

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

ESCUELA CENTROAMERICANA DE GEOLOGÍA

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN:

*DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO EN LA
CUENCA DEL RÍO ANDAMOJO, SANTA CRUZ, GUANACASTE,
COSTA RICA.*

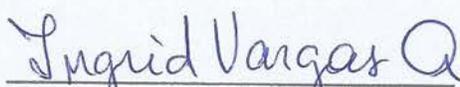
ESTUDIANTE: MARLEN DE LOS ÁNGELES BRENES JARA

CARNÉ ESTUDIANTIL: B01079

ENERO DE 2021

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

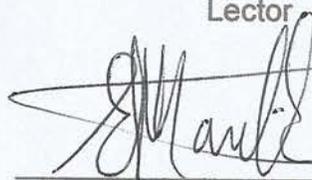
Tribunal examinador



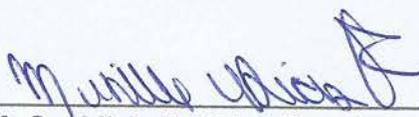
M. Sc. Ingrid Vargas Azofeifa
Directora



Lic. Alonso Alfaro Martínez
Lector



Lic. Ernesto Echandi Echeverría
Lector



M. Sc. Michelle Arias Fernández
Miembro del Tribunal



Dr. Mauricio Mora Fernández
Presidente del Tribunal



Geól. Marlen Brenes Jara
Postulante

Derechos de propiedad intelectual

Yo, **Marlen de los Ángeles Brenes Jara**, portadora de la cédula de identidad: 114730083, conocedora de las sanciones legales con las que la Ley Penal de la República de Costa Rica castiga el falso testimonio.

Declaro bajo fe de juramento lo siguiente: Que soy estudiante egresada de la licenciatura en geología de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica, y como requisito de graduación debo defender mi Trabajo Final de Graduación, para obtener el grado de académico de Licenciatura en geología, la cual versa sobre el tema: **DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO EN LA CUENCA DEL RÍO ANDAMOJO, SANTA CRUZ, GUANACASTE, COSTA RICA**. Por lo que manifiesto que ha sido elaborada bajo las disposiciones exigidas por la Universidad de Costa Rica.

Además, declaro solemnemente que dicho Trabajo Final de Graduación es resultado de mi esfuerzo e investigación en su totalidad, y que en ella no han participado personas ajenas a mi directora, Co-Directores y Lector, ni organizaciones, instituciones ni organizaciones extrañas y que todos los documentos utilizados están respectivamente citados. Es TODO.

Firmo en la ciudad de San José a las 12 horas del 18 de diciembre del 2020.



Marlen Brenes Jara
Sustentante

Dedicatoria

A Dios, por la fortaleza que me da para no desfallecer.

A mami y a papi por apoyarme y motivarme en cada momento de mi vida, quienes se han esforzado tanto para que pueda salir adelante, ellos son la inspiración de mi vida donde quiera que esté.

A Juan Enrique por su ayuda, paciencia y cariño,
Por su motivación y apoyo clave a lo largo de esta investigación y de todo mi proceso universitario.

A mis hermanas Jenny y Cristina y a mi hermano Johnny, por todo el apoyo a lo largo de mi vida, por los consejos para salir adelante y por el soporte tan fuerte que me brindaron en esta etapa final de la universidad.

Agradecimientos

Quiero expresar mi sincera gratitud con las siguientes personas:

A mi directora de tesis, Ingrid Vargas Azofeifa, por creer en mí y darme la oportunidad de desarrollar este proyecto, por la paciencia, y los consejos tanto de vida como los técnicos-hidrogeológicos, por el seguimiento y las sugerencias aportadas durante este proyecto. ¡Muchas gracias!

A los colegas Alonso Alfaro y Ernesto Echandi, quienes también forman parte del comité asesor de tesis, por el apoyo en las giras de campo, por compartir su conocimiento hidrogeológico, por las recomendaciones, y sugerencias durante el desarrollo de este proyecto.

Al SENARA y a la UCR que en convenio financiaron este proyecto.

Se agradece a los funcionarios del SENARA, Jonathan Chinchilla, Pedro Bermúdez por la colaboración y las sugerencias durante el trabajo de campo, en especial a Michelle Arias por las correcciones y todas las sugerencias a lo largo de este proyecto.

A los colaboradores de las ASADAS Delicias, Río Seco, Guapote y Paraíso y Junquillal, y a cada uno de los pobladores que nos permitieron ingresar a sus propiedades para efectuar la toma de datos hidrogeológicos en pozos. De igual forma a Ray Beise, que además compartió los datos pluviométricos registrados en su propiedad, para ser utilizados en esta investigación.

Al geólogo Luis Obando por los consejos y sugerencias brindadas durante la elaboración del anteproyecto de esta investigación.

A Greivin Rodríguez y Armando Soto por el apoyo y colaboración en trabajos realizados en el campo.

A la ingeniera Marcia Gómez, integrante de la Organización *Restoring Our Watershed The Nandamojo River Basin, Costa Rica*, por compartir información técnica y general del área de estudio.

A la ingeniería Ana Julieta Calvo, por transmitirme información importante acerca de la profundidad de raíces en plantas y árboles de Guanacaste.

A los geólogos Arístides Alfaro, Mario Arias, Johnny Castro, José Daniel López y Adrián Obando por las sugerencias durante la elaboración de esta investigación. También a las colegas Paola Alvarado y Nazareth Torres por la colaboración en el trabajo de campo y por todas las sugerencias que me brindaron durante el desarrollo de esta investigación.

A los funcionarios del área administrativa de la ECG Armando Alvarado, Manrique Azofeifa y al director de la Escuela Centroamericana de Geología Mauricio Mora, por la colaboración y apoyo en los trámites administrativos que se han llevado a cabo durante este proyecto.

Al geólogo Juan Vargas, por su apoyo incondicional en todo momento, por su colaboración en el trabajo de campo, por las sugerencias y consejos en este proyecto, principalmente en el uso y aplicación del álgebra de mapas ráster.

A la Universidad de Costa Rica por resguardarme todos estos años y por darme la oportunidad de formarme en el área de la geología.

A mis padres Luz Mary Jara Chavarría y Ulises Brenes Fallas por darme todo por mí, por enseñarme el valor del esfuerzo y a mis hermanas Jenny Brenes, Cristina Brenes y Johnny Brenes, por ser apoyo y soporte en esta y todas las etapas de mi vida.

A la familia Vargas Zúñiga por acogerme en su hogar en tantas ocasiones después de realizar las giras de campo.

A todas las personas que me brindaron su apoyo de alguna u otra forma, desde sus oraciones hasta esas palabras de motivación, que me impulsaron para culminar este proceso.

Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Justificación.....	1
1.2. Problema	2
1.3 Ubicación geográfica	3
1.4 Clima y vegetación	3
1.5 Pequeña reseña histórica	7
1.6 Alcances y limitaciones del estudio	7
1.7 Objetivos	10
1.7.1 Objetivo General.....	10
1.7.2 Objetivos Específicos.....	10
1.8 Hipótesis	10
1.9 Metodología	11
1.10 Antecedentes hidrogeológicos.....	13
1.10.1 Hidrogeología.....	13
1.11 Vías de acceso.....	23
Capítulo 2: Marco Conceptual.....	24
2.1 Modelo hidrogeológico conceptual	24
2.2 Acuífero.....	24
2.3 Regolito	25
2.4 Balance hídrico de suelos mediante el método de Schosinsky (2006). ...	25
2.5 Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos	27
2.6 Índice de Vulnerabilidad GOD	27
2.7 Composición química del agua.....	28
Capítulo 3: Aspectos físicos de la cuenca Andamojo	29
3.1. Geomorfología regional	29
3.1.1 Llanura aluvial:.....	29
3.1.2. Coluvios:	29
3.1.3. Serranías y suelos residuales y denudacionales:	29
3.1.4. Meseta estructural:.....	29
3.2 Geología Estructural	31
3.2.1. Falla limones-Cañas	31
3.2.2. Sistema de falla Los Chanchos.....	32
3.3 Geomorfología local.....	33

3.3.1. Formas de origen denudacional	34
3.3.2 Unidades morfológicas de origen fluvial.	35
3.3.3 Unidades morfológicas de origen marino.	36
3.3.4 Estructuras geológicas.	37
3.4.1 Complejo de Nicoya (Basaltos):.....	41
3.4.2 Complejo de Nicoya (Intrusivo Potrero):.....	41
3.4.3 Depósito de playa arenosa:	42
3.4.4 Unidad de Coluvios:	45
3.4.5 Depósitos aluviales cuaternarios:	45
3.5 Geología local.....	46
3.5.1 Complejo de Nicoya (Basaltos).....	46
3.5.2 Depósitos aluviales	48
3.5.3 Intrusivo Potrero (Gabros).....	49
Capítulo 4: Hidrogeología.....	51
4.1 Características del flujo subterráneo	51
4.1.1 Interacción entre el drenaje superficial y el acuífero.	51
4.1.2 Redes de flujo	55
4.2 Perfiles hidrogeológicos.....	60
4.2.1. Perfil B-B'	60
4.2.2. Perfil C-C'	61
4.2.3 Perfil D-D'	62
4.3 Acuíferos en la cuenca Andamojo	65
4.3.1 Acuífero aluvial Andamojo	65
4.3.2 Acuífero fisurado Andamojo	70
4.4 Balance hídrico de suelos	73
4.4.1 <i>Mapa de uso de suelo</i>	76
4.4.2 <i>Fracción de lluvia interceptada por el follaje</i>	82
4.4.3 Escorrentía superficial	98
4.4.4 Balance de suelos	101
4.5 Hidrogeoquímica.	120
4.6 Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero, para el área llana de la cuenca Andamojo.	124
4.6.1 Variable G o Grado de confinamiento hidráulico del acuífero:	125
4.6.2 Variable O (Ocurrencia del sustrato suprayacente):.....	126
4.6.3 Variable D (Distancia al agua del acuífero):.....	127

4.7 Modelo hidrogeológico conceptual	131
Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones	134
5.1 Conclusiones:.....	134
5.2 Recomendaciones:	136
6. Referencias	138
Anexo 1: Resumen del modelo planteado a partir de cada uno de los SEV. Tomado de Arias (2018).....	142
Anexo 2. Mapa de afloramientos.....	144
Anexo 3. Pozos base de datos del SENARA	145
Anexo 4. Análisis Químicos en agua de pozos	156
Anexo 5. Pruebas de infiltración del área de estudio	157
Anexo 6. Mapa de ubicación de pozos utilizados para el desarrollo de la metodología GOD	162

Índice de Figuras

Figura 1: Mapa de ubicación de la cuenca Andamojo, Santa Cruz, Guanacaste. Elaboración propia a partir de datos del SNIT (2018)	9
Figura 2: Ubicación de los SEVs y perfiles geoelectrónicos realizados en el área de estudio. Imagen basada en Arias (2018)	20
Figura 3: Perfil geoelectrónico E-E'' con dirección NE-SW localizado en la cuenca Andamojo. Imagen tomada y modificada de Arias (2018)	21
Figura 4: Perfil geoelectrónico F-F'' con dirección N-S localizado en la cuenca Andamojo. Imagen tomada y modificada de Arias (2018)	22
Figura 5: Diagrama de la metodología de Schosinsky (2006). Tomado y modificado de Monge (2015)	26
Figura 6: Mapa geomorfológico tomado y modificado de Rodríguez (2010)	30
Figura 7: Rasgos estructurales del área de estudio. Tomado de Montero & Denyer (2011).....	33
Figura 8: Patrones de drenaje presentes en el área de estudio. Elaboración propia.....	38
Figura 9: Mapa geomorfológico de la cuenca Andamojo. Elaboración propia.	39
Figura 10: Columna cronoestratigráfica del área de estudio, basado en Denyer et al. (2014)	43
Figura 11: Mapa Geológico de la cuenca Andamojo. Geología basada en Denyer et al. (2013) y modificada por comprobación de campo. Fallas tomadas de Denyer et al. (2003).....	44
Figura 12: Perfil geológico A-A' del área de estudio. Fallas tomadas de Denyer et al. (2003)	45
Figura 13: Esquema de la sección medida AF2 en el río Andamojo. Tomado y modificado de Ingeniería Civil (2008).	52
Figura 14: Ubicación de afloramientos diferenciales en la cuenca Andamojo, realizados en marzo, 2019	55
Figura 15: Red de flujo del área de estudio en la zona plana, con datos del mes de octubre del 2018.....	58
Figura 16: Red de flujo del área de estudio en la zona plana, con datos del mes de febrero del 2019.....	59
Figura 17: Ubicación de perfiles hidrogeológicos, SEVs y pozos del área de estudio	63
Figura 18: Perfiles hidrogeológicos del área de estudio.....	64
Figura 19: Red de monitoreo y ubicación del pluviómetro dentro el área de estudio	68
Figura 20B: Esquema de la unidad de Complejo de Nicoya (basaltos) para el área de estudio. Tomado y modificado de Arce et al. (2012).....	73
Figura 21: Ubicación de las estaciones o grillas de información meteorológica (precipitación)	76
Figura 22: Mapa de uso de suelo de la cuenca Andamojo. Elaboración propia a partir de imágenes satelitales de Google Earth (2018) y trabajo de campo.....	81

Figura 23: Mapa de coeficiente de retención por el follaje para la cuenca Andamojo (Cfo)	83
Figura 24: Mapa de retención de lluvia en el follaje	85
Figura 25: Mapa de ubicación de las pruebas de infiltración y análisis de suelos. 88	
Figura 26: Mapa de coeficiente de infiltración para el área de estudio.....	91
Figura 27: Mapa de coeficiente de infiltración por la pendiente del terreno (Kp) ...	92
Figura 28: Mapa de coeficiente de infiltración por efecto de la cobertura vegetal (Kv)	94
Figura 29: Mapa de coeficiente de infiltración del suelo (Ci).....	96
Figura 30: Precipitación que infiltra anualmente en la cuenca Andamojo.....	98
Figura 31: Escorrentía superficial anual, para la cuenca Andamojo	100
Figura 32: Mapa de profundidad de raíces.....	103
Figura 33: Mapa de densidad aparente en gramos por centímetro cúbico.....	105
Figura 34: Mapa de punto de marchitez en milímetros para el área de estudio. .	106
Figura 35: Mapa de capacidad de campo en milímetros, para la zona de estudio	107
Figura 36: Mapa de humedad disponible, para la cuenca Andamojo	113
Figura 37: Mapa de evapotranspiración real, para la cuenca Andamojo	115
Figura 38: Recarga potencial anual para la cuenca Andamojo. Elaboración propia.	119
Figura 39: Ubicación de las muestras de agua, en el área de estudio	120
Figura 40: Diagrama de Piper para los análisis de agua en pozos	123
Figura 41: Esquema para la aplicación de la metodología GOD. Tomada de Foster et al. (2002). Se resalta en color café los rangos utilizados en este estudio.	129
Figura 42: Mapa de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero para el área llana de la cuenca Andamojo, Santa Cruz, Guanacaste. Elaboración propia.	131
Figura 43: Modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca Andamojo, Santa Cruz, Guanacaste. Elaboración propia.	133

Índice de Tablas

Tabla 1: Acuífero Rio Andamojo (tomado y modificado de Arellano & Vargas, 2001)	15
Tabla 2: Estudios hidrogeológicos previos en la cuenca Andamojo.....	18
Tabla 3: Características de los Sondeos Eléctricos Verticales, realizados por Arias (2018).....	19
Tabla 4: Resultado de los aforos diferenciales en varias secciones de la cuenca, para el mes de marzo del 2019	53
Tabla 5: Abatimientos para pozos localizados en el acuífero aluvial Andamojo	67
Tabla 6: Precipitación promedio mensual para los años 1980-2017. Datos Durán et al. (2019).....	75
Tabla 7: Ubicación de las pruebas de infiltración y Coeficiente de infiltración para cada una de ellas.....	89
Tabla 8: Clasificación de los componentes de infiltración para la pendiente del terreno según Schosinsky & Losilla (2001)	92
Tabla 9: Coeficientes por la vegetación.....	93

Tabla 10: Parámetros de CC, PM y DA en porcentaje por peso de suelo seco...	101
Tabla 11: Temperatura media mensual (Durán et al.,2019)	109
Tabla 12: Porcentaje de horas luz solar mensual (Calvo, 1999).....	109
Tabla 13: Evapotranspiración potencial mensual calculada para las estaciones o áreas de influencia de la cuenca Andamojo. Método de Blaney & Criddle, ONU (1972).....	109
Tabla 14: Niveles de agua medidos en el mes de octubre	127

Índice de fotografías

Foto 1: Fractura con dirección NE-SW ubicada en Playa Junquillal en las coordenadas Lambert Norte: 338178 E / 237800 N (Foto 1A), de la cual brota agua (Foto 1 A.1)	47
Foto 2: En la foto A se muestran basaltos masivos sanos con vetas silíceas, en B se observa el suelo residual de los basaltos (saprolita) con rastros de la roca madre, en C se muestran basaltos en almohadilla y en D se observan basaltos bastante meteorizados y recurrentes dentro del área de estudio.....	48
Foto 3: Depósitos Aluvionales en la cuenca Andamojo.....	50
Foto 4: Sitio seleccionado para aforar una sección del río Andamojo (coordenadas: 343767 E / 244117 N)	51
Foto 5: Distintos usos de suelo en la cuenca Andamojo, Santa Cruz, Guanacaste	80
Foto 6: Pruebas de infiltración P15 y P17, en la fotografía de la derecha se observa parte de las muestras que fueron trasladadas para el respectivo análisis de laboratorio.....	87

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Precipitación total mensual Vs temperatura promedio mensual representativa para el área de estudio.....	5
Gráfico 2: Fluctuación de niveles en pozos M1-M30 vs Precipitación (Pluviómetro Pura Jungla)	69
Gráfico 3: Precipitación promedio mensual de las estaciones en el área de estudio (Durán et al., 2019).....	74
Gráfico 4: Distribución del uso de suelo en la cuenca Andamojo.....	79
Gráfico 5: Datos de precipitación y recarga potencial para el área de estudio	117

Capítulo 1: Introducción

1.1 Justificación

El agua es un recurso indispensable en el desarrollo de casi todas las formas de vida en el planeta tierra, además es el motor que impulsa el desarrollo socioeconómico de un país.

El 30 de setiembre del 2014 se declaró emergencia por faltante de lluvias para 19 cantones de Costa Rica, de los cuales 11 pertenecen a la provincia de Guanacaste (Decreto ejecutivo 38642, Gaceta N °195). El déficit en las precipitaciones es un factor principal en la disponibilidad de las aguas subterráneas, aunado a esto la falta de medidas de protección de los acuíferos, generan vulnerabilidad del recurso.

La creciente demanda del recurso hídrico, producto del crecimiento de la población, el cambio del uso de suelo y la construcción de edificaciones (historial de imágenes satelitales Google earth desde el 2002 hasta el 2018), pueden ocasionar cambios en los datos de la recarga acuífera o un posible estrés en el acuífero, que a su vez genera la necesidad de actualizar la información con estudios recientes donde se revise el estado actual del agua subterránea.

Por lo anterior, es que surge la necesidad de impulsar una gestión integrada del recurso hídrico, donde se incorpore información científica acerca de las características de los acuíferos y su dinámica, como herramienta para el desarrollo social, industrial, turístico y agrícola-ganadero de la zona, por cuanto se involucra a los vecinos de las comunidades y a las instituciones estatales que administran el recurso hídrico, mientras se crea conciencia y se trabaja de una forma equilibrada con el ambiente.

Este proyecto Final de Graduación, tiene como fin generar los principales insumos que faciliten actualizar y caracterizar al recurso hídrico de la zona mediante la elaboración de modelo hidrogeológico conceptual que contempla un balance hídrico de suelos, y las zonas de recarga potencial acuífera. Para esto se utilizó información

actualizada de pozos, geofísica (SEV), análisis de suelos y su capacidad de infiltración.

El modelo hidrogeológico de la cuenca Andamojo (en el distrito de Veintisiete de Abril, Santa Cruz, Guanacaste), permite conocer la geometría y el comportamiento de los acuíferos presentes en el área de estudio. Además, se determinó la vulnerabilidad intrínseca del acuífero para la zona de topografía plana de la cuenca. Todo esto permite la generación de nueva información hidrogeológica en la Cuenca Andamojo y su acuífero asociado, que puede ser utilizado como insumo para las instituciones encargadas de la gestión del recurso hídrico como lo son el SENARA, MINAE, AyA entre otras.

Este Trabajo Final de Graduación se desarrolló gracias a la colaboración y financiamiento del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA) que, en convenio con la Universidad de Costa Rica, apoyaron el proyecto Acuíferos Seleccionados de Costa Rica, código: 113-B5-169.

1.2. Problema

El crecimiento de la población y expansión de las actividades socioeconómicas ha venido en aumento en los últimos años para Costa Rica; aunado a esto existe un desconocimiento de información técnica actualizada y a detalle por parte de las entidades gubernamentales que administran el recurso hídrico, lo que genera un desarrollo agropecuario, crecimiento en infraestructura, y asentamientos humanos ausentes de regulaciones en cuanto al uso de suelo, amenazando las zonas de recarga acuífera y por ende vulnerando el recurso hídrico del país.

La provincia de Guanacaste ha tenido un gran impacto por la variación en las precipitaciones afectadas por el fenómeno del niño, un ejemplo de esto ocurrió en 2014, donde el déficit porcentual fue del 60% (hasta agosto del 2014) en relación al promedio anual de zonas como Liberia y la Cruz (Herrera, 2016). Esto podría generar un impacto en la recarga de aguas subterráneas a los acuíferos y disminuir la capacidad de aprovechamiento del recurso mediante pozos o manantiales en la zona.

Para fortalecer el abastecimiento de agua en las comunidades, evitar conflictos por desigual repartición del recurso hídrico, crecimiento turístico/industrial sin control, o la sobreexplotación de los acuíferos, es necesario contar con insumos tales como datos de parámetros calidad del agua, niveles de agua subterránea y zonas de protección acuífera, que permita a los tomadores de decisiones y al sector social (comunidad) tener un mayor control del recurso hídrico, y un monitoreo del mismo. Es por eso que el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento (SENARA) en convenio con la Universidad de Costa Rica (R-CONV-065-2017), en el marco del proyecto: Investigaciones en Acuíferos Seleccionados en Costa Rica, código: 113-B5-169, abrió la oportunidad para que la información técnica generada en este proyecto fuera utilizada para realizar el presente trabajo y que su vez sirviera a las autoridades estatales como herramienta de gestión del recurso hídrico de la zona de estudio.

1.3 Ubicación geográfica

La cuenca sobre el río Andamojo se ubica en la Península de Nicoya, específicamente a 17 km al oeste de la ciudad de Santa Cruz, Guanacaste (figura 1) y pertenece al cantón de Santa Cruz, distrito de Veintisiete de Abril. Esta cuenca abarca parte de las hojas Marbella, Diriá y Villarreal, y posee una extensión total aproximada de 93 km^2 (figura 1). Los ríos principales que la conforman son el Limones, Zapote, Seco, y Andamojo.

