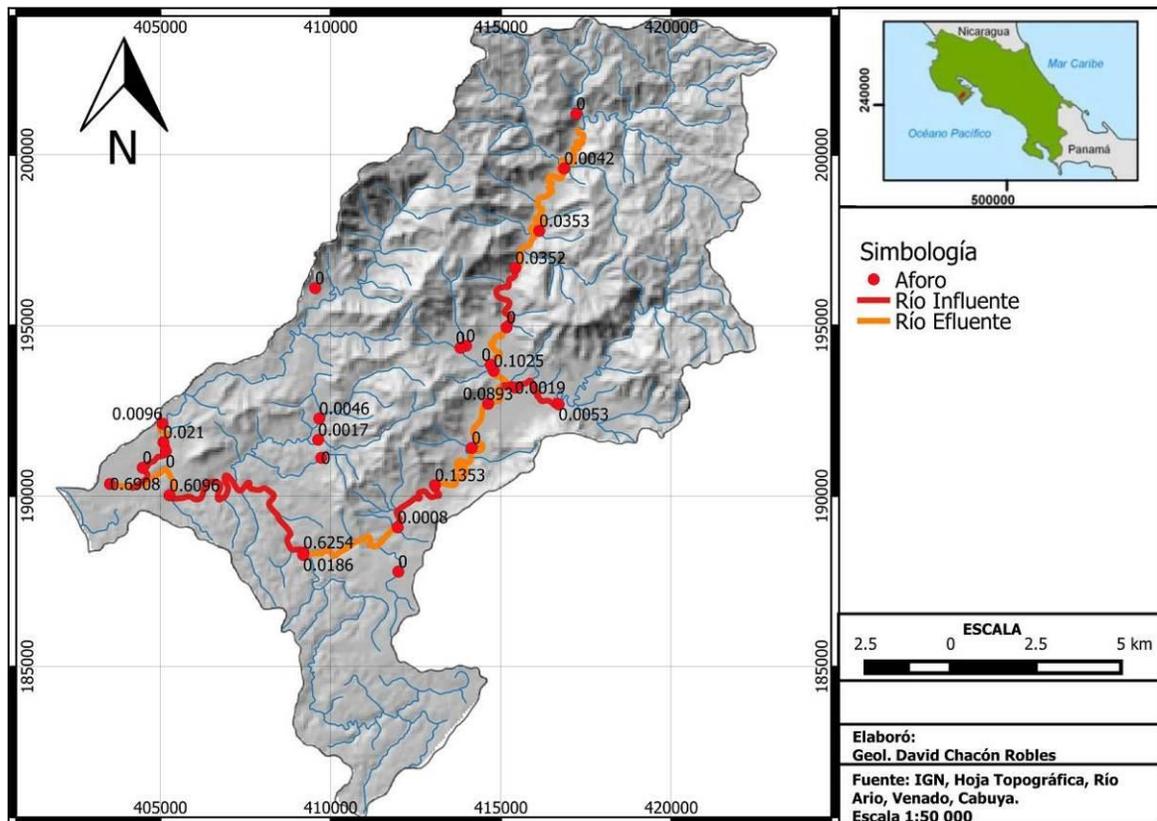


Figura 20: Aforos y conexión hidráulica río Arío.

Según el resultado de las mediciones realizadas, la mayor parte del cauce del río Arío presenta una condición de efluencia respecto al acuífero.

La condición de efluencia se presenta principalmente en los sectores donde se encuentra la unidad aluvial.

Para los sitios donde se encuentra otro tipo de litologías, o la extensión de la unidad aluvial es menor, el cauce del río Arío se presenta Influyente.

Los caudales medidos van del rango de 0,001 a los 0,6 m³/s, hay sitios dentro de la cuenca donde los ríos y quebradas se encuentran secos, otros puntos presentan agua estancada.

En el sector medido más al norte de la cuenca, no hay presencia de caudal, luego las posteriores mediciones se registran pocas variaciones de caudal, hasta llegar al punto final de la cuenca donde se mide un caudal del 0,69 m³/s.

2.2.3 Flujo subterráneo y Gradiente

La determinación del flujo del agua subterránea permite realizar una mejor comprensión de la hidrogeología en el área del interés.

Con la información recopilada se define tres zonas acuíferas, dos asociadas a la unidad aluvial y una presente en la formación Montezuma.

Por la cantidad de pozos e información de niveles estáticos presentes en estas zonas se realiza la determinación del flujo subterráneo, en el resto de la cuenca la información es escasa para el trazo de la misma.

Los tres sectores que presentan información para la realización de las equipotenciales se indican en la figura 21.

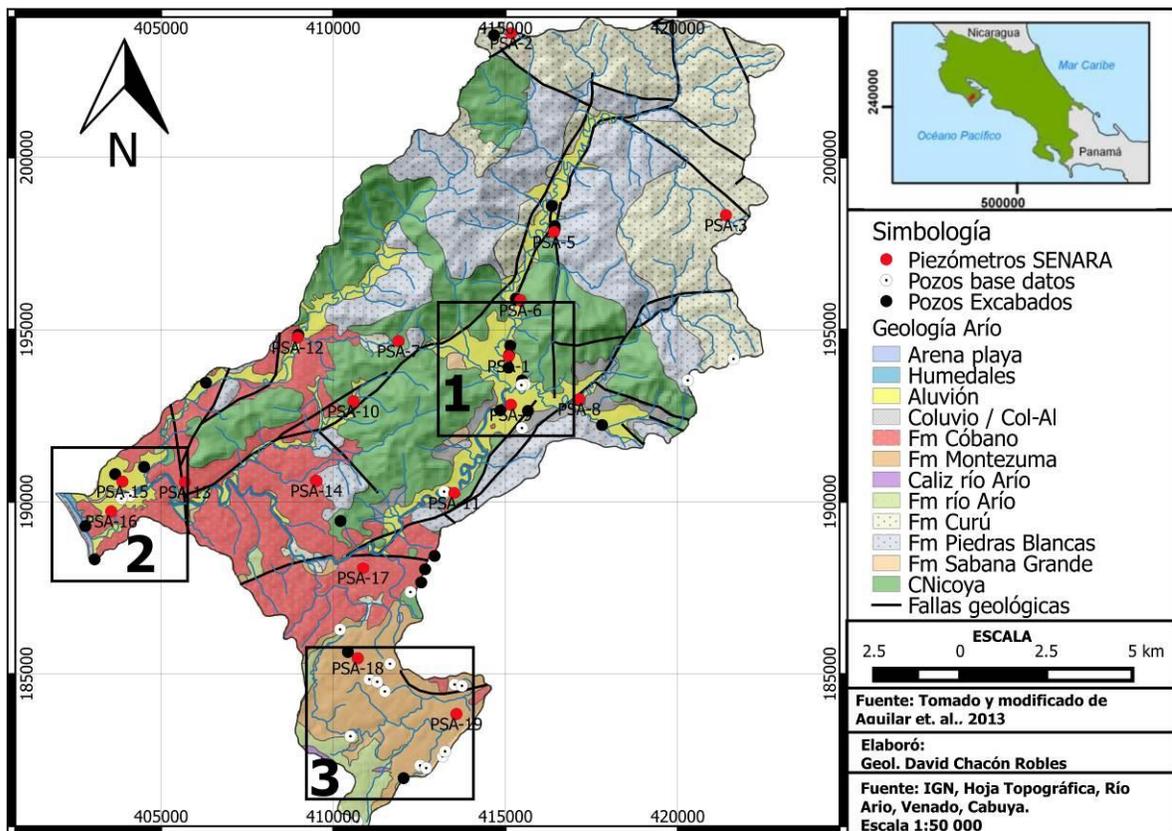


Figura 21: Sectores dentro de la cuenca con información para realizar equipotenciales.

El sector 1 (San Ramón de Arío), se ubica en la unidad aluvial, se determina alturas del agua subterránea a 85-100 m.s.n.m. en el cual el flujo subterráneo es hacia el SW, hacia el cauce principal del río Arío (ver figura 22), se determina un gradiente hidráulico de 0,007.

Para el caso del sector 2 (bajos de Arío), con la información existente se generan isofreáticas tanto en la margen derecha como derecha del río Arío, en la margen derecha el flujo es hacia el S y la margen izquierda es hacia el NW, con alturas de nivel menores a los 10 m.s.n.m., el flujo del agua subterránea presenta dirección hacia el cauce principal (ver figura 23), se obtiene un gradiente de 0,007.

Para el caso del sector 2, esta condición de acuífero somero se corrobora en campo, ya que en la zona se observa la presencia de humedales, además se indica un aumento de caudal según aforos.

En lo referente al sector 3 (Río Negro), se determina que el agua subterránea se encuentra a alturas entre 130-180 m.s.n.m.

El flujo del agua subterránea se presenta hacia afluentes del Río Negro, como se observa en las equipotenciales ubicadas hacia en el S y NE, el flujo ubicado al NW se desplaza hacia la quebrada Maldita la cual es afluente del Río Negro (ver figura 24).

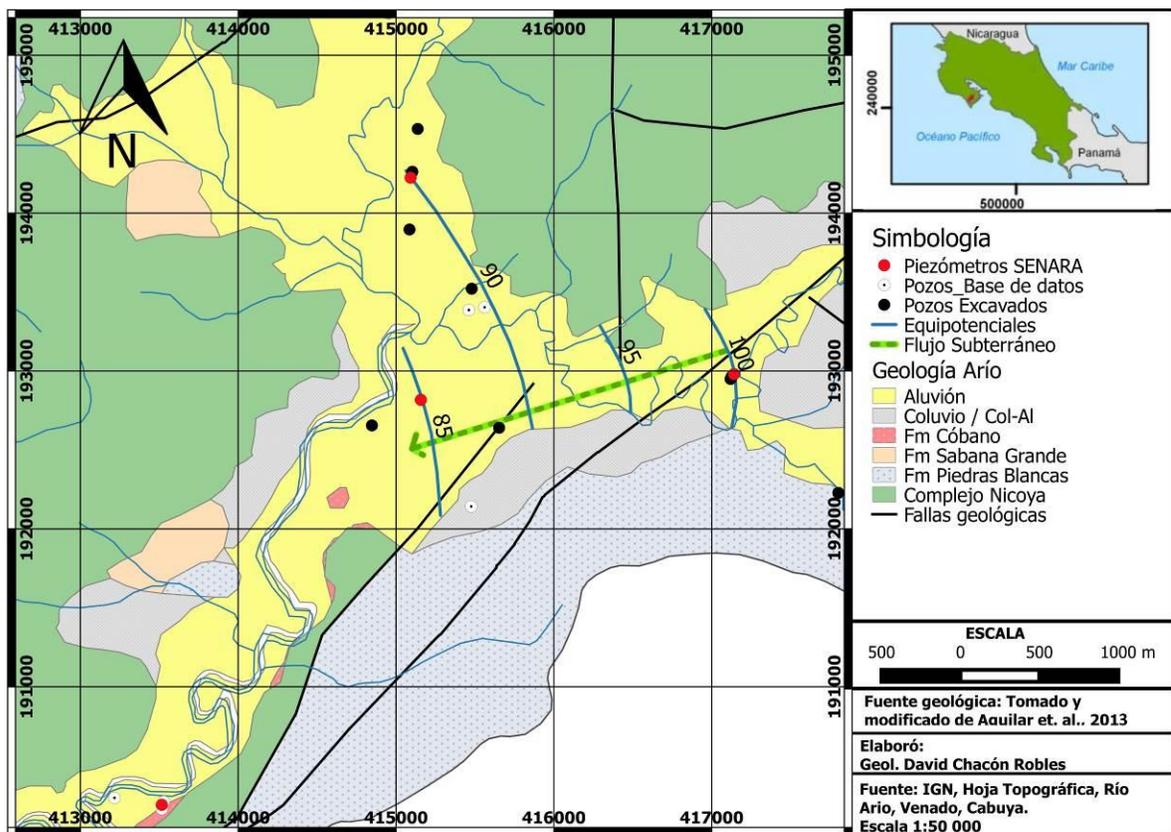


Figura 22: Equipotenciales sector 1, cuenca río Arío.

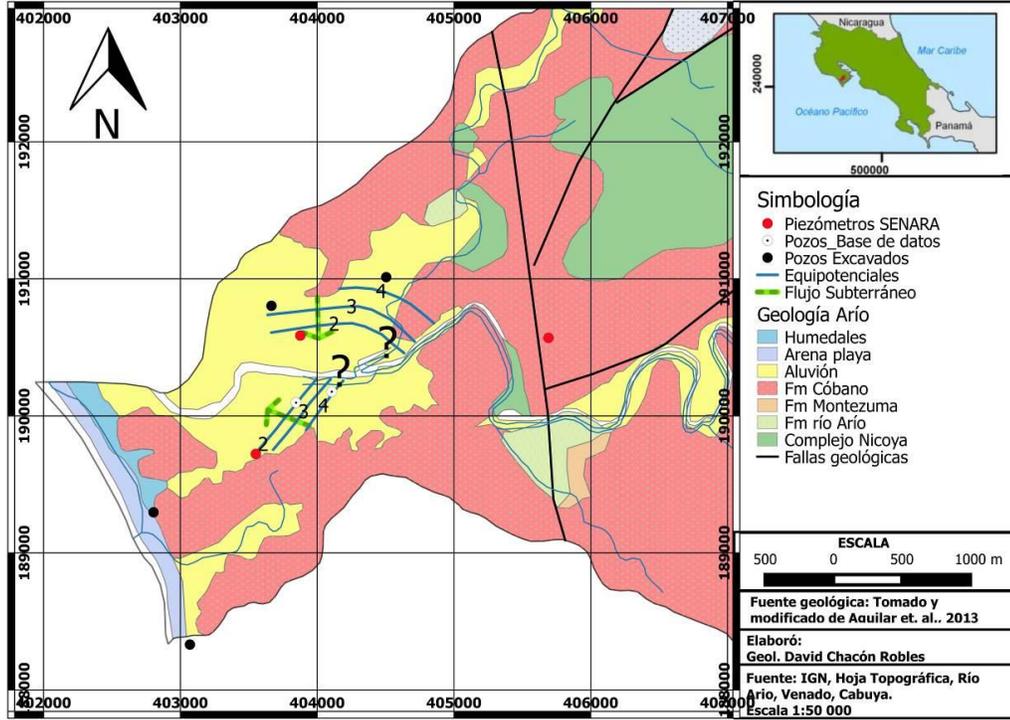


Figura 23: Equipotenciales sector 2, Cuenca río Arío.

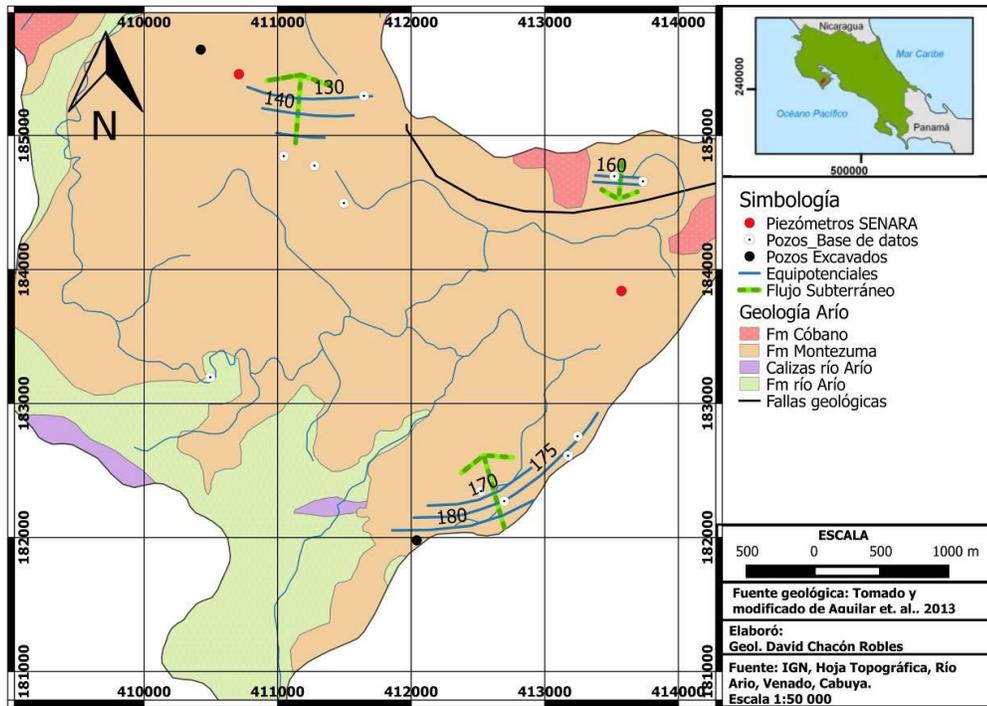


Figura 24: Equipotenciales sector 3, cuenca río Arío.

2.2.4 Parámetros Hidráulicos

Para realizar una mejor caracterización de los acuíferos, se realiza una búsqueda de información hidráulica que pueda existir en los informes de perforación presentes en el SENARA, así como en los informes de los piezómetros realizados.

En lo referente a los informes de perforación presentes en SENARA, únicamente 6 pozos poseen información del acuífero que capta, la misma se indican en el cuadro 14.

Cuadro 14: Parámetros hidráulicos de pozos presentes en la cuenca Arío.

Pozo	Unidad Geológica	Caudal (l/s)	Transmisividad (m ² /día)
RA-148	Aluvión	4	258
RA-149	Aluvión	15,03	366
RA-180	Complejo de Nicoya	1,1	15
RA-172	Formación Cóbano	0,5	0,45
CY-112	Formación Montezuma	0,74	0,544
RA-178	Formación Curú	1,5	3,64

Fuente: Base datos SENARA.

De la revisión de los diferentes informes de perforación, se desprende que la unidad aluvión presenta la mayor transmisividad, en promedio valores de 300 m²/día, además los pozos asociados a esta unidad presentan los mayores caudales en la cuenca de interés, los cuales pueden llegar hasta los 15 l/s.

Las restantes unidades geológicas de carácter sedimentario presentan transmisibilidades bajas.

El Complejo de Nicoya presenta transmisibilidades medias, asociadas posiblemente a porosidades secundaria, los diferentes pozos perforados en esta unidad presenta caudales bajos.

Las diferentes pruebas de bombeo, presentes en el archivo nacional de pozos y nacientes, presenta una duración de 12 horas, en el anexo 5 se adjuntan algunas de las pruebas de bombeo realizadas en la zona.

La distribución de los pozos con parámetros hidráulicos en la cuenca de estudio se indica en la figura 25.

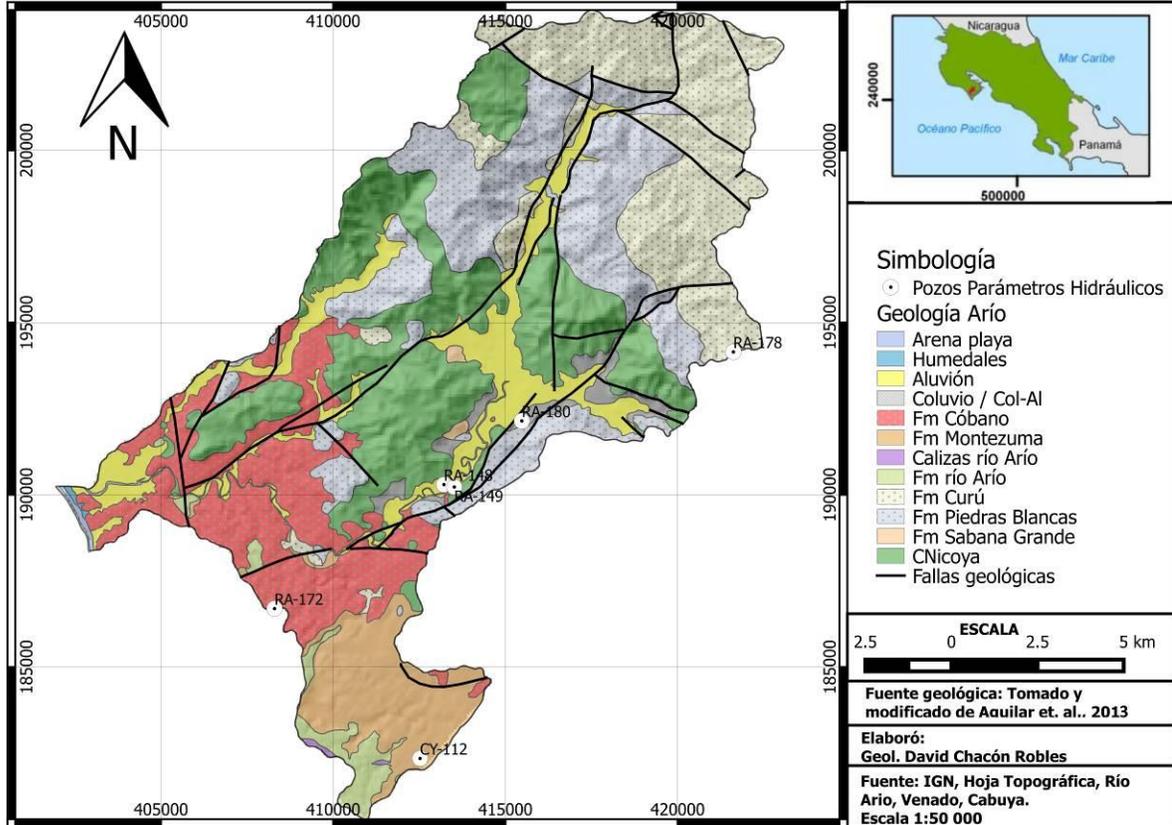


Figura 25: Pozos con parámetros hidráulicos.

Respecto a las pruebas hidráulicas realizadas a los piezómetros, únicamente en 2 perforaciones se logró obtener los resultados, ya que el resto presentaron problemas de inestabilidad al ser rocas fracturadas o material sedimentario muy blando, lo que impidió la obtención de los respectivos resultados.