1.4 Clima y vegetación

Debido a la gran diversidad climática que caracteriza al Pacífico Norte, Solano & Villalobos, (2001) exponen un mapa que realizó en IMN bajo los estudios de Coen (1967) en el que divide en subregiones climáticas las diferentes zonas del país, según autores mencionados, Santa Cruz se ubica en la subregión occidental de la Península de Nicoya, la cual presenta un clima seco. Según la climatología de esta zona, la precipitación total anual es de 2385 mm, la temperatura máxima promedio

mensual es de 30 °C, la temperatura mínima promedio mensual es de 23 °C, y el periodo seco generalmente tiene 4 meses.

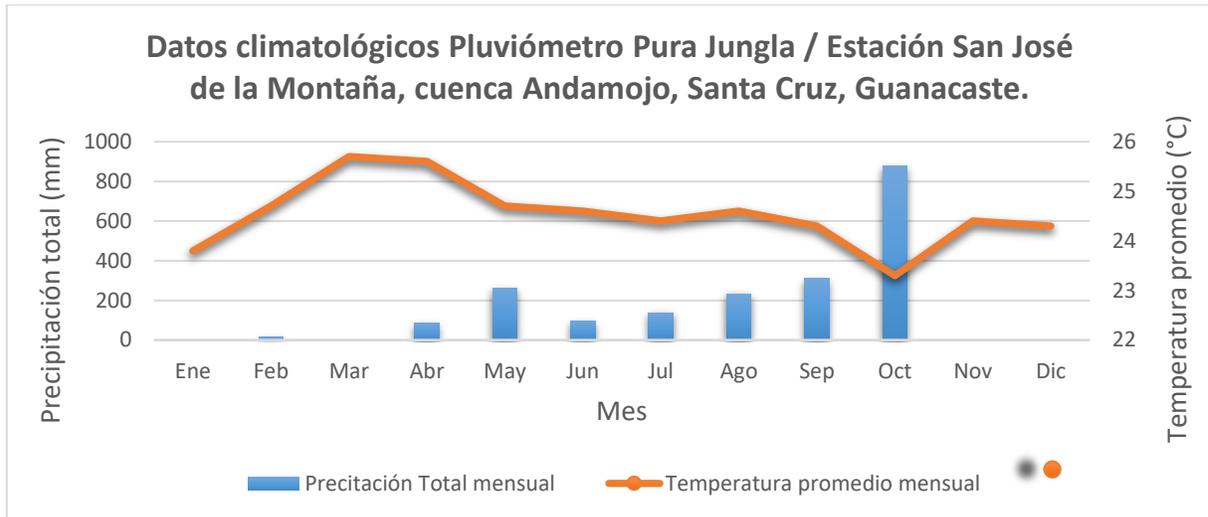
Mora (1978) indicó que la cuenca Andamojo se ubicada en la franja más seca de toda la Península, donde la precipitación promedio anual no sobrepasa los 1500 mm, mientras que Bolaños (1973) afirma que la cuenca del río Andamojo, así como otras de la provincia de Guanacaste, permanece predominantemente seca durante los meses de verano, pero que las lluvias máximas de cada año son capaces de inundar toda la región.

Herrera (1980) estudió la precipitación para el período 1979-1980, esto con la ayuda de un pluviógrafo propiedad del SENARA, el cual fue instalado en el centro del poblado de Río Seco, con el mismo se registró una precipitación anual de 2415,6 mm.

El área de estudio posee un clima relativamente seco la mayor parte del año, tiene influencia lluviosa principalmente en los meses de setiembre y octubre (gráfico 1), meses en los que incluso se da la presencia de cierres de caminos parciales a totales, debido a las inundaciones, situación que comúnmente tiende a dejar a los pobladores incomunicados por algunos días.

Según el registro pluviométrico propiedad de Pura Jungla, y datos meteorológicos provistos por el IMN (gráfico 1) para esta tesis (se detallará en el apartado 4.3.1), se observa que la estación lluviosa ocurre desde mayo hasta octubre, siendo octubre el mes más lluvioso, mientras que los meses más secos, van desde noviembre hasta marzo, lo cual coincide bastante con la climatología establecida para la subregión occidental de la Península de Nicoya.

Gráfico 1: Precipitación total mensual Vs temperatura promedio mensual del área de estudio



Precipitación tomada del Pluviómetro Pura Jungla (2018) / Temperatura promedio tomada de la estación N° 172187 San José la Montaña, (IMN, 2018)

Para realizar el balance hídrico de suelos se utilizaron datos meteorológicos proporcionados por la Dra. Ana María Durán (se detallará en el apartado 4.4), del Centro de Investigaciones Geofísicas (CIGEFI), los cuales fueron generados en el proyecto titulado: Efectos del cambio climático observado sobre el ciclo hidrológico y la disponibilidad de recurso hídrico en la Región Chorotega, N°B7507, mediante financiamiento del Fondo de Incentivos del MICITT.

Según lo explicado por la Dra. Ana María Durán, dicha información se generó a partir de un registro observacional con datos de calidad adecuada, que toma en cuenta un registro histórico que va desde 1980 al 2017, para un total de 37 años. Con esto se genera un producto en grilla de 10 km a partir de la calibración de un modelo dinámico regional, tomando en cuenta características tales como la topografía y vegetación. A partir de la información modelada, se valida y se genera una serie de tiempo con las mismas características de resolución temporal del registro histórico observado (datos del IMN), una vez se calibra las series básicas, que son la temperatura y precipitación, se valida y calibra la serie mensual de estos parámetros, que a su vez corresponde con los datos utilizados en la presente investigación.

Cabe resaltar que esta modelación dinámica de datos meteorológicos fue realizada para toda la región Chorotega.

Respecto a la vegetación que caracteriza esta subregión, es de tipo bosque seco tropical, según Quesada (2007), quien indica que el ámbito de precipitación media anual varía entre 800 y 2100 mm, además la disminución de las precipitaciones ocurre entre los meses de noviembre a mayo, y comprende la estación seca, durante la cual gran cantidad de especies forestales producen flores. El mismo autor menciona algunas especies vegetales comunes de esta zona de vida como: *Anacardium excelsum* (espavel), *Enterolobium cyclocarpum* (guanacaste), *Samanea saman* (cenízaro), *Tabebuia rosea* (roble sabana), *Hymenaea courbari* (guapinol), *Manilkara sapota* (chicle), *Cochlospermum vitifolium* (poro poro), *Calycophyllum candidissimum* (madroño), *Bombacopsis quinatum* (pochote).

Es importante mencionar que, durante el trabajo de campo de esta investigación, se identificaron cultivos de teca, en varios puntos del área de estudio. Este cultivo es característico por presentar una raíz pivotante gruesa y larga (tiene como función el anclaje) que puede persistir o desaparecer, y forman numerosas raíces fuertes y laterales FONAFIFO (2003)., Además las raíces de la teca son sensibles a la deficiencia del oxígeno, por esto la profundidad de las mismas es poca, aproximadamente de 30 cm FONAFIFO (2003).

En sitios afectados comúnmente por incendios, donde hay suelos poco fértiles, se desarrolla una vegetación dominada por *Curatella americana* (raspa guacal) y *Byrsonima crassifolia* (mance). En sectores poco impactados por actividades humanas, se pueden diferenciar hasta 3 estratos de vegetación (inferior, medio y alto) siendo el mayor de hasta 20 m; además presenta un sotobosque escaso y compuesto por arbustos espinosos (Quesada, 2007).

1.5 Pequeña reseña histórica

Los pobladores del distrito Veintisiete de Abril conocen al río principal de esta cuenca como el río *Nandamojo*, mientras que en la mayor parte de la bibliografía consultada utilizan el nombre Andamojo. No se tiene certeza cuál es el nombre original del río. Quirós (1987) en su artículo “Términos Chorotegas en la Toponimia Guanacasteca” menciona que Andamojo es posible sea el mismo *Nandamojo* y que su formación se deba a una etimología española y no chorotega. No existe en español un término *nanda*, pero si “mojo” o por creer la gente, al escuchar la expresión “en Nandamojo” que la *n* formara parte sólo de la preposición y no del nombre. En los términos chorotegas Quirós (1987) menciona que *Nanda* es “arroyo” *mojo* es “ojoche”.

1.6 Alcances y limitaciones del estudio

Dentro de los alcances se establece lo siguiente:

- Se estableció la cuenca Andamojo como el límite espacial del área de estudio, por lo que tanto la información geológica, hidrogeológica, hidrológica y meteorológica se encuentran supeditadas y fueron obtenidas principalmente para dicha área.
- Adicionalmente puesto que se utilizó información geoquímica y geofísica reciente como insumo para la construcción del modelo conceptual, en los sitios donde se aplicaron dichas técnicas se pudo actualizar la información hidrogeoquímica y validar los límites del acuífero y modelos sugeridos por otros autores.
- No fue posible establecer una campaña de mediciones de fallas y fracturas a nivel de cuenca, debido a que no era parte de los objetivos del estudio, sin embargo, se pudo constatar que en la unidad del Complejo de Nicoya (basaltos) se da la presencia de gran cantidad de fracturas cerradas y fracturas rellenas con vetas sin reacción al HCl, rellenas arcilla y en menor proporción calcita. Son pocas las fracturas que se observaron abiertas.

Como limitantes del estudio se puede indicar los siguientes elementos:

- Se asume que las ubicaciones de los pozos con las que fueron realizados estos trabajos son correctas, puesto que se tomó información oficial de la base de datos del SENARA.
- Una limitante fue la distribución de pozos en la cuenca, además algunos registros de pozos no tenían información litológica o de niveles de agua por lo que no pudieron ser utilizados para la confección del modelo.
- Los parámetros hidráulicos reportados en los registros de pozos utilizados en ocasiones eran escasos o inexistentes.
- No se pudo muestrear la cuenca en su totalidad con pruebas de infiltración o ensayos de suelo y aforos, debido a las condiciones de los caminos y el clima como se mencionó en el apartado anterior, sin embargo, se intentó bajo criterio profesional, establecer los puntos que se consideró fueran primordiales para un correcto modelado del acuífero, por ejemplo, intentando muestrear todas las litologías y en el caso de los aforos tratando de obtener datos de los cauces principales.
- Durante estación seca no fue posible aforar algunos cauces, ya que los mismos no presentaban ningún flujo aparente o se encontraban del todo secos.
- La metodología GOD se realizó únicamente en la zona aluvional de la cuenca, debido a que es en esta zona donde se localiza la mayor cantidad de pozos con registro litológico.
- La estación meteorológica más cercana al área de estudio tenía un faltante de 5 meses de información, por lo que se descartó su utilización para este proyecto. En su lugar se decidió trabajar con datos de precipitación y temperatura media generados a partir de un modelo dinámico regional (Durán et al., 2019), mientras que otros parámetros meteorológicos como humedad, brillo solar, entre otros, no fue posible obtenerlos al momento de inicio de este proyecto.

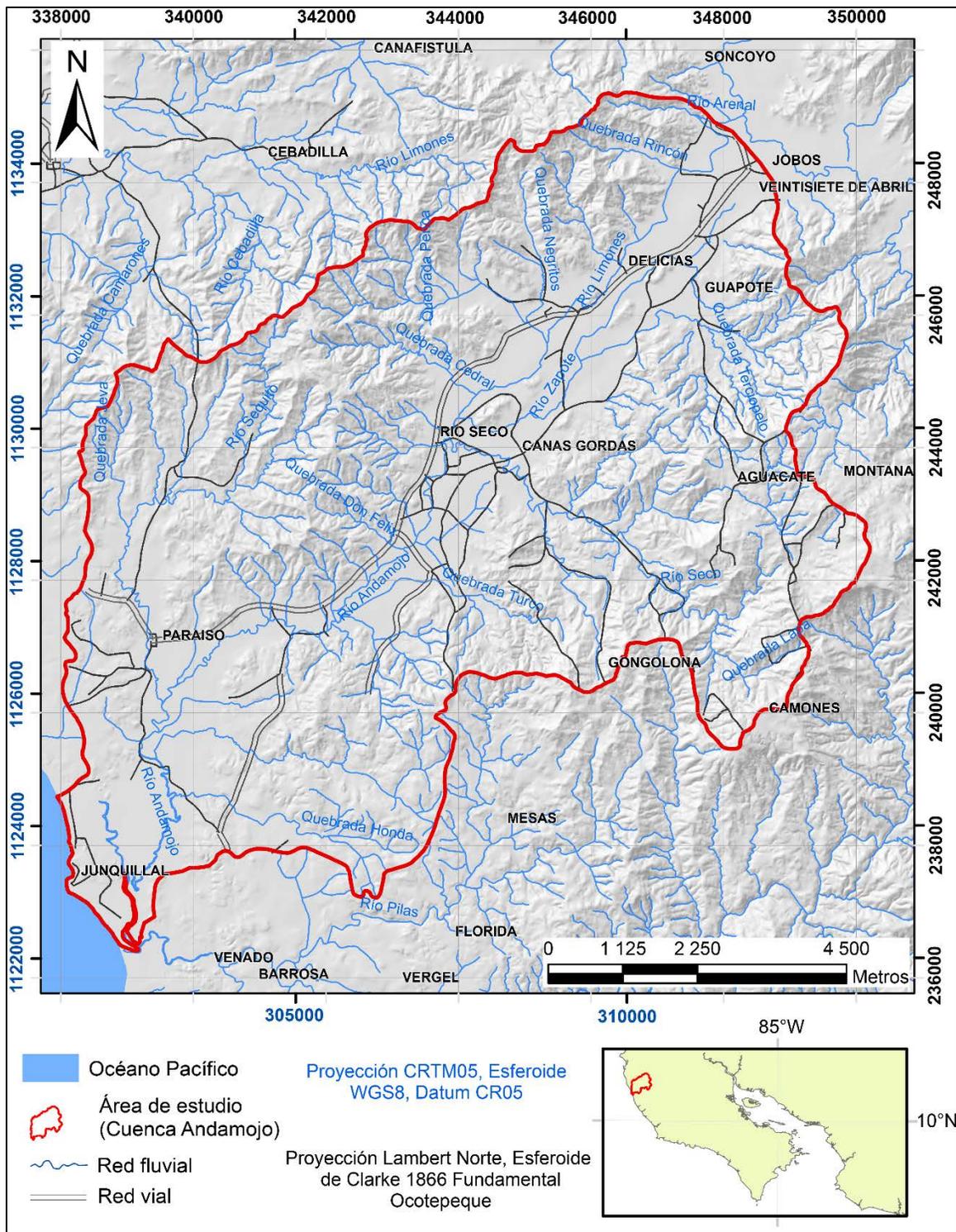


Figura 1: Mapa de ubicación de la cuenca Andamojo, Santa Cruz, Guanacaste. Elaboración propia a partir de datos del SNIT (2018)

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo General

Caracterizar el recurso hídrico subterráneo de la Cuenca Andamojo en la zona de Santa Cruz, Guanacaste, con el fin de determinar su potencial acuífero como herramienta para la gestión del agua.

1.7.2 Objetivos Específicos

- Elaborar un modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca de Andamojo a partir de la información geológica, geomorfología, información de pozos, geofísica e hidrogeoquímica, que muestre la dinámica del agua subterránea en la zona de estudio.
- Determinar la susceptibilidad a la contaminación del agua subterránea a partir del análisis de la vulnerabilidad en el sector aluvial de la cuenca Andamojo.

1.8 Hipótesis

Este proyecto se trabajó bajo la siguiente hipótesis:

La cuenca del río Andamojo presenta dos unidades hidrogeológicas que corresponden con la zona aluvial y los basaltos del Complejo de Nicoya, se prevé que el potencial acuífero de la cuenca Andamojo es bajo, dado que los caudales reportados en los pozos en la zona aluvial son bajos, mientras que en los basaltos del Complejo de Nicoya el agua subterránea se ve limitada por la heterogeneidad del medio geológico.

1.9 Metodología

En el presente proyecto se actualizó el estado del recurso hídrico subterráneo mediante la construcción de un balance hídrico, con el cual se determinó la recarga potencial a los acuíferos, para esto se utilizó la metodología propuesta por Schosinsky y Losilla (2000) y Schosinsky (2006), por lo cual se recabó y validó información geológica existente y nueva, se analizaron las características físicas de suelos, y finalmente se utilizaron datos meteorológicos del proyecto N°B7507 del CIGEFI (Duran et al., 2019) para estimar la recarga potencial al agua subterránea. Además, se utilizó la información de los pozos de la base de datos del SENARA (incluyendo pozos construidos recientemente) y prospecciones geoeléctricas de tipo SEV realizadas por el Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (Arias, 2018). En el área de estudio, que generó información de gran detalle de la geología de sitios específicos como fuente base para definir la geometría del acuífero y construir un modelo hidrogeológico.

Asimismo, se obtuvieron datos actualizados de suelos distribuidos a lo largo de la cuenca, los cuales son de gran utilidad para el desarrollo del balance hídrico de suelos, tales como la capacidad de infiltración, densidad aparente, capacidad de campo y el punto de marchitez.

Además, se utilizó la metodología GOD (Foster & Hirata, 1988) para determinar la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero, en la zona plana de la cuenca, utilizando información reciente de niveles de agua medido en pozos perforados y excavados en su mayoría. Además, se incluyeron los datos hidrogeoquímicos recabados en el proyecto realizado por Vargas (2018), para establecer la composición y calidad química del agua subterránea en la zona.

Es importante mencionar que la cartografía utilizada en campo para estudiar la cuenca Andamojo, permitió identificar la geología con un mayor detalle a escala, pero manteniendo la escala 1:50 000 existente para la zona.

El proyecto consistió de tres fases:

Fase 1, recopilación de información existente y planificación del trabajo:

- En primera instancia se realizó la recopilación de información geológica, hidrogeológica, meteorológica y cartográfica, a partir de las bases de datos, información bibliográfica y registros de la Escuela Centroamericana de Geología, el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento (SENARA), el Sistema de Bibliotecas, Documentación e Información (SIBDI), el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y el Instituto Geográfico Nacional (IGN)
- Planificación del trabajo de campo.
- Elaboración de los mapas base.
- Diseño de una malla de muestreo para el análisis de agua, suelo y roca.
- Compilación de información de pozos y manantiales de las bases de datos del SENARA, AyA y la Dirección de Aguas del MINAE.

Fase 2, trabajo de campo y análisis de laboratorio:

- Realización de giras para el reconocimiento del área, identificación de posibles pozos para el muestreo de aguas.
- Realización de 10 pruebas de infiltración entre el 12 al 15 de noviembre del 2018, distribuidas en el área de estudio.
- Análisis de datos de 10 muestras de suelo distribuidas en toda el área, para determinar los parámetros de conductividad hidráulica. Toma de 10 muestras de suelo para realizar análisis de laboratorio (capacidad de campo, punto de marchitez y capacidad de campo).
- Elaboración del mapa de uso de suelo de la zona de estudio a partir de imágenes satelitales y comprobación en campo.
- Análisis de los datos y cálculo de la infiltración básica a partir de las pruebas de infiltración.

- Elaboración de un balance hídrico mediante la información obtenida de las muestras de suelo e información meteorológica.
- Actualización de la cartografía a escala 1:50 000, para detallar el contexto geológico de la zona.
- Generación de perfiles hidrogeológicos con la información recopilada en la base de datos del SENARA, pozos de la red de monitoreo y geofísica.
- Realización del mapa de afloramientos, geológico y geomorfológico, con la información recopilada en el campo, la bibliografía consultada y la información de pozos.

-

Fase 3, Síntesis de la información

- Síntesis e integración de la información para generar el producto final de la investigación, que consiste en un modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca Andamojo y determinación de la vulnerabilidad intrínseca del acuífero en las partes planas de la cuenca.

1.10 Antecedentes hidrogeológicos.

1.10.1 Hidrogeología

El primer estudio a detalle de los aspectos hidrogeológicos de la cuenca Andamojo estuvo a cargo de Mora (1978) quien indicó que el régimen del flujo de agua subterránea está relacionado con la estructura del basamento, que, aunque es casi impermeable, ha desarrollado zonas con algún grado de permeabilidad a lo largo de fallas y fracturas que lo cruzan. La presencia de un espesor de sedimentos aluvionales de variadas granulometrías, que actúa como medio de almacenamiento del agua transmitida por las zonas de falla permeables, es lo que hace de esta unidad, importancia geológica (Mora, 1978). Además, el autor menciona que hay un flujo de agua hacia el valle, y los depósitos porosos son capaces de almacenarla. En el análisis del basamento que corresponde con rocas del Complejo de Nicoya, Mora (1978) determinó que corresponde con rocas impermeables y que el acuífero

es homogéneo e isotrópico, además indica que el flujo que pasa a través de él, es de régimen permanente.

Una característica importante del drenaje de la cuenca, es que estos ríos aportan en conjunto un caudal de 30 l/s en la época de estiaje (Herrera, 1980).

Según el mapa hidrogeológico de la Península de Nicoya elaborado por Senara (1992) la cuenca Andamojo tiene un potencial acuífero medio en la zona del valle aluvial, mientras que en las zonas altas o montañosas los acuíferos son prácticamente ausentes, y para el límite ubicado en el extremo oeste, entre los indicados anteriormente, existe una zona de muy bajo potencial acuífero.

Herrera (1980) menciona que el acuífero de la cuenca Andamojo es libre, aluvional con algunos sectores de confinamiento, conformado por interestratificaciones de arcilla, arena y grava con espesores entre 15 y 35 m. Además, este mismo autor indicó que es de permeabilidad variable.

En una campaña geofísica llevada a cabo en 1980, se aplicó sísmica de refracción; el área abarcó desde la zona de Veintisiete de Abril hasta Paraíso, coincidiendo con el relleno aluvional; donde se obtuvo que el espesor del relleno se encuentra entre 15 m - 35 m y las velocidades sísmicas entre 800 y 1500 m/s, para una porosidad del 40% (Herrera, 1980). En el basamento se identifica una velocidad sísmica entre 2000 y 2500 m/s para la zona alterada o fracturada y entre 3000 m/s y 4000 m/s para la roca sana que corresponde con los basaltos del Complejo de Nicoya (Herrera, 1980). De acuerdo con la investigación también se concluye que el área más promisoría para la explotación de aguas subterráneas, desde el punto de vista estructural, es la comprendida desde Veintisiete de Abril hasta Delicias, no obstante, estas zonas presentan mayores contenidos de limos y arcillas, que, por su baja porosidad y permeabilidad, restringen de cierta manera la producción acuífera en la zona (Herrera, 1980).

Rodríguez (2010) mediante los análisis de laboratorio de las muestras de suelo, obtiene una porosidad promedio de 57% y estudia la presencia de acuíferos tanto

en el horizonte superior del basamento, como en la unidad de depósitos aluviales, sin embargo, recalca que los principales se localizan en esta última.

Según Mora (1978) el caudal que pasa a través de la divisoria topográfica, en el tubo es de 48 l/s limitado por dos líneas de flujo, sin embargo afirma que el potencial de la cuenca es mayor de 50 l/s, puesto que hay que tomar en cuenta que a lo largo del recorrido el caudal se incrementa por el aporte proveniente de las fracturas y zonas permeables del basamento, añadido a esto la capacidad de almacenamiento de los sedimentos aluvionales permitirían extraer mucho más agua que la que pasa a través suyo.

Herrera (1980) menciona que en general las producciones por pozo y de acuerdo a su localidad varían entre 5 y 25 l/s.

Arellano y Vargas (2001) realizaron un estudio general sobre algunos acuíferos de la península de Nicoya dentro de los cuales mencionan el acuífero de la cuenca Andamojo y para el cual determinan las siguientes características (Tabla1).

Tabla 1: Acuífero Rio Andamojo (tomado y modificado de Arellano & Vargas,

Acuífero	Q (l/s)	E (m)	Localidad	T (m ² /d)	k (m/d)	S
Río Andamojo	1-5	20	Río Seco	1080	6,4 - 43,0	0,05

2001)

Donde: Q: caudal promedio; E: espesor promedio; T: transmisividad, k: conductividad hidráulica; S: coeficiente de almacenamiento.

Para el acuífero originado en la unidad de depósitos fluviales cuaternarios, se reportan caudales máximos en pozos de 11 l/s, mientras que para el que se forma en los basaltos al limitarse a un horizonte superior meteorizado y alterado, se reportan caudales de hasta 4,5 l/s, aunque generalmente los valores se encuentran entre 1 y 3 l/s (Rodríguez, 2010).

Mora (1978) realizó un mapa de isofreáticas, a partir de mediciones en los niveles freáticos de algunos pozos para el mes de noviembre de 1976, en el mismo se

muestra la continuidad de los sedimentos aluvionales a uno y al otro lado de la divisoria topográfica.

Por su parte Herrera (1980), mediante mapas de isofreáticas observa un desplazamiento de las curvas con dirección a la costa cuando el acuífero está en su máximo nivel de almacenamiento; además de esto identifica que el río Andamojo es efluente.

Rodríguez (2010) indica que los niveles de agua subterránea se encuentran en el rango de un metro y hasta los 45 metros de profundidad. El autor indica mediante las isofreáticas que la dirección del agua subterránea corre desde las partes altas o cerros hacia la parte central de la cuenca, además afirma que el río Andamojo y sus afluentes que corren por la planicie se comportan como ríos efluentes, lo cual permite entender los caudales permanentes (Rodríguez, 2010).

Herrera (1980) calcula los gradientes hidráulicos de la zona que muestran una variación entre 0,002 y 0,005 donde el primer valor corresponde con zonas en el acuífero de mayor transmisividad, comprendidas entre los poblados de Río Seco y Paraíso. Las zonas aparentemente con menor transmisividad se ubican entre los poblados de Río Seco y Veintisiete de Abril.

Por su parte Rodríguez (2010) indica que el gradiente subterráneo en la llanura aluvial es de 0,016 (1,6%) en el sector norte y de $8,6 \times 10^{-4}$ (0,08%) cerca del extremo suroeste y más cercano a la costa (Rodríguez, 2010).

Herrera (1980) calcula un volumen extraído total anual equivalente a $1,05 \times 10^6 m^3$, del acuífero presente en la cuenca del Río Andamojo. Considerando que el volumen de la recarga anual de $40,4 \times 10^6 m^3$ (correspondiente al flujo de base anual según el registro del Hidrograma del río Andamojo), el caudal extraído en los 80's representaba un 2,6% del caudal disponible, no obstante, estos datos deben actualizarse hoy en día (Herrera, 1980).

Para el cálculo de la recarga a los acuíferos, Rodríguez (2010), elige el método de la entrada de agua en el suelo y posteriormente determina cuánta de esa agua se convierte en recarga; para esto el mismo autor calcula la precipitación que infiltra a

partir de la metodología de Schosinsky y Losilla (2000) y Schosinsky (2006) y posteriormente determina el balance de humedad de suelos con la metodología propuesta por Penman-Grindley.

Rodríguez (2010) calcula la recarga potencial usando el método de Penman-Grindley a una escala mensual, donde se toma la lluvia que infiltra cada mes y se relaciona con el grado de humedad que hay en el suelo, así obtuvo un volumen promedio de la recarga anual igual a $30.67 \times 10^6 m^3$.

Rodríguez (2010) compara la recarga potencial ($30,67 \times 10^6 m^3$) con la extracción estimada ($2,09 \times 10^6 m^3$), y obtiene una diferencia de $28,58 \times 10^6 m^3$ o un caudal continuo equivalente a 905 l/s (Rodríguez, 2010).

Mora (1978) define las aguas de composición bicarbonatados-magnésica, con una participación de los iones de cloruro y con el ion calcio no predominante.

Herrera (1980) clasifica las aguas dentro del tipo Bicarbonatado-cálcicas, y a excepción de uno de los pozos analizados (DI-162) que se encontraba a la intemperie, el resto de los análisis dieron como resultado aguas con parámetros físico-químicos dentro de las normas permitidas.

Rodríguez (2010) recolecta muestras de agua de tres pozos para realizar análisis usando parámetros bacteriológicos y físico químicos; en los análisis bacteriológicos sólo un pozo presentó coliformes fecales y *Escherichia coli* fuera de las normas de potabilidad; este pozo es excavado, y aunque se encuentra protegido por su estructura propiamente; se ubica muy cerca de un tanque séptico el cual presenta derrames de agua en el suelo, por lo que se concluye que muy probablemente se trate de una contaminación local. Los análisis físico químicos indican que las aguas se encuentran dentro de las normas de potabilidad para los parámetros analizados (Rodríguez, 2010).

Astorga (s.f.) hace mención de los acuíferos con mayor riesgo por intrusión salina en la provincia de Guanacaste, entre los cuales se encuentran el de San José de Pinilla y Río Andamojo, mientras que Arellano & Vargas (2001), realizan un estudio de casos de contaminación por intrusión salina en acuíferos de la Península de

Nicoya donde determinan que el acuífero de la cuenca Andamojo no se ve afectado por la misma.

En cuanto la definición de la cuenca del río Andamojo realizada por Mora (1978) y Herrera (1980) son bastante similares, sin embargo, se puede encontrar algunas diferencias entre las cuencas trazadas por Herrera (1980) y Rodríguez (2010), la variante principal radica en que Rodríguez abarca mayor área en la parte sureste de la cuenca lo que corresponde con el poblado de Florida y alrededores.

El Tabla 2 muestra los principales aportes de la hidrogeología hecha por diferentes autores, a lo largo del tiempo para la zona.

Tabla 2: Estudios hidrogeológicos previos en la cuenca Andamojo

Autor (año)	Aportes a la hidrogeología
Mora (1978)	Primer estudio hidrogeológico general de la cuenca Andamojo. Clasifica el acuífero como homogéneo e isótropo. Indica que el régimen del flujo del agua subterránea se relaciona con la estructura del basamento, que, aunque es impermeable ha desarrollado zonas de alguna permeabilidad a lo largo de fallas / fracturas y que a su vez se almacena en el relleno aluvial.
Herrera (1980)	Hidrogeología de la cuenca del Río Andamojo. Determina dos unidades hidrogeológicas, porosidad, espesores del acuífero (zona aluvial). Determina que el acuífero de la cuenca Andamojo es libre con algunos sectores de confinamiento.
Rodríguez (2010)	Estudio hidrogeológico (general) de la cuenca Andamojo. Determina que hay dos acuíferos en la cuenca Andamojo, el primero restringido a la parte superior meteorizada de los basaltos y el segundo en la zona aluvial.

En vista de que esta zona tiene un potencial turístico importante por la presencia de playas, se requiere de información actualizada acerca de la situación del recurso hídrico y su potencial en la zona, con el fin de contar con herramientas técnico-científicas para mejorar la gestión del agua y el ordenamiento del territorio en la cuenca del río Andamojo.

1.10.2 Geofísica

En el año 2018 el Centro de Investigación en Ciencias Geológicas realizó un trabajo de geofísica para el proyecto 113-B5-169 “Investigaciones en Acuíferos seleccionados de Costa Rica” el cual tiene por título: “Sondeos Eléctricos Verticales en sitios seleccionados de Guanacaste” el cual estuvo a cargo del M.Sc. Mario Arias y su equipo de colaboradores. En dicho proyecto se llevaron a cabo 13 SEV (figura 2) en la cuenca Andamojo, los cuales se interpretaron tomando en consideración la información geológica disponible (tabla 3).

Tabla 3: Características de los Sondeos Eléctricos Verticales, realizados por Arias (2018)

Arreglo electrónico	Schlumberger	-
Longitud propuesta	400 m	Debido a factores como la limitación de espacio en el sitio y la información geológica/ hidrogeológica disponible en algunos SEV la abertura de AB/2 tuvo que ser menor a los 200 m (Arias, 2018).
Abertura máxima (AB/2)	200 m	
Profundidad de investigación	50 m	

En el anexo 1 se detallan cada una de las capas según lo interpretado por Arias (2018). Los resultados anteriores se analizaron espacialmente mediante dos perfiles geoelectricos (figura 3 y 4).

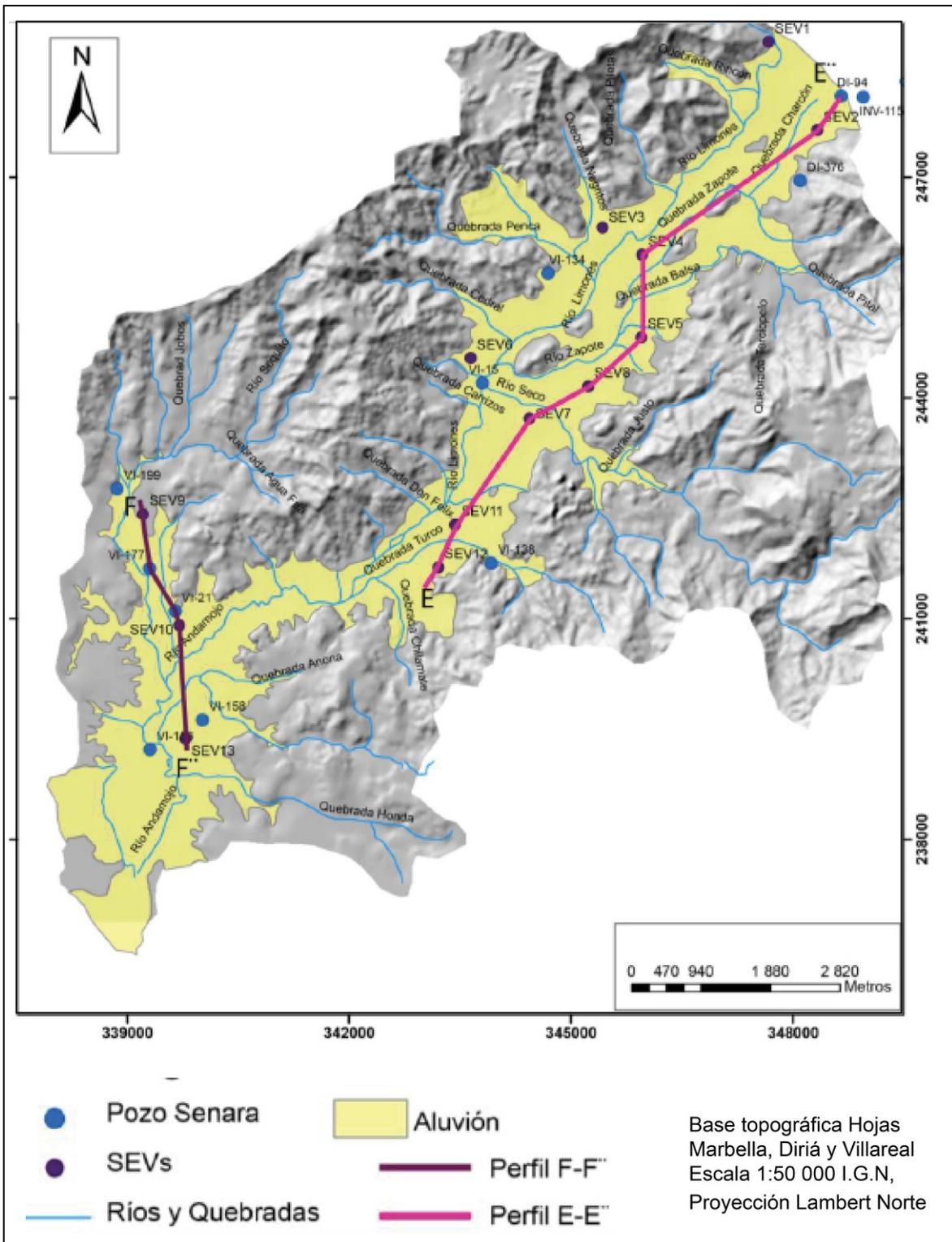


Figura 2: Ubicación de los SEVs y perfiles geoelectricos realizados en el área de estudio. Imagen tomada y Arias (2018)

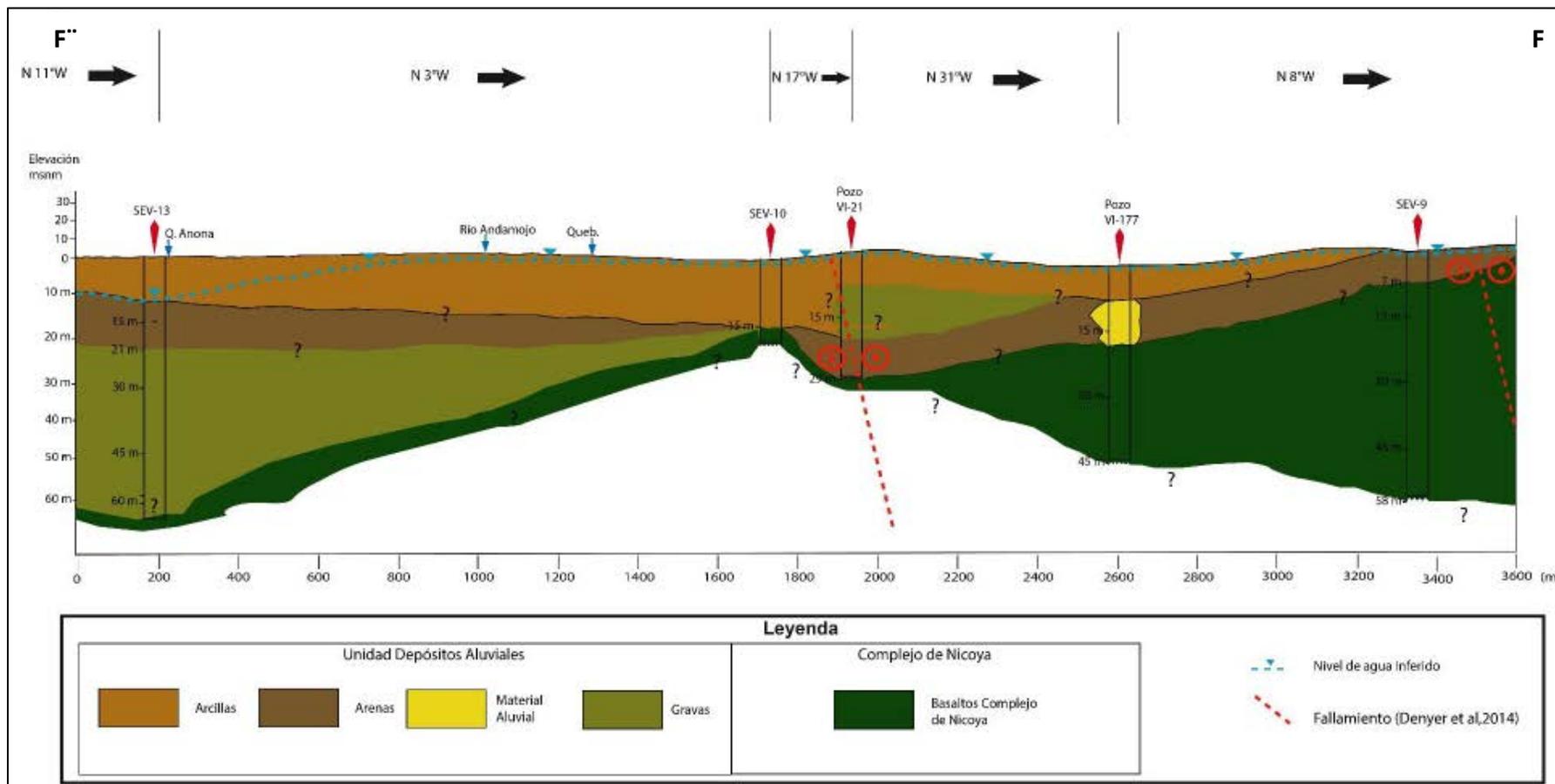


Figura 4: Perfil geoelectrico F-F'' con dirección N-S localizado en la cuenca Andamojo. Imagen tomada y modificada de Arias (2018)

1.11 Vías de acceso

La vía de acceso principal al área de estudio es la ruta nacional 160, la cual viene desde Santa Cruz, pasando por Lagunilla y se desvía al pueblo Veintisiete de Abril, en el cruce hacia Huacas y Tamarindo. La carretera se mantiene con asfalto hasta aproximadamente el cruce con la carretera cantonal 928, la cual lleva hasta Los Pargos, Playa Negra, Playa Blanca, y Playa Junquillal. Una vez dentro del área se observó la presencia de pequeños caminos algunos no aptos para vehículos bajos debido a la gran cantidad de material suelto y huecos, los cuales incluso en estación lluviosa se vuelven intransitables con vehículos doble tracción debido al barro y a la necesidad en ocasiones de cruzar ríos altamente caudalosos. Salvo por algunos caminos donde su acceso es privado, la mayor parte de la cuenca baja es transitable, a diferencia de la cuenca alta donde existen pocos caminos disponibles o los mismos se encuentran en muy mal estado.

Capítulo 2: Marco Conceptual

2.1 Modelo hidrogeológico conceptual

Un modelo es una representación de un sistema real, y cuando se estudia un sistema de flujo de agua subterránea se desarrolla un modelo conceptual (Fetter, 2001).

Por su parte Custodio & Llamas (2001) afirman que un modelo conceptual es una simplificación de una situación real que se conoce sólo puntualmente a través de un número limitado de datos, este autor describe el proceso, que se requiere al pasar de una situación real, a un modelo conceptual, el cual se resume de la siguiente manera:

- Geometría del sistema: Espesores de las formaciones litológicas, niveles del agua subterránea.
- Características hidráulicas: Parámetros de transmisividad, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento, entre otros.
- Funcionamiento hidráulico: Relación del acuífero con aguas superficiales, dirección del flujo subterráneo, relación entre acuíferos, áreas de recarga al acuífero, entre otros.
- Acciones sobre el sistema: Infiltración de lluvia, evapotranspiración y Recarga

2.2 Acuífero

De acuerdo con Custodio & Llamas (1983) un acuífero es un estrato o formación geológica que permite la circulación del agua por sus poros o grietas, hace que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus necesidades.

2.3 Regolito

El regolito está conformado por varios horizontes, en la parte superior corresponde con un suelo residual sin la presencia de la estructura de la roca original, por debajo de este nivel se forma un regolito que es una acumulación de minerales arcillosos y secundarios (grava) de la roca madre, finalmente se encuentra la saprolita, que es una acumulación de minerales arcillosos y secundarios con vestigios de la estructura de la roca madre; en este horizonte puede haber fracturamiento (Singhal & Gupta, 2010). Este tema se detallará en apartado 4.3.2 donde contextualizará al área de estudio.

2.4 Balance hídrico de suelos mediante el método de Schosinsky (2006).

La necesidad de conocer el potencial de las aguas subterráneas para ser explotadas mediante pozos, conduce a estimar la recarga de los acuíferos, con base en la distribución de la precipitación y coeficientes de infiltración en los suelos del país (Schosinsky, 2006).

Para determinar la infiltración de lluvia que penetra al suelo en una zona, se requiere la siguiente información: la precipitación mensual de la zona de estudio, los diferentes valores de infiltración básica de los suelos, la cobertura vegetal del suelo y la pendiente del terreno (Schosinsky, 2006).

Según Schosinsky (2006), el agua que ingresa a un suelo, es igual al agua que se almacena en el suelo, más el agua que sale del mismo. Las entradas se deben a la infiltración del agua hacia el suelo, y las salidas ocurren por la evapotranspiración de las plantas, más la descarga de los acuíferos (Schosinsky, 2006).

La recarga al acuífero se lleva a cabo cuando, la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante, una vez satisfecha la capacidad de campo y la evapotranspiración, será la recarga del acuífero y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$R_p = P_i + H_{Si} - H_{Sf} - ETR$$

Donde:

R_p = Recarga potencial mensual en mm/mes.

P_i = Precipitación que infiltra en mm/mes.

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

ETR = Evapotranspiración real en mm/mes.

En la figura 5 se muestra un resumen de la metodología Schosinsky (2006).

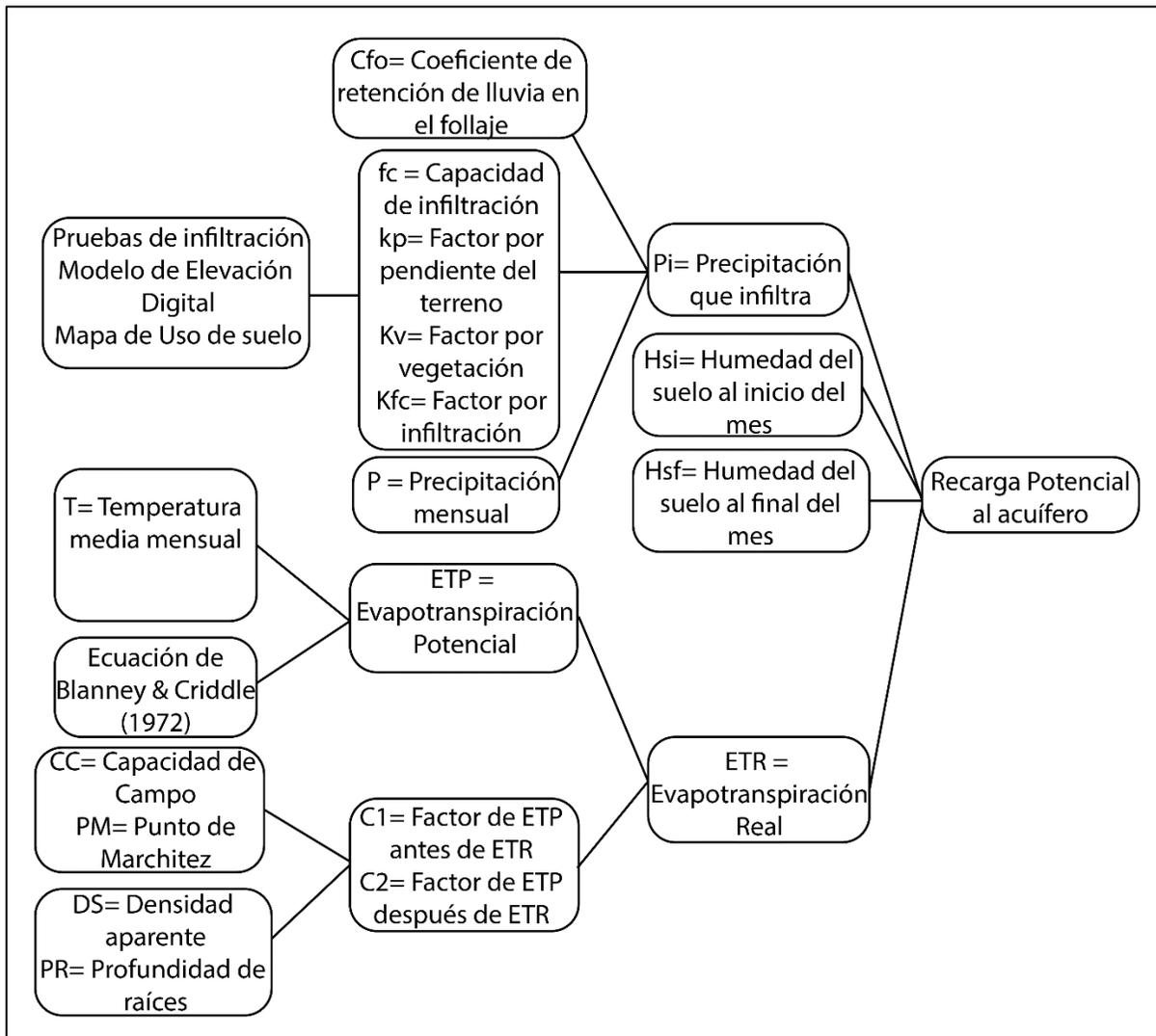


Figura 5: Diagrama de la metodología de Schosinsky (2006). Tomado y modificado de Monge (2015)

2.5 Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos

Es la sensibilidad de un acuífero a ser afectado en forma adversa por una carga contaminante impuesta y es una consecuencia de las características naturales de los estratos que lo separan de la superficie del suelo (Foster et al., 2002). Existen diferentes métodos para obtener la vulnerabilidad, en esta investigación se utilizó la metodología GOD propuesto por Foster (1987), debido a que es recomendada por el Senara en los términos de referencia para la elaboración de estudios hidrogeológicos en Costa Rica, publicado en el diario Oficial la Gaceta N°137, el 19 de julio del 2017. Además, esta metodología está diseñada para zonas cuya información del subsuelo y del agua subterránea es escasa, ya que esta metodología se basa en tres parámetros, que por lo general están disponibles o son fácilmente determinables (Foster et al., 2002).