Las pruebas se realizaron a los piezómetros PSA-13 y PSA-19, los resultados se observan en el cuadro 15:

Cuadro 15: Parámetros hidráulicos obtenidos de pruebas realizadas a los piezómetros.

Código Piezómetro	Unidad Lit	Transmisividad (m ² /día)
PSA_13	Unidad Volcánica	4,1 e-6
PSA_19	Form. Montezuma	3,8 e-7

Fuente: SENARA.

Como se observa, las conductividades son muy bajas, mismas que se pueden deber a que el método de lugeon no es muy confiable y exacto, el mismo consiste en la inyección de cierto caudal

de agua a diferentes presiones, y se va generando un registro de tiempo contra presión, lo cual permite obtener K.

Los resultados no son confiables para estos piezómetros, ya que para las mismas unidades geológicas, mediante la realización de pruebas de bombeo se obtienen valores superiores, lo que hace dudar de los resultados.

Con la información obtenida en este apartado, se determina que la unidad con la mejor capacidad acuífera corresponde al aluvión, la cual la transmite más fácilmente grandes volúmenes de caudal.

2.2.5 Perfiles Hidrogeológicos.

Para comprender mejor la hidrogeología presente en la cuenca de interés, con la información del reconocimiento hidrogeológico, las mediciones, la información de los piezómetros y los resultados geofísicos, se procede a realizar perfiles hidrogeológicos en la cuenca de interés.

Los perfiles hidrogeológicos se trazan en el mismo sector donde se realizaron los perfiles geológicos, incluyendo la información de carácter hídrico presente en las diversas perforaciones, en los sondeos hidrogeológicos, sumado a las mediciones de nivel realizadas en el tiempo.

Para el caso del perfil hidrogeológico A-A', se determina niveles freáticos profundos en el rango de los 20 m, con espesores máximos del acuífero posiblemente de 30 m, asociados en su totalidad a la formación Montezuma (ver figura 26).

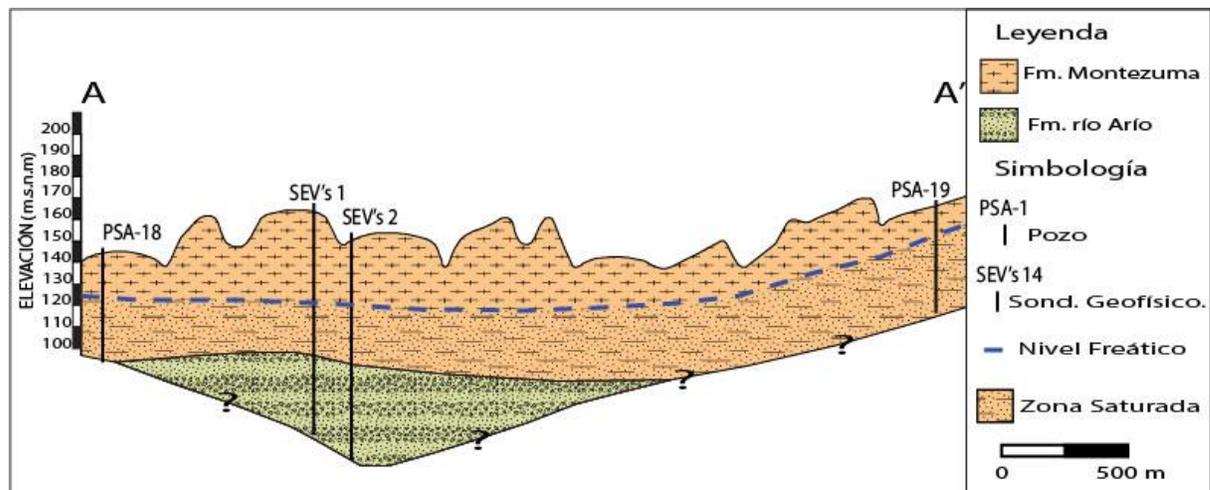


Figura 26: Perfil hidrogeológico A-A'.

El perfil B-B', muestra la posible existencia de un nivel en la formación Cóbano, el cual aporta caudal al río Arío, lo cual es consecuente con los resultados de aforo realizados, sin embargo, es muy poca la información para caracterizar el acuífero presente en dicha formación (Ver figura 27).

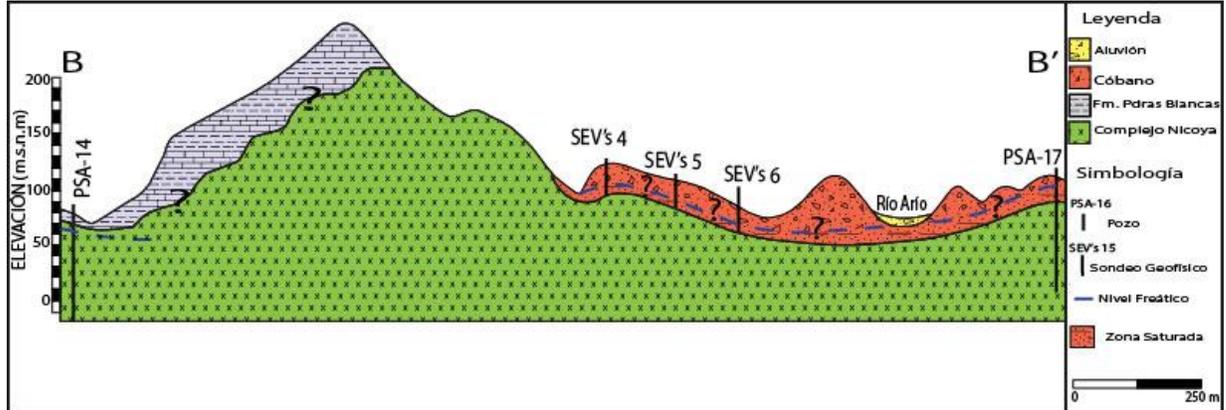


Figura 27: Perfil hidrogeológico B-B'.

Los perfiles C-C', D-D', E-E' y G-G' (figuras 28,29, 30 y 31 respectivamente), muestran la existencia de un acuífero en la unidad aluvial, la cual presenta niveles someros (alrededor de los 5 m de profundidad), con espesores del acuífero de hasta 50 m, los cuales posiblemente se encuentran en condición libre.

Aunque las muestras clasifican el suelo como limos, los espesores que presentan son muy variables, siendo máximo de 1 m y en otros puntos el espesor de limos no existe, por lo cual se considera que el aluvión se presenta principalmente en condición libre.

Con la información de los perfiles hidrogeológicos, se logra determinar la existencia de dos zonas importantes en la cuenca, con presencia de acuíferos asociados a la unidad aluvial.

Para ambas zonas, se determina la presencia de espesores acuíferos de 50 m, los espesores se presenten constantes, los niveles freáticos se ubican alrededor de los 5 m de profundidad, las zonas acuíferas asociadas a la unidad aluvial se ubican en el sector de San Ramón de Arío y bajos de Arío.

Para el caso del perfil C-C', se observa la posible influencia estructural en la presencia del acuífero aluvial en esta zona, esto posiblemente influenciado por la presencia cercana de la falla Bongo, la cual forma un *pull apart* en las zonas cercanas.

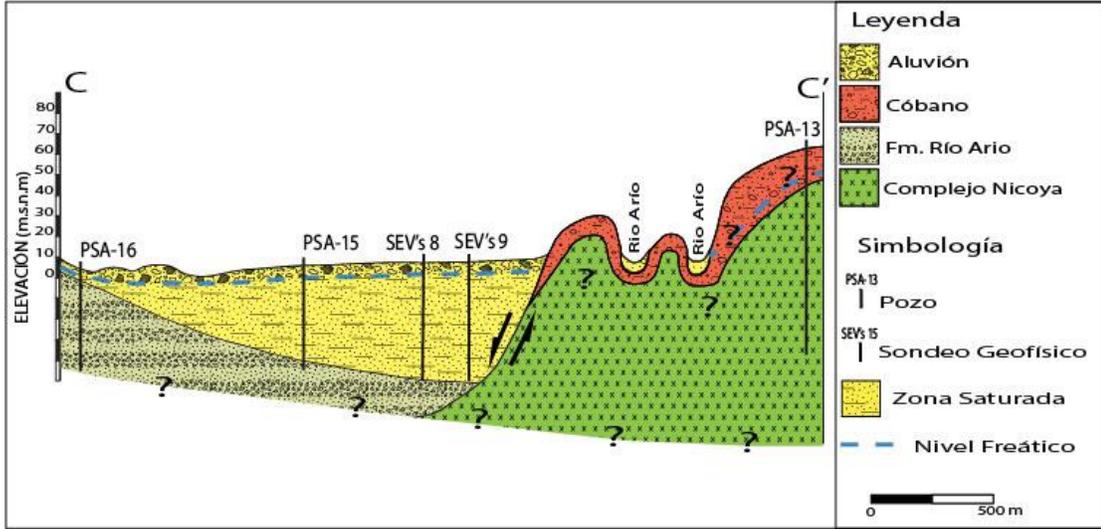


Figura 28: Perfil hidrogeológico C-C'.

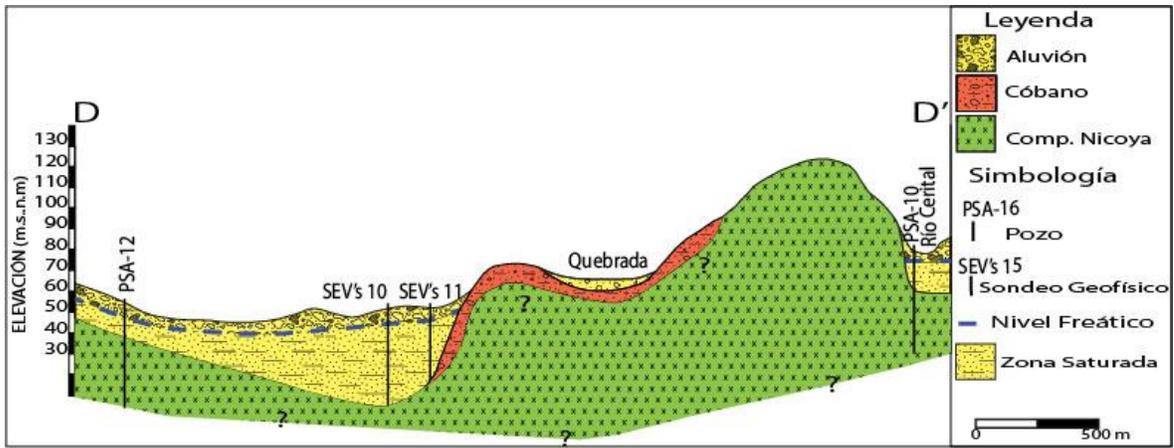


Figura 29: Perfil hidrogeológico D-D'.

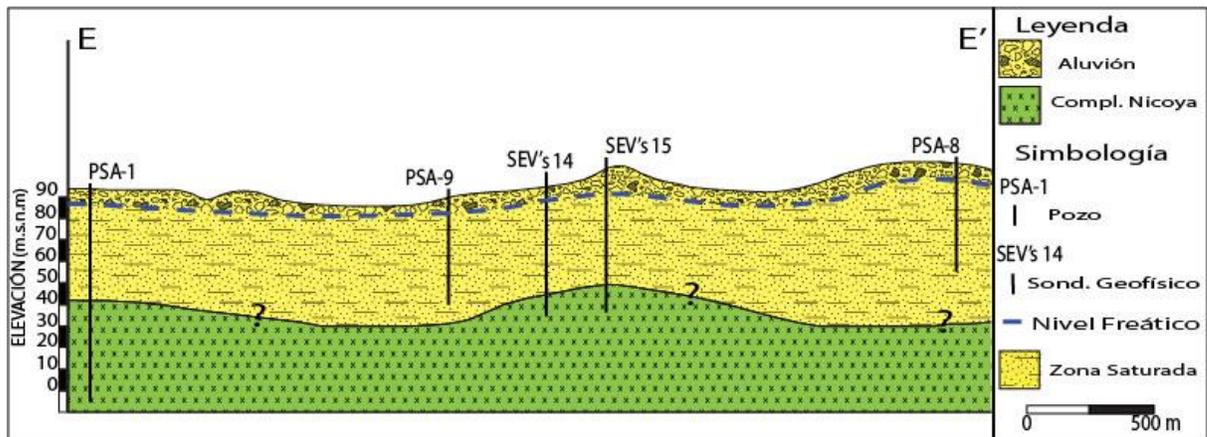


Figura 30: Perfil hidrogeológico E-E'.

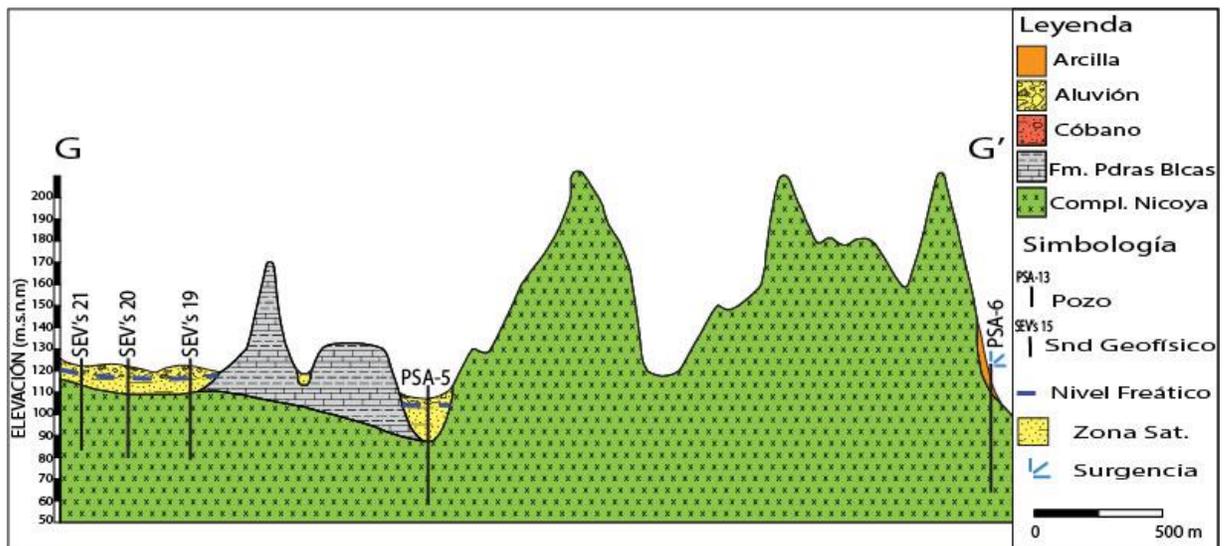


Figura 31: Perfil hidrogeológico E-E'.

2.2.6 Modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca del río Arío

Con la realización de diferentes estudios a la cuenca de interés, se determina la existencia de un basamento ígneo, el cual corresponde al Complejo de Nicoya, sobre dicha unidad se depositan diferentes formaciones sedimentarias, de variadas composiciones.

De todas las formaciones sedimentarias presentes en la zona de estudio, se determina que únicamente dos unidades presentan suficiente información para realizar una caracterización del acuífero, las mismas corresponden a la Formación Montezuma y la unidad Aluvial.

Otras unidades geológicas de la cuenca presentan pozos, lo cual indica la presencia de acuíferos pero no hay la suficiente información para realizar una caracterización hidrogeológica de las mismas.

Para cada una de las unidades hidrogeológicas con información suficiente para realizar la descripción, se determina:

La formación Montezuma, presenta niveles freáticos cercanos a los 20 m de profundidad, con espesores de la zona saturada de 30 m, con pozos que presentan rendimientos de caudal bajos máximo 2 l/s, con transmisibilidades de hasta 0,544 m²/ día.

El flujo subterráneo se dirige hacia el Río Negro, con alturas del agua subterráneas de superiores a los 150 m, se determinan gradientes de 0,05.

Respecto a la unidad aluvial, se determina dos zonas donde se puede realizar una caracterización del acuífero, cada una de las unidades ubicadas se indican a continuación, para su distinción se define la zona 1_ San Ramón de Arío y la zona 2_ Bajos de Arío.

Para la zona 1_ San Ramón de Arío, se determinan niveles someros, en el rango de 5 m de profundidad, el espesor de la zona saturada se encuentra en el rango de los 50 m manteniéndose constantes en todo este sector.

El flujo del agua subterránea se presenta hacia el SW, en dirección del cauce del río Arío, corroborando la efluencia del río en este punto, mismo determinada mediante aforos.

La altura del agua subterránea en este punto es del rango de los 80-100 m.s.n.m., con gradientes de 0,007.

Para la zona 2_ Bajos de Arío, se encuentran niveles someros menores a los 5 m de profundidad, el espesor de la zona saturada corresponde a los 50 m, el flujo del agua subterránea es hacia el cauce principal del Río Arío, definiendo en este punto una efluencia del río respecto al acuífero, lo cual se corrobora en los aforos realizados en el sector.

La altura del agua subterránea en este punto se encuentra en el rango de los 1-5 m.s.n.m., con gradiente de 0,008.

Respecto a las características hidráulicas en los sectores aluviales, se indica que no hay información propiamente para cada una de ellas, se logra determinar que los pozos presentes pueden aportar caudales de hasta 15 l/s y presentar transmisibilidades de hasta 250 m²/día.

En la mayoría de los casos, donde se encuentra la unidad aluvial, hay aporte del acuífero al cauce del Río Arío.

CAPITULO 3: BALANCE HÍDRICO DE SUELOS

3.1 Clima

Se determina que la zona de estudio se encuentre ubicada en la región Pacífico Norte, específicamente en la subregión occidental de la Península de Nicoya (PN1).

Según, Solano & Villalobos, (*n.d.*), la subregión occidental de la península de Nicoya, comprende desde Cabo Velas hasta Bahía Ballena. Hacia el Oeste, Santa Cruz, Nicoya, Hojanca y Carmona. Abarca las zonas montañosas de la Península y la cuenca de los ríos: Arío, Blanco, Bongo, Ora, Nosara, Montaña y Tabaco; Santa Rosa de Santa Cruz, Florida, Belén, Nosara, San Gabriel, La Fresca, Cóbano, Cabuya.

La zona de estudio presenta un régimen de precipitación tipo Pacífico, el cual se caracteriza por presentar una estación seca y otra lluviosa bien definidas.

La estación seca se registra normalmente desde el mes de noviembre hasta el mes de abril y la estación lluviosa se inicia normalmente en el mes de mayo concluyendo en el mes de octubre. Con una disminución relativa de la cantidad de precipitación en los meses de julio y agosto que se conoce con el nombre de “veranillo” y que experimentan en algunos años un déficit hídrico (Solano & Villalobos, *n.d.*).

Esta región presenta un clima lluvioso con influencia monzónica, en el cuadro 16 se indica una sinopsis de las características climáticas que presenta.

Cuadro 16: Resumen de las características climáticas en zona donde se encuentra la cuenca del río Arío.

Lluvia Anual Media (mm)	Temp. Máxima Media Anual °C	Temp. Mínima Media Anual °C	Temp. Media Anual °C	Prom. de Días con Lluvia	Duración del periodo seco (meses)
2385	30	23	25 a 30	99	4

Fuente: Solano & Villalobos, *n.d.*

3.1.1 Datos climatológicos de la zona

La zona de estudio no cuenta con presencia de estaciones meteorológicas, sin embargo se cuenta con una estación cercana, la cual corresponde con la estación meteorológica Paquera, la misma es propiedad del instituto Meteorológico Nacional (IMN), dicha estación registra datos de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media y la humedad.

Se procede a utilizar la información registrada en la estación Paquera, ya que presenta un registro de datos meteorológicos constante en el tiempo, los datos registrados van desde el año 1974-

2013 (precipitación), y del año 1986-2013 (registros de temperatura), se posee registros de humedad desde el año 1996-2004.

Todo lo anterior representa un registro claro e importante de las condiciones climáticas imperantes en la zona de estudio, e información útil a ser utilizada en el balance hídrico de suelo.

En el cuadro 17, se muestra el promedio por mes, de cada uno de los parámetros meteorológicos que registra la estación meteorológica Paquera.

Cuadro 17: Registro parámetros climáticos estación Paquera.

Elemento	Periodos	Enero	Febr.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiem.	Octubr.	Noviem.	Diciem.	Anual
LLUVIA (mm)	1974-2013	8,9	2,3	6,4	45,7	282,8	250,3	224,9	266,6	364,7	362,6	181,1	29,7	2026,0
DIAS LLUVIA	1974-2013	1	0	1	3	12	13	12	13	16	15	9	2	97
TEMP.MAXIMA (°C)	1986-2013	33,3	34,7	35,4	35,3	32,7	31,6	31,6	31,5	31,0	30,6	31,1	32,0	32,6
TEMP.MINIMA (°C)	1986-2013	19,7	19,9	20,6	22,1	23,2	23,2	22,7	22,5	22,8	22,7	22,2	20,9	21,9
TEMP.MEDIA (°C)	1986-2013	26,5	27,3	28,0	28,7	28,0	27,4	27,2	27,0	26,9	26,7	26,7	26,5	27,2
HUMEDAD (%)	1996-2004	75,0	72,0	70,0	72,0	82,0	86,0	86,0	86,0	89,0	88,0	87,0	83,0	81,3

Fuente: IMN, Estación Paquera.

Como se puede observar, los meses entre mayo y octubre corresponden con los meses donde se produce mayor precipitación, siendo el mes de setiembre el más lluvioso, con una precipitación promedio de 364,7 mm, así mismo setiembre es el mes con mayores días de precipitación con un total de 16.

Los meses entre enero y abril, presentan los mayores registros de temperatura máxima, con temperaturas de hasta 35,4 °C para el mes de marzo.

La relación de precipitación y temperatura, basada en los registros de la estación Paquera se indica en el gráfico 2.