2.6 Índice de Vulnerabilidad GOD

El índice de vulnerabilidad GOD (por sus siglas en inglés) considera el confinamiento hidráulico, la ocurrencia del sustrato suprayacente y la distancia al nivel de agua subterránea. Este método caracteriza la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos en función de los siguientes parámetros (Foster et al., 2002):

- Grado de confinamiento hidráulico del acuífero en estudio. A este parámetro se le asigna un índice en una escala de 0,0 a 1,0.
- Ocurrencia del sustrato suprayacente (zona no saturada o capas confinantes) se basa en las características litológicas y el grado de consolidación, las cuales determinan la capacidad de atenuación de los contaminantes. A este parámetro se le asigna un índice en una escala de 0,4 a 1,0.
- Distancia al agua determinada como: la profundidad al nivel del agua en acuíferos no confinados o la profundidad al techo de acuíferos confinados. A este parámetro se le asigna un índice en una escala de 0,6 a 1,0.

2.7 Composición química del agua

Las aguas naturales nunca son puras, ya que siempre contienen pequeñas cantidades de sólidos y gases disueltos (Fetter 2001). La composición de la solución acuosa depende de un conjunto de factores, tales como: la composición inicial del agua, la presión parcial de la fase gaseosa, el tipo de materia mineral con la que el agua entra en contacto, el pH y el potencial de oxidación de la solución (Fetter 2001). Para mostrar los resultados de análisis de datos hidrogeoquímicos, se utilizan tablas o gráficos, como por ejemplo diagrama de Piper, Stiff, Shoeller, entre otros; generalmente estos datos se pueden expresar en unidades de miligramos por litro (mg/L), miliequivalentes por litros (meq/L) o milimoles por litro.

Capítulo 3: Aspectos físicos de la cuenca Andamojo

3.1. Geomorfología regional

Rodríguez (2010) identifica cuatros unidades geomorfológicas que se describen a continuación (figura 6):

3.1.1 Llanura aluvial:

Forma la parte central y de menor elevación de la cuenca, es característica por su relieve plano. Se forma por la depositación de materiales durante las crecidas de los ríos.

3.1.2. Coluvios:

Se origina en menor cantidad con respecto a la totalidad de la cuenca. Se forma por la depositación de materiales que provienen de las serranías.

3.1.3. Serranías y suelos residuales y denudacionales:

Ocupan los terrenos con topografía más abrupta y se originaron por la erosión de los basaltos que son las rocas existentes en la cuenca, y ocupan una importante proporción dentro del área de estudio.

3.1.4. Meseta estructural:

Se localiza en el suroeste de la cuenca, confinando a las zonas de llanura aluvial. Se originó debido a la erosión diferencial de las rocas basálticas, la cual puede verse con pendientes más bajas que las serranías, y con frecuentes oscilaciones en el terreno.

Rodríguez (2010), además clasifica el humedal/manglar como una llanura de inundación marina con relieve plano, por lo que esta área no es tomada como acuífero o terreno utilizable.

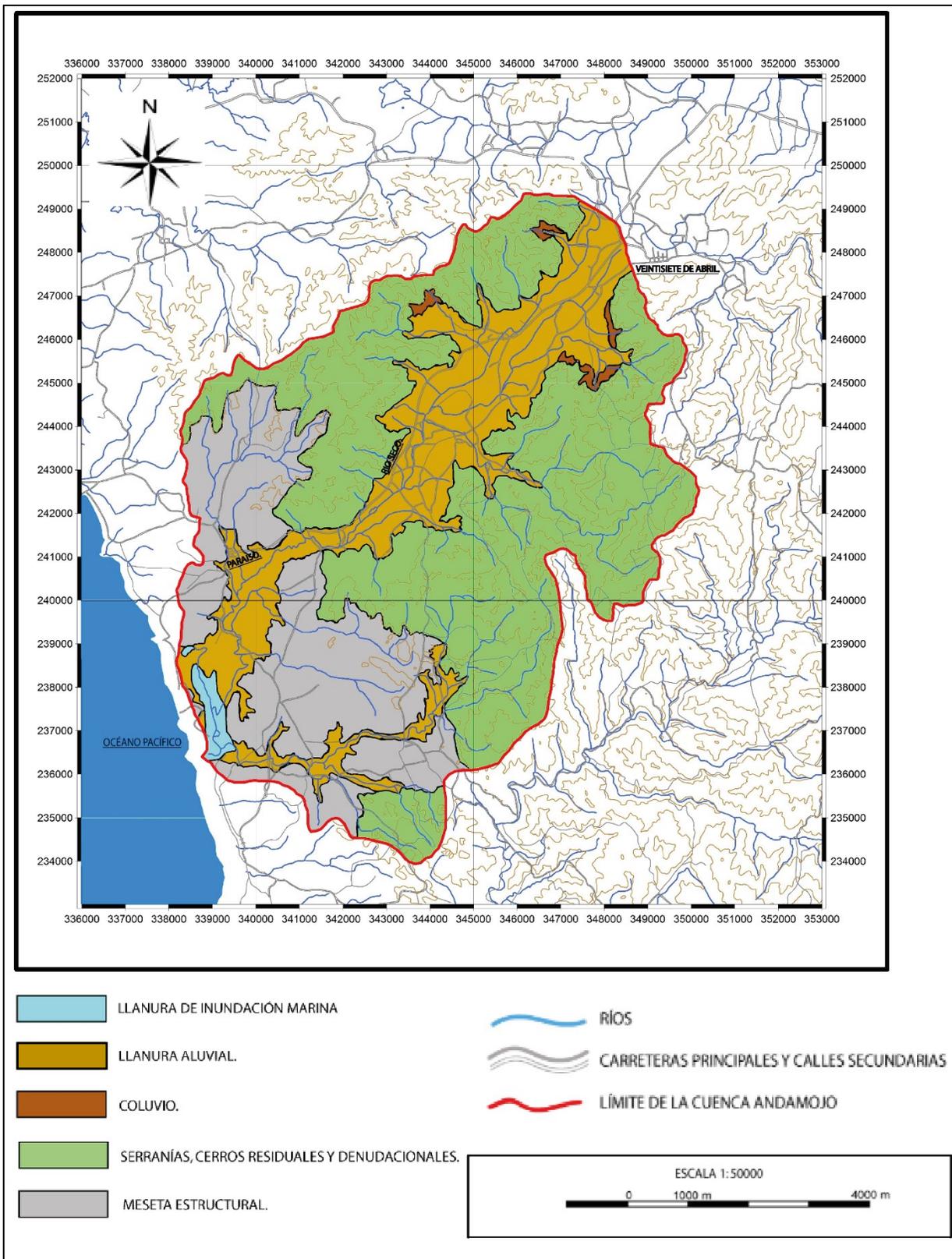


Figura 6: Mapa geomorfológico tomado y modificado de Rodríguez (2010)

3.2 Geología Estructural

“Bajo el NW de la península de Nicoya se subduce una litósfera oceánica formada en la dorsal de Pacífico E, caracterizada por un piso oceánico de morfología relativamente suave” Montero & Denyer (2011).

Montero & Denyer (2011) clasifican las deformaciones neotectónicas como aquellas que empezaron en algún momento del Neógeno, por causa de un proceso tectónico que perdura en la actualidad. Estas deformaciones se asocian con las subducción-colisión de la corteza engrosada

El área de estudio se encuentra afectada por el sistema de falla *los Chanchos*, la Falla Limones, y otras estructuras asociadas, que se describirán a continuación:

3.2.1. Falla limones-Cañas

Posee una longitud en el área de estudio de unos 9,5 Km, desde Veintisiete de Abril hasta las inmediaciones de Paraíso.

Montero & Denyer, (2011) relacionan el origen de esta falla al Cerro Azul, que es una superficie de erosión formada cerca del nivel del mar durante un periodo de estabilidad, y que por el proceso fue levantada en forma discontinua y diferenciada, lo que conlleva a su erosión y fragmentación en seis bloques principales (Finca Carrera Buena, Montaña, Esperanza, San Isidro, Cerro Azul y Once Estrellas). La deformación frágil se concentró en el sector NW de la superficie con el desarrollo de dos fallas principales con componente normal de levantamiento relativo en el lado SE llamadas falla limones-Cañas y Montaña, separando a los bloques de Carrera Buena y al último bloque Esperanza (figura 7).

Inicialmente esta falla se clasificó como neotectónica, sin embargo, estudios recientes indican que la falla Limones-Cañas, en las hojas Villareal y Diría tiene un trazo con rumbo NE, y es cortada por el fallamiento N-S dextral Los Chanchos, además no se encontraron rasgos que indiquen sea neotectónica (Denyer et al., 2014). La longitud total de la falla es de 15 Km y el bloque SE sube con respecto al NW (Denyer et al., 2014).

3.2.2. Sistema de falla Los Chanchos

Este sistema de fallas afecta la parte suroeste de la cuenca en estudio, presenta un rumbo preferencial hacia el NE, Montero & Denyer (2011) definen un arreglo de fallas dentro de la Península de Nicoya, de las cuales distinguen dos dominios, el primero y que se describirá en este trabajo, tiene un movimiento traslacional al norte y se ubica en el centro-NW de la Península, este se caracteriza por un predominio de bloques limitados por fallas subparalelas con un desplazamiento dextral con rumbos aproximados norte-sur llamado sistema de fallas **Los Chanchos** y otras fallas que no se mencionarán en este proyecto ya que se encuentran fuera del área de estudio.

Es un sistema de fallas dextrales, que al cruzar el río Limones, se subdivide en dos trazas. La traza W tiene rumbo NNE, con una componente normal, tal y como se observa en varios escarpes alineados y facetados al W (Denyer & Montero, 2011). La traza E de rumbo NE, tiene un escarpe principal facetado al NW, del lado N del bloque Montaña de la superficie Cerro Azul. Este relevo transtensivo de la falla Los Chanchos, se denomina Veintisiete de Abril, tal y como se observa en la figura 7 (Denyer & Montero, 2011).

3.3.1. Formas de origen denudacional

3.3.1.1 Pendientes denudacionales y colinas de baja pendiente (< 15°):

Estas formas se identifican al sur o parte baja de la cuenca Andamojo, en las cercanías de la desembocadura en el océano Pacífico. Su distribución forma parte de las localidades de Paraíso y Junquillal, ocupando un área total de 10,99 km^2 .

Las pendientes de estas formas son iguales o menores a 15° y se constituyen por basaltos muy meteorizados, en algunos sectores en su transición a la regolita. En el límite suroeste con la llanura aluvial Denyer et al. (2014) traza una falla dextral con rumbo N-S la cual no pudo ser comprobada en el campo, sin embargo, se encontraron algunas evidencias, como dos “charcos” cercanos a la estructura, que dan indicio de posibles fracturas donde el nivel freático aflora en superficie, además se puede observar el río Andamojo deflectado específicamente en ese sector (Figura 9). Por otro lado, en el sector sureste de esta unidad geomorfológica también se encuentra afectado por una falla dextral con dirección sur-noreste, en la cual se localizó un manantial o “charco”. Esta geoforma posee un patrón de drenaje dicotómico, con un área más pequeña que exhibe un patrón rectangular, al oeste de esta unidad (figura 8).

3.3.1.2. Pendientes denudacionales y colinas de moderada pendiente (15°- 45°):

Comprende un área aproximada de 15,62 km^2 y está distribuida hacia el sector izquierdo de la cuenca, al norte del poblado de Paraíso; también se le puede observar cómo cerros alineados con una dirección noreste-suroeste, en el sector alto y medio de la cuenca, sobresaliendo entre la unidad de llanura aluvial, siendo el origen de dichos cerros posiblemente asociado a la influencia de la falla Limones Cañas en este sector (figura 9). El patrón de drenaje rectangular es el de mayor influencia en esta unidad, el mismo se encuentra afectado por el sistema de fallas de la zona, y en particular por la falla Limones-Cañas que cruza la cuenca por unos 9 kilómetros con dirección noreste-suroeste (figura 8).

3.3.1.3. Pendientes denudacionales y montañas de alta pendiente (>45°):

Son colinas con pendientes mayores a los 45°, es la morfología que cubre mayor área, con un total aproximado de 40,22 km^2 .

La topografía de esta unidad es irregular, y es disecada por ríos que en algunos casos presentan socavamiento. Esta unidad está afectada por dos tipos de drenaje, el dendrítico, que afecta parte del sector medio de la cuenca, y el patrón de drenaje rectangular, el cual es el más común para la cuenca debido posiblemente al control estructural existente (figura 8).

3.3.1.4 Pie de monte:

Abarca un área aproximada de 4,65 km^2 , y se origina al pie de las zonas montañosas, en las localidades de Paraíso y Río Seco. Esta unidad se caracteriza por una topografía ondulada de baja pendiente, y de una disectación moderada. El patrón de drenaje es rectangular y con menor influencia dendrítico (figura 8).

3.3.2 Unidades morfológicas de origen fluvial.

3.3.2.1. Llanura aluvial:

Comprende unos 19,84 km^2 y corresponde con la zona plana de la cuenca. Forma parte de los depósitos aluviales y parte de la regolita de las rocas basálticas del Complejo de Nicoya (figura 9). Esta unidad presenta una topografía plana, sin embargo, en algunos sectores se identifican montículos en el terreno, generados por rocas del Complejo de Nicoya que han sido modelados por los procesos de la geodinámica externa.

Esta unidad está constituida por los ríos principales de la cuenca Limones, Zapote, Río Seco, Andamojo y algunos de sus colectores, estos ríos se caracterizan por permanecer secos en varias secciones, mientras que en estación lluviosa su caudal es capaz de inundar parte de los poblados de Paraíso y Río Seco, razón por la cual ocurre afectación en viviendas por crecidas y desbordamientos de los ríos, además

algunos pueblos como Guapote quedan incomunicados debido al desbordamiento de ríos que cruzan por los caminos de esa localidad en ausencia de puentes. Según vecinos, esta situación se repite cada vez que ocurren fuertes precipitaciones o temporales en la zona.

En esta unidad se identifican tres patrones de drenaje, el patrón dicotómico en la parte baja de la cuenca, un pequeño sector de la cuenca media donde los ríos presentan un patrón dendrítico, y por último el patrón rectangular es el más frecuente de la llanura, el cual posiblemente se debe a la acción de la Falla Limones-Cañas que la cruza de noreste a suroeste (figura 8).

El origen de esta llanura aluvial podría deberse a los depósitos de los ríos que en las avenidas máximas inundan y depositan el material fluviátil en la superficie, sin embargo, durante el trabajo de campo se pudo observar algunos sectores de topografía ondulada que indican la presencia de la regolita del Complejo de Nicoya, además no se descarta la influencia de que parte de este aplanamiento sea atribuido a la Falla Limones-Cañas y otras fallas asociadas, tal y como lo menciona Herrera (1980) quien clasifica a esta unidad como un valle por falla, que es rellenado por los materiales aluvio-coluviales, sin embargo para efectos de este proyecto, esto no pudo ser confirmado, ya que se requiere de un análisis de campo más detallados para poder confirmar o descartar esta teoría.

3.3.3 Unidades morfológicas de origen marino.

3.3.3.1 Playa:

Se refiere a la línea de playa Junquillal, que se distribuye a lo largo de aproximadamente $0,2 \text{ km}^2$, se encuentra ubicada al sur y suroeste de la cuenca Andamojo, específicamente en el poblado de Junquillal.

Esta unidad se caracteriza por presentar una forma longitudinal y una topografía bastante plana. Los materiales que conforman esta playa, son en su mayoría arena fina color gris claro, con algunos sectores de gravas cercanos a la formación rocosa basáltica (figura 9).

3.3.3.2 Humedal:

Tiene un área de $1,9 \text{ km}^2$ y se ubica en las localidades de Paraíso y Junquillal. En esta unidad los ríos Andamojo y Venado desembocan hacia el Océano Pacífico.

Bravo et al. (2014) clasifica dos tipos de humedal para este sector, uno representado por ecosistemas estuarinos con bosques de manglar de la fachada oceánica de la costa pacífica de la Península de Nicoya, el cual se localiza en la desembocadura del río Nandamojo (Andamojo), mientras que el otro tipo de humedal corresponde al sistema marino, localizado a lo largo de Playa Junquillal, que abarca un tramo de costa de 3.8 Km de longitud conformado por playas sedimentarias arenosas y rocosas: Playa Onda, La Boca, Junquillal centro, Las Ventanas y Playa Blanca.

3.3.4 Estructuras geológicas.

El área de estudio se encuentra afectada por el sistema de fallas dextral los Chanchos y la falla normal Limones-Cañas. Estas estructuras se manifiestan en superficie, deflectando los ríos principales y colectores de la zona, que presentan un patrón de drenaje rectangular. Además de esto, en la zona de estudio se localizaron varios “charcos” o acumulaciones de agua que parecieran estar alineados, y que se lograron identificar durante la visita al sitio en estación seca, propiamente cerca de quebradas y ríos del área de estudio (figura 9).

Algunos de estos “charcos” se localizan en las cercanías de las trazas de falla dextrales y demás fallas asociadas que Denyer et al. (2014) trazan sobre el área de estudio.

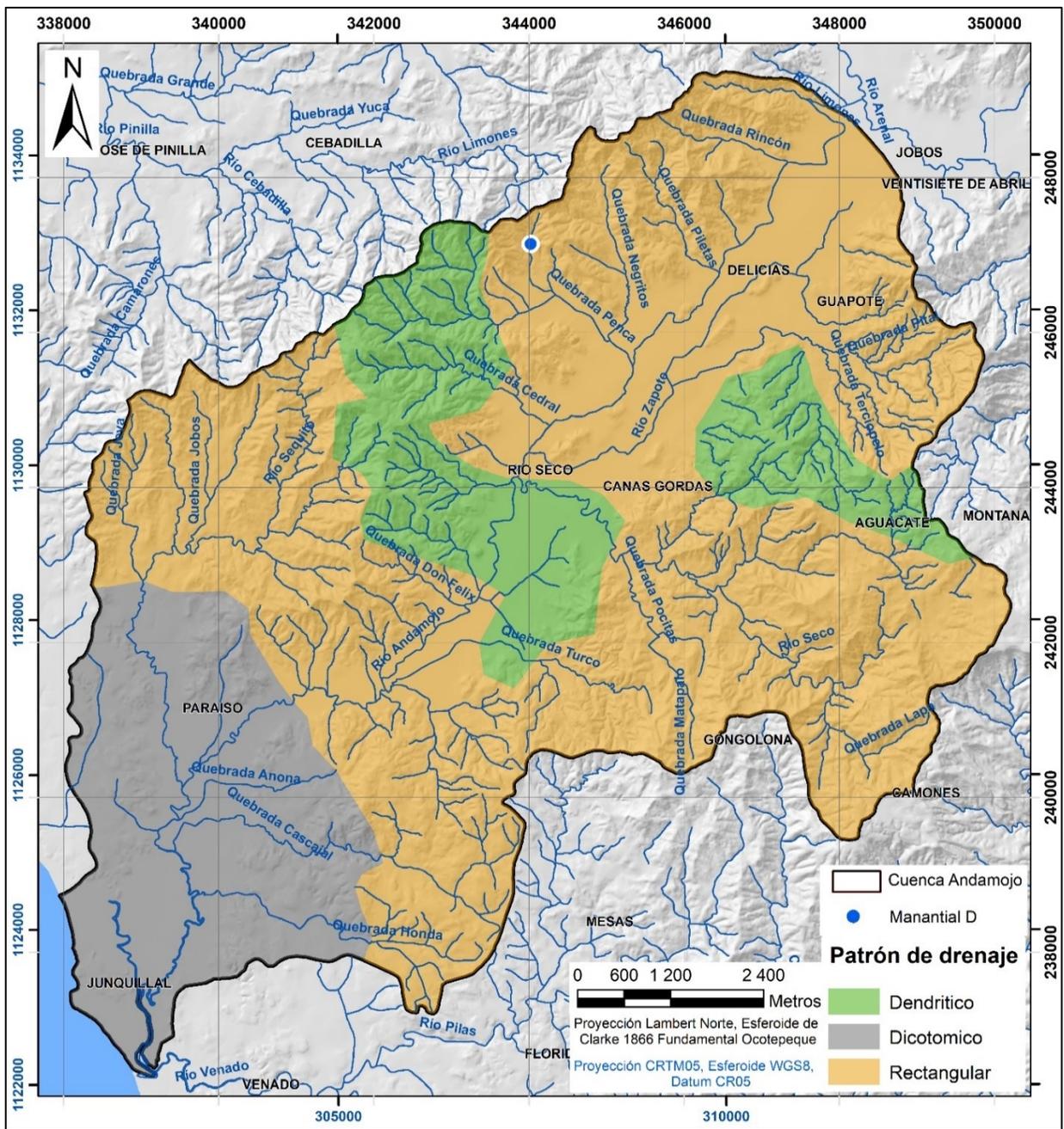


Figura 8: Patrones de drenaje presentes en el área de estudio. Elaboración propia.

3.4 Geología regional

La geología de la zona se divide en 4 unidades, que consisten en lavas basálticas del Complejo de Nicoya, el intrusivo Potrero, los depósitos aluviales y coluviales recientes, que se describirán a continuación. Para una mejor visualización espacio temporal de estas unidades, se elaboró una columna cronoestratigráfica para la zona de estudio (figura 10).

Mora (1978) identifica tres unidades sobre la cuenca del río Andamojo. La unidad inferior está constituida por coladas de lava, cuerpos intrusivos (diabasas y gabros) poco fracturados que pertenecen al Complejo de Nicoya (Edad Cretácica). El mismo autor identifica los sedimentos silíceos del Complejo de Nicoya, que sobreyacen la sucesión de rocas anterior, tales como ftanitas, radiolaritas, de espesor no mayor de 40 metros (Mora, 1978). La unidad más reciente es el relleno aluvional, compuesto por lentes de gravas, arcilla, limos y arenas (Mora 1978).

Por su parte Herrera (1980) define dos unidades informales aflorando en el área, la Unidad Esperanza y la Unidad Coluvial-Aluvial. La primera de edad Senoniano – Santoniano constituida por basaltos, ofíticas, gabros y plagiogranitos con lentes de radiolarita, litologías que se asocian al Complejo de Nicoya; el autor las clasifica como rocas compactas y poco facturadas. La Unidad Coluvial-Aluvial está constituida por gravas sub-redondeadas a redondeadas y poca arcilla; estratigráficamente en superficie se hallan limos y arcillas. Subyaciendo se encuentra una capa de grava y arena envueltas en una matriz limosa-arcillosa; se le atribuye una edad Cuaternario. El espesor de estos depósitos recientes es de 35 metros en la zona de Veintisiete de Abril donde hay mayor cantidad de limos y arcillas, entre las zonas de Delicias y Río Seco el espesor es de 25 metros, mientras que el espesor medio del aluvión a lo largo de la cuenca es de 15 metros (Herrera 1980). Herrera (1980) indica que el origen de la unidad Coluvial-Aluvial es un valle generado por falla, que es rellenado por los materiales antes mencionados.

A continuación, se describe la geología regional, a partir de trabajos realizados por varios autores:

3.4.1 Complejo de Nicoya (Basaltos):

Rodríguez (2010), la describe como una unidad constituida por basaltos que provienen de erupciones submarinas en el pasado y que actualmente afloran en las partes altas de los cerros y relieves más abruptos. Son rocas color gris oscuro con pocos cristales, se les puede encontrar sanas con un horizonte superior más meteorizado con un espesor de 5 metros a más. Este horizonte es de importancia hidrogeología como se verá más adelante ya que posee una capa residual con un espesor de hasta 3 metros, la cual posee condiciones muy similares a las de la porosidad intergranular y varía según la localidad.

Denyer et al. (2014) describe la unidad de la siguiente forma: Flujos de basaltos masivos, cruzados por varias generaciones de vetillas y fracturas mayoritariamente zeolitas, y algunas silíceas; también se encuentran estructuras en almohadilla y microalmohadilla. Asociado a los basaltos se presentan brechas que se formaron como autobrechas o brechas de explosión de las almohadillas. Estos basaltos son toleíticos, de grano fino, generalmente afíricos, compuestos por plagioclasas, augita, clorita y óxidos de hierro y titanio, todo esto en una matriz afanítica, con presencia de vetillas de calcedonia, zeolitas, ópalo y rara vez calcita (Denyer et al., 2014).

3.4.2 Complejo de Nicoya (Intrusivo Potrero):

Denyer et al. (2014) lo localiza al noroeste de la Península de Nicoya, al noroeste del área de estudio. Según este autor, dicha unidad está constituida por gabros, microgabros y doleritas, de color oscuro y de textura porfirítica, muy rica en minerales máficos, con acumulaciones esferoidales de piroxenos. La edad de estas rocas es del Santoniano (84 a 83 Ma). Esta unidad no se observó aflorando en el campo en la zona de estudio.

3.4.3 Depósito de playa arenosa:

El contacto entre los depósitos de playa y los depósitos aluviales es muy difícil de trazar, sin embargo, se ha determinado un espesor aproximado de unos 100 metros de arenas costeras en el límite litoral (Denyer et al., 2014).

La columna cronoestratigráfica de la figura 10 muestra la relación temporal de las unidades existentes en el área de estudio. En ella se pueden observar los basaltos del Complejo de Nicoya. Denyer et al. (2014) menciona que dichos basaltos tienen su origen en el CLIP, que es un evento magmático regional intenso ocurrido cuando la placa Farallón (placa que da origen a la placa Nazca y Cocos al fragmentarse) pasó por un punto caliente produciendo intrusiones y derrames lávicos, y que generó un engrosamiento de la corteza conformando a su paso la placa boyante (actualmente compone el basamento del Caribe). Intruyendo a esta unidad se localiza el intrusivo Potrero, y superficialmente se observan los depósitos aluviales y coluviales o de pie de monte.

El mapa geológico del presente proyecto que se muestra en la figura 11, se basa en la cartografía realizada por Denyer et al. (2014), e incluye algunas modificaciones de la geología superficial, ya que se logró delimitar y/o detallar áreas que inicialmente estaban clasificadas como depósitos aluviales, pero al realizar la comprobación en campo correspondían con basaltos del Complejo de Nicoya. Es importante mencionar que, aunque el mapa geológico de la figura 11 se basa en Denyer et al. (2014), únicamente muestra las unidades geológicas que pudieron ser comprobadas en el campo. Como complemento se generó un perfil geológico esquemático del área de estudio (figura 12).

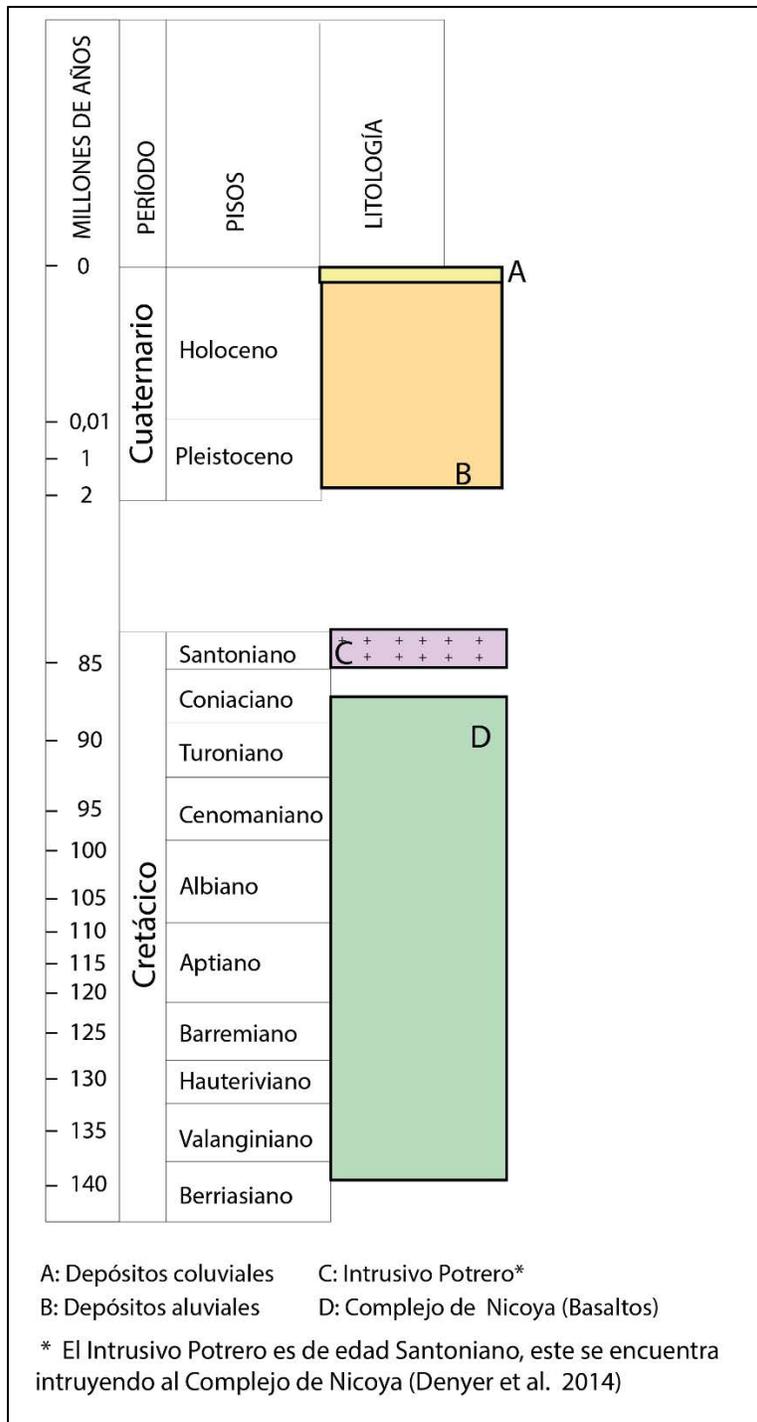


Figura 10: Columna cronoestratigráfica del área de estudio, basado en Denyer et al. (2014)

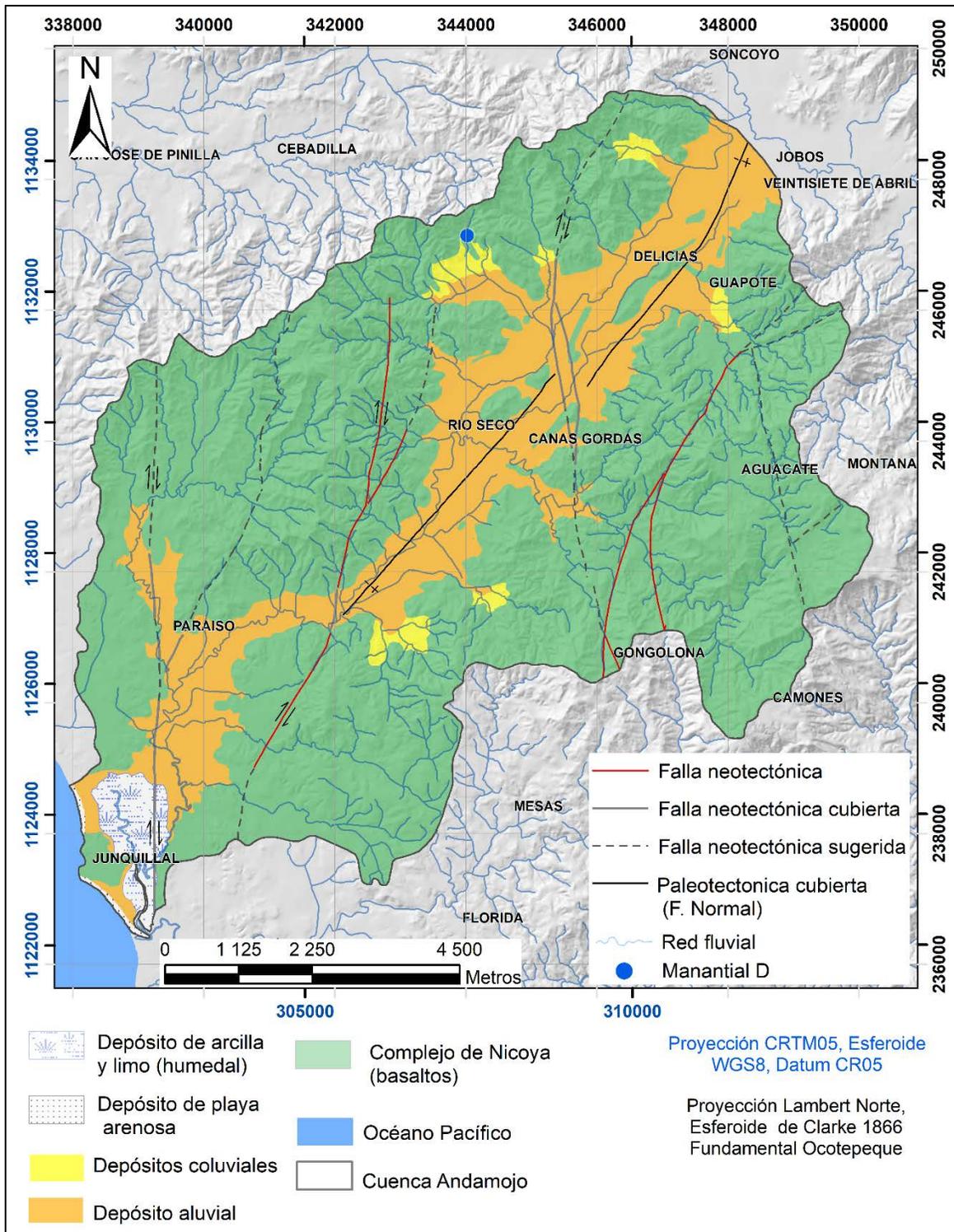


Figura 11: Mapa Geológico de la cuenca Andamojo. Geología basada en Denyer et al. (2013) y modificada por comprobación de campo. Fallas tomadas de Denyer et al. (2003)

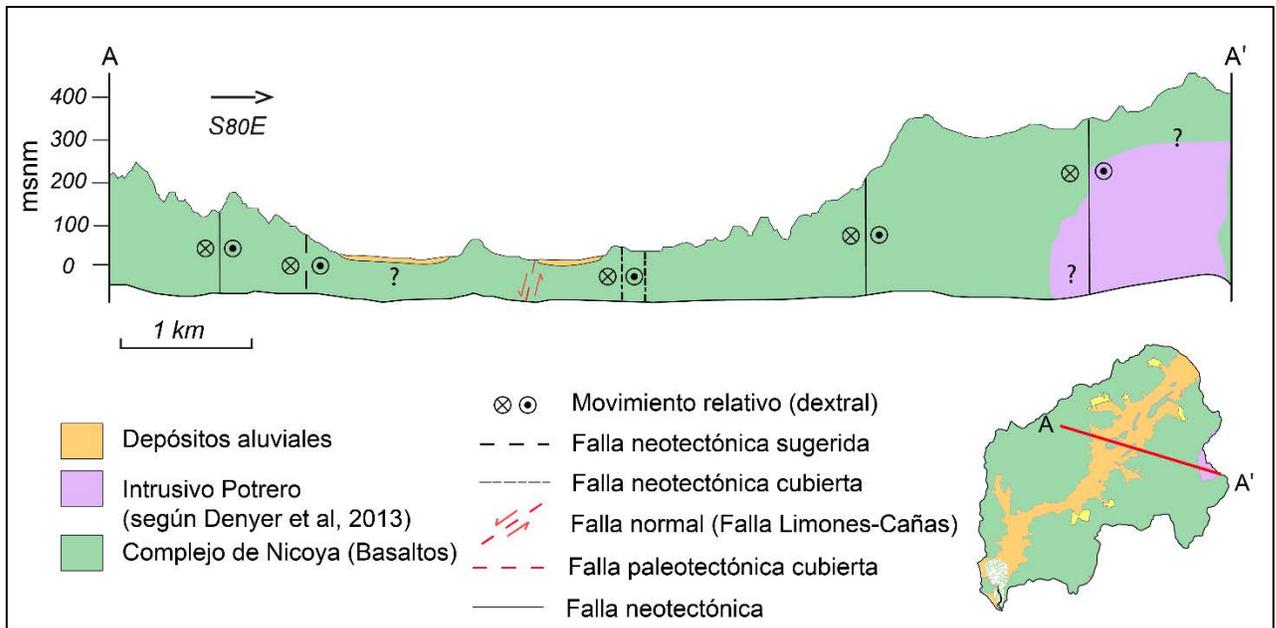


Figura 12: Perfil geológico A-A' del área de estudio. Fallas tomadas de Denyer et al. (2003)

3.4.4 Unidad de Coluvios:

Rodríguez (2010) la describe compuesta por fragmentos de limos, arcillas, materiales arenosos y fragmentos de rocas sin ningún grado de cementación, que provienen de la serranía y se acumulan al pie de la misma.

3.4.5 Depósitos aluviales cuaternarios:

Consiste en capas de gravas, arenas, limos y arcillas distribuidas de forma lenticular, sin embargo, en la mayor parte del área se presenta un suelo limo arcilloso a arenoso en superficie. Esta unidad sobreyace a los basaltos, y rellena una topografía irregular por lo que su espesor es variable, aproximadamente ronda los 40 metros (Rodríguez, 2010).

Por su parte Denyer et al. (2014) la clasifica como depósitos aluviales y menciona que en algunas zonas aisladas del área de estudio se han encontrado superficies

de erosión que son rellenadas por aluvión por hasta unos 30 m, los cuales tienen importancia para la formación de acuíferos.

3.5 Geología local

Durante las giras de campo al área de estudio se pudo comprobar la presencia de dos unidades geológicas, que consisten en los basaltos del Complejo de Nicoya y los depósitos aluviales (anexo 2). Por otra parte, la Unidad de coluvios y los gabros del intrusivo Potrero no fue posible comprobarlos en el campo, ya que en las áreas donde Denyer et al. (2013) localizaba dichas unidades, los caminos eran de difícil acceso, mientras en otros casos no fue posible determinar con certeza a esta unidad debido al grado avanzado de meteorización y alteración de la misma.

3.5.1 Complejo de Nicoya (Basaltos)

Es la unidad más extensa del área de estudio, son lavas que se correlacionan con el Complejo de Nicoya, y abarcan un área total de 70,07 Km². Generalmente se localiza en las partes altas de la cuenca, formando cerros y estribaciones, y en menor proporción aflorando en partes bajas de la cuenca formando cerros alineados y también formando una regolita/saprolita producto de la meteorización y alteración de la roca, que además se asocia al desarrollo de acuíferos en las partes planas de esta unidad.

Estas lavas se encuentran afectadas por el fracturamiento producto del control estructural de la zona que se detallará más adelante. Estas fracturas son abiertas y cerradas principalmente, sin una dirección preferencial. Al suroeste del poblado de Río Seco, se destaca la influencia de micro fallas que cortan vetas, de igual forma se observa en el suroeste de la desembocadura del río Andamojo al Océano Pacífico específicamente en el sector de playa Junquillal (foto 2A). Estas fracturas a su vez podrían ser asociadas a la presencia de varios manantiales en apariencia intermitentes, que se identificaron durante la época seca del año 2018, los cuales

se identifican como “charcos” en el mapa geomorfológico de la zona en estudio, que se mostrará más adelante (foto 1B).



Foto 1: Fractura con dirección NE-SW ubicada en Playa Junquillal en las coordenadas Lambert Norte: 338178 E / 237800 N (Foto 1A), de la cual brota agua (Foto 1 A.1) En la Foto 1B se muestra un “charco” sobre una quebrada de localidad de Río Seco en las coordenadas 342478 E / 243450 N

Localmente son lavas basálticas masivas con espesores que van desde 1 m hasta 10 m, generalmente con gran cantidad de vetas milimétricas de sílice, arcilla y en menor cantidad de calcita (foto 1A). La superficie sana es color gris oscuro a verde, de textura afanítica principalmente, mientras que la superficie meteorizada es beige-anaranjada con presencia de óxidos de hierro, manganeso y ocasionalmente cristales de calcita en los intersticios de la matriz. Se identificaron estructuras en almohadilla muy meteorizadas hacia los bordes, mayormente arenitizadas (foto 2C). En su mayoría estos basaltos presentan un grado de meteorización desde medio hasta alto, principalmente en las zonas de topografía plana de la cuenca, en su transición con la regolita/saprolita (Foto 2B y 2D).

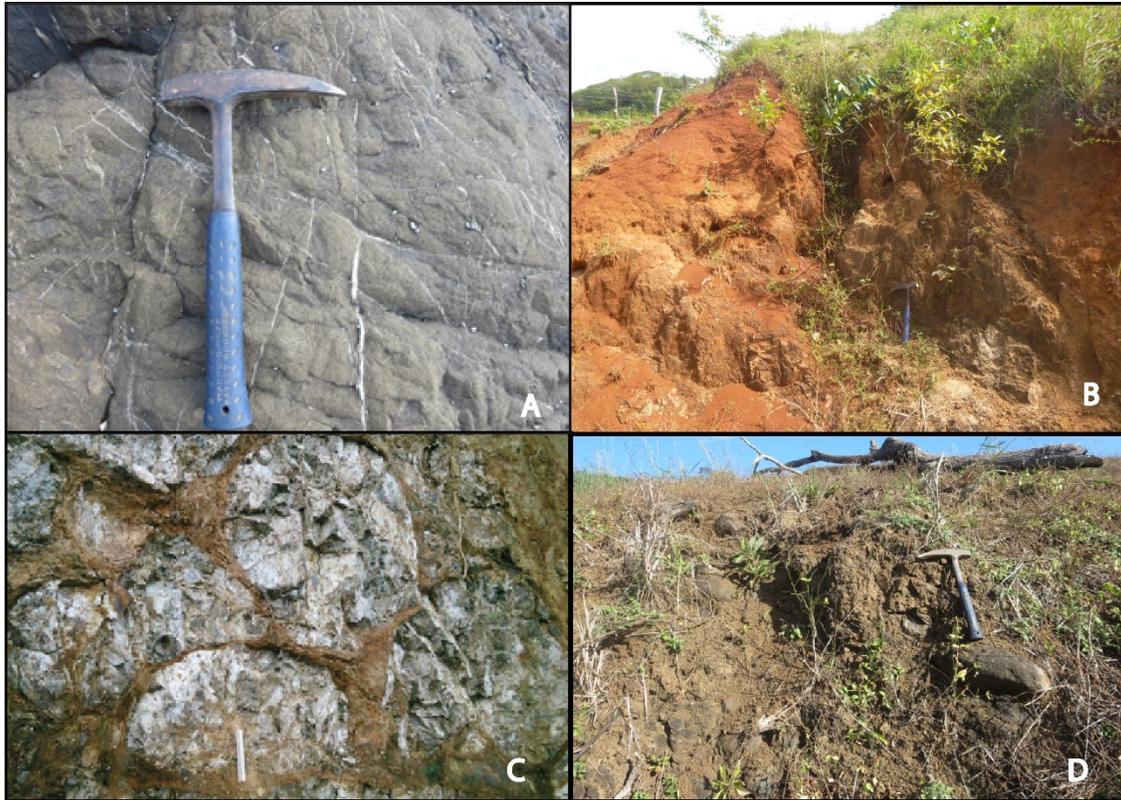


Foto 2: En la foto **A** se muestran basaltos masivos sanos con vetas silíceas, en **B** se observa el suelo residual de los basaltos (saprolita) con rastros de la roca madre, en **C** se muestran basaltos en almohadilla y en **D** se observan basaltos bastante meteorizados y recurrentes dentro del área de estudio

3.5.2 Depósitos aluviales

Estos depósitos constituyen 18,79 km² del área total de la cuenca, se localiza a lo largo de la parte llana de la cuenca, con una dirección noreste-suroeste. Se encuentran sobreyaciendo a los basaltos del Complejo de Nicoya (figura 7). Este material es depositado por los ríos principales, secundarios y colectores de la zona, generalmente durante la estación lluviosa, cuando los episodios son más intensos, ya que inundan y rellenan el plano aluvial en sitios como Paraíso, Río Seco y Soncoyo.

Estos estos materiales afloran en elevaciones inferiores a los 21 m.s.n.m, donde el uso del suelo corresponde con potreros, generalmente se le ve como un aluvi3n fino

compuesto por limo con arcilla y arena color café oscuro, con tamaños de granos milimétricos a centimétricos y un espesor de hasta 5 metros.

En las márgenes y lechos de los ríos esta unidad también corresponde mayoritariamente con un aluvión fino, que consiste de un limo arcilloso con cantidades bajas de arena color café. Su espesor máximo observado ronda los 3 metros (foto 3C). En algunas secciones de los ríos Zapote, Limones, Seco, Andamojo y Quebrada Pocitas, se pudo localizar un material aluvional con textura media a gruesa. El espesor mínimo observado ronda los 10 cm y el máximo 40-50 centímetros aproximadamente, como el que se visualiza en la figura 3A. Sus clastos generalmente son de composición basáltica (59%), y en menor cantidad de gabros (1%), los mismos con tamaños milimétricos a centimétricos (6 cm). La selección es media, los clastos son subangulares a subredondeados y el contacto entre ellos es flotante en una matriz limosa con arcilla y poca arena (foto 3A y 3B).