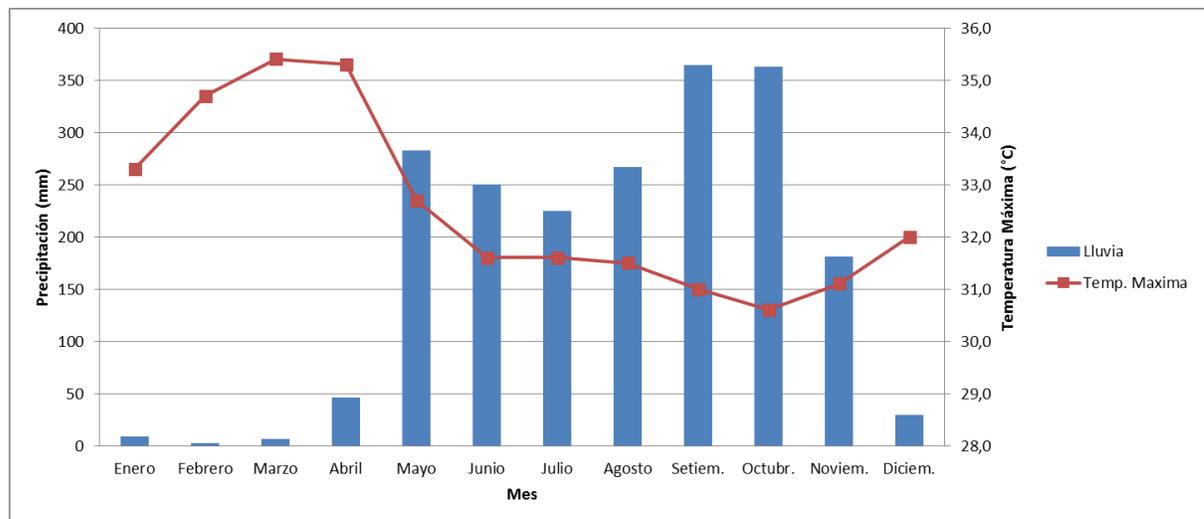


Gráfico 2: Relación precipitación y temperatura máxima registros estación Paquera.

Como se logra observar en el gráfico, los primeros meses de los distintos años presentan muy poca precipitación y las mayores temperaturas, con el aumento de la precipitación en los meses finales del año se presenta la disminución de las temperaturas máximas.

3.1.2 Evapotranspiración Potencial:

Para la determinación de la evapotranspiración de la zona de estudio, se utilizó la información meteorológica de la estación Paquera, a cargo del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), la cual posee registro de datos desde 1986 hasta el 2013.

Para la determinación de la evapotranspiración potencial, se utilizó la fórmula de Hargreaves y Samani (1985):

$$ETP = (K)(RA)(DT)^{0.5} (0,0075)(32 + 1,8(Tpromedio^{\circ}C))$$

Dónde:

K= corresponde a un coeficiente que para este caso corresponde a 0,17.

RA= Radiación solar incidente. Según el mes se asigna un valor específico.

DT= Diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima.

Los valores de evapotranspiración para la cuenca Arío para los diferentes meses se indican en el cuadro 18:

Cuadro 18: Parámetros utilizados en el cálculo de la evapotranspiración potencial.

Meses	Tprom (°C)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	RA	EVP	Dias	EVP_Mes
Enero	26,5	33,3	19,7	13,2	5,71	31	176,9
Febrero	27,3	34,7	19,9	14,2	6,58	28	184,2
Marzo	28,0	35,4	20,6	15,3	7,18	31	222,7
Abril	28,7	35,3	22,1	15,7	6,95	30	208,5
Mayo	28,0	32,7	23,2	15,5	5,53	31	171,6
Junio	27,4	31,6	23,2	15,3	5,03	30	150,8
Julio	27,2	31,6	22,7	15,3	5,17	31	160,3
Agosto	27,0	31,5	22,5	15,5	5,26	31	163,0
Setiembre	26,9	31,0	22,8	15,3	4,90	30	147,1
Octubre	26,9	30,6	22,7	14,7	4,59	31	142,2
Noviembre	26,7	31,1	22,2	13,6	4,55	30	136,5
Diciembre	26,5	32,0	20,9	12,9	4,91	31	152,2

Fuente: IMN, cálculos propios.

La relación entre evapotranspiración mensual, precipitación y temperatura promedio se representa en el gráfico 3.

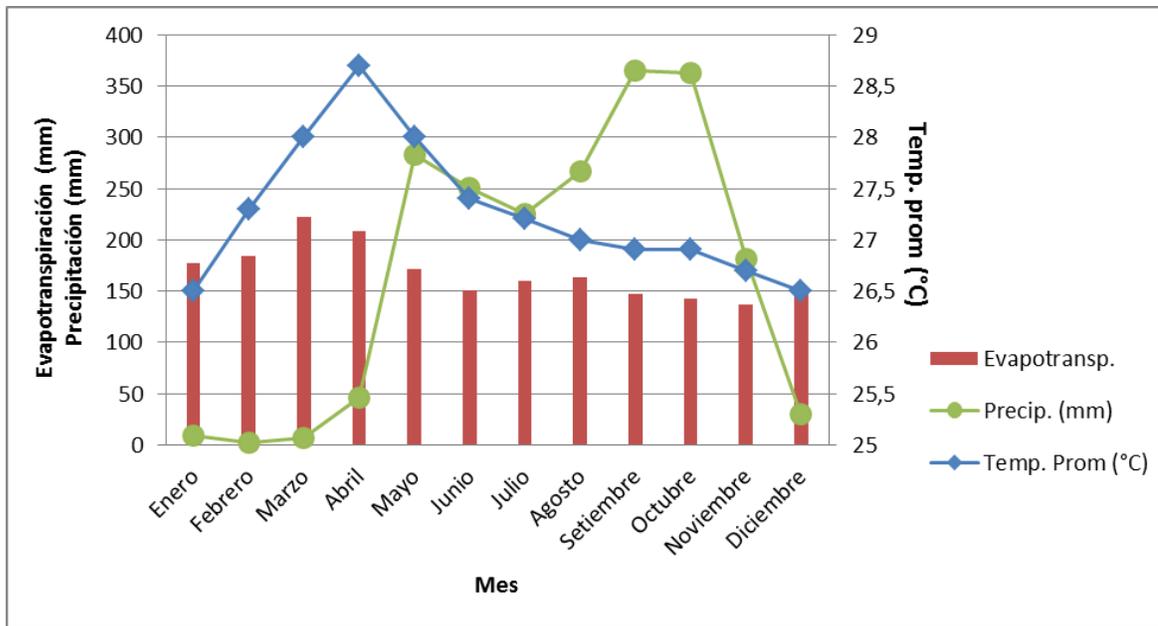


Gráfico 3: Relación Evapotranspiración mensual, precipitación y temperatura promedio para la estación Paquera.

Del gráfico anterior se desprende, la poca precipitación y las máximas temperaturas en los primeros meses del año, provocan que la evapotranspiración sea la mayor, para los meses siguientes el aumento de la precipitación y la disminución de las temperaturas máximas, produce una disminución en la evapotranspiración.

3.2 Análisis de los suelos

Como elemento importante en la obtención del balance hídrico en la cuenca de interés, es necesario conocer las características del suelo, para lo cual se realizó una gira de campo, con la finalidad de obtener muestras de suelo para cada unidad litológica para su posterior análisis.

En la gira realizada se logró extraer un total de 17 muestras, tratando que las mismas se encuentren distribuidas en toda la cuenca (ver figura 32) permitiendo obtener variabilidad litológica.

Posterior a su recolección se presentaron a los laboratorios de geotecnia e hidrogeología de la escuela centroamericana de geología, así como el laboratorio de suelos de la UCR.

Se debe dejar claro que los sitios seleccionados se deben principalmente a formación presente, así como a la accesibilidad.

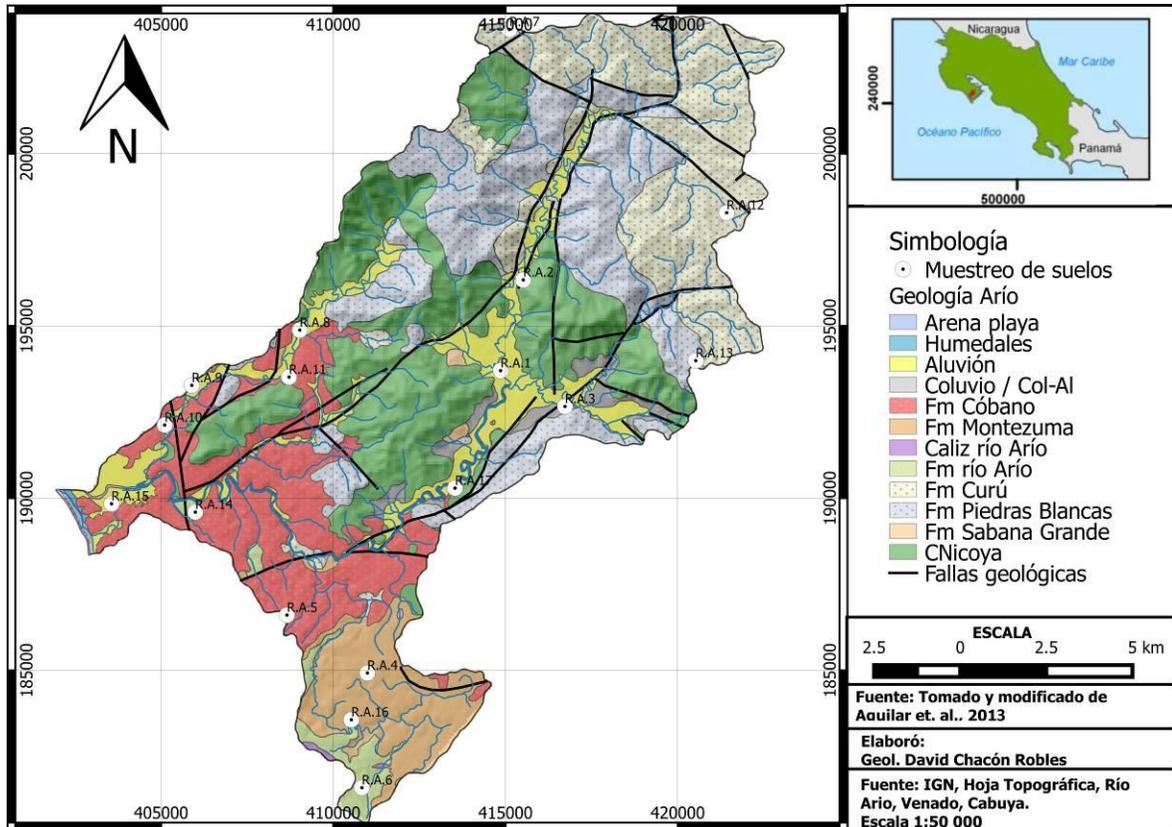


Figura 32: Sitios de Muestreo suelos Cuenca río Arío.

Los parámetros analizados a cada una de las muestras corresponde a: capacidad de campo (CC), punto de marchitez (PM), Densidad Aparente (DA), Contenido de Humedad (CH), los anteriores parámetros se analizaron en el Laboratorio Nacional de Suelos de la Universidad Costa Rica (UCR).

Además, se obtuvo: Contenido de Humedad, Peso Unitario, Gravedad específica, Límites de Atterberg, Análisis granulométrico, porosidad, los mismos se analizaron en el laboratorio de geotecnia de la escuela centroamericana de geológica.

3.2.1 Capacidad de campo (CC)

Se define como el contenido de agua que retiene un suelo en contra de la fuerza de gravedad, en condiciones de equilibrio y cuando no existe extracción de agua del suelo por las plantas, sea esta por evaporación o transpiración (SIAR, 2009).

En el cuadro 19, se indican los resultados obtenidos de capacidad de campo (CC), para diferentes unidades geológicas presentes en la cuenca Arío.

Cuadro 19: Resultados de Capacidad de Campo (CC), muestras suelos Cuenca Arío.

Unidad Litológica	CC mínima (%)	CC máxima (%)	CC Promedio (%)
Aluvión	31	49	41,0
Coluvio/Aluvial	-	35	35,0
Form. Cóbano	36	54	44,4
Form. Curú	30	51	40,5
Form. Montezuma	40	46	43,0
Complejo Nicoya	-	17	17,0
Form. río Arío	-	59	59,0
Form. Piedras Blancas	-	36	36,0

Fuente: Análisis de laboratorio.

La mayoría de las unidades geológicas, presentan valores promedios de capacidad de campo cercanas a 40%, el Complejo de Nicoya presenta capacidades bajas y la Form. río Arío la mayor.

3.2.2 Punto de marchitez (PM)

El concepto de punto de marchitez, corresponde a la cantidad de agua retenida en un suelo, que es insuficiente para abastecer adecuadamente a la planta y esta se marchita irreversiblemente. Puede ser un rango o un límite, pero una vez alcanzado es un proceso irreversible. (SIAR, 2009).

En el cuadro 20, se indican los resultados obtenidos de punto de marchitez (PM) para diferentes unidades geológicas presentes en la cuenca Arío.

Cuadro 20: Resultados Punto Marchitez (PM), muestras suelo cuenca río Arío.

Unidad Litológica	PM mínima (%)	PM máxima (%)	PM Promedio (%)
Aluvión	3,0	33,0	20,0
Coluvio/Aluvial	-	32,0	32,0
Form. Cóbano	28,0	46,0	36,4
Form. Curú	17,0	37,0	27,0
Form. Montezuma	27,0	37,0	32,0
Complejo Nicoya	-	10,0	10,0
Form. río Arío	-	54,0	54,0
Form. Piedras Blancas	-	23,0	23,0

Fuente: Análisis de laboratorio.

El punto de marchitez de la mayoría de las unidades se encuentra alrededor del 30 %, el complejo de Nicoya y Arío, presentan resultados que se salen del rango de valores obtenidos.

3.2.3 Densidad aparente (DA)

Se refiere a la relación entre el peso seco de una muestra de suelo y el volumen que ocupó dicha muestra a campo, con su ordenamiento natural (Gil, 2009).

En el cuadro 21, muestra los resultados obtenidos de densidad aparente (DA), para diferentes unidades geológicas presentes en la cuenca del río Arío.

Cuadro 21: Resultados Densidad Aparente (DA), muestras suelo cuenca río Arío.

Unidad Litológica	DA mínima (g/cm³)	DA máxima (g/cm³)	DA Promedio (g/cm³)
Aluvión	0,91	1,24	0,99
Coluvio/Aluvial	-	1,47	1,47
Form. Cobano	0,76	1,38	1,00
Form. Curu	0,92	1,21	1,07
Form. Montezuma	0,81	1,33	1,07
Complejo Nicoya	-	1,59	1,59
Form. Río Arío	-	0,99	0,99
Form. Piedras Blancas	-	0,82	0,82

Fuente: Análisis de laboratorio.

Los resultados obtenidos, muestran que las diversas unidades presentan unidades en el rango de 1 g/cm³.

3.2.4. Contenido de humedad

Se define como la razón entre el peso del agua de los poros del suelo y el peso de los sólidos del suelo (granos), a determinar por secado en estufa (González de Vallejo *et al.*, 2002; Bowles, 1982).

En el cuadro 22, muestra los resultados obtenidos de contenidos de humedad para diferentes unidades geológicas presentes en la cuenca del río Arío.

Cuadro 22: Resultados Contenido Humedad (CH), muestras suelo cuenca río Arío.

Unidad Litológica	CH mínima (%)	CH máxima (%)	CH Promedio (%)
Aluvión	27,27	41,72	35,9
Coluvio/Aluvial	-	23,34	23,34
Form. Cóbano	32,43	50,31	38,50
Form. Curú	26,21	51,51	38,86
Form. Montezuma	36,10	48,52	42,31
Complejo Nicoya	-	26,93 ²	26,93 ²
Form. río Arío	-	53,94 ²	53,94 ²
Form. Piedras Blancas	-	42,42 ²	42,42 ²

Fuente: Análisis de laboratorio.

Los valores de contenido de humedad determinados en laboratorio, indican un rango de 30 y 50 %.

3.2.5 Peso unitario húmedo

Los resultados obtenidos de peso unitario húmedo para las diversas unidades geológicas presentes en la cuenca del río Arío se indican en el cuadro 23:

Cuadro 23: Resultados Contenido Humedad (CH), muestras suelo cuenca río Arío.

Unidad Litológica	P. U. H. Mínimo [kN/m ³]	P. U. H. Máximo [kN/m ³]	P. U. H. Promedio [kN/m ³]
Aluvión	16,42	17,10	16,9
Coluvio/Aluvial	-	17,86	17,86
Form. Cóbano	15,88	17,58	16,60
Form. Curú	15,01	15,86	15,4
Form. Montezuma	14,33	17,40	15,8
Complejo Nicoya	-	17,69	17,69
Form. río Arío	-	15,05	15,05
Form. Piedras Blancas	-	16,27	16,27

Fuente: Análisis de laboratorio.

Los resultados obtenidos de los análisis indican un rango de resultados entre los 15 y 17 kN/m³.

3.2.6 Gravedad específica

Los valores obtenidos para la gravedad específica de las muestras analizadas se indican en el cuadro 24.

Cuadro 24: Resultados Gravedad Especifica, muestras suelo cuenca río Arío.

Unidad Litológica	Grav. Esp. mínima	Grav. Esp. Máxima	Grav. Esp. Promedio
Aluvión	2,44	2,76	2,6
Coluvio/Aluvial	-	2,71	2,7
Form. Cóbano	2,62	2,73	2,6
Form. Curú	2,71	2,73	2,7
Form. Montezuma	2,65	2,72	2,6
Complejo Nicoya	-	2,46 ²	2,4
Form. río Arío	-	2,32 ²	2,4
Form. Piedras Blancas	-	2,65 ²	2,6

Fuente: Análisis de laboratorio.

Los resultados obtenidos indican valores que oscilan entre 2,3-2,7. Los menores resultados corresponden al Complejo de Nicoya y los mayores a la formación Curú.

3.2.7 Límites de Attemberg.

A las muestras de suelo recolectadas, se determinó los límites de Attemberg y el Índice de Plasticidad.

Los resultados obtenidos para las diferentes unidades geológicas se indican en el cuadro 25.

Cuadro 25: Resultados Límites de Attemberg, muestras suelo cuenca río Arío.

Muestra No ²	Unidad Litológica	Límites de Attemberg
RA-1 ²	Aluvión	Limos arenosos, sin plasticidad
RA-8 ²	Aluvión	Limo elastico con arena (MI) de plasticidad intermedia.
RA-10 ²	Aluvión	Arcilla gruesa (CI) de plasticidad intermedia.
RA-15 ²	Aluvión	Limo elastico (MI) de plasticidad intermedia.
RA-3 ²	Coluvio/Aluvial	Arcilla delgada arenosa con grava (CL)
RA-5 ²	Form. Cóbano	Limo elastico (MH) de alta plasticidad
RA-9 ²	Form. Cóbano	Limo elastico (MV) de muy alta plasticidad.
RA-11 ²	Form. Cóbano	Limo elastico (MH) de alta plasticidad.
RA-14 ²	Form. Cóbano	Arcilla gruesa (CI) de plasticidad intermedia.
RA-17 ²	Form. Cóbano	Arcilla gruesa (CI) de plasticidad intermedia.
RA-7 ²	Form. Curú	Limo elastico (MI) de plasticidad intermedia
RA-12 ²	Form. Curú	Arcilla delgada (CI) de plasticidad intermedia.
RA-4 ²	Form. Montezuma	Limo elastico (MH) de alta plasticidad
RA-16 ²	Form. Montezuma	Limo elastico (MI) de plasticidad intermedia.
RA-2 ²	Complejo Nicoya	Arcilla delgada con arena (CL) de baja plasticidad.
RA-6 ²	Form. río Arío	Limo elastico (MI) de plasticidad intermedia
RA-13 ²	Form. Piedras Blancas	Arcilla delgada (CL) de baja plasticidad.

Fuente: Análisis de laboratorio.

Con los resultados obtenidos, para las diferentes unidades geológicas presentes en la zona de estudio, se procede a la realización del mapa de suelos de la cuenca en estudio (Ver figura 33).

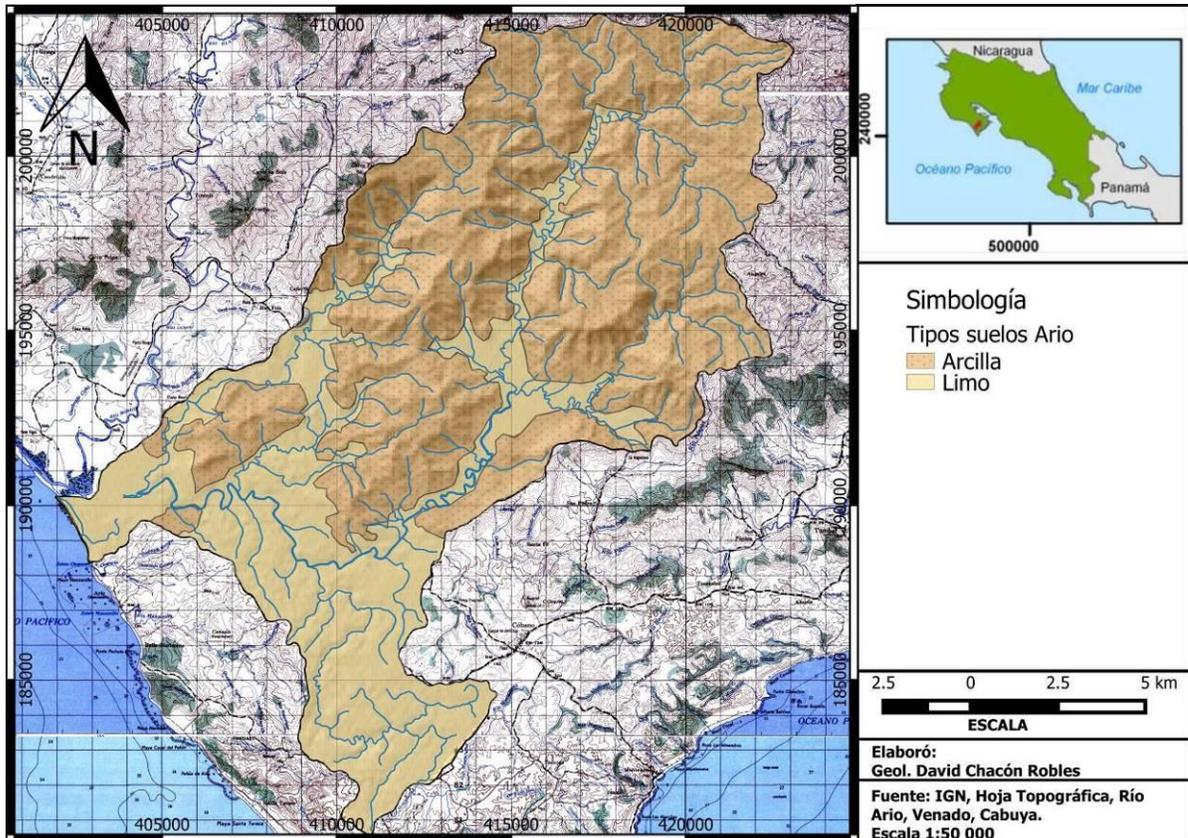


Figura 33: Clasificación suelos Cuenca río Arío.