Como se mencionó anteriormente la geología base que se utilizó para este proyecto fue la realizada por Denyer et al. (2013) y en esta investigación fue modificada a partir de la comprobación de campo. La principal modificación al mapa geológico se realizó sobre la unidad de depósitos aluviales, a la cual se le disminuyó el área debido a que algunas zonas planas que exhiben ondulaciones en el terreno y que son clasificadas por Denyer et al. (2013) como aluvión, sin embargo, durante las giras de campo se observó que están conformadas más bien por un suelo residual originado a partir de los basaltos del Complejo de Nicoya, los cuales se encuentran bastante meteorizados, prácticamente arenitizados (figura 11).

3.5.3 Intrusivo Potrero (Gabros)

Durante las visitas realizadas al campo, se intentó identificar lo señalado por Denyer et al. (2014) quien ubica a estos gabros entre las localidades de Aguacate y Montaña, sin embargo, estas rocas no pudieron ser identificadas. Lo que se pudo identificar fue únicamente un suelo residual limo arenoso color rojizo, con algunos remanentes de roca muy meteorizados lo que hizo imposible su identificación. Por esta razón esta litología fue omitida en el mapa geológico local.



Foto 3: Depósitos Aluvionales en la cuenca Andamojo

Capítulo 4: Hidrogeología

4.1 Características del flujo subterráneo

4.1.1 Interacción entre el drenaje superficial y el acuífero.

Con el fin de identificar el flujo base y la interacción hidráulica entre el drenaje superficial y el acuífero, se realizaron 8 aforos durante la primera semana de marzo del 2019, en diferentes secciones de los ríos principales Andamojo, río Zapote y quebrada Zapote, y un aforo en el río tributario Quebrada Jobos. Los aforos se realizaron en el mes de marzo, mes que está dentro de los más secos de la subregión occidental de la Península de Nicoya (Solano & Villalobos, 2001); por esta razón la mayor parte de los ríos en la zona se encontraban secos.

Las velocidades de flujo se tomaron con un molinete de calibración digital modelo Gurley No. 62. Ya que las mediciones se realizaron en estación seca, fue muy recurrente que el flujo laminar mantuviera velocidades muy bajas, por lo que se procedió a buscar secciones de menor ancho, pero con un flujo mayor y que de esta forma fuera detectado por el molinete. De igual manera se buscaron secciones rectas, de flujo constante y lecho homogéneo para no inducir a errores en la medición (foto 4).



Foto 4: Sitio seleccionado para aforar una sección del río Andamojo (coordenadas: 343767 E / 244117 N)

Para efectuar las mediciones de campo se dividió el ancho del cauce en secciones iguales, y se tomó la velocidad del flujo en el punto central de cada uno de los tramos. Además, se midió la altura desde el espejo de agua hasta el lecho del río, esto para toda la sección medida. Posteriormente se realizaron perfiles transversales para cada sección, a partir de esto se aplicó la fórmula de un trapecio para calcular el área aproximada para cada tramo.

$$A = \left(\frac{h_0 + h_1}{2} \right) L$$

Una vez calculada el área, se multiplica por el promedio de la velocidad de flujo (medida en el campo) de cada sección y se obtiene el caudal, el cual al sumarse para cada sección da como resultado un caudal total aproximado en l/s. En la figura (figura 13) se muestra un ejemplo de aforo realizado en una sección del río Andamojo AF2.

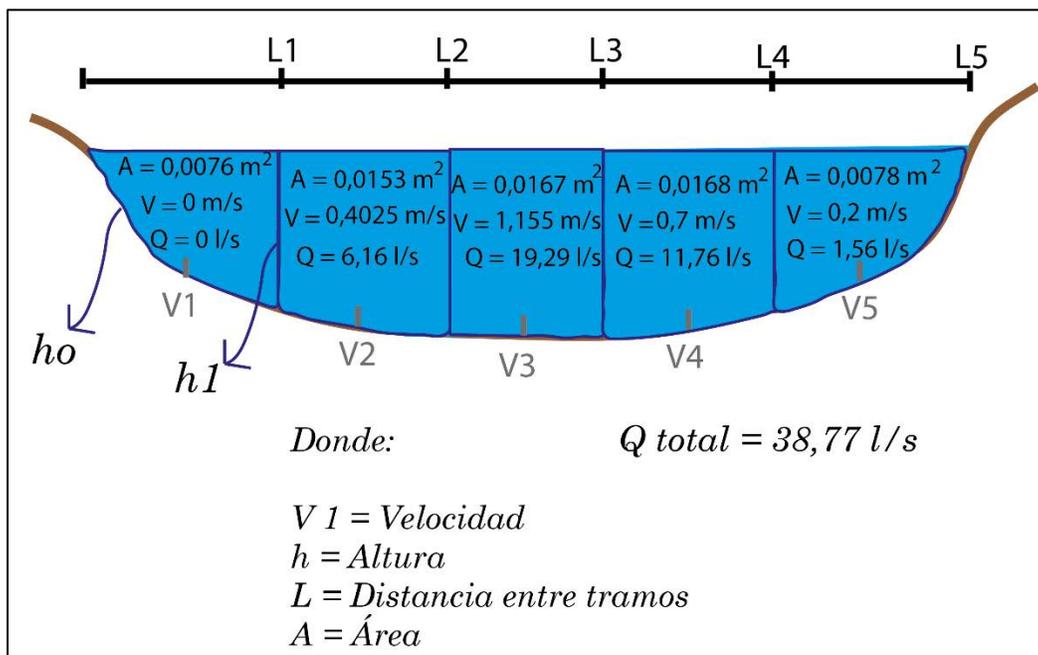


Figura 13: Esquema de la sección medida AF2 en el río Andamojo. Tomado y modificado de Ingeniería Civil (2008).

Tabla 4: Resultado de los aforos diferenciales en varias secciones de la cuenca, para el mes de marzo del 2019

Aforo	Q (l/s)	Q de ganancia (l/s)	Q de pérdida (l/s)	Tributario	Q (l/s)	Q salida. (l/s)	Río / Quebrada
Ríos principales				Ríos Tributarios			
AF1	27,5	27,5					Q. Zapote
AF8	2,05		25,45				R. Zapote
AF2	38,8	36,75					R. Andamojo
AF3	18,5		20,3				R. Andamojo
AF4	21,74	3,24					R. Andamojo
-	-	-	-	AF7	4,9	26,64	Sin nombre
AF5	2,11		24,53				R. Andamojo
				AF6	0,4	-	Q. Jobos
l/s = Litros por segundo Q = Caudal medido en el campo para cada sección medida. Q. salida = AF4+AF7							

En la tabla 4 se visualizan los resultados para cada uno de los aforos realizados y se concluye lo siguiente:

- 1- Los tramos ubicados entre AF1 y AF8, AF2 y AF3, AF4y AF5 muestran una pérdida de caudal (figura 14). Este comportamiento podría asociarse a infiltración de agua superficial a través de fracturas en zonas de fallas. El uso de suelo en las inmediaciones de estos sitios de medición generalmente corresponde con pastos utilizados para la ganadería, (figura 14). Por lo visto durante el trabajo de campo, no se determinó la existencia de alguna extracción o toma de agua procedente de los ríos, para riego o similares, que pudiera originar una disminución en el caudal aguas abajo, sin embargo, esto no se puede descartar hasta tanto no realizar un recorrido exhaustivo a lo largo del lecho, ya que algunos sectores presentaban difícil acceso.
- 2- Los tramos comprendidos entre, AF3 y AF4, AF8 y AF2 (cuenca media) presentan una ganancia de caudal, el cambio en el mismo es de 3,24 y 36,7 l/s respectivamente. Este comportamiento hidráulico se puede atribuir a un aporte del agua del acuífero hacia el río, es decir que el río se comporta como efluente en estos dos tramos, es muy posible que se le atribuya a la existencia del fallamiento local que genera zonas de aporte de flujo proveniente del acuífero fracturado hacia la superficie, como flujo base. En

congruencia con lo anterior está el análisis de Herrera (1980), el cual se basó en datos registrados por un limnógrafo que anteriormente se encontraba instalado en la localidad de Río Seco, bajo el puente que comunica Río Seco y Florida, del cual se tomaron 22 mediciones de caudal, y a partir de esto se concluyó que el río Andamojo se comporta como efluente, para ese sector. Es importante mencionar que se da la existencia de algunas viviendas en las inmediaciones de los sitios de aforo, por esto no se descarta por completo que el incremento del caudal aguas abajo se relacione con un aporte de aguas residuales de estas infraestructuras, sin embargo, esta suposición cobra menos fuerza puesto que estos poblados se caracterizan por ser poco densos, además no se observaron tuberías de descarga en los ríos en los sitios visitados.

- 3- Durante el recorrido de algunos cauces secos, se identificó la existencia de charcos, con una velocidad de flujo imperceptible por el molinete, pero observable. Dicha humedad podría estar asociada a un aporte de agua proveniente del acuífero a través de las zonas de fractura, tal y como se mencionó anteriormente, ya que muchos de ellos se ubican cerca de zonas de fallamiento (figura 9).

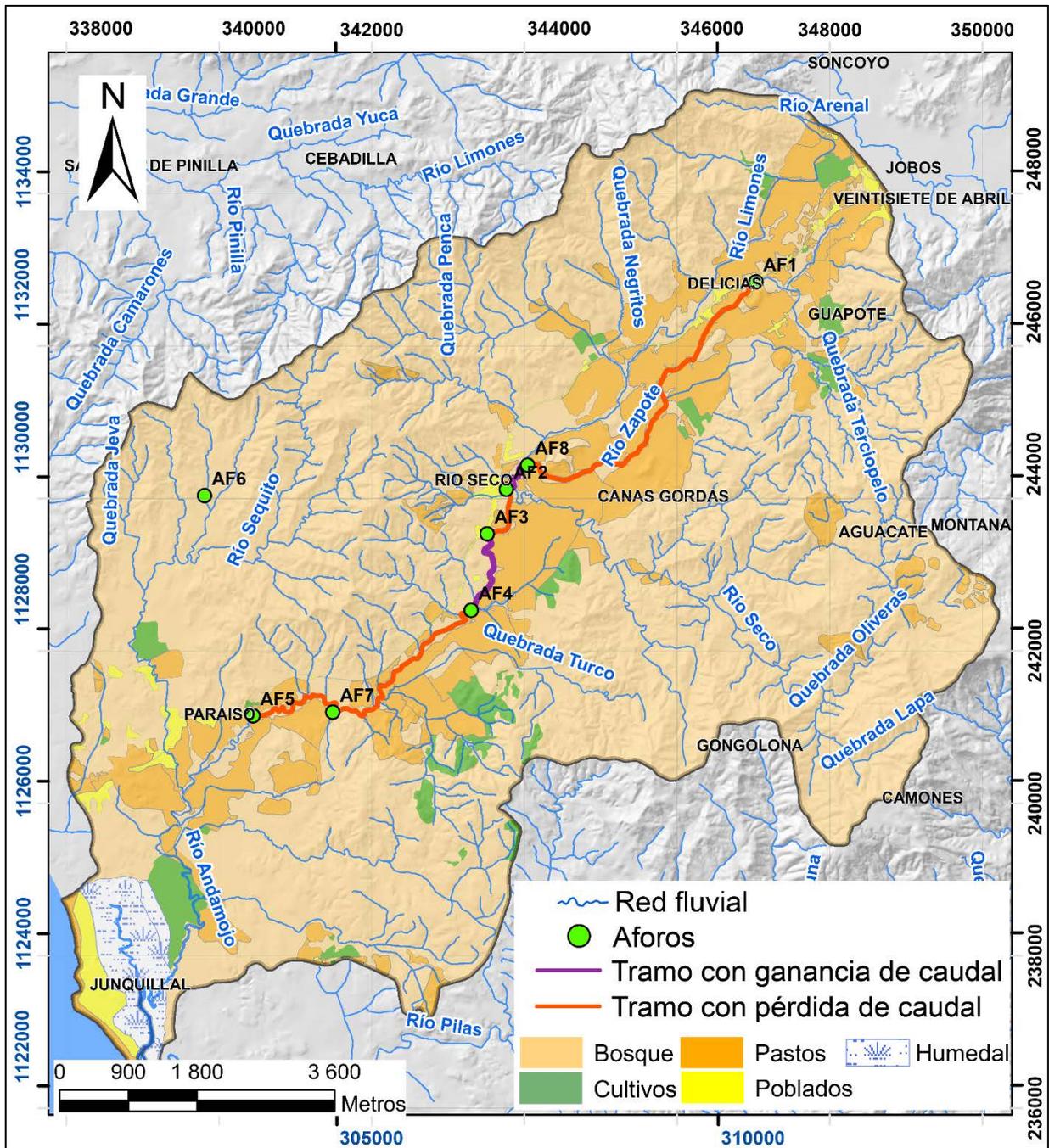


Figura 14: Ubicación de aforos diferenciales en la cuenca Andamojo, realizados en marzo, 2019

4.1.2 Redes de flujo

Las isotopenciales se generaron a partir de los niveles estáticos de pozos, que captan el acuífero presente en la zona plana de la cuenca, es decir en la unidad aluvial y algunos sectores de la regolita del Complejo de Nicoya, ya que, esta zona

es donde hay más pozos, y por lo tanto donde existe mayor cantidad de información hidrogeológica.

Por lo anterior se cuenta con información de niveles estáticos de pozos perforados y excavados que fueron ubicados como parte de una red de monitoreo establecida en el 2018 en la cuenca Andamojo.

El monitoreo del nivel de agua se realizó desde el mes de agosto del 2018 hasta febrero del 2019. A partir de esta información se ejecutó un análisis exhaustivo de los datos de los niveles de agua subterránea.

Las isopotenciales fueron dibujadas para los meses de octubre del 2018 y febrero del 2019, ya que son los meses que presentan mayor precipitación y mes más seco con el que se cuenta información respectivamente, con el fin de determinar diferencias en el flujo, sin embargo, tal y como se observa en las figuras 15 y 16, el flujo se comporta muy similar.

En el análisis general se identificó que tanto en la parte alta y media de la cuenca, el flujo de agua subterránea tiene una dirección predominante hacia el suroeste, aunque se observaron leves diferencias en las inmediaciones de los poblados de Jobos y Veintisiete de Abril. En estos sitios podría estarse manifestando un aporte de flujo regional proveniente de las llanuras del norte que altere en cierta forma el flujo principal, sin embargo, no se descarta que se esté dando un aporte de flujo lateral desde las rocas basálticas del Complejo de Nicoya, hacia la unidad aluvional, similar a como lo sugieren otros autores, asociado a los sistemas de fallas existentes, donde las fracturas facilitan la transmisión del flujo. Este comportamiento se observa tanto para los meses de octubre del 2018 como febrero del 2019 (15 y 16).

En la sección baja de la cuenca, específicamente en el sector de Paraíso hacia playa Junquillal, el flujo subterráneo se dirige hacia el sur, con dirección al humedal y al Océano Pacífico.

Es importante recordar que, debido al gradiente hidráulico, el flujo de agua subterránea se dirige desde las zonas con niveles de mayor energía hacia las zonas con menor energía (Rebollo, s.f.) y se determina mediante la siguiente fórmula:

$$i = \Delta h / \Delta L, \text{ esa}$$

Donde:

i = Gradiente hidráulico adimensional)

Δh = Diferencia de potencial entre dos puntos del acuífero.

ΔL = Distancia en la dirección de flujo entre dos puntos

El gradiente hidráulico en promedio ronda 0,0055 en la parte alta y media de la cuenca, y presenta una disminución hacia el sur de la cuenca, con un gradiente aproximado de 0,0035, esto para el mes de febrero del 2019 (figura 16). Para la red de flujo del mes de octubre del 2018, el patrón es similar, ya que en la zona alta y media de la cuenca el gradiente hidráulico tiene valores entre 0,0150 y 0,0050, experimentando una disminución hacia el sur con valores cercanos a 0,0040. Para ambos casos la disminución en el gradiente coincide con una topografía regular, además es importante mencionar que, para el mes de octubre, las isopotenciales en el sector de Paraíso (debido al pozo M2) se encuentran sobre la topografía, pudiendo ser un indicador de confinamiento del acuífero, específicamente en este sitio, sin embargo, este comportamiento se da únicamente para el mes de octubre, característico por ser el mes con mayor precipitación del año (ver gráfico 1). Se debe mencionar que no se utilizaron en su totalidad los mismos pozos para ambas redes de flujo, debido a que, por diferentes razones, tales como: limitaciones en el acceso al sitio o ausencia de propietarios del pozo, algunos de los mismos no se pudieron medir.

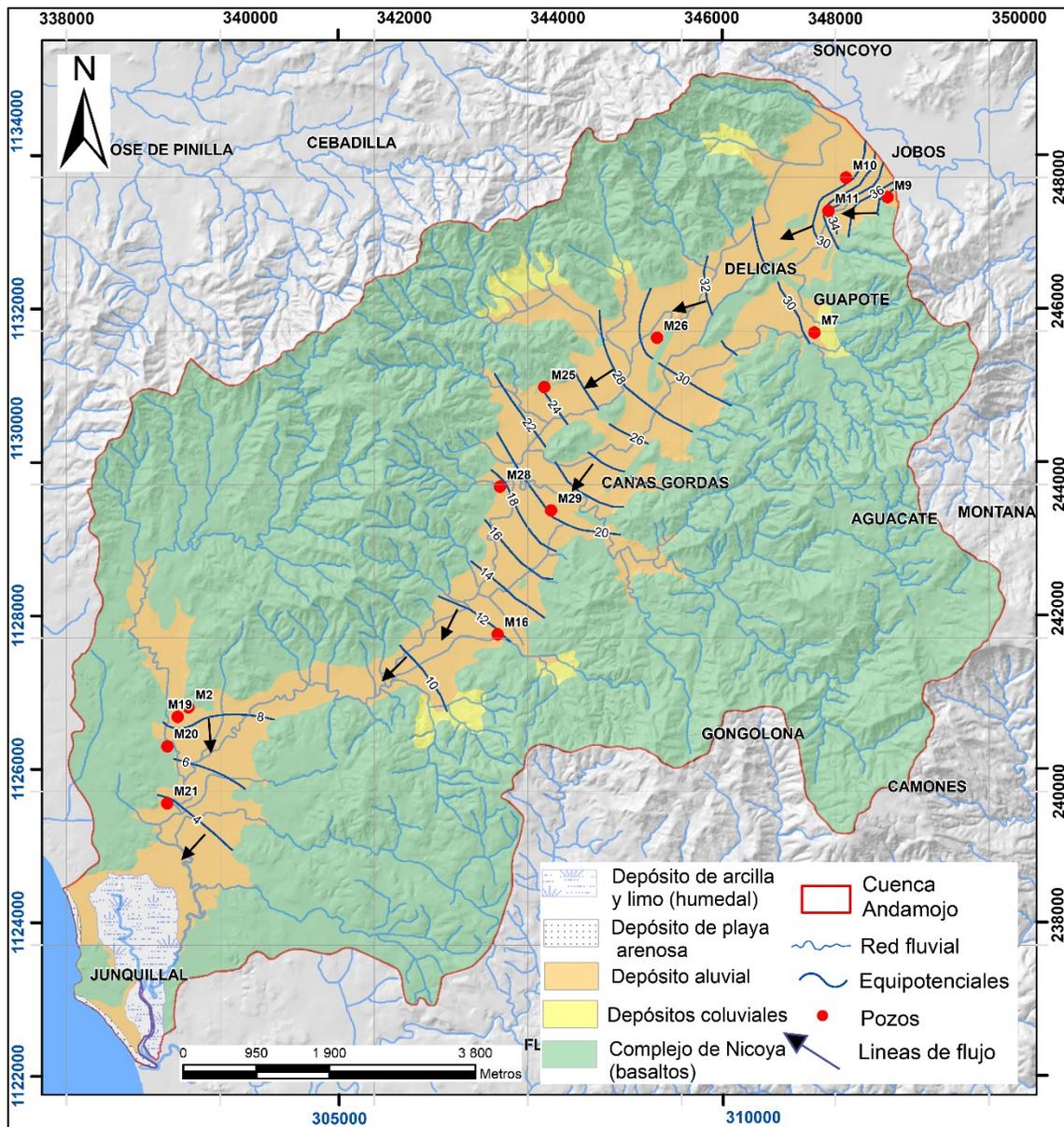


Figura 15: Red de flujo del área de estudio en la zona plana, con datos del mes de octubre del 2018

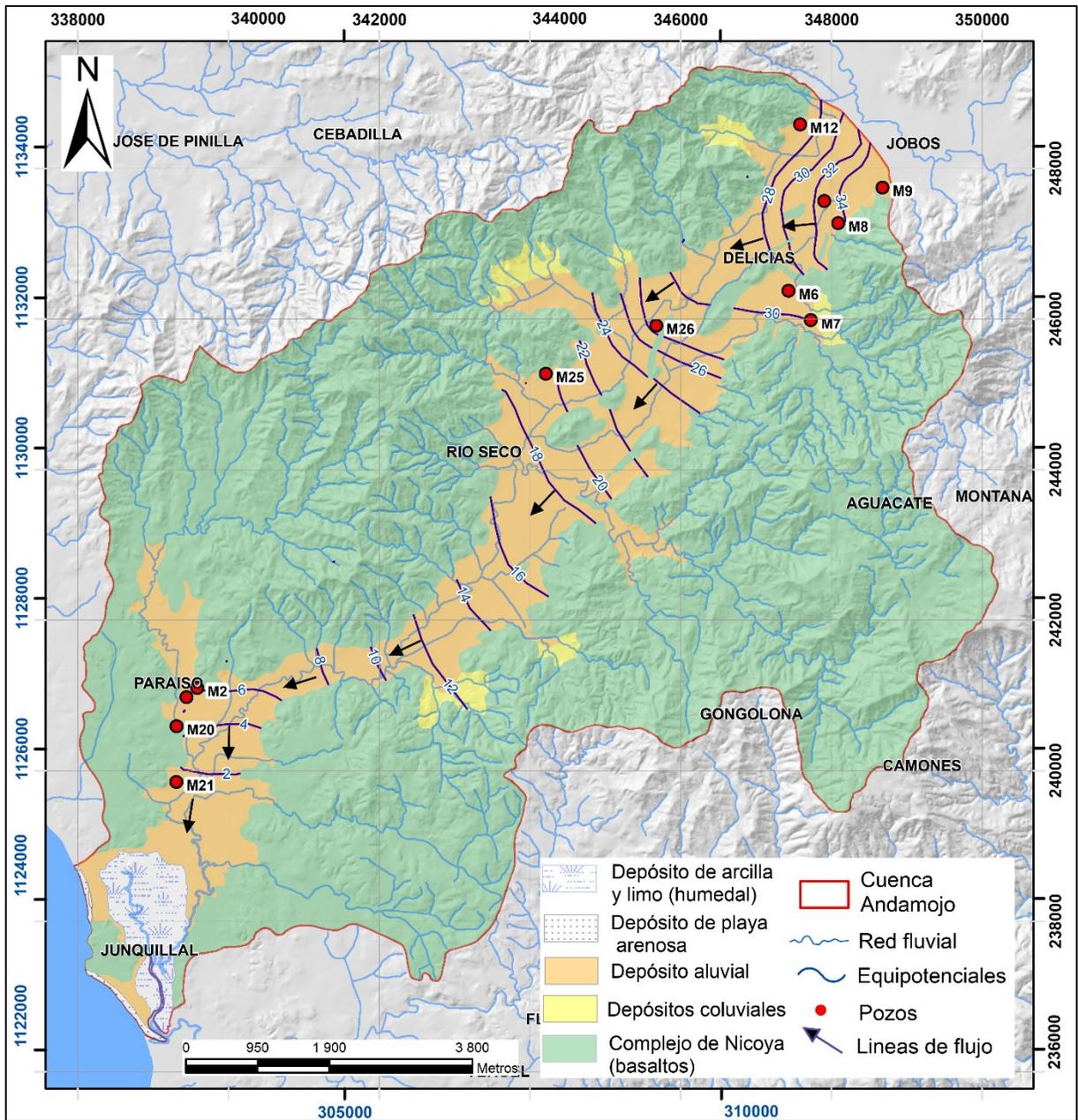


Figura 16: Red de flujo del área de estudio en la zona plana, con datos del mes de febrero del 2019

4.2 Perfiles hidrogeológicos

En la zona de estudio se realizaron 3 perfiles hidrogeológicos, con el fin de caracterizar los acuíferos de la cuenca Andamojo, a partir de la información litológica existente. Para esto se contó con la información de pozos de la base de datos del SENARA y pozos que forman parte de la red de monitoreo que se estableció durante este proyecto. Adicionalmente se toma en consideración la información de los 14 SEV que fueron realizados por Arias (2018) en el área de estudio.

4.2.1. Perfil B-B'

El perfil B-B' tiene una dirección NE-SW, se extiende desde las cercanías del poblado Veintisiete de Abril hasta el sector de Paraíso, y tiene una longitud total de 12,8 km (figura 17).

Se identifica una capa superficial, casi continua, que corresponde con los depósitos aluviales, la cual fue interpretado con base en la información de perforación de pozos como una fracción fina compuesta de limos y arcillas, y una fracción más gruesa que consiste en arenas y gravas, esta última en menor proporción (figura 18).

En este caso, la capa aluvional tiene un espesor que varía entre 7 y 38 metros de espesor, para un promedio de 18 m. La porción fina de esta unidad, específicamente para este perfil, ronda los 5 metros mientras que la parte media a gruesa tiene un máximo de 20 metros aproximadamente. Se debe indicar, que el pozo DI-94 hace mención de una capa de aluvión bastante espesa conformada por arenas, arcillas y gravas, donde el horizonte conformado por este último material podría atribuirse a los basaltos meteorizados que dan origen a un suelo residual de texturas gruesas, por lo que se podrían confundir con material aluvional, sin embargo no se descarta lo indicado por dicho reporte de perforación, ya que aunado a esto, el sondeo SEV-2 de Arias (2018) localizado a unos 500 metros al suroeste no concuerda con los datos de profundidad reportados en pozo DI-94, en este caso el autor sugiere un

contacto lateral por la influencia del sistema de fallas Limones-Cañas propuesta por Denyer et al. (2014), el cual permite que exista una mayor capacidad de almacenar material aluvional, esto ocurre hacia el noreste de la cuenca, específicamente en las inmediaciones del poblado Veintisiete de Abril.

Según la información litológica reportada en el registro del pozo DI-94, a los 38 m de profundidad se detectó un aumento en el nivel de agua debido posiblemente a las interestratificaciones de arcillas suprayacentes. En este caso, el nivel final de agua reportado es de 3,48 m.b.n.s.

El pozo VI-141 reporta basaltos masivos fracturados hasta los 80 m, con una superficie meteorizada en la parte superior (regolito) de unos 18 m de espesor (figura 18), además se indica que esta alteración y el fracturamiento proporcionado por los basaltos aportan agua al pozo, y se da una recuperación buena.

El nivel de agua subterránea, se localiza en la unidad de depósitos aluviales, en donde la granulometría es de grano fino y grueso, a una profundidad entre los 7 - 2 m.b.n.s, para un promedio de 4 m.b.n.s. Dichos niveles fueron calculados a partir de la información de los registros de pozos de la base de datos del SENARA y también de la red de monitoreo (nivel medido en agosto del 2018).

4.2.2. Perfil C-C'

El perfil C-C' se ubica al sur de la cuenca Andamojo, tiene una dirección NW-S y una longitud de 4,8 km (Figura 17).

En este perfil (figura 18) se identifican dos unidades geológicas: La primera unidad compuesta de depósitos aluviales con su interfaz fina y gruesa, con un espesor que varía entre 7 y 29 metros y un promedio de 12 metros con el mayor espesor aluvial observado en el pozo VI-177, al norte de Paraíso; y una segunda unidad observada en los pozos VI-199, VI-141, VI-153 donde se reportan rocas basálticas masivas y fracturadas (con excepción del VI-199 que no reporta fracturamiento), con una

superficie meteorizada de un espesor promedio de 8 metros, que se interpreta como regolito y/o saprolita. Así mismo en los pozos VI-177, VI-141 y VI-153 se indica un sector de fracturamiento en la roca basáltica que va de los 2 a los 27 metros de espesor, para un promedio de 9,7 m. Cabe indicar que esta característica es de suma importancia para la existencia de acuíferos.

En dicho perfil, se puede observar que la profundidad del agua subterránea muy superficial, y en este caso se ubica en la unidad de depósitos aluviales, tanto en los limos y arcillas como en las arenas y gravas, a una profundidad que va de 1 a 9 m.b.n.s., para un promedio de 9 m.b.n.s.

4.2.3 Perfil D-D'

Tiene una longitud de 2,7 km (figura 17), y en él se puede observar la misma sucesión litológica antes mencionada, y como característica importante, se identifica un espesor de entre 7 y 12 metros de basaltos meteorizados (regolito), y un nivel de agua somero limitado a los depósitos aluviales tanto en la parte fina como en la gruesa (figura 18).

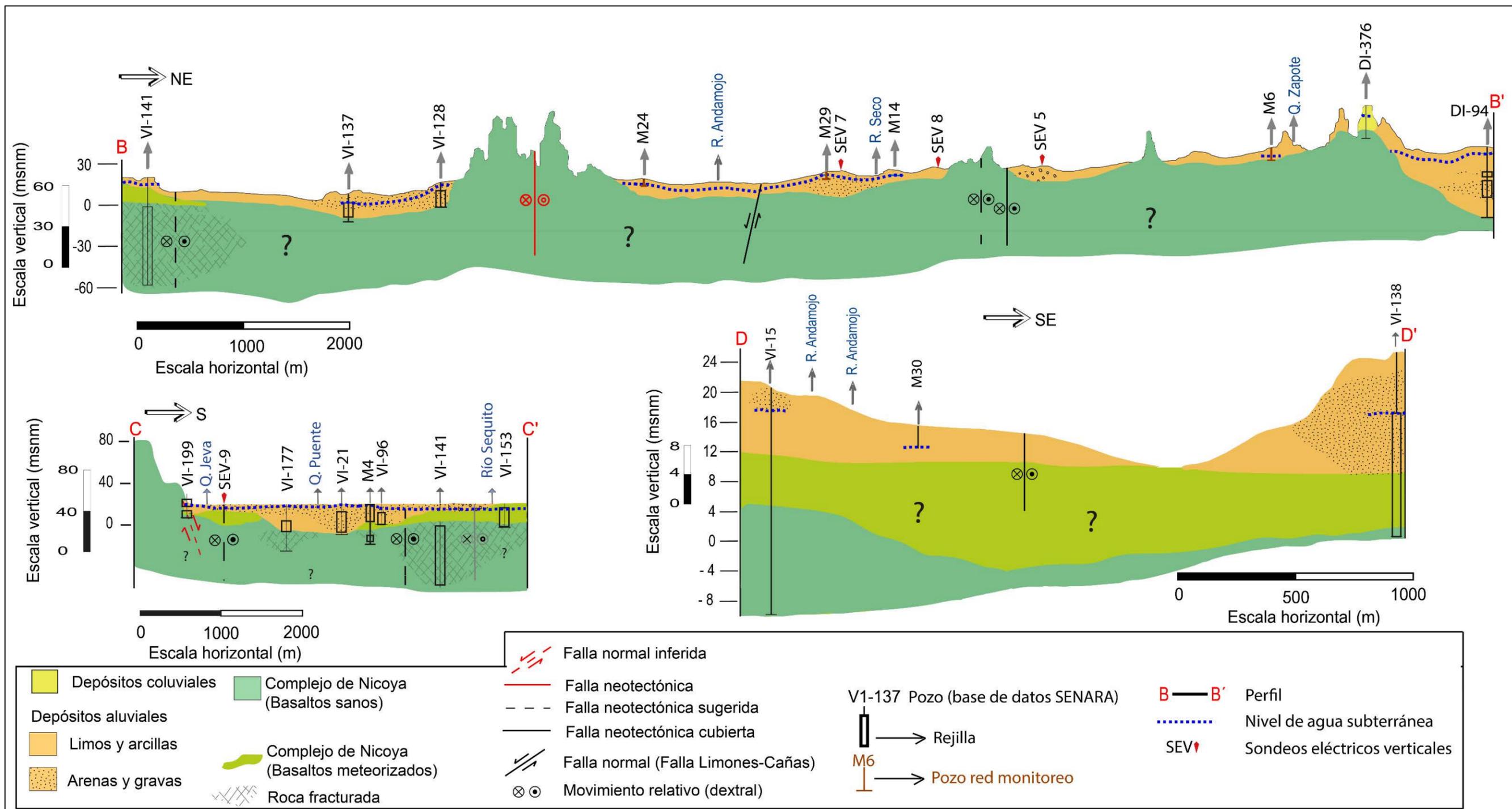


Figura 18: Perfiles hidrogeológicos del área de estudio

4.3 Acuíferos en la cuenca Andamojo

A partir de la información bibliográfica existente en el área de estudio y el análisis realizado a partir de los datos de pozos, se confirma la existencia de dos acuíferos, los cuales se describen a continuación.

4.3.1 Acuífero aluvial Andamojo

En esta unidad se forma el acuífero principal, alojado en un aluvión de tamaño de grado fino a medio en su mayoría, conformado por arcilla y un horizonte de gravas y arenas no constante en toda la sección, con un espesor variable entre los 4 y los 38 m, para promedio de 17,4 m (base de datos de pozo del SENARA, 2018). El mayor espesor de esta unidad se localiza en el límite noreste del área de estudio, específicamente al suroeste de Jobos, al sureste de Paraíso y al norte de esta misma localidad. Es importante recalcar que, debido a la presencia de suelos arcillosos en las inmediaciones de Veintisiete de Abril, Jobos y Soncoyo, las conductividades hidráulicas tienen valores de 5,8 cm/día, similar sucede en las cercanías de Canas Gordas y Río Seco donde se presentan valores entre 5,2 cm/día y 12,1 cm/día. Estos datos son bajos respecto a los encontrados en el resto del área de estudio.

En cuanto a los caudales reportados para dicho acuífero, varían entre 1 l/s y 21 l/s para un caudal promedio de 6,6 l/s.

Las transmisividades en los depósitos aluviales varían entre los 141,3 m²/d - 614 m²/d según los pozos DI-94 y VI-21. Según la clasificación Krásný (1993) se trata de transmisividades altas, sin embargo, este parámetro está prácticamente ausente en la mayoría de pozos que captan el acuífero contenido en esta unidad, y únicamente se cuenta con datos en tres reportes de pozo, por lo que es necesario contar con más pruebas de bombeo para tener una mayor aproximación de la transmisividad de dicho acuífero.

Durante el presente proyecto se estableció una red de monitoreo (figura 19), en la cual se le midió la fluctuación de niveles para los meses de agosto, octubre, noviembre, diciembre del 2018 y febrero del 2019, para 30 pozos. Se debe indicar que no en todos los meses fue posible tomar la medición, debido a que muchos de ellos se localizaban en zonas que fueron afectadas por fuertes precipitaciones entre los meses de setiembre y octubre del 2018, quedando los sitios incomunicados por los constantes desbordamientos de los ríos. En otras ocasiones, no fue posible el acceso al pozo por ausencia del propietario, entre otras situaciones ocurridas durante las visitas de campo.

En el gráfico 2A, 2B y 2C, se observa una relación entre la precipitación (pluviómetro Pura Jungla) y los niveles de agua de pozos de la red de monitoreo, donde a medida que la precipitación aumenta, también se identifica un aumento en el nivel de agua subterránea, lo que indica que la recarga del acuífero es inmediata o directa. Los niveles de agua subterránea más someros ocurrieron durante el mes de octubre del 2018, donde incluso los pozos M2 y M4 experimentaron niveles por encima de la superficie (gráfico 2A), esto debido a las fuertes precipitaciones para ese mes (875,9 mm), donde incluso hubo desbordamientos de ríos e inundaciones de localidades como Río Seco, Paraíso y Guapote. El mes donde los niveles de agua son más profundos, es febrero, el cual es relativamente seco según los registros meteorológicos, donde se registra una precipitación de 15 mm.

Durante el desarrollo de este proyecto, no fue posible cubrir con aforos toda la sección del río principal durante estación seca, por este motivo es difícil establecer una conexión hidráulica entre los ríos y el acuífero, sin embargo, como ya se ha mencionado anteriormente, se localizaron algunos “charcos” de flujo visible leve, y con presencia de pequeños ecosistemas (peces), esto en secciones de río que yacían completamente secos por varios cientos de metros tanto aguas arriba como aguas abajo (figura 9). Adicionalmente cabe destacar que los niveles reportados en esta unidad acuífera son bastantes someros, por ejemplo, para los pozos de la red de monitoreo en el mes de octubre, se obtuvieron valores de hasta de 72 cm por

encima de la superficie, y máximos en profundidad de 7,51 m, para un promedio de 1,4 m, mientras que para el mes de febrero se observaron niveles mínimos de 0,91 m y máximos de 11,9 m para un promedio de 4,3 m. En cuanto a los niveles reportados en la base de datos del SENARA, los mismos arrojan un nivel máximo de 9 m.b.n.s. y un mínimo de 0 m.b.n.s. y en promedio 3,7 m.b.n.s.

Según lo indicado anteriormente, se esperaría que el acuífero mantenga un nivel somero en los meses de estación lluviosa donde existe un aporte hacia los drenajes superficiales (ríos), pudiéndolos mantener llenos durante ese período (figura 20A, escenario 1), mientras que en estación seca hay un descenso en el nivel del acuífero, que hace que los ríos no reciban aporte de agua y se sequen durante los meses febrero, marzo y abril en general (figura 20A, escenario 2). Sin embargo, para sacar mayores conclusiones en este sentido, se requeriría realizar estudios más detallados.

Como se consideró anteriormente, este acuífero posee un reservorio pequeño no obstante la recarga potencial es alta (apartado 4.4.4.8), por lo que es muy común observar que, durante estación lluviosa, los niveles de agua subterránea se mantengan a nivel e incluso por arriba de la superficie, existiendo un aporte importante de agua hacia los ríos principales y colectores de la zona aluvial.

Los abatimientos reportados en algunos de los pozos DI-94, VI-21 y M4 muestran que hay una estabilización en un tiempo relativamente bajo, lo que sugiere que el sistema podría alcanzar un equilibrio o régimen permanente después de unos pocos minutos (tabla 5).

Tabla 5: Abatimientos para pozos localizados en el acuífero aluvial Andamajo

Nº Pozo	N.E. (m)	N.D. final	Abatimiento total (m)	Caudal (l/s)	Tiempo bombeo (min)	Tiempo bombeo estabilización (min)
DI-94	3,48	6,80	3,32	12,3	2700	35
VI-21 (M2)	0,33	0,60	0,27	4,7	1440	7
M4?	0,00	7,88	7,88	21	3060	60 / 915

Fuente: Base de datos del SENARA (2018)

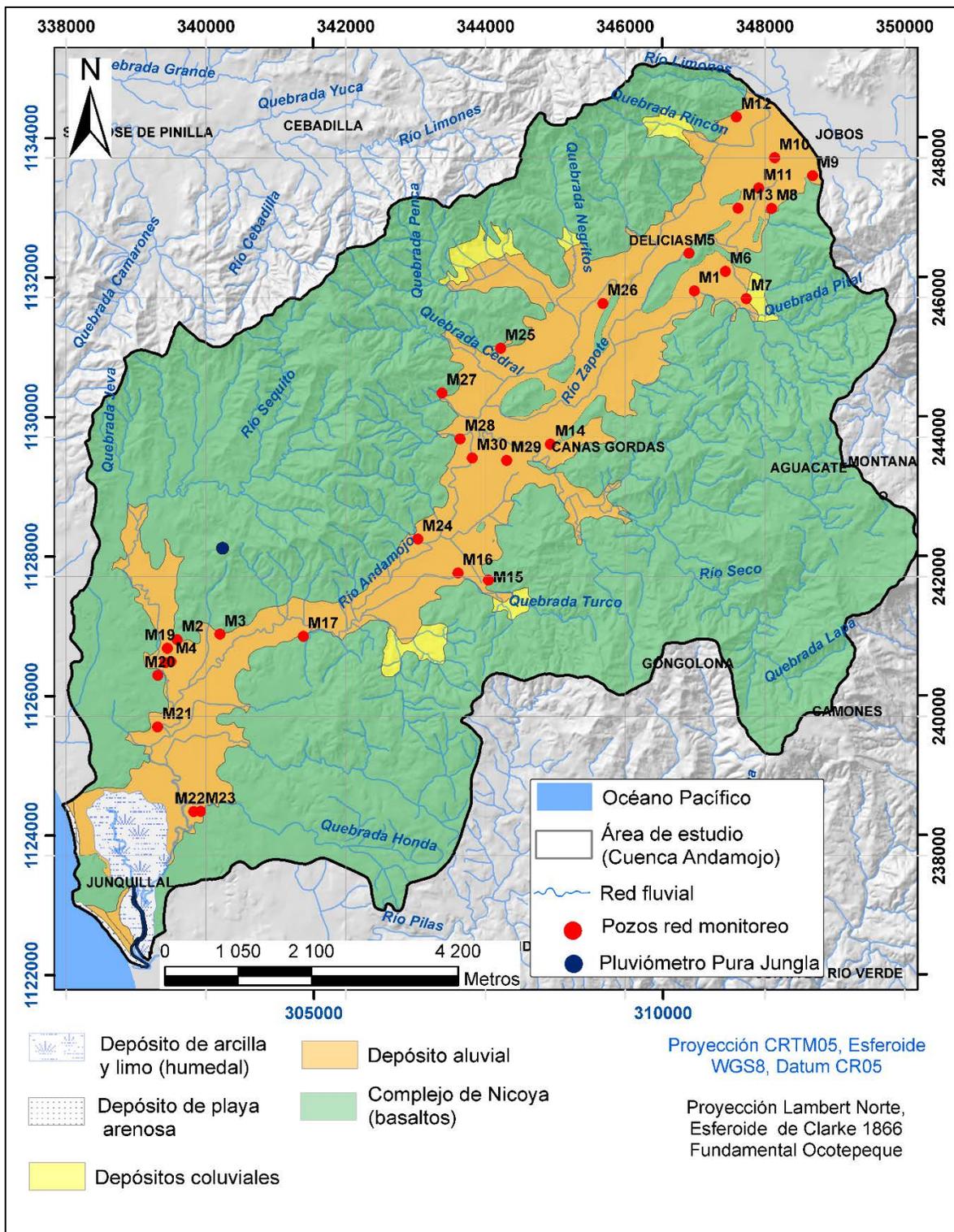
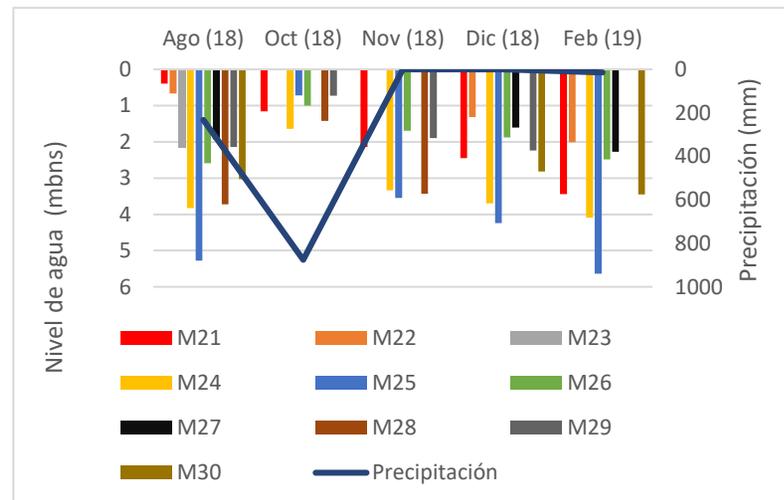
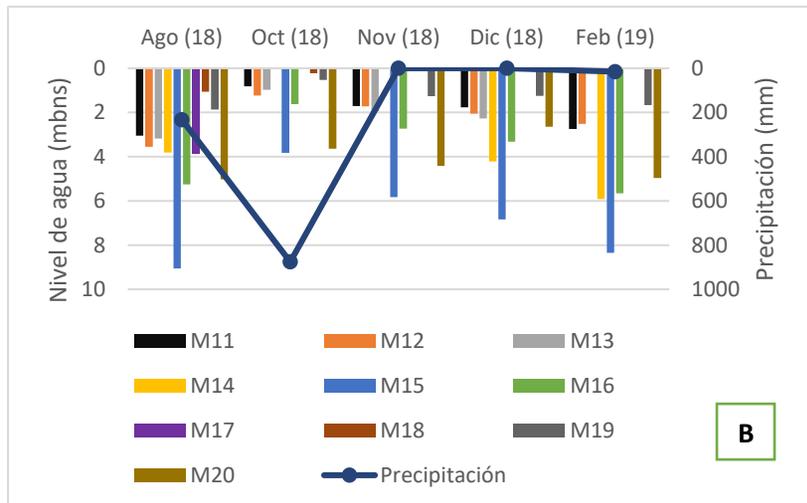
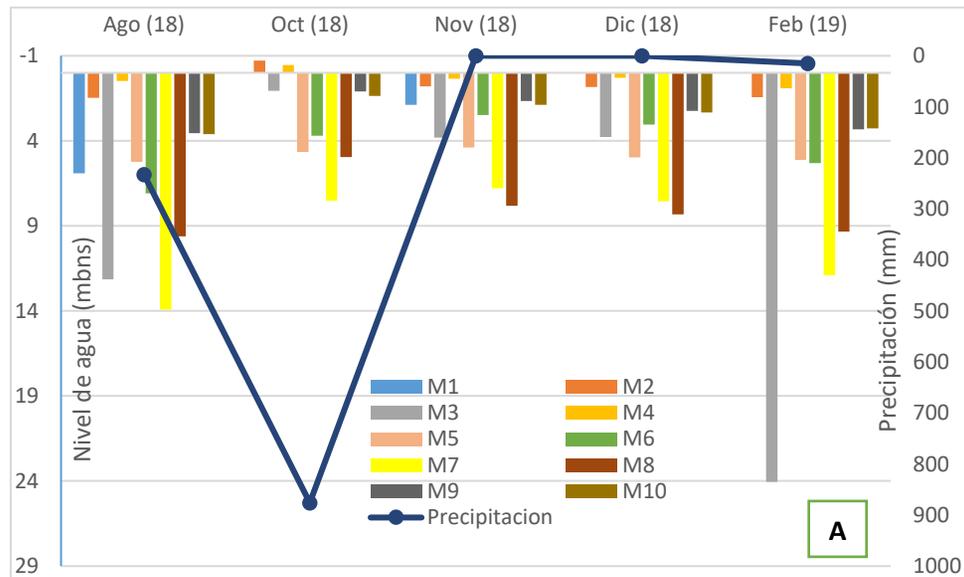