3.3. Pruebas de Infiltración

Como parte de la determinación de la recarga potencial del acuífero, es necesario conocer la velocidad de infiltración “I” para cada una de las diferentes formaciones que se encuentran en la cuenca de estudio.

Las pruebas de infiltración, tienen como objetivo determinar la velocidad con que infiltra el agua al suelo a través de los poros por unidad de tiempo, es la relación entre la capa de agua que infiltra y el tiempo que dura en hacerlo, expresándose en mm/día.

Debido a que se desea conocer la velocidad de infiltración en las unidades litológicas presentes en la cuenca del río Arío, el Instituto Costarricense de Acueductos y alcantarillados (AyA), realizó un total de 74 pruebas de infiltración en la zona de estudio (ver figura 34), las mismas se realizaron

mediante del método del doble anillo, la cantidad de pruebas se distribuyó según la extensión de la formación.

La cantidad de pruebas de infiltración realizadas por formación en la zona de estudio y los resultados de velocidad de infiltración obtenidos, se indica en el cuadro 26, en dicho cuadro se logra observar que las formaciones con mayor cantidad de pruebas de infiltración realizadas corresponde a la formación Montezuma y los aluviones, con un total de 9 y 19 pruebas respectivamente, las formaciones con menores cantidad de pruebas corresponden a la formación Piedras Blancas y Calizas Arío, con un total de 2 y 1, respectivamente.

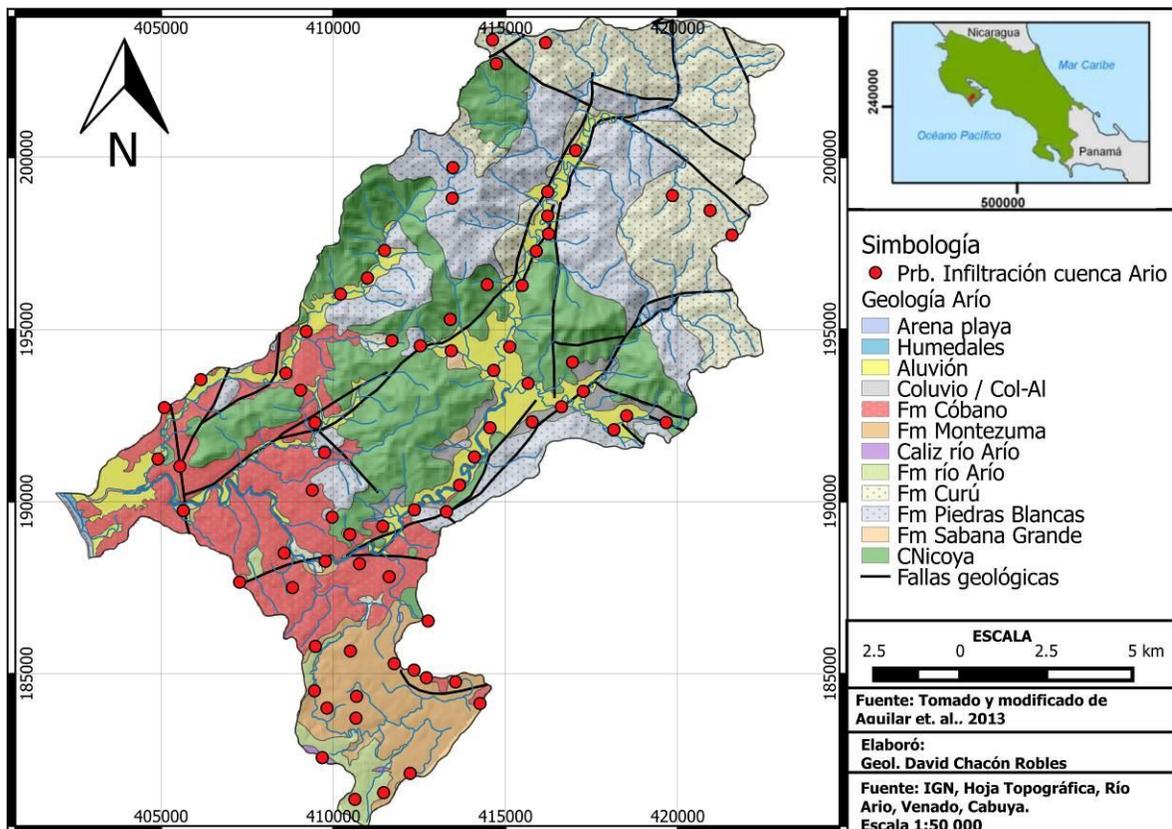


Figura 34: Ubicación pruebas de infiltración Cuenca río Arío.

Para tener datos más representativos, se realizó un análisis estadístico de los valores de infiltración para una misma unidad geológica, eliminando los valores que están fuera de una distribución normal para que no causen distorsión en la obtención del promedio aritmético.

Cuadro 26: Infiltración promedio para cada una de las formaciones presentes en la cuenca Arío.

Unidad Litológica	Numero de pruebas	Valor Promedio (cm/s)	Valor Promedio (mm/día)	Valor Promedio (m/día)
Aluvión	19	0,00093	800,43	0,80
Fm. Cóbano	9	0,00182	1569,98	1,57
Fm. Arío	2	0,00234	2018,74	2,02
Fm. Curú	4	0,00259	2235,60	2,24
Fm Montezuma	8	0,00067	578,99	0,58
Complejo de Nicoya	6	0,00095	821,09	0,82
Coluvio/Aluvial	2	0,00038	330,91	0,33
Form. Piedras	6	0,00078	674,78	0,67
Calizas río Arío	1	0,00010	83,46	0,08

Fuente: pruebas campo AyA.

Los valores promedios de infiltración en mm/día obtenidos para cada una de las diferentes formaciones, serán las que se utilicen para la determinación del balance hídrico de suelos.

3.4 Uso del Suelo:

Respecto al uso de suelos en la cuenca del río Arío, se utiliza la información generada por el geógrafo Ricardo Orozco en su práctica profesional, en la cual determino el uso de suelo que presenta la zona de interés.

Orozco (2011) realiza la comparación del uso del suelo en la zona de interés para el año 2005 y el 2011, como resultado obtenido indica que en el transcurso de este periodo no hay cambios en los usos de suelo para la zona de estudio, para el año 2011 indica variedad de usos de suelo en la cuenca del río Arío, algunos de los usos definidos presenta gran extensión dentro de la cuenca.

Para el caso de la determinación del balance hídrico de suelos, se homogenizo los usos de suelos definidos por Orozco, con la intención de que los usos se ajusten a los usos definidos en la metodología.

Para la realización del mapa de uso de suelo definitivo, se realizó consultas al geógrafo Orozco, con la intención de homogenizar de una forma más clara los usos presenten en la zona.

Además, al verificarse en campo los usos de suelo según mapa elaborado, se determina que para la zona de interés el uso de suelos corresponde según se observa en la figura 35.

Para el uso de suelo bosque, se asigna un valor de índice de 0,20 y para el caso del pasto al considerar mayor al 75% se asigna un valor de 0,21.

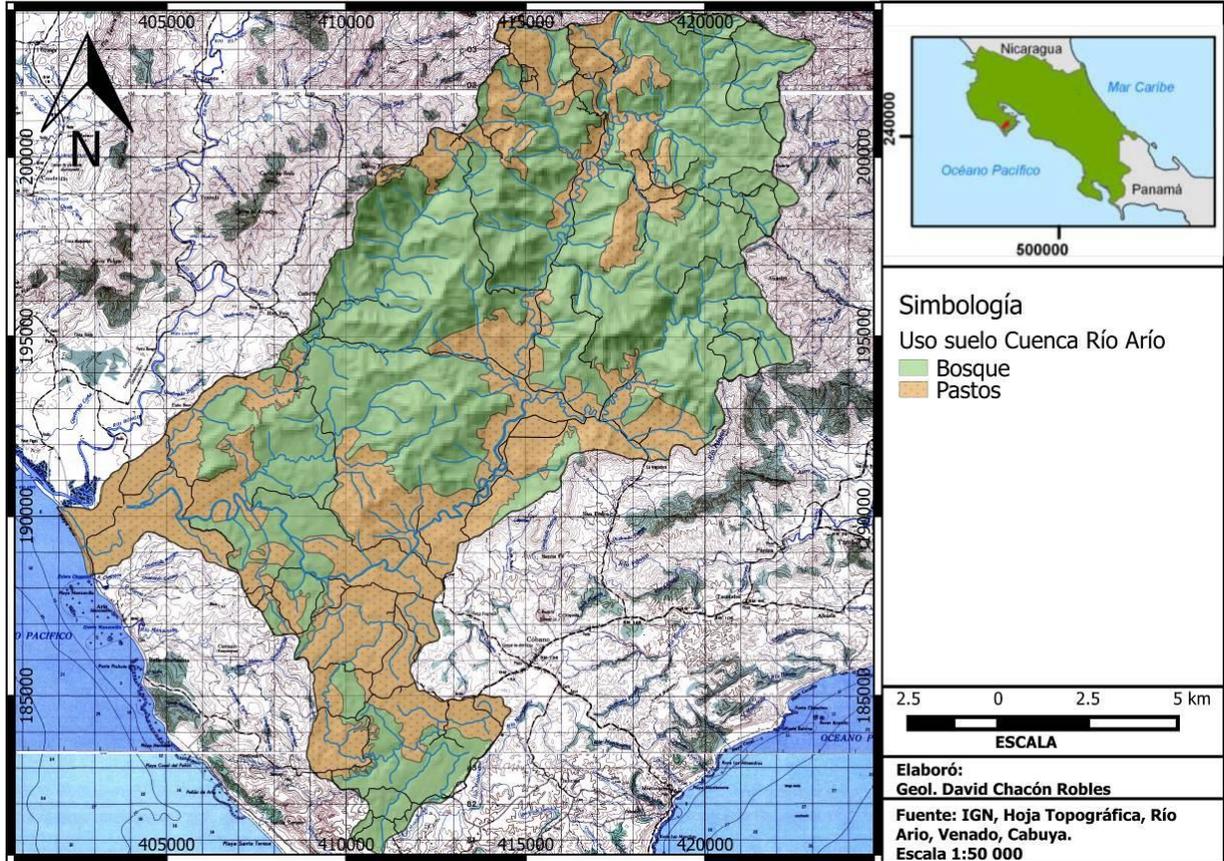


Figura 35: Uso de suelos cuenca Río Arío.

3.5 Mapa de pendientes:

Con la información de las curvas de nivel, se procede a la realización de un modelo de elevación de la cuenca de interés, lo cual nos permite realizar la el mapa de pendientes, el cual es necesario para la realización del balance hídrico de suelos.

Según los resultados obtenidos, la cuenca del río Arío presenta pendiente: fuerte, promedio, plana, plana-algo plana y muy plana, como se observa en la figura 36, las pendientes predominantes corresponden a la fuerte y la promedio.

En la figura de pendientes, se indican los valores de índice Kp a utilizar en el balance hídrico de suelos.

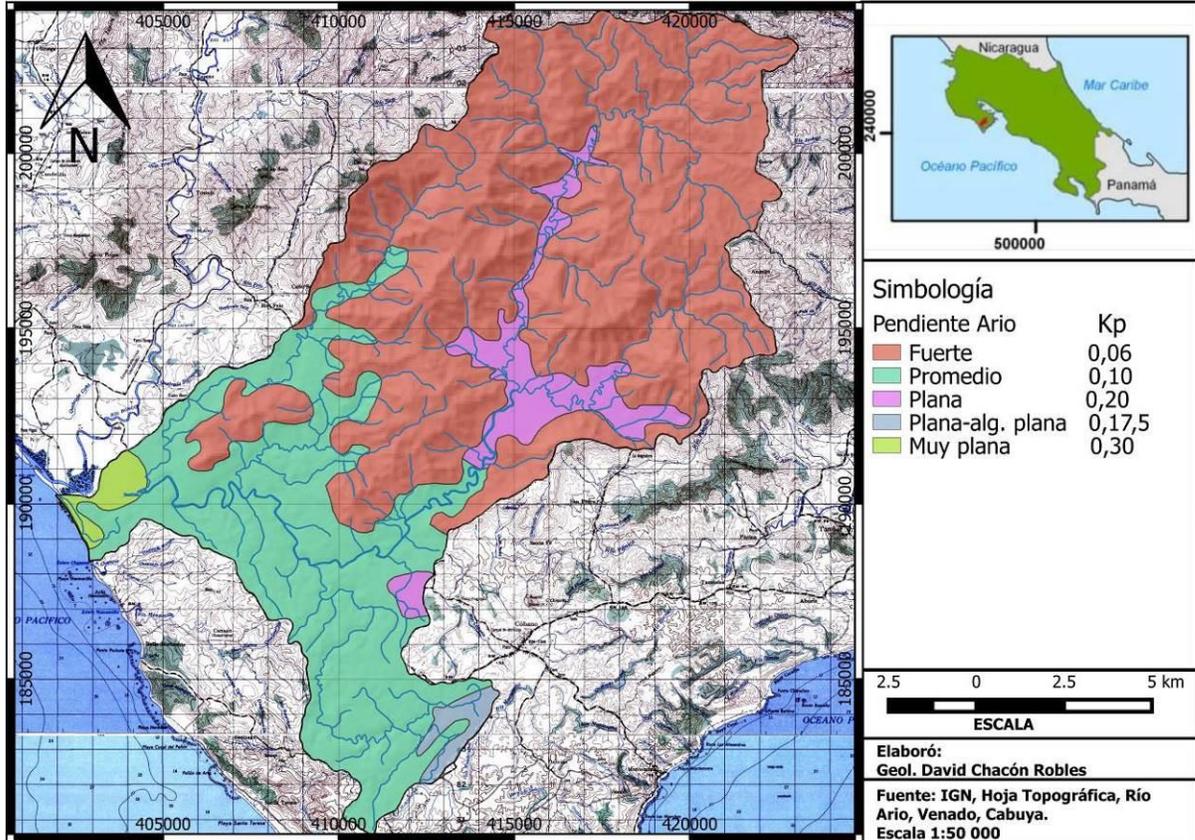


Figura 36: Clasificación pendientes por porcentaje, Cuenca río Ario.

3.6. Recarga potencial del Acuífero:

Determinación Coeficiente de infiltración:

Para la obtención del coeficiente de infiltración se emplea la metodología propuesta de Schosinky & Losilla, 2000, la cual se indica a continuación:

$$C_i = K_p + K_v + K_{fc}$$

donde:

C_i = Coeficiente de infiltración.

K_v = Fracción que infiltra por efecto de cobertura.

Los índices a asignar según la cobertura de suelo presente se indican en el cuadro 27.

Cuadro 27: Componentes del coeficiente de infiltración por pendiente.

Cobertura vegetal:	Kv
Cobertura con zacate menos del 50%	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Cobertura con pastizal	0,18
Bosques	0,20
Cobertura con zacate más del 75%	0,21

Fuente: Schosinsky & Losilla, 2000

La asignación de los índices por cobertura vegetal, se obtienen utilizando el mapa de uso de suelo anteriormente elaborado.

Kp = Fracción que infiltra por efecto de pendiente.

Los índices a asignar según la cobertura de suelo presente se indican en el cuadro 28.

Cuadro 28: Componentes del coeficiente de infiltración por vegetación.

Pendiente	Pendiente	Kp
Muy plana	0,02%-0,06%	0,3
Plana	0,3%-0,4%	0,2
Algo plana	1%-2%	0,15
Promedio	2%-7%	0,10
Fuerte	mayor de 7%	0,06

Fuente: Schosinsky & Losilla, 2000

La asignación de los índices por pendiente, se obtienen utilizando el mapa de uso de suelo anteriormente elaborado.

Kfc = Fracción que infiltra por textura del suelo, este coeficiente se obtiene al aplicar la siguiente ecuación 2.

$$K_{fc} = 0,267 \ln (f_c) - 0,000154f_c - 0,723$$

donde:

Kfc [adimensional] = Coeficiente de infiltración (fracción que infiltra por textura del suelo);

fc [mm/día] = Infiltración básica del suelo.

Los resultados de K_v , K_p y K_{fc} , para las diferentes unidades geológicas presentes en la cuenca del río Arío, y que se utilizarán para la obtención del balance hídrico de suelos, se indican en el cuadro 29.

Se utiliza dos valores diferentes de K_v , ya que las diferentes unidades geológicas presentan tantos usos de suelo de pastos como de bosque.

Cuadro 29: Valores de f_c , K_v , K_p y profundidad de raíces a utilizar en el balance de suelos.

Unidad Geológica	f_c (mm/día)	K_v	K_p	Prof. Raíces(m)
Unidad Col/Alv	330,91	0,20	0,06	0,50
Unidad Col/Alv	330,91	0,20	0,20	0,50
Unidad Col/Alv	330,91	0,21	0,06	1,00
Unidad Col/Alv	330,91	0,21	0,10	1,00
Unidad Col/Alv	330,91	0,21	0,20	1,00
Unidad Aluvión	800,43	0,20	0,06	1,00
Unidad Aluvión	800,43	0,20	0,20	1,00
Unidad Aluvión	800,43	0,20	0,10	1,00
Unidad Aluvión	800,43	0,21	0,06	0,50
Unidad Aluvión	800,43	0,21	0,30	0,50
Unidad Aluvión	800,43	0,21	0,20	0,50
Unidad Aluvión	800,43	0,21	0,10	0,50
Form. Cobano	1569,98	0,20	0,06	1,50
Form. Cóbano	1569,98	0,20	0,10	1,50
Form. Cóbano	1569,98	0,21	0,15	0,50
Form. Cóbano	1569,98	0,21	0,30	0,50
Form. Cóbano	1569,98	0,21	0,06	0,50
Form. Cóbano	1569,98	0,21	0,20	0,50
Form. Cóbano	1569,98	0,21	0,10	0,50
Form. Curú	2235,60	0,20	0,06	2,00
Form. Curú	2235,60	0,20	0,20	2,00
Form. Curú	2235,60	0,20	0,10	2,00
Form. Curú	2235,60	0,21	0,06	0,60
Form. Curú	2235,60	0,21	0,20	0,60
Form. Curú	2235,60	0,21	0,10	0,60
Form. Montezuma	578,99	0,20	0,18	1,00
Form. Montezuma	578,99	0,20	0,10	1,00
Form. Montezuma	578,99	0,21	0,20	0,50
Form. Montezuma	578,99	0,21	0,18	0,50
Form. Montezuma	578,99	0,21	0,10	0,50
Form. Pied. Blanc.	674,78	0,20	0,06	1,50
Form. Pied. Blanc.	674,78	0,20	0,20	1,50
Form. Pied. Blanc.	674,78	0,20	0,10	1,50
Form. Pied. Blanc.	674,78	0,21	0,06	0,60
Form. Pied. Blanc.	674,78	0,21	0,20	0,60
Form. Pied. Blanc.	674,78	0,21	0,10	0,60
Form. río Arío	2018,74	0,20	0,10	1,00
Form. río Arío	2018,74	0,21	0,10	0,50
Complejo Nicoya	821,09	0,21	0,06	2,50
Complejo Nicoya	821,09	0,21	0,20	2,50
Complejo Nicoya	821,09	0,21	0,10	2,50
Complejo Nicoya	821,09	0,20	0,06	0,60
Complejo Nicoya	821,09	0,20	0,20	0,60
Complejo Nicoya	821,09	0,20	0,10	0,60

Fuente: Elaboración propia/ datos de campo.

Parámetros de Capacidad de campo (CC), Punto de Marchitez (PM), Densidad Aparente (DA).

Es importante recordar que para los cálculos del balance hídrico, se utiliza la densidad aparente de las muestras de suelo obtenida en laboratorio, para cambiar el punto de marchitez (PM) y capacidad de campo (CC) de porcentaje de peso de suelo seco a porcentaje por volumen.

Los valores de capacidad de campo (CC), punto de marchitez (PM) y densidad aparente (DA) utilizados en el balance hídrico de suelos se muestran en el cuadro 30, los rangos que presentan las muestras de suelo respecto a estos parámetros son poco amplios, por lo que se tomó el promedio de los mismos.

Para convertir los valores de capacidad de campo y punto de marchitez de mm a porcentaje, se utiliza la siguiente fórmula: % por volumen = % por peso de suelo seco x densidad aparente (Schosinsky, 2006).

Para la obtención de los valores para cada unidad geológica presente en la zona de interés, se realizó un promedio para todos los resultados obtenidos.

Posteriormente, los datos obtenidos se utilizarán en la obtención de la recarga por unidad geológica.

El cuadro 30, indica los valores obtenidos para cada una de las diferentes unidades geológicas de la cuenca en estudio:

Cuadro 30: Valores de capacidad de campo, punto de marchitez y densidad aparente a utilizar en el balance de suelos.

Unidad Geológica	CC %	PM %	D. A. (g cm-3)
Aluvión	41,0	20,0	0,99
Coluvio/Aluvial	35,0	32,0	1,47
Form. Cóbano	44,4	36,4	1,00
Form. Curú	40,5	27,0	1,07
Form. Montezuma	43,0	32,0	1,07
Complejo Nicoya	17,0	10,0	1,59
Form. río Arío	59,0	54,0	0,99
Form. Piedras Blancas	36,0	23,0	0,82

Fuente: Análisis de laboratorio.

Como se logra observar, las unidades geológicas presentan capacidades de campo principalmente entre los 40 - 45% y puntos de marchitez de entre 20 - 30%.

Recarga neta potencial al acuífero (Rp).

Para el cálculo de la recarga potencial se utilizó la hoja electrónica diseñada por Schosinsky (2006), aplicando el programa de dicha hoja para cada una de las unidades litológicas.

Para la cuenca de interés, se realizó un total de 44 balances hídricos, esto debido a la cantidad de unidades geológicas presentes en la cuenca, y cada una de las diversas unidades presenta variedad de pendientes para los usos de suelos.

Volumen de recarga potencial anual.

Se desea conocer el volumen de agua que recarga al acuífero, el cual está dado por la ecuación:

$$V = R_p * A$$

donde:

V: Volumen de recarga en m³/año.

R_p: recarga neta potencial al acuífero en m/año.

A: Área donde se genera la recarga potencial en m² (Schosinsky, 2006)

Los resultados de recarga potencial del acuífero y volumen de recarga potencial anual, se indican en el cuadro 31.

Para la determinación de la recarga potencial, cada uno de los diferentes balances corresponden a la suma de áreas pequeñas que cumplen las mismas características o condición, el balance se realiza a la suma de cada una de las pequeñas áreas definidas.

Así mismos, en el mapa de polígonos definido para el balance, se observa el total de polígonos definidos para toda la cuenca del río Arío, teniendo presente que para la Formación Montezuma y Calizas Arío, no se realizó balance ya que no se obtuvieron muestras de suelo.

Las diferentes áreas definidas para el balance hídrico y el mapa de polígonos, se muestran en el anexo 6.

Cuadro 31: Recarga potencial total y para cada una de las formaciones presentes en la cuenca Arío.

Unidad Geológica	Recarga (mm/año)	Recarga (m/año)	Area (m2)	Vol (m3/año)	Vol (l/año)	Vol (l/s)
Unidad Col/Alv	527,11	0,53	541302	285325,6972	285325697	9,04761851
Unidad Col/Alv	527,11	0,53	487598	257017,7818	257017782	8,1499804
Unidad Col/Alv	354,44	0,35	910991	322891,65	322891650	10,2388271
Unidad Col/Alv	354,44	0,35	352615	124980,8606	124980861	3,96311709
Unidad Col/Alv	354,44	0,35	1537878	545085,4783	545085478	17,2845471
Unidad Aluvión	250,99	0,25	1213720	304631,5828	304631583	9,65980412
Unidad Aluvión	250,99	0,25	1544038	387538,0976	387538098	12,2887525
Unidad Aluvión	250,99	0,25	3123657	784006,6704	784006670	24,8606884
Unidad Aluvión	487,7	0,49	1177145	574093,6165	574093617	18,2043892
Unidad Aluvión	487,7	0,49	1659126	809155,7502	809155750	25,6581605
Unidad Aluvión	487,7	0,49	7522933	3668934,424	3668934424	116,341147
Unidad Aluvión	487,7	0,49	4368182	2130362,361	2130362361	67,5533473
Form. Cóbano	304,14	0,30	472044	143567,4622	143567462	4,55249436
Form. Cóbano	304,14	0,30	12002040	3650300,446	3650300446	115,750268
Form. Cóbano	400,93	0,40	165156	66215,99508	66215995,1	2,09969543
Form. Cóbano	400,93	0,40	379555	152174,9862	152174986	4,82543716
Form. Cóbano	400,93	0,40	575176	230605,3137	230605314	7,31244653
Form. Cóbano	400,93	0,40	733152	293942,6314	293942631	9,3208597
Form. Cóbano	400,93	0,40	17666980	7083222,291	7083222291	224,607505
Form. Curú	207,13	0,21	31601878	6545696,99	6545696990	207,56269
Form. Curú	207,13	0,21	183	37,90479	37904,79	0,00120195
Form. Curú	207,13	0,21	453927	94021,89951	94021899,5	2,98141488
Form. Curú	446,12	0,45	6363461	2838867,221	2838867221	90,0198891
Form. Curú	446,12	0,45	25098	11196,71976	11196719,8	0,35504565
Form. Curú	446,12	0,45	256236	114312,0043	114312004	3,62480988
Form. Montezuma	305,23	0,31	1414237	431667,5595	431667560	13,6880885
Form. Montezuma	305,23	0,31	5104362	1558004,413	1558004413	49,4039959
Form. Montezuma	496,46	0,50	150504	74719,21584	74719215,8	2,36933079
Form. Montezuma	496,46	0,50	856280	425108,7688	425108769	13,4801106
Form. Montezuma	496,46	0,50	8297484	4119368,907	4119368907	130,624331
Form. Pied. Blanc.	282,10	0,28	28337253	7993939,071	7993939071	253,486145
Form. Pied. Blanc.	282,10	0,28	165039	46557,5019	46557501,9	1,4763287
Form. Pied. Blanc.	282,10	0,28	837258	236190,4818	236190482	7,48955105
Form. Pied. Blanc.	544,28	0,54	11582065	6303886,338	6303886338	199,894924
Form. Pied. Blanc.	544,28	0,54	230197	125291,6232	125291623	3,97297131
Form. Pied. Blanc.	544,28	0,54	708967	385876,5588	385876559	12,2360654
Form. río Arío	346,81	0,35	2538333	880319,2677	880319268	27,9147409
Form. río Arío	379,29	0,38	1613976	612164,957	612164957	19,4116234
Complejo Nicoya	212,02	0,21	36771640	7796323,113	7796323113	247,219784
Complejo Nicoya	212,02	0,21	100879	21388,36558	21388365,6	0,67822062
Complejo Nicoya	212,02	0,21	1328213	281607,7203	281607720	8,92972223
Complejo Nicoya	556,4	0,56	9111430	5069599,652	5069599652	160,75595
Complejo Nicoya	556,4	0,56	749720	417144,208	417144208	13,2275561
Complejo Nicoya	556,4	0,56	1560509	868267,2076	868267208	27,5325725
Total						2190,06

Fuente: Análisis propio.

Se determina que las unidades geológicas con mayor recarga, corresponde a la Formación Piedras Blancas y al complejo de Nicoya, con recargas de 478 l/s y 458 l/s respectivamente, correspondiendo a un porcentaje de 21,8% y 20,90 %.

Para el caso del Complejo de Nicoya, la Formación Piedras Blancas, así como La formación Curu, donde la pendiente es fuerte y el uso del suelo es bosque, se obtiene volúmenes de recargas mayores a los 200 l/s, las mismas en áreas alrededor de los 30 Km².

Para esas mismas unidades, para pendientes fuertes con uso de suelo pastoril, se obtienen volúmenes de recarga entre los 100 l/s y 200 l/s, pero en este caso las áreas de influencia se encuentre entre los 6 y 12 Km².

En este caso se determina una marcada influencia de las profundidades de las raíces, ya que entre menor es la profundidad mayor el volumen de recarga, independientemente del área, ya que como se observa aunque las áreas de pasto son pequeñas, las recargas pueden ser similares a áreas mayores donde se presenta bosque.

Referente a las zonas pendiente plana y promedio, la formación Cóbano y Aluvión presentan volúmenes de recargas en el rango de los 130 -200 l/s, para uso pastoril, en un rango de área entre los 10 y 17 Km².

Para el uso del suelo de bosques en estas unidades, los volúmenes de recarga son bajas, únicamente la formación Cóbano, que presenta un área de bosque de 12 Km², se determinan volúmenes de recarga de 115 l/s.

En el cuadro 32 se indica los resultados de recarga para cada unidad, tanto en volumen de recarga en l/s como el porcentaje correspondiente.

Asimismo en el gráfico 4, se representa las porcentajes de recarga para cada una de las unidades geológicas presentes en la en la zona de estudio.

Cuadro 32: Porcentaje de recarga por unidad geológica, cuenca río Arío.

Unidad geológica	Recarga (l/s)	% Recarga	Km2
Coluvio_Aluvial	48,68	2,20%	3,83
Aluvión	274,57	12,50%	20,6
Form. Cóbano	366,37	17,70%	31,9
Form. Curú	304,55	13,88%	38,7
Form. Montezuma	209,57	9,50%	15,8
Piedras Blancas	478,56	21,80%	41,05
Form. río Arío	47,33	2,15%	4,1
Complejo Nicoya	458,34	20,90%	49,02

Fuente: Análisis propio.

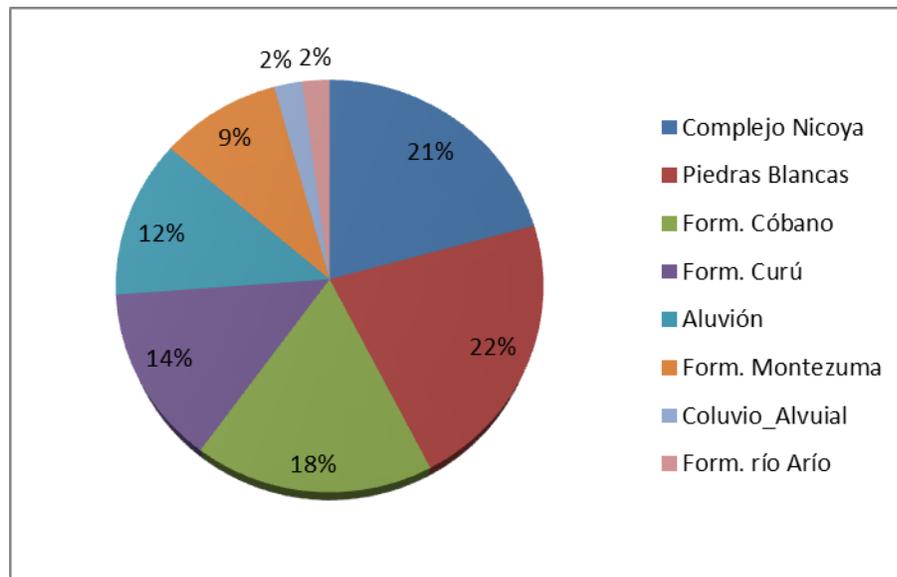


Gráfico 4: Recarga en porcentaje por unidad geológica.

El volumen de recarga obtenida mediante el balance hídrico de suelos es de 2190 l/s, lo cual corresponde a 16% del total de precipitación (13 200 l/s), registrada en la estación meteorología Paquera.

Caudal de Extracción:

Como parte de conocer el volumen de agua disponible en la cuenca del río Arío, es necesario el conocer la cantidad de agua que es extraída del acuífero para ser utilizada en diversos usos.

Para conocer dicha información, se procedió a buscar la información de caudales presenten en los informes de perforación, así como obtener información de los caudales concesionados en la Dirección de Agua (MINAE).

Se logró determinar que gran cantidad de pozos que se encuentran en la cuenca del río Arío no indican la información de caudal de explotación, muchos de ellos, no presentan una concesión, donde se indique la información sobre caudal de explotación.

Así mismo, los 35 expedientes de concesiones presentes en la dirección de aguas, únicamente 10 presentan información de caudales de explotación, estos expedientes comprenden concesiones de pozos, nacientes y quebradas.

Respecto a los pozos presentes en la base de datos de pozos y nacientes del SENARA, hay un total de 22 pozos registrados, únicamente 15 pozos presentan información sobre caudal.

No es posible determinar la información de caudal de pozos excavados, ya que la mayoría son utilizados en ciertas horas del día e incluso a ciertos meses del año.

Respecto a las nacientes, no fue posible realizar la medición de caudales, pero la mayoría al no ser utilizadas, aporta su caudal a los diversos ríos y quebradas, con lo cual su aporte se incluye en la medición del cauce del río Arío.

Basado en lo anterior, se determina que el caudal total utilizado para la cuenca del río Arío corresponde a 68,85 l/s, a lo cual hay que sumar el valor caudal de pozos excavados, el cual si se estima un caudal de 0,05 l/s, corresponde a un total de 1,15 l/s, con lo cual se estima un valor de extracción total de 70 l/s.

Disponibilidad de Recurso hídrico

Según datos de caudales registrados y estimados, se determina un caudal de explotación de 70 l/s, al ser la recarga de 2190 l/s hay un disponible de 2120 l/s, sin embargo para tener certeza de rendimiento sostenible del acuífero debe desarrollarse otros estudios entre ellos: caudal ambiental o ecológico, estudios de consumo y retorno.

CAPITULO 4: VULNERABILIDAD INTRINSECA A LA CONTAMINACIÓN

Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación

La vulnerabilidad a la contaminación del acuífero se considera como aquellas características intrínsecas de los estratos que separan la zona saturada del acuífero de la superficie del terreno lo cual determina su sensibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante aplicada en la superficie (Foster, 1987).

Para este estudio se utilizó el método GOD para el análisis de vulnerabilidad intrínseca del acuífero a la contaminación ya que este método utiliza la menor cantidad de variables, además es el método más utilizado en Costa Rica.

El índice final de vulnerabilidad GOD es el producto de los índices obtenidos para cada uno de los parámetros (Foster et al., 2003).

Toda la información de pozos, piezómetros, sondeos geofísicos, fue analizado respecto a cada uno de los parámetros que define el cálculo del índice GOD, determinando un índice de vulnerabilidad a la contaminación para cada punto.

Para la generación de los mapas que corresponden a los parámetros G.O. se utilizan las descripciones presentes en los informes de perforación de los pozos, así como los diversos perfiles hidrogeológicos generados.

Para el caso del parámetro D, además de la información de pozos y perfiles, se suma las mediciones de niveles realizadas en la zona, esto como un complemento de información que fortalezca la generación del mapa para este parámetro.

La realización de los mapas de para cada parámetro G.O.D. así como el mapa de vulnerabilidad GOD, se realizó principalmente en dos unidades geológicas, que como se observó en la caracterización hidrogeológica, las misma presentan acuíferos y la cantidad de información presente permite asignar valores a los diferentes parámetros.

Las áreas donde se determinó la vulnerabilidad GOD, corresponden geológicamente a la unidad aluvión y la Formación Montezuma, las otras zonas de la cuenca ano cuentan con la suficiente información para la determinación del valor de vulnerabilidad.

Grado de confinamiento hidráulico (G)

Respecto al parámetro G, el índice correspondiente se determina basados en la información de informes de perforación, geofísica y los perfiles realizados.

Se determina que el acuífero presente en la formación Montezuma, presenta una condición de libre cubierto, debido a que presenta capas de pequeños espesor de arcillas y limos, que protegen el acuífero, con lo cual el valor asignado a este parámetro corresponde a 0,6.

El acuífero presente en la unidad aluvial se considera libre, aunque se observó la existencia de una capa de limos con espesores máximos de 1 m, el mismo no se presenta constante en todo el área donde se presenta esta unidad, además los promedios de pruebas de infiltración en esta unidad presentan resultados de 0,8 m/día con lo cual un contaminante llega rápidamente al acuífero, asimismo las clasificación de suelos indica la presencia de limos, lo cual no ejerce una protección sobre el acuífero, basado en estas condiciones se asignó un valor estimado de 0,9 al parámetro G.

La condición de grado de confinamiento determinada para el acuífero presente en el aluvión y la formación Montezuma, corresponde a libre y libre cubierto, respectivamente.

La representación de los valores de grado de confinamiento para las unidades geológicas de interés, se representan en la figura 37.

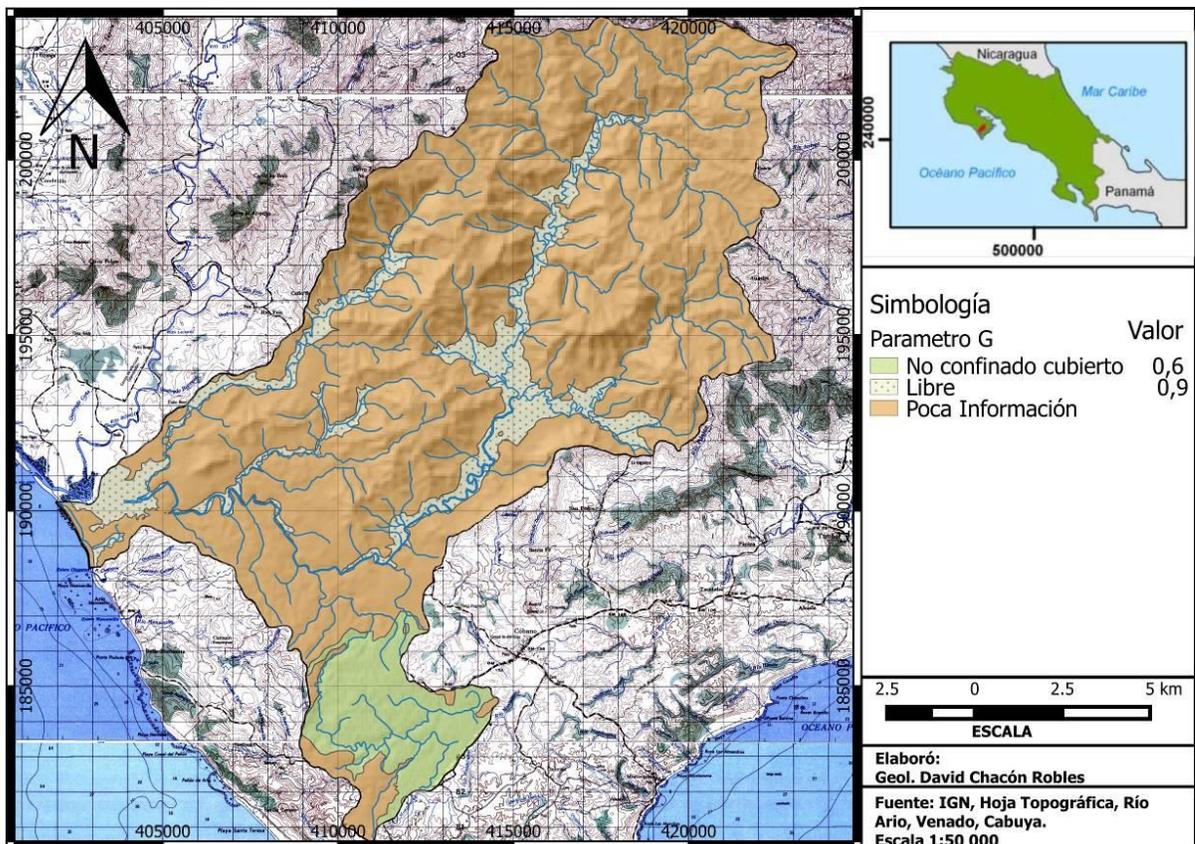


Figura 37: Parámetro G de la metodología G.OD. Cuenca río Ario.

Ocurrencia del sustrato (O)

Respecto al parámetro O, se determina según la revisión de la diferente información generada para los acuíferos definidos, presencia de material sedimentario.

Para el acuífero que se encuentra en la formación Montezuma, se determina inicialmente capas de arcillas, limos y areniscas, como no se encuentra un valor que se ajuste a las litologías en la metodología, se ajusta a un valor que permita abarcar los tres tipos de materiales, con los cual se asigna un valor de 0,6.

Para el caso de los pozos presentes en la unidad aluvi3n, la informaci3n generada indican la presencia únicamente de capas de arenas, con lo cual al parámetros O, para este acuífero se le asigna un valor de 0,7. Aunque las muestras de suelo en la zona clasifican el suelo como limos, los piez3metros perforados describen presencia de aluvi3n así como la geofísica, se determina en campo que la capa de limo presenta un espesor de máximo 1 m.

La representaci3n de los valores asignados al parámetro de ocurrencia del sustrato, para los dos acuíferos definidos en la cuenca de interés, se indican en la figura 38.

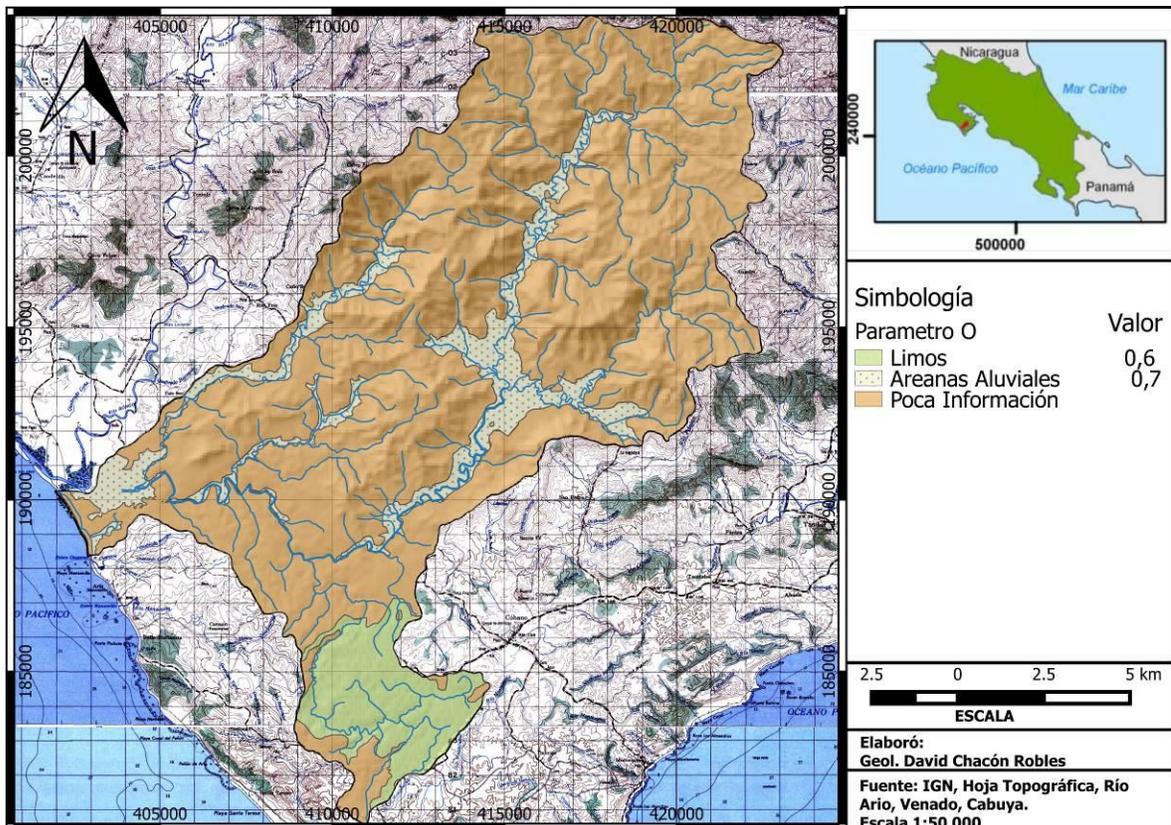


Figura 38: Parámetro O de la metodología G.OD. Cuenca río Arío.

Distancia al nivel (D)

Referente al parámetro de distancia al nivel freático (parámetro D), el análisis de la información generada indica que los niveles se encuentran en un rango de 5 -20 metros de profundidad con respecto al nivel de suelo.

Referente al acuífero presente en la formación Montezuma, se determina que los niveles se encuentran a una profundidad de alrededor de los 20 m, con lo cual se asigna un valor al índice D igual a 0,8.

Según la diversa información generada, para la unidad aluvial la mayoría de las mediciones indican profundidades alrededor de los 5 m.

Al encontrarse las variaciones dentro de un rango definido, el cual corresponde a 5-20 m, se procede a asignar al índice D un valor de 0,8.

Para el caso de este parámetro, se determina que las dos unidades geológicas que presentan buena caracterización hidrogeológica, los niveles freáticos se encuentran en un mismo rango (5-20 m), con lo cual el valor asignado al parámetro D corresponde a 0,8.

Los valores asignados al parámetro D, se representan en la figura 39.

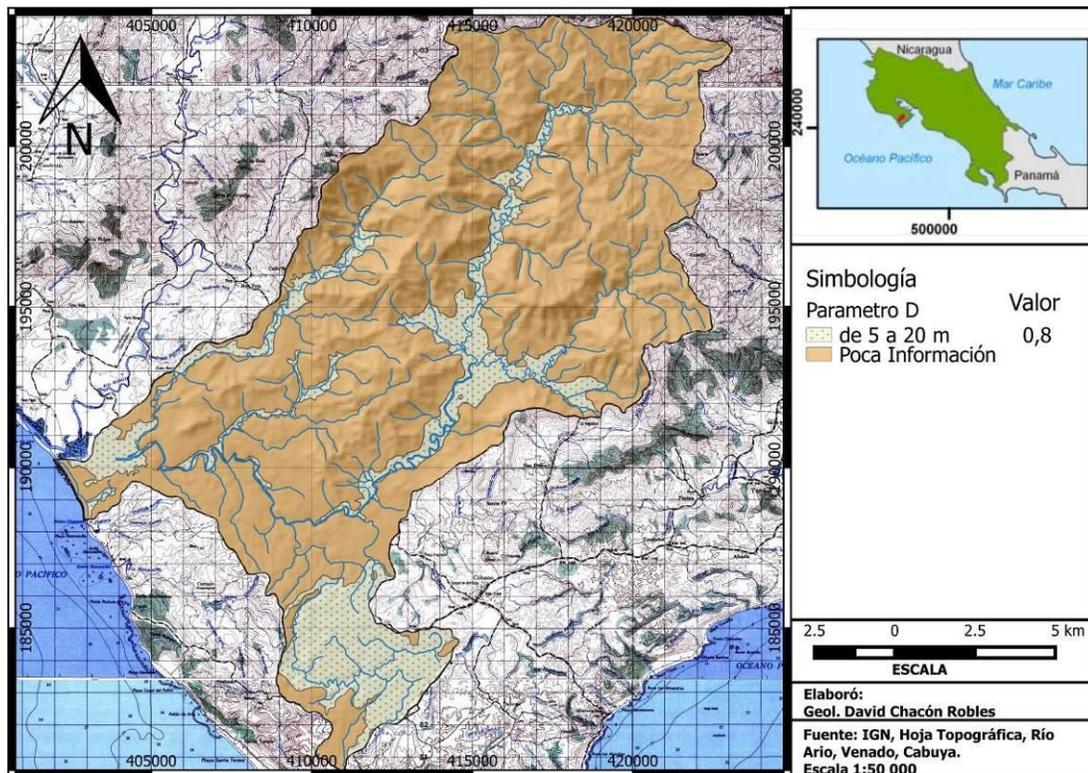


Figura 39: Parámetro D de la metodología G.OD. Cuenca río Arío.

Determinación de la vulnerabilidad G.O.D. para las áreas de interés.

Por la falta de información de pozos, piezómetros y sondeos geofísicos, no es posible determinar la vulnerabilidad por el método GOD, para toda la cuenca.

Se realiza la determinación de la vulnerabilidad a la contaminación G.O.D. para las unidades que poseen suficiente información hidrogeológica para su descripción, misma que corresponden a la unidad aluvión y la Formación Montezuma.

Para el caso del acuífero presente en la unidad Montezuma, para el parámetro de grado de confinamientos (G), al encontrarse libre cubierto se asignó un valor de 0,6, al presentar arcillas y arenas se asigna un valor de 0,6 a la ocurrencia del sustrato (O), para el parámetro D, se asigna un valor de 0,8 con lo cual se obtiene un valor de 0,288, determinándose una vulnerabilidad baja intrínseca a la contaminación.

Para el caso del acuífero definido en la zona del aluvión, al determinarse un valor de 0,9 para el parámetro (G), 0,7 para el parámetro de (O) y 0,8 para el parámetro (D), se obtiene como resultado una vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de 0,504 la cual se clasifica como alta.

La vulnerabilidad intrínseca a la contaminación obtenida para las dos unidades acuíferas definidas en la cuenca de interés, se indican en la figura 40.

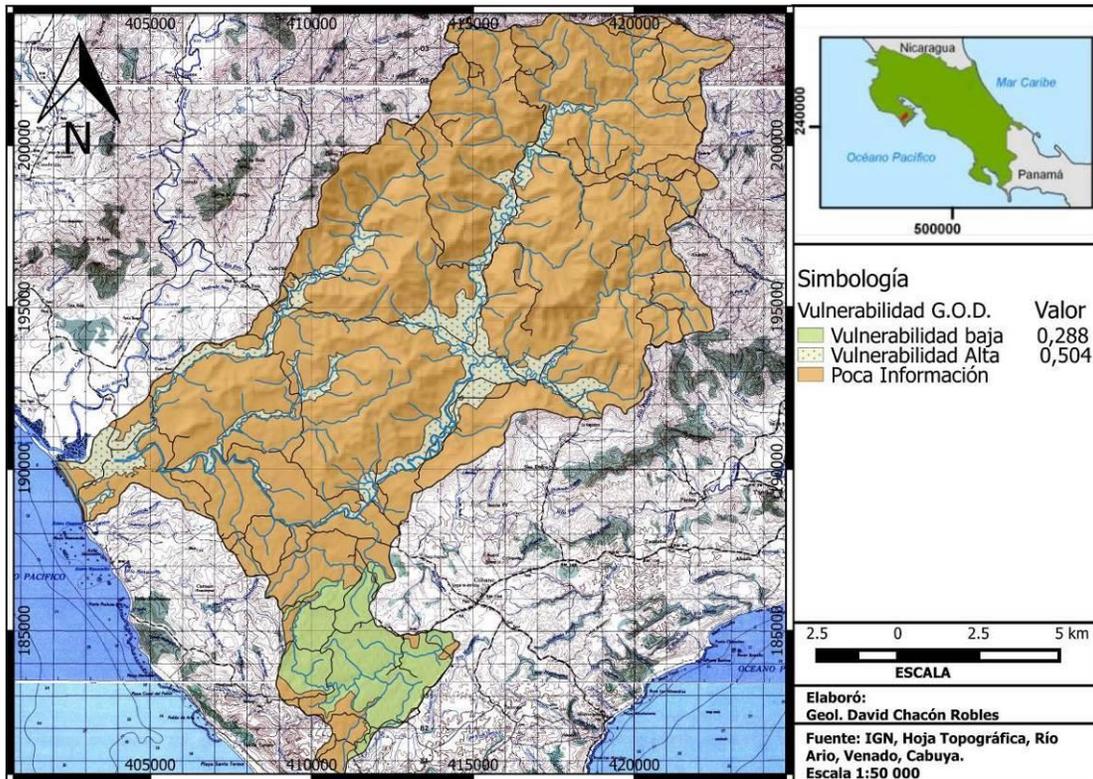


Figura 40: Vulnerabilidad G.O.D. cuenca río Ario.

MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO FINAL

Para el sitio se determina la presencia de un acuífero presente en la unidad aluvional y otro en la formación Montezuma.

Donde la unidad aluvional presenta profundidades del nivel de 5 m, con flujo de agua subterránea al cauce del río Arío, con aporte de caudal de hasta 15 l/s, transmisividad superior a los 250 m²/día, se presenta en una condición libre, presentando una vulnerabilidad alta a la contaminación, con recargas de 274 l/s lo cual corresponde a un 12,50% del total de la recarga de la cuenca.

La formación Montezuma presenta niveles a los 20 m de profundidad, con flujos hacia el Río Negro, con alturas del agua subterránea de hasta 150 m.s.n.m., se presenta en condición no confinado cubierto, con baja vulnerabilidad a la contaminación, recargas de 207 l/s, correspondiendo a un 9,5% del total recargado en la cuenca.

En la figura 41 se observa el modelo conceptual hidrogeológico general presente en la cuenca del río Arío.

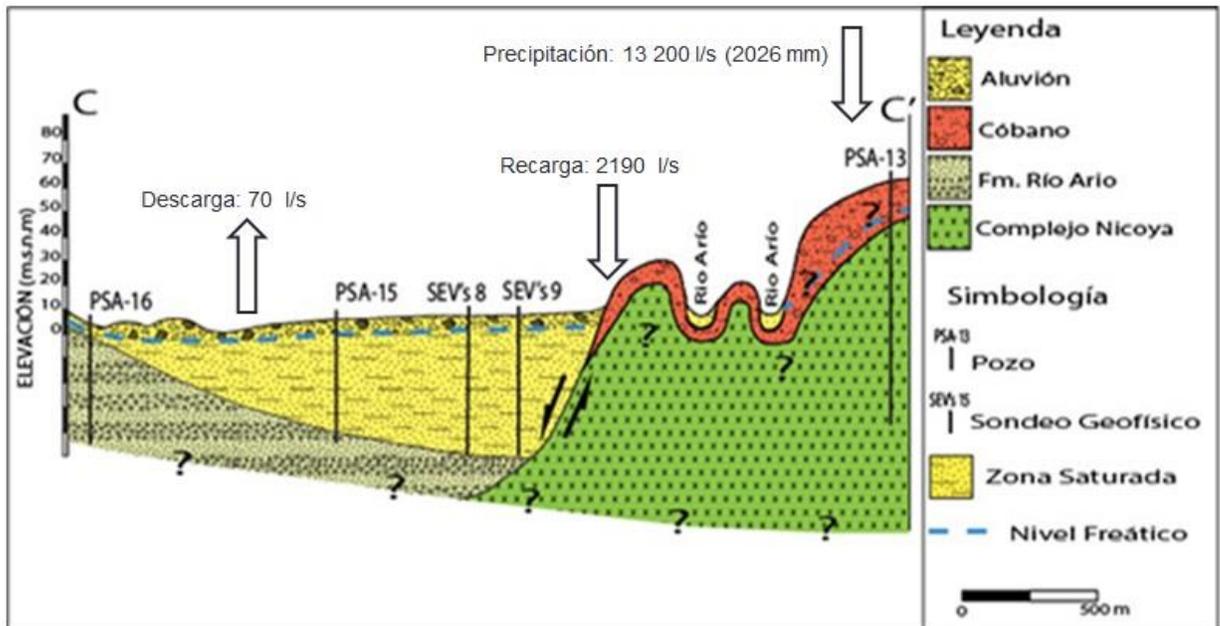


Figura 41: Modelo conceptual hidrogeológico cuenca río Arío

CONCLUSIONES:

- *) La zona de estudio presenta una extensión de 205 Km², en los que se encuentra un basamento ígneo correspondiente al Complejo de Nicoya, posteriormente se encuentra formaciones de características sedimentarias.
- *) Las Formaciones sedimentarias que se localizan en la zona de interés corresponde a: Formación Sabana Grande, Formación Piedras Blancas, Formación río Arío, Formación Calizas Arío, Formación Curú, Formación Montezuma, Formación Cóbano, unidad Coluvial y unidad Aluvión.
- *) Los sondeos geofísicos estiman resistividades menores a los 50 Ohm-m para los materiales sedimentarios y entre los 100-300 Ohm-m para las lavas.
- *) Se determina la existencia de un total de 23 pozos excavados, 22 pozos perforados y registrados en base de datos del SENARA y 18 piezómetros realizados mediante el proyecto Progirh.
- *) Se determina la existencia de tres zonas con potencial acuífero, dos zonas asociadas a la unidad aluvial (zona 1_ San Ramón, zona 2_ Bajos de Arío) y una asociada a la Formación Montezuma (Río Negro).
- *) Los acuífero asociados a la unidad aluvial presentan espesores de acuíferos de hasta 50 m, con niveles freáticos cercanos a los 5 m, con flujos del agua subterránea hacia el Río Arío, presenta acuíferos de carácter libre, presenta pozos con caudales de hasta 15 l/s, y transmisividad superiores a los 250 m²/día.
- *) El acuífero asociado a la formación Montezuma, presenta profundidad del nivel freático de 20 m, presenta espesores de 30 m, los pozos aportan caudales de menores a 1 l/s, conductividades hidráulicas de 0,5 m²/día.
- *) Los aforos realizados en el cauce del río Arío y algunos de sus afluentes, determinan que la mayor parte del trazo del cauce se considera efuente, principalmente en las zonas donde se encuentra la unidad aluvial.
- *) Las mediciones en la red de monitoreo muestran variaciones en el nivel alrededor de los 5 m en los aluviones, con mayores variaciones en la unidad acuífera presente en la formación Montezuma, estas variaciones se debe al mayor coeficiente de infiltración presente en los aluviones respecto a la formación Montezuma.
- *) El balance hídrico de suelos determina una recarga potencial de 2190 l/s, correspondiendo a un 16% de la precipitación promedio total registrada en la estación más cercana a la cuenca.

- *) Las mayores recargas se presentan en el Complejo de Nicoya, Piedras Blancas y Formación Cóbano, donde el porcentaje de recarga de cada unidad corresponde a un 20% del total de recarga en la cuenca. Estas mayores recargas se dan por ser las unidades geológicas de mas extensión presentes en la cuenca.
- *) De los 2190 l/s que se recargan en la cuenca del río Arío, según registro de caudales, se hace un uso del 70 l/s, con lo cual hay disponible un total de 2120 l/s.
- *) No es posible determinar un mapa de vulnerabilidad en toda la cuenca del río Arío ya que hay zonas con escasa información.
- *) Se determina tres zonas donde es posible determina la vulnerabilidad a la contaminación, dos zonas de vulnerabilidad alta a la contaminación, asociadas a acuíferos presentes en la unidad aluvial y una zona de vulnerabilidad baja, asociada al acuífero presenten en la formación Montezuma.

RECOMENDACIONES:

- *) Realizar un mapeo geológico más detallado en la cuenca, principalmente en las zonas de poca accesibilidad, con la finalidad de conocer de una forma más exacta la geología y tectónica de la cuenca, así como determinar de una manera más exacta la extensión de cada unidad geológica, permitiendo determinar de una manera más precisa la recarga al acuífero.
- *) Ejecutar los estudios (extracción, caudal ambiental, uso biológico, volumen del acuífero) para la obtención del rendimiento sostenible en cada una de las unidades acuíferas definidas, con lo cual se pueda determinar de una forma más exacta el volumen de caudal disponible en toda la cuenca
- *) Efectuar pruebas de bombeo en cada una de las unidades acuíferas definidas en la cuenca, así como las unidades que no poseen mucha información para su caracterización, con la finalidad de conocer mejor las características hidráulicas de todos los acuíferos y lograr una mejor caracterización de la cuenca.
- *) Realizar los estudios correspondientes principalmente de modelación, que permitan determinar el volumen de agua que alberga cada una de las unidades acuíferas determinadas, especialmente en los acuíferos presenten en la unidad aluvial.
- *) Continuar con el monitoreo de niveles, realizando en la medida de lo posible una medición cada año o instalar instrumentos de medición automática, con la finalidad de tener un mejor registro de variaciones del nivel de agua subterránea, lo cual permita entre otras cosas conocer la influencia

de las precipitaciones en la variaciones de niveles, así como determinar a futuro la recarga por el método de variación de niveles.

*) Análisis estructural principalmente en las unidad aluvial con la finalidad de determinar si hay influencia o no de la tectónica local en la formación de un acuífero en esta zona, así como determinar si afecta al acuífero (presencia de barreras positivas o negativas).

*) Realizar análisis hidrogeoquímicos al agua presente en las diferentes unidades acuíferas definidas, tanto para su clasificación como para conocer su evolución, además de determinar si cumplen con las normas de potabilidad definida por el ministerio de salud y pueden ser utilizadas sin ningún inconveniente por la población.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AGUILAR, T., DENYER, P., MONTERO, W., 2014: *Geología de la península de Nicoya: Actualización, sintetización y digitalización de la cartografía geológica de la península de Nicoya.*-302 pags. Informe final MINAET-UCR

AGUILAR, T., DENYER, P. & MONTERO, W., 2013: *Mapa geológico de la hoja río Ario.- Escala 1: 50 000, CIGG-UCR & DGM-MINAE, San José.*

AGUILAR, T., DENYER, P. & MONTERO, W., 2013: *Mapa geológico de la hoja Cabuya.- Escala 1: 50 000, CIGG-UCR & DGM-MINAE, San José.*

AGUILAR, T., DENYER, P. & MONTERO, W., 2013: *Mapa geológico de la hoja Venado.- Escala 1: 50 000, CIGG-UCR & DGM-MINAE, San José.*

ASTORGA, A., 1987: *El Cretácico Superior y el Paleógeno de la vertiente Pacífica de Nicaragua Meridional y Costa rica septentrional: origen, evolución y dinámica de las cuencas profundas relacionadas al margen convergente de Centroamérica.*- 182 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].

ASTORGA, A., ARIAS, M., 2003: *Mapa de geopotencial hidrogeológica de Costa Rica: implicaciones respecto a la gestión ambiental del desarrollo.*- Rev. Geol. Amér. Central, 29: 95-100.

AUGE, M., 2004: *Vulnerabilidad de acuíferos, conceptos y métodos.* Universidad de Buenos Aires. CONICET.

<http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/gestionambiental/Materiales%20y%20Actividades%20Riesgosas/sitioscontaminados/CEPIZ-GTZ/I-Vulnerabilidad-Conceptos-Auge.pdf>.- [Consulta: 15 de abril 2014].

ARELLANO, F., VARGAS, A., 2001: *Casos de contaminación por intrusión salina en acuíferos costeros de la Península de Nicoya (Costa Rica).*- Rev. Geol. Amér. Central, 25: 77-84.

BETANCUR, T., MEJIA, O., PALACIO, C., 2003: *Modelo hidrogeológico conceptual del Bajo Cauca antioqueño: un sistema acuífero tropical*.- Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º 48, pp. 107-118. Junio, 2009.

BAUMGARTNER, P.O., 1984: *El Complejo Ofiolítico de Nicoya (Costa Rica): Modelos estructurales analizados en función de las edades de los radiolarios (Colloviense a Santoniense)*.- En: SPRECHMANN, P. (Ed.): *Manual de Geología de Costa Rica*.- San José: Editorial UCR I:115-123.

BAUMGARTNER, P.O., 1987: *Tectónica y sedimentación del Cretácico Superior en la zona pacífica de Costa Rica (América Central)*.- En: BARBARIN, J.M.; GURSKY, H.J. & MEIBURG, P. (Eds.): *El Cretácico de México y América Central (resúmenes)*.- Linares-México: Facultad de Ciencias de la Tierra U.A.N.L. II: 251-260.

BAUMGARTNER, P., MORA, C., BUTTERLIN, J., SIGAL, J., GLACON, G., AZÉMA, J. & BOURGOIS, J., 1984: *Sedimentación y paleogeografía del Cretácico y Cenozoico del litoral pacífico de Costa Rica*.- Rev. Geol. Amér. Central, 1: 57-136.

BAUMGARTNER-MORA, C., BAUMGARTNER, P. & TSCHUDIN, P., 2008: *Late Oligocen larger foraminifera from Nosara (Nicoya Peninsula, Costa Rica) and Inward (Carriacou, Lesser Antilles) calibrated by 87Sr/86Sr isotope stratigraphy*.-Rev. Geol. Amér. Central, 38: 33-52.

BOURGOIS, J., AZEMA, J., BAUMGARTNER, P.O., TOURNON, J., DESEMET, A. & AUBOIN, J., 1984: *The gologic history of the Caribbean-Cocos Plate boundary with special reference to the Nicoya Ophiolite Complex (Costa Rica) and D.S.D.P. results (Legs 67 and 84 of Guatemala): a synthesis*.- Tectonophysics 108: 1-32.

CALVO, C., 1987: *Las calizas neríticas de la vertiente pacífica del norte de Costa Rica y sur de Nicaragua, épocas y sistemas asociados con la apertura y evolución del margen convergente de la América Central Meridional*.- 165 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis de Lic.].

CHINCHILLA, A., 1989: *Estudio geológico de la Formación Montezuma (Plio-Pleistoceno, Península de Nicoya, Costa Rica)*. - 148 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].

CHINCHILLA, J., RAMIREZ, R., 2011: *Estudio hidrogeológico del acuífero en la cuenca del Río Montezuma, Cóbano, Puntarenas*.-40 págs. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento (SENARA).

CHINCHILLA, J., 2012: *Informe de avance proyecto de perforación exploratoria en la cuenca del río Arío, Puntarenas*.- 19 págs. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento (SENARA).

CUSTODIO, E., LLAMAS, M., 1996: *"Hidrología Subterránea"*; 2da. Ed; Ediciones Omega S.A., Sec.15: Cáp. 5.1; apartado 1.3, Tomo II.

- DENGO, G., 1962: *Estudio geológico de la región de Guanacaste, Costa Rica.*- 112 págs. Instituto Geográfico Nacional, San José.
- DÍAZ, C., YORY, F., 2008: *Determinación a la contaminación de un acuífero al utilizar álgebra de mapas en un sistema de información geográfica.*- Revista avances N° 8. pp. 32-49.
- DENYER, P. & ARIAS, O., 1993: *Geología del Norte de la Península de Nicoya, Costa Rica.*- Rev. geól. Amér. Central, 16:69-84.
- ESTADO DE LA NACION, 2008: *Decimocuarto informe Estado de La Nación en Desarrollo Humano Sostenible – Situación del Recurso Hídrico.*- 60 págs. La Defensoría de los Habitantes – CONARE.
- FLORES, K., 2003: *Propuesta tectonoestratigráfica de la región septentrional del Golfo de Nicoya, Costa Rica.*- 176 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].
- FLORES, K., DENYER, P. & AGUILAR, T., 2003a: *Nueva propuesta estratigráfica: geología de las hojas Matambú y Talolinga, Guanacaste, Costa Rica.*- Rev. Geol. América Central, 28: 131-138.
- FLORES, K., DENYER, P. & AGUILAR, T., 2003b: *Geología y estratigrafía dela hoja Abangares, Guanacaste, Costa Rica.*- Rev. Geológica de América Central. 29: 127- 136.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M. & PARIS, M., 2002: *Protección de la Calidad del Agua Subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales.* – 115 págs. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento / Banco Mundial. Washington, EE.UU.
- GALLI-OLIVER, C., 1979: *Ophiolite and island arc volcanism in Costa Rica.*- Geological Society of America Bulletin, 90(1):444-452.
- HARGREAVES, G.H. & SAMANI, Z.A., 1985: *Reference crop evapotranspiration from temperature.*- Applied Eng. in Agric., 1(2): 96-99.
- HIDROTERRA, 2012: *Estudio geológico-geofísico en la cuenca Arío- Cóbano, Puntarenas.*-95 págs. AyA-SENARA [Informe técnico].
- HOFFSTETTER, R., DENGO, G., WEYL, R., DIXON, C., MEYER-ABICH, H., WOODRING, W. & ZOPPIS, L., 1960: *Lexique stratigraphique international.-Amérique Latine Fascicule IIa: Amerique Centrale. París.*- 366 págs.
- INGEOMINAS, 2004: *Programa de exploración de aguas subterráneas.*- <http://www.sgc.gov.co/getattachment/92fd1dc3-e4a6-4450-96b5-b19abf276144/Programa-exploracion-aguas-subterranas.aspx> [Consulta: 1 de abril de 2014].

KUYJPERS, E.P., 1979: La geología del Complejo Ofiolítico de Nicoya, Costa Rica.- Informe Semestral Instituto Geográfico Nacional (Julio-diciembre): 15-75.

LAURITO, C., 1988: Análisis sedimentológico de las formaciones El Fraile, en la costa suroeste de Nicaragua, Carmen y Punta Carballo, en la costa Pacífica de Costa Rica.- 117 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].

MINAE, SENARA, AyA, ICE, BN (Ministerio de Ambiente y Energía, Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento, Instituto de Acueductos y Alcantarillados, Instituto Costarricense de Electricidad, Banco Nacional), 2008. Acuíferos en Guanacaste. Informe General de los Mantos Acuíferos en Guanacaste. Plan de Abastecimiento de Agua para Guanacaste.

MORA, C.R., 1985: Sedimentología y geomorfología del sur de la Península de Nicoya (Provincia de Puntarenas, Costa Rica).- 148 págs. UCR, San José, Costa Rica [Tesis de Lic.].

OROZCO, R, 2011: Cambios en el uso de la tierra y su incidencia en el recurso hídrico en la cuenca del río Arío, 2005-2011.-60 págs. Univ. Nacional [Informe práctica profesional].

PROTTI, R., 1981: Geología y geofísica con fines hidrogeológicos en la planicie costera Jicaral, Santa Rita, Península de Nicoya, Costa Rica.- 45 págs. Univ. de Costa Rica, San José [Tesis Lic.].

ROJAS, N., 2011: Estudio de cuencas hidrográficas de Costa Rica: Ríos Península de Nicoya.-24 págs. Instituto Meteorológico Nacional (IMN).

SCHOSINSKY, G.; 2006: Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. - Revista Geológica de América Central 34-35: 13-30.

SENARA, 2009: Programa de Gestión Integrada de Recursos Hídricos.- 30 págs. Informe Interno SENARA.

SENARA, 2016: Base nacional de pozos y nacientes.- Hojas río Arío, Cabuya y Venado.

SOLANO, J., VILLALOBOS, R., (n.d.): Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica.-20 págs. Editorial San José, Instituto Meteorológico Nacional, CR.

SPRECHMANN, P., 1984: Manual de Geología de Costa Rica.- 320 págs. Ed. de la Univ. de Costa Rica, San José.

ANEXOS

Anexo 1: Información pozos presentes en la base de datos.

Codigo_Pozo	Latitud	Longitud	Prof. Nivel (m)	Columna Estratigrfica	Rejilla	Caudal	Formación	Uso
CY-69	182760	413249	3	0- 3 Suelo vegetal 3- 50 Mat. Arenoso.	de 12 a 44 m	0.85 l/s	Montezuma	Domestico-Riego
CY-98	183200	410500	NI	NI	NI	NI	Montezuma	Domestico-Riego
CY-112	182350	412525	15,22	0- 2: Suelo Arenoso. 2- 18: Arenisca Cafe. 18-59: Alternancia de arenisca y lutitas grises Form. Montezuma.	de 30 a 59 m	0.74 l/s	Montezuma	Domestico-Riego
CY-128	182275	412700	NI	NI	NI	NI	Montezuma	Domestico-Riego
CY-140	182614	413178	NI	NI	NI	NI	Montezuma	Domestico-Riego
RA-25	184850	411050	11,37	NI	de 58 a 64 m	NI	Montezuma	Abast. Publico
RA-35	185300	411650	29,15	0- 7 m Arcilla. 7 - 12 m Limo poco arenoso 12 - 34 m limo con grava gris 34- 37 m Arcilla gris oscura que engloba gran cantidad de conchas y fosiles marinos. 37- 58 m Arcilla limosa con algo de grava y arena redondeada, buen contenido de fosiles animales, conchas caracoles y madera . 58- 60 m Limo.	de 10 a 58 m	0.4 l/s	Montezuma	Turistico
RA-59	184500	411500	NI	NI	NI	NI	Montezuma	Abast. Publico
RA-69	190100	403850	5	NI	NI	11 l/s	Aluvi3n	Domestico-Riego
RA-80	186300	410200	9,25	0- 30 m Areniscas	de 18 a 24 m	2 l/s	Montezuma	Abast. Publico
RA-86	193530	420295	40	0-34 m Caliza de color Blanco 34- 90 m Arenisca fina-media	de 40 a 90 m	0.5 l/s	Pedras Blancas	Domestico
RA-94	193407	415565	4	0-30 m Aluvi3n	de 6 a 30 m	15 l/s	Aluvi3n	Riego
RA-95	193390	415465	3	0-30 m Aluvi3n	de 6 a 30 m	11 l/s	Aluvi3n	Riego
RA-115	184700	413525	15	0- 3 m Arcilla 3- 80 m Roca arenosa verde Fm. Curu	de 50 a 80 m	1 l/s	Montezuma	Domestico-Riego
RA-122	184662	413739	24	0- 3 m Suelo Arcilloso 3- 8 m Material suelto 8- 21 m Basalto Met. 21- 63 m Basalto sanos	de 27 a 63 m	0.7 l/s	Montezuma	Domestico-Riego
RA-135	190180	404111	0,7	0- 2 m Arcillas 2- 14 m Aluvi3n	de 2 a 14 m	1.1 l/s	Aluvi3n	Domestico-Riego
RA-148	190300	413220	11	0- 5 m Arcila. 5- 11 m Lutitas. 11 - 15 m Arenas y gravas 15 - 19 m Arenas y gravas 19- 23 m Arena con arcillas 23 - 26 m Arcillas	de 11 a 20 m	7 l/s	Aluvi3n	Abast. Publico
RA-149	190230	413520	11	0- 5 m Arcilla 5- 11 m Lutitas 11- 15 m Arenas y gravas 15- 19 m Arenas y gravas 19- 23 m Arenas con arcilla 23- 26 m Arcillas.	de 14 a 23 m	8 l/s	Aluvi3n	Abast. Publico
RA-172	186700	408300	20	0- 1 m Suelo arenoso 1- 20 m Arcillas y lutitas 20- 31 m Arenisca calcarea y calcilutitas 31- 60 m Areniscas calcareas y calcilutitas Fm. Ario.	de 30 a 60 m	0.5 l/s	Cobano	Domestico-Riego
RA-178	194150	421622	58	0- 24 Areniscas alteradas 24- 86 Areniscas finas	de 60 a 82 m	1.5 l/s	Curu	Domestico
RA-180	192148	415480	19,5	0- 8 m Arcillas. 8- 36 m Basaltos Fract	de 12 a 36 m	1.1 l/s	Col-Aluv	Domestico
RA-195	184779	411279	15	0- 0.10 m Arcillas 0.10 - 25 m Sin dato 25- 60 m Mat. arenoso.	de 42 a 60 m	NI	Montezuma	Domestico-Riego

Fuente: SENARA.

Anexo 2: Ubicación nacientes presentes en la zona de estudio.

Codigo Naciente	Latitud Y	Longitud X	Formación	Uso
Nac_Año-1	187976	411507	Cobano	Sin Uso
Nac_Año-2	188159	411690	Cobano	Sin Uso
Nac_Año-3	194197	416081	C.N.	Sin Uso
Nac_Año-4	184844	411136	Montezuma	Abast. Casas
Nac_Año-5	184204	410603	Montezuma	Sin Uso
Nac_Año-6	184211	410683	Montezuma	Abast. Casas
Nac_Año-7	185537	410696	Montezuma	Sin Uso
Nac_Año-8	193473	406236	Aluvión	Sin Uso
Nac_Año-9	194735	411571	Curu	Sin Uso
Nac_Año-10	203584	414559	Curu	Abast. Casas
Nac_Año-11	203710	414639	Curu	Sin Uso
Nac_Año-12	202239	416697	Curu	Sin Uso
Nac_Año-13	198155	416450	Aluvión	Sin Uso

Fuente: levantamiento de campo.

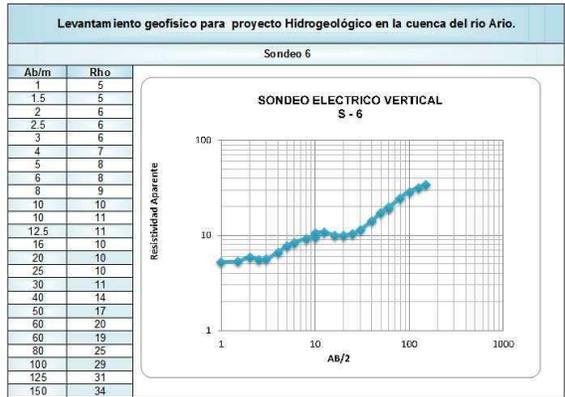
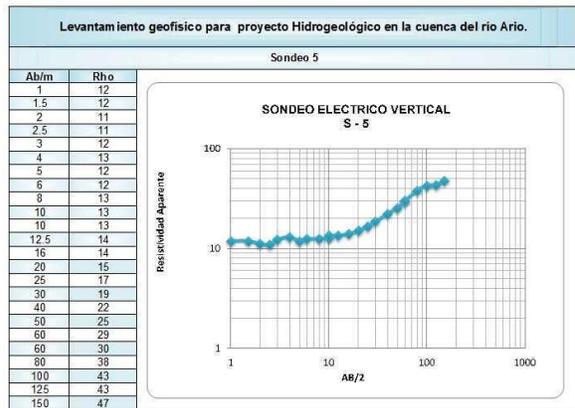
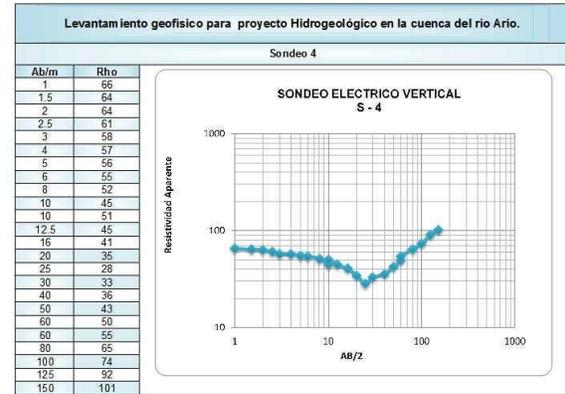
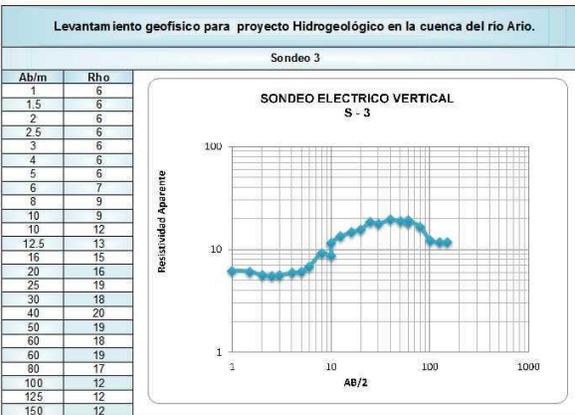
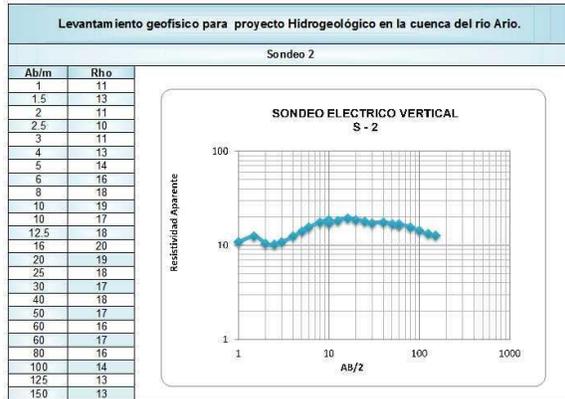
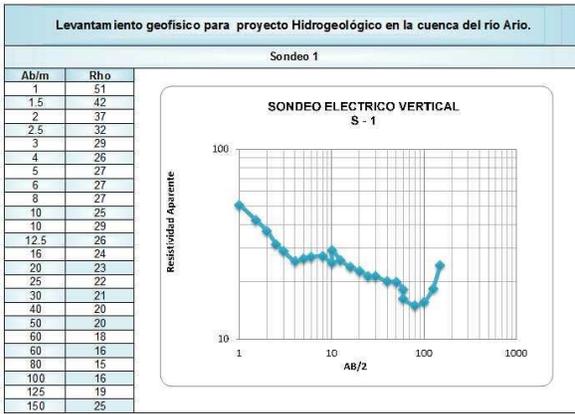
Anexo 3: Información piezómetros perforados por SENARA.

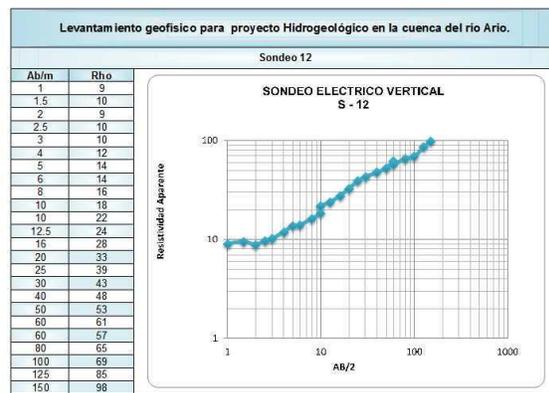
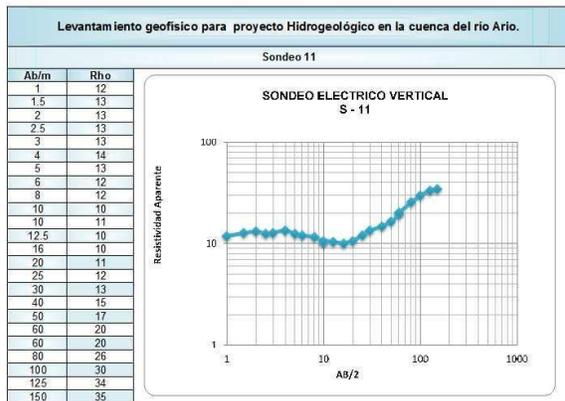
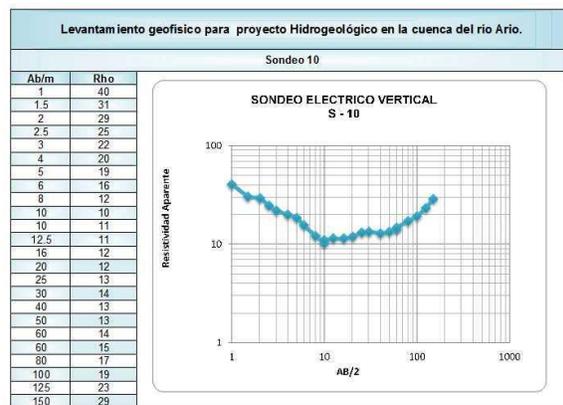
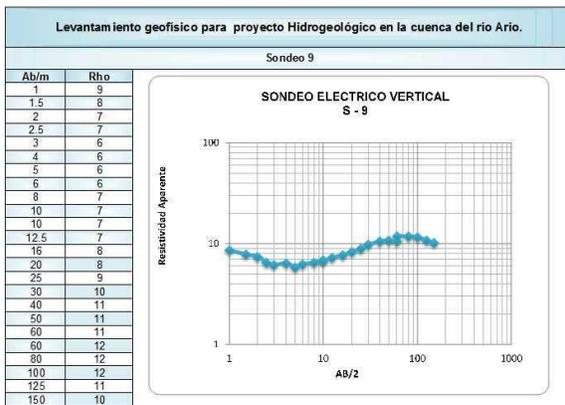
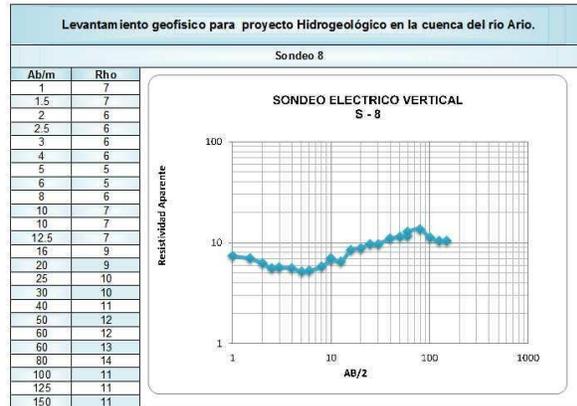
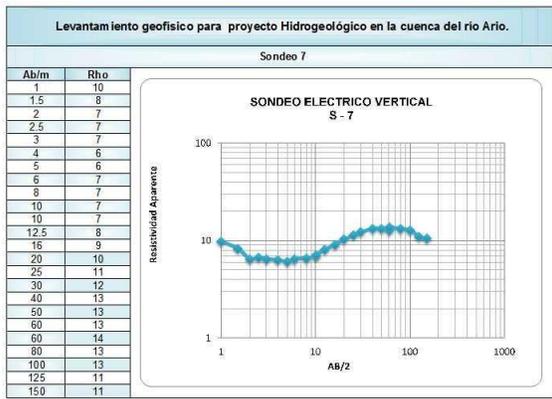
Codigo Piez	Latitud	Longitud	Prof. (m)	Prof. NE (m)	Rejilla	Columna litologica	Analisis petrografico	% Recup.	RQD	Prueb. hidraulicas	Pruebas geofisicas	Formación
PSA-1	194228	415096	100	2,8	de 37 a 76 m	0- 53 m Unidad Coluvio Aluvial 53-100 m Unidad Volcanica	Basalto					Aluvi6n/ CN
PSA-2	203609	415172	150	3,8	de 84 a 144 m	0-97 m Form.Curu. 97- 150 m Unidad Intrusiva.	Leucogabro	75%	50%		0-97 m--> 20 Ohm-m 97-130 m--> 40 Ohm-m 130 - 150 m--> 10 Ohm-m	Curu
PSA-3	198324	421404	100	3,5	de 50 a 92 m	0 -100 m Form. Curu		60%	35%		10 Ohm-m	Curu
PSA-5	197832	416411	50	20	de 26 a 44 m	0-20,65 m Unidad Colivio Aluvial. 20,65 - 50 m Unidad Volcanica.	26,75 m y 50 m: Leucogabro 35,75 m: Basalto	0-20,65 m --> 90 % 20,65-50 m -->	entre 6% y 31%	No se realizo	No se realizo	Aluvi6n/ CN
PSA-6	195854	415436	50	3,6	de 23 a 44 m	0-3,6 m Unidad Coluvial. 3,6- 50 m Unidad Volcanica.	6,25 m y 24,85 m Leucogabro 49,25 m Basalto.	90%	90%	No se realizo	No se realizo	Aluvi6n / CN
PSA-7	194666	411896	100	6,3	de 43 a 76 m	0-2,5 Suelo 2,5- 100 m Unidad Volcanica						C.N.
PSA-8	192984	417145	50	2,5	de 8m a 11 m, de 17 a 26 m, de 38 a 50 m	0- 50 m Unidad Aluvial.	No se realizo	entre 0 a 70 %	No se realizo	No se realizo	No se realizo	Aluvi6n
PSA-9	192821	415161	50	3,5	de 23 a 44 m	0- 50 m Unidad Aluvial.	No se realizo	entre 0 y 50 %	No se realizo	No se realizo	No se realizo	Aluvi6n
PSA-10	192918	410588	50	2,35	de 23 a 44 m	0-21,60 m Unidad Coluvio- Aluvial 21,60 - 50 m Unidad Volcanica			21,60- 50m - 75 %		21,60-50 m--> superior a 100 Ohm-m	Aluvi6n/ C.N.
PSA-11	190256	413520	50	5,35	de 23 a 44 m	0-5,35 m Unidad Coluvio Aluvial 5,35- 50 m Unidad Volcanica	Leucogabro	95%	75%		Superior a los 200 Ohm-m	Aluvi6n/ CN
PSA-12	194770	408970	50	6,5	de 11 a 17 m, de 29 a 44 m	0-18 Unidad Aluvial. 18-50 m Unidad Volcanica.						Aluvi6n / CN
PSA-13	190573	405695	100	7,5	de 52 a 94 m	0-17 m Unidad Coluvio Aluvial. 17 - 100 m Unidad Volcanica.	42,50 m, 62 m, 75,50 m,98 m Leucogabro	0-20 m --> 50 % 20-60 m --> 90%	0-20 m --> de 0 a 50 % 20-60 m --> 50 a 90%	entre 1,3 e-8 m/s y 9,8 e-8 m/s	0-20 m --> no se realizo 20-60 m --> 70-100 ohm-m	Cobano / CN
PSA-14	190162	409514	100	24	de 52 a 94 m	0-5 m Unidad Couvio Aluvial. 5- 11 m Piedras Blancas. 11- 100 m Unidad Volcanica.	11 m-->Roca calcarea 45 m--> Andsita-Bas. 56 m --> andesita 92 m--> Leucogabro	95%	50%	No se realizo	Superior a los 200 Ohm-m	Cobano/ Pied Blancas/ CN
PSA-15	190590	403881	50	7,5	de 11 a 29 m	0-44 m Llanura de Inundaci6n. 44-50 m Form. Montezuma.	No se realizo	entre 0 y 50 %	entre 0 y 50 %	No se realizo	No se realizo	Aluvi6n/ Fm. Ario
PSA-16	189726	403556	50	2,8	de 23 a 44 m	0-6,50m Llanura de Inundaci6n 6,50-50 m Form. Montezuma	No se realizo	entre 50 y 100 %	entre 0 y 50 %	No se realizo	5 Ohm-m	Aluvi6n/ Fm. Ario
PSA-17	188087	410870	100	2,8	de 28 a 43 m, de 73 a 94 m	0-23,30 m Unidad Aluvional. 23,30- 100 m Unid. Volcanica.	Leucogabro					Cobano/ CN
PSA-18	185462	410714	50	3,95	de 47 a 50 m	0-15,50 m Llanura Aluvial. 15,50 -50 m Form. Montezuma.	No se realizo	95%	15,50-50m 70%		35.50 m--> 30 Ohm-m	Fm Mont/ Fm Ario
PSA-19	183844	413578	50	6,2	de 23 a 44 m	0-6,35 Llanura de inundacion. 6,35-50 Form. Montezuma.	No se realizo	entre 50-90%	entre 0 y 80%	1,82 e-8 m/s	10 Ohm-m	Fm Mont/ Fm Ario

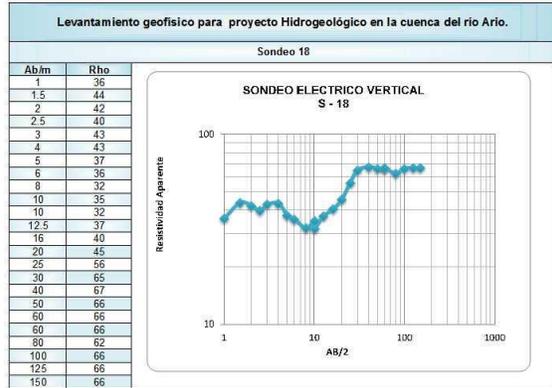
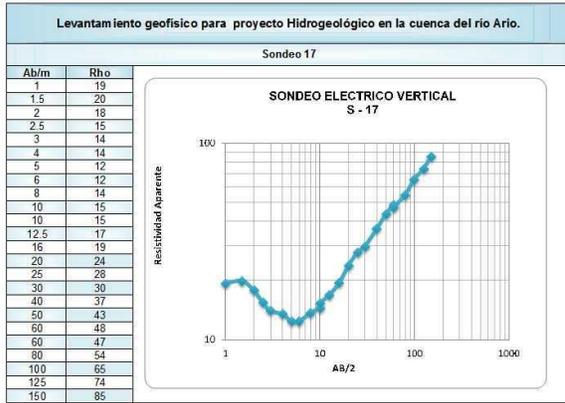
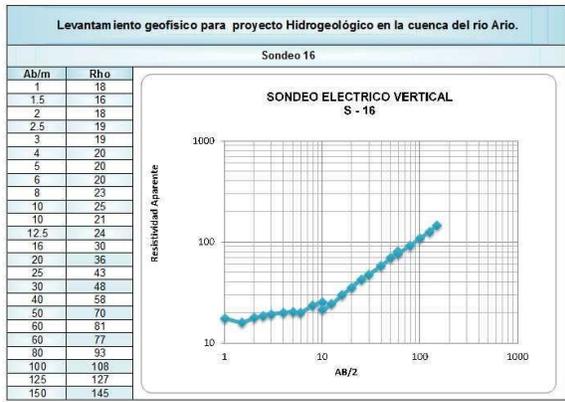
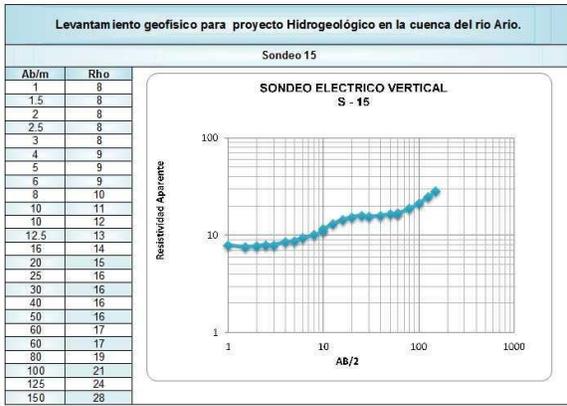
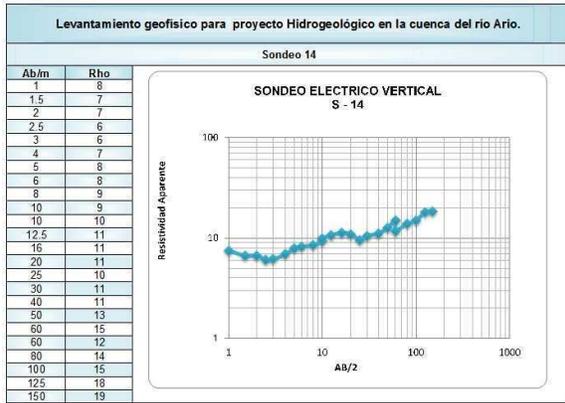
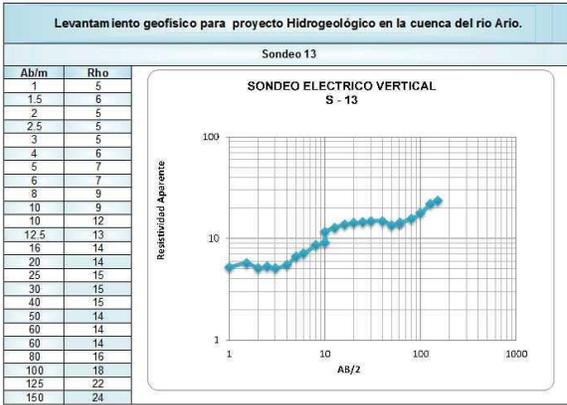
Fuente: SENARA

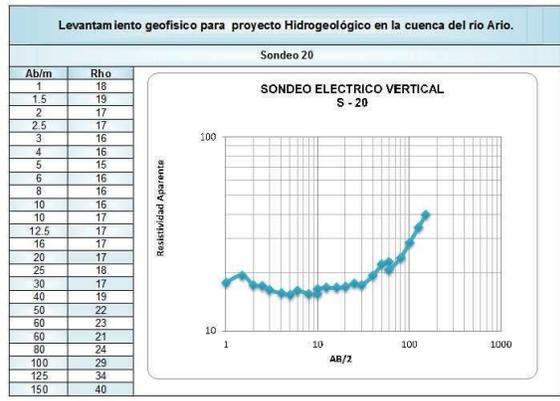
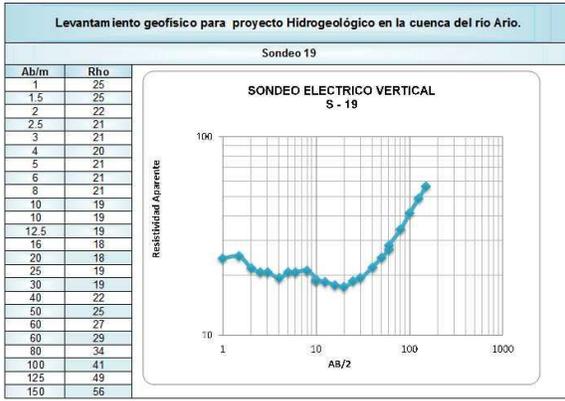
Anexo 4: Ubicación y curvas de resistividades obtenidas en los sondeos geofísicos (fuente Hidrotierra, 2012).

<i>Método</i>	<i>Perfil N°</i>	<i>N° SEV</i>	<i>Estación</i>	<i>Coordenada</i>	<i>Ubicación geográfica - Referencia</i>
Sondeos Eléctricos Verticales	1	1	GPS 94	411280 / 184851	Río Negro
		2	GPS 93	411472 / 184780	
		3	GPS 92	411628 / 184861	
	2	4	GPS 89	411219 / 189301	Santa Clemencia - San Jorge
		5	GPS 90	411433 / 189170	
		6	GPS 91	411648 / 189069	
	3	7	GPS 74	403857 / 190660	Bajos de Ario (Campo Pozos AyA)
		8	GPS 72	404179 / 190729	
		9	GPS 73	404343 / 190910	
	4	10	GPS 77	408804 / 193708	Camino Caño Seco (en medio a San Jorge)
		11	GPS 75	408718 / 193520	
		12	GPS 76	408821 / 193371	
	5	13	GPS 86	415295 / 192973	Bijagua – Pachanga
		14	GPS 87	415530 / 192874	
		15	GPS 88	415763 / 192817	
	6	16	GPS 78	411741 / 194671	Camino Caño Seco (en medio a Bijagua)
		17	GPS 79	412004 / 194690	
		18	GPS 80	412212 / 194532	
	7	19	GPS 83	416551 / 198776	Piedades – San Luis
		20	GPS 82	416652 / 199000	
		21	GPS 81	416725 / 199186	

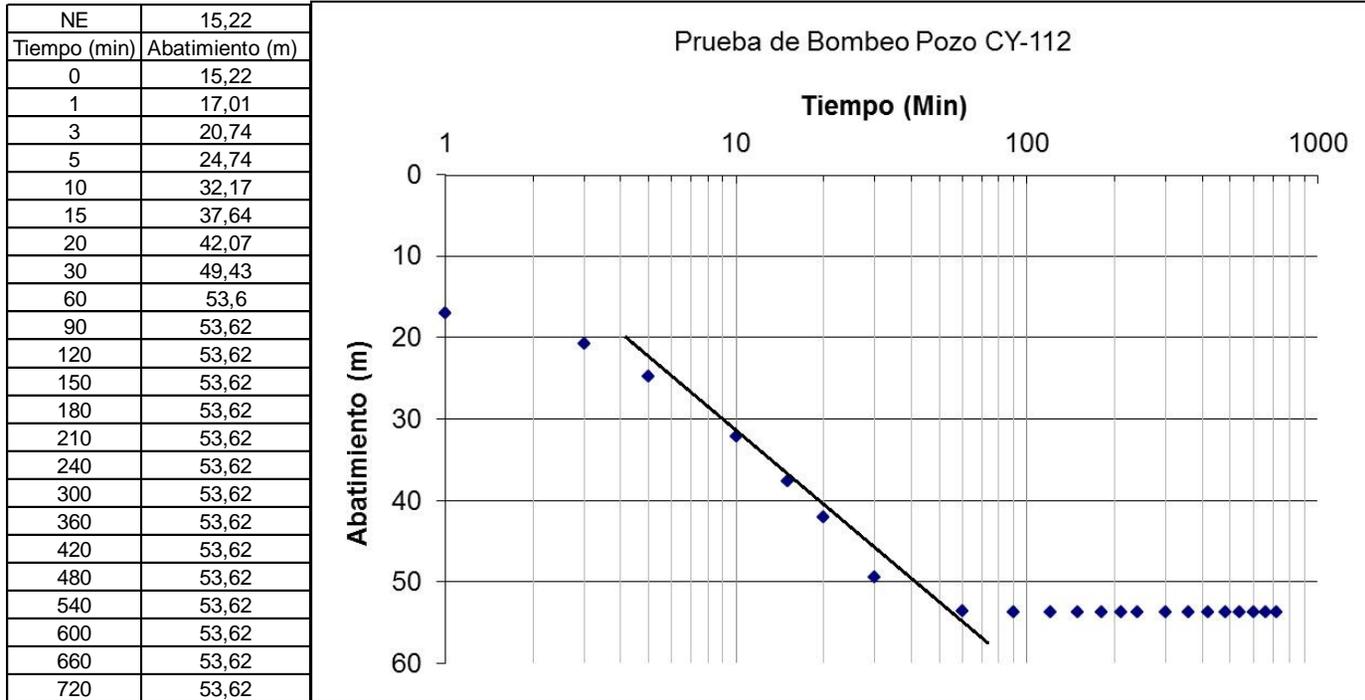






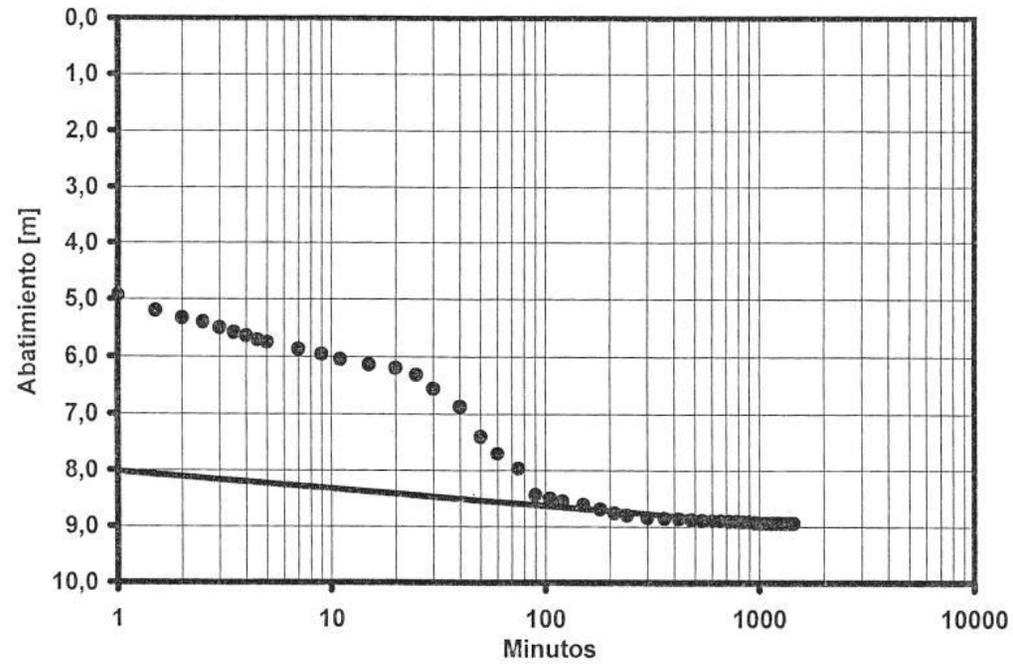


Anexo 5: Pruebas de bombeo realizadas en la cuenca Arío.



Pozo RA-148

Cóbrano de Puntarenas (San Ramon)



● Abat. Pozo Bomb. [m]

T [m²/día] = 366,17
S = 1,71E-04

Nivel Estático [m] = 4,60
Q [lps] = 7,00

Anexo 6: Polígonos definidos para determinar el balance hídrico de suelos

Formación	Área 1 (m2)	Área 2 (m2)	Área 3 (m2)	Área 4 (m2)	Área 5 (m2)	Área 6 (m2)	Área 7 (m2)	Área 8 (m2)	Área 9 (m2)	Área 10 (m2)	Área 11 (m2)	Área 12 (m2)	Área 13 (m2)	Área 14 (m2)	Área 15 (m2)	Área 16 (m2)
Fm. Piedras B_Pasto_Pomedio	35219	13	86927	750	80608	136938	264085	88388	16039							
Fm. Piedras B_Pasto_Plana	4129	10657	146491	14044	24099	30777										
Fm. Piedras B_Pasto_Fuerte	51487	111354	47035	268204	1267769	19051	3475493	354127	3846223	48106	2803656					
Fm. Piedras B_Bosque_Promedio	44739	14843	378063	282303	218059	2899	25105	3933782								
Fm. Piedras B_Bosque_Plana	2873	119701	42465													
Fm. Piedras B_Bosque_Fuerte	34770	252032	259521	76110	9061	60102	1630672	10174874	6606	80697	12036529	3716279				
Fm_Montezuma_Pasto_Promedio	37815	152107	267388	50303	86497	7703374										
Fm_Montezuma_Pasto_Plana-algo plana	856280															
Fm_Montezuma_Pasto_Plana	150504															
Fm_Montezuma_Bosque_Promedio	43789	94444	3057	13657	30441	4918974										
Fm_Montezuma_Bosque_Plana-algo plana	1414237															
Fm_río Ario_Pasto_Promedio	286670	55823	160161	438073	673249											
Fm_río Ario_Bosque_Promedio	14163	72749	93058	14361	2344002											
Fm_Curu_Pasto_Promedio	43964	212272														
Fm_Curu_Pasto_Plana	21460	3638														
Fm_Curu_Pasto_Fuerte	500364	157994	4912537	792566												
Fm_Curu_Bosque_Promedio	380736	73191														
Fm_Curu_Bosque_Plana	183															
Fm_Curu_Bosque_Fuerte	340686	1242101	325635	813384	28400640	172104	307328									
C_Nicoya_Pasto_Promedio	228172	66558	53582	12551	78342	29988	161	11407	237960	600599	143720	31786	65683			
C_Nicoya_Pasto_Plana	45915	273803	27	426136	3839											
C_Nicoya_Pasto_Fuerte	332827	979	726168	41143	1156706	1611	3777483	245965	367292	2461256						
C_Nicoya_Boque_Promedio	200535	1127678														
C_Nicoya_Boque_Plana	97585	1307	1987													
C_Nicoya_Boque_Fuerte	5619	2790163	117631	10286321	301769	21833035	171525	460936	19627	785014						
Aluvi3n_Pasto_Plana	395355	46675	6300372	780531												
Aluvi3n_Pasto_Promedio	19716	25834	55282	316517	110025	1120311	22423	43286	41257	38209	58570	315304	333494	488926	199616	1179412
Aluvi3n_Pasto_Muy Plana	1138614	459686	60826													
Aluvi3n_Pasto_Fuerte	72964	38252	673124	392784	21											
Aluvi3n_Bosque_Promedio	1063358	29688	6177	26113	37754	88971	1951	6821	439	290	52854	1809241				
Aluvi3n_Bosque_Plana	22155	1501303	20580													
Aluvi3n_Bosque_Fuerte	12063	28871	767897	404889												
Col Alv_Pasto_Promedio	253594	99021														
Col Alv_Pasto_Plana	240	52092	443361	1042185												
Col Alv_Pasto_Fuerte	294723	121485	280417	214366												
Col Alv_Bosque_Fuerte	294763	21358	21148	176925	27108											
Col Alv_Bosque_Plana	15154	23295	249361	199788												
Fm_Cobano_Pastos_Plana	13652	979	3683	6290	708548											
Fm_Cobano_Pastos_Promedio	143270	179868	29352	707464	1868142	18818	216014	639	64141	9155	2829448	6311703	5288966			
Fm_Cobano_Pastos_Fuerte	216979	4209	1813	440	351735											
Fm_Cobano_Pastos_Muy Plana	192826	18929	167800													
Fm_Cobano_Pastos_Plana-Algo Plana	165156															
Fm_Cobano_Bosque_Promedio	444461	4143278	3738930	3357462	317909											
Fm_Cobano_Bosque_Fuerte	36551	1619	141683	292191												