Figura 19: Red de monitoreo y ubicación del pluviómetro dentro el área de estudio

Gráfico 2: Fluctuación de niveles en pozos M1-M30 vs Precipitación (Pluviómetro Pura Jungla)



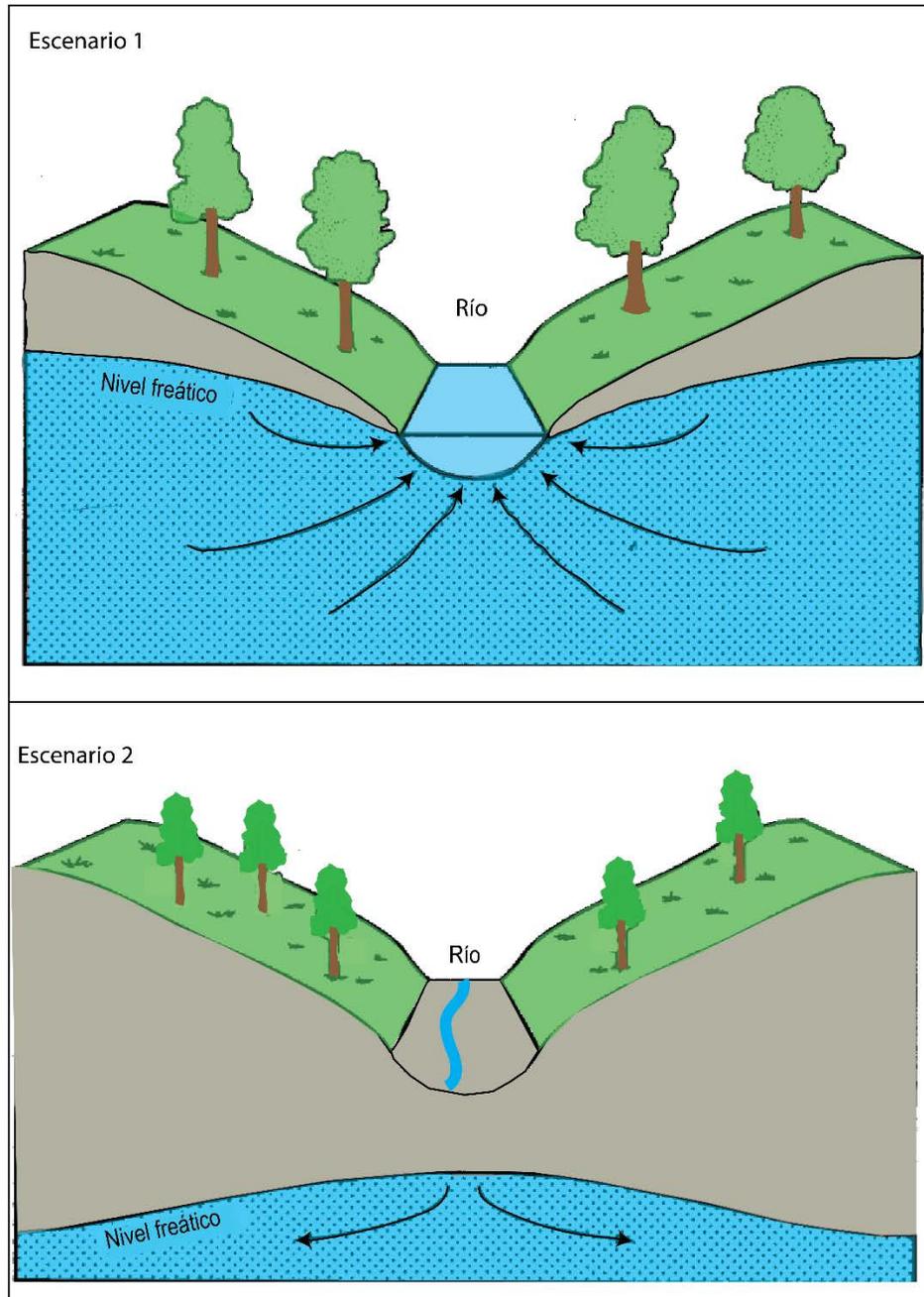


Figura 20A: Esquema de la relación entre el acuífero y el sistema superficial (ríos). Imagen tomada y modificada de Fetter (2001)

4.3.2 Acuífero fisurado Andamajo

Una de las características principales que hace que una roca aloje acuíferos fisurados, es que por su rigidez presentan un comportamiento mecánico frágil, lo

que da como resultado el origen de fracturas al someterse a esfuerzos. Este sistema de fracturas podría llegar a generar una permeabilidad suficiente (por porosidad secundaria) como para formar un acuífero (Molinero, 2005). Sin embargo, aunque en el área de estudio haya un sistema de fallas que afecta el Complejo de Nicoya, no se cuenta con información de pozos suficiente para determinar parámetros hidrogeológicos que permitan identificar el comportamiento del flujo; tampoco se cuenta con un análisis estructural para determinar cómo es el comportamiento de las fracturas, ya que a nivel superficial muchas de estas se observan rellenas de arcillas y vetas rellenas de sílice, sin embargo se encontraron fracturas abiertas por lo que no se descarta que en profundidad tengan algún grado de conexión, sin embargo, para efectos de este proyecto no fue posible investigarlas con mayor detalle.

Una característica importante en las rocas fracturadas es el desarrollo de la regolita, que es un manto de alteración superficial que se origina por la meteorización física y química de la roca madre (Molinero, 2005), y que posteriormente da origen a los suelos residuales, los cuales poseen conductividades hidráulicas similares a las arenas finas y limosas.

De acuerdo con el marco teórico, la información disponible y el trabajo de campo realizado, para esta unidad se sugiere la conformación de un acuífero compuesto por dos niveles: uno superficial, desarrollado en el regolito que presenta características similares a la porosidad intergranular (Molinero, 2005), y otro profundo fracturado, esto se representa en el esquema de la figura 20B. Algo similar se sugiere en esta investigación que ocurre en la unidad del Complejo de Nicoya, esto también fue propuesto para la zona de Nambí, Nicoya por Alan (2017).

Con la información litológica de pozos (base de datos del SENARA) se determina un espesor regolítico entre 1-12 m, para un promedio de 4,40 m., con rendimientos entre 0,5 -11 l/s.

Los pozos que captan el nivel más profundo de esta unidad (basaltos fracturados), reportan niveles de agua subterránea entre los 6,24 – 75 m.b.n.s, con rendimientos

entre los 6 - 0,75 l/s., según los pozos MA-17, DI-381 y VI-192. Los parámetros hidráulicos están ausentes en casi todos los pozos, a excepción del V1-212, y el MA-17 (levemente fuera del área de estudio, aunque se considera representativo). Dichos registros reportan una transmisividad de 10 m²/día - 478 m²/día, las cuales son transmisividades consideradas como moderada y alta por Krásný (1993).

En los sectores colindantes al acuífero aluvial Andamojo, se encuentran varios pozos que captan un nivel de agua formado en el regolito de esta unidad, con características hidrogeológicas bastantes similares entre ambos, por lo que se podría asociar a un único acuífero, sin embargo, es necesario realizar estudios a mayor detalle, que confirmen dicha característica comunicación hidráulica entre ellos.

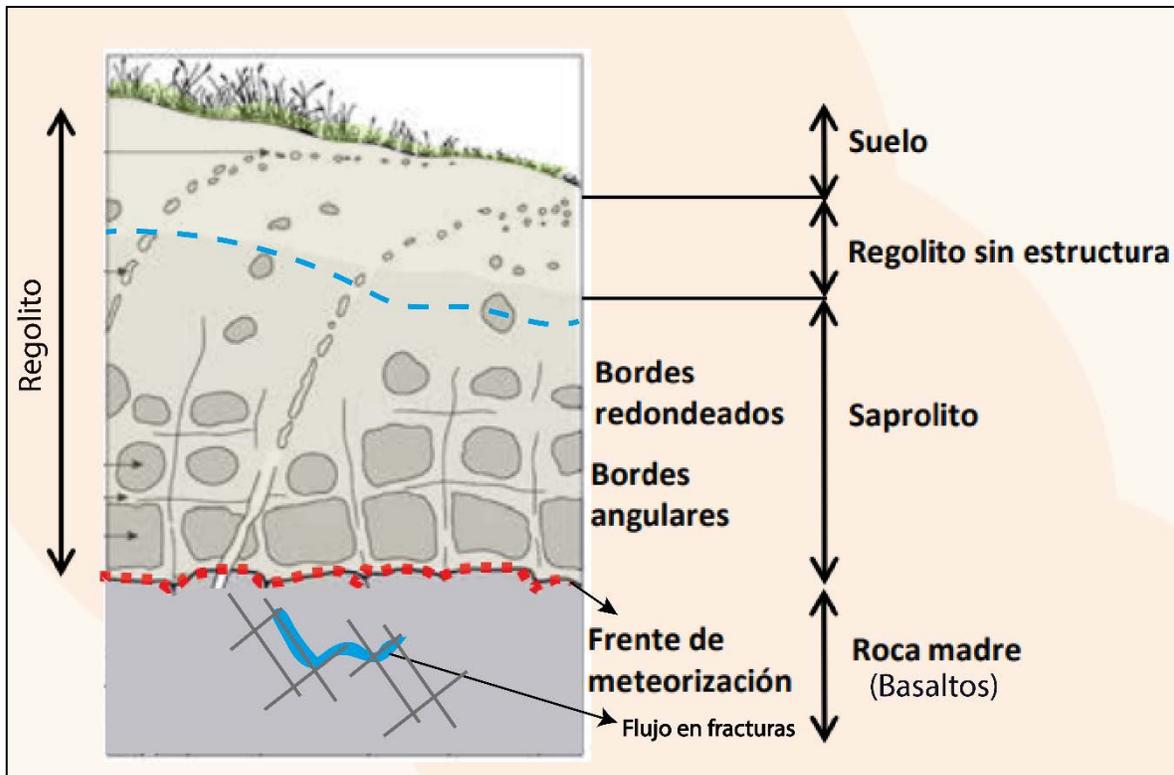


Figura 20B: Esquema de la unidad de Complejo de Nicoya (basaltos) para el área de estudio. Tomado y modificado de Arce et al. (2012)

4.4 Balance hídrico de suelos

Para calcular la recarga potencial de un acuífero existen distintas metodologías; para este estudio se realizó un balance hídrico de suelos, a partir de la metodología de Schosinsky (2006), la cual utiliza variables como la textura del suelo, uso del suelo, precipitación mensual, temperatura, características del suelo y otras variables que son relativamente sencillas de obtener en el país. Además, dicha metodología es la oficial en Costa Rica, según consta en el acuerdo 60-2012 Alcance 105 del 31 de julio del 2012, del Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET).

A continuación, se describe dicha metodología:

Para dar inicio con los cálculos, se debe conocer la precipitación de la zona de estudio. Tal y como se indicó en la sección 1.4 se utilizaron los datos de Durán et al. (2019).

Esta información entregada se obtuvo a partir de la depuración de datos regionales con información y validación de estaciones meteorológicas ubicadas en las zonas aledañas a la cuenca (la metodología se detalló en el capítulo 1.4 de clima y vegetación).

Para efectos de este estudio se filtraron los datos que abarcan únicamente la cuenca Andamojo, que corresponden con tres grillas de información meteorológica y se trabajó con el promedio mensual entre los años 1980 y el 2017 (gráfico 3 y tabla 6). Para efectos de este proyecto, a las grillas con información meteorológica se les asignó el nombre de Estación 1,2, Estación 2,2 y Estación 2,3, es decir E1.2 - E2.2 y E2.3 respectivamente (figura 21).

Es importante mencionar que esta metodología se elaboró en el programa ArcGIS 10, y la información generada se trabaja en polígonos o vectores de información geoespacial llamados *shapes*.

Gráfico 3: Precipitación promedio mensual de las estaciones en el área de estudio (Durán et al., 2019).

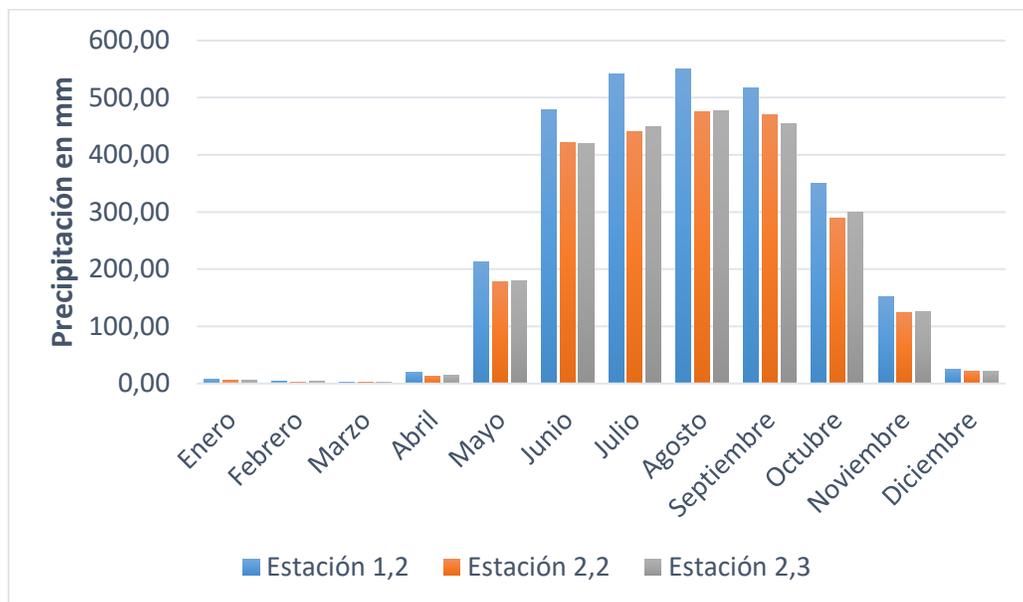


Tabla 6: Precipitación promedio mensual para los años 1980-2017. Datos Durán et al. (2019).

Mes	Precipitación en las áreas de influencia (mm)			
	E1.2	E2.2	E2.3	Total
Enero	7.77	4.95	5.49	18.21
Febrero	3.25	2.96	3.72	9.93
Marzo	2.68	2.2	2.63	7.51
Abril	19.66	13.13	13.88	46.67
Mayo	212.72	178.72	179.9	571.34
Junio	478.77	422.03	420.33	1321.13
Julio	541.57	441.36	450	1432.93
Agosto	550.08	475.89	476.81	1502.78
Septiembre	516.81	471.09	454.4	1442.3
Octubre	350.03	288.59	298.92	937.54
Noviembre	151.39	123.59	124.91	399.89
Diciembre	25.7	21.36	22.21	69.27
Total	2860.43	2445.87	2453.2	

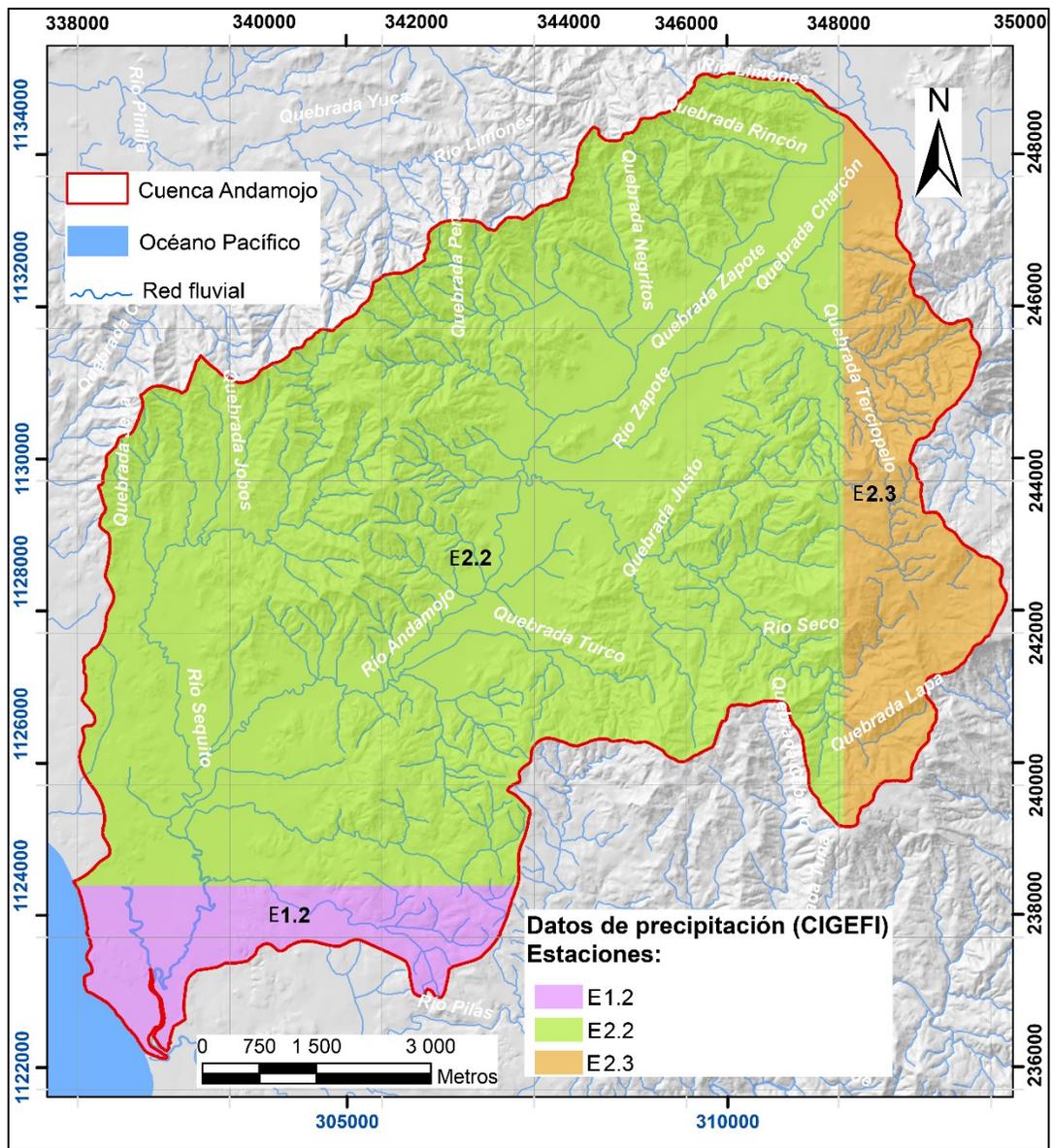


Figura 21: Ubicación de las estaciones o grillas de información meteorológica (precipitación)

4.4.1 Mapa de uso de suelo

El mapa de uso de suelo para la zona de estudio se construyó con base en imágenes satelitales de *Google Earth* del año 2018, ya que contienen un detalle más amplio y actualizado, e incorpora las modificaciones recientes en el uso de la

tierra, además esta imagen satelital cubre el área de estudio en su totalidad. Además, se realizó una validación general en campo de lo analizado en laboratorio.

Para la zona de estudio se determinaron 5 usos de suelo que se clasifican en Bosques, Cultivos, Pastos, Poblados y Humedal (figura 22). A continuación, se describe cada uno de ellos.

4.4.1.1 Bosques:

El bosque es el uso de suelo con mayor cobertura en el área de estudio, cubre un total de 71,6 km² y un 77% de la cuenca y corresponde con un bosque característico del clima Tropical Seco (sección 1.4), el cual se encuentra distribuido en las partes montañosas donde la topografía es principalmente quebrada (foto 5A).

4.4.1.2 Pastos:

Los pastos abarcan un área de 15,4 km², y un 16,6% de la cuenca, se localizan en las zonas de topografías planas, donde generalmente los terrenos son dedicados a la siembra de pastos para consumo del ganado (foto 5B).

4.4.1.3 Cultivos:

Corresponden con un área total de 2,5 km² y un 2,6% del total de la cuenca. Los cultivos presentes en el área de estudio consisten en su mayoría de teca (foto 5C2) y en menor proporción arroz (foto 5C1). Los cultivos de arroz fueron identificados mediante comprobación de campo y posteriormente fueron interpretados en su totalidad mediante imágenes satelitales., De manera similar se realizó con el cultivo de la teca la cual es una plantación utilizada en la generación de madera para comercializarla.

Según lo conversado con vecinos de la zona no se conoce de otras plantaciones en el área de estudio además del arroz y la teca, aunque no se descarta la existencia de otros cultivos en menor escala.

4.4.1.4 Poblados:

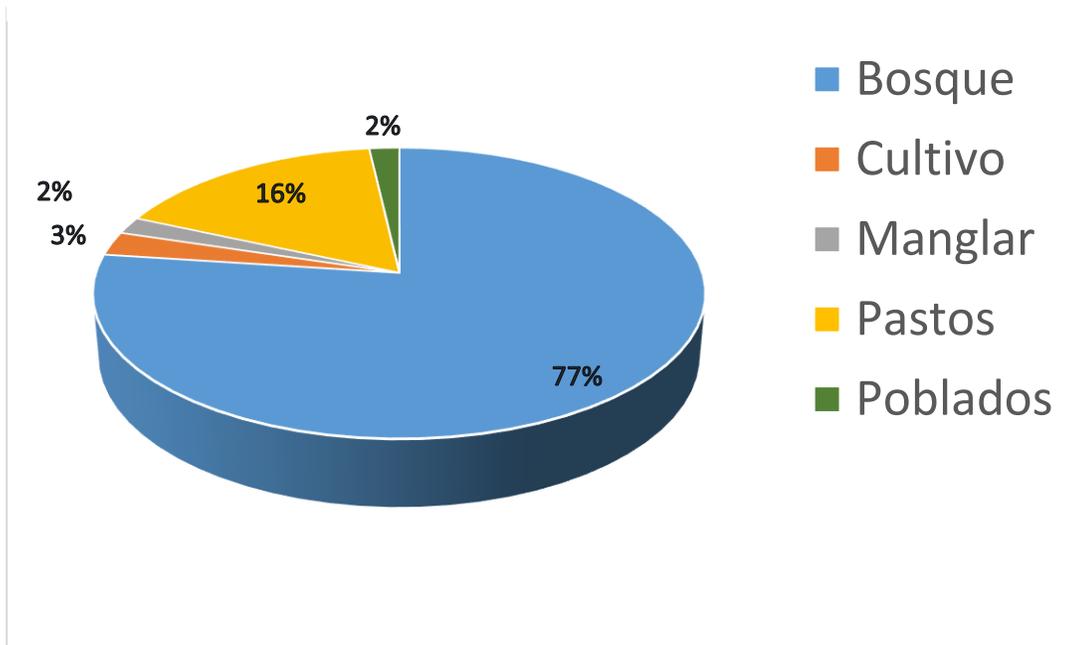
En el área de estudio existen cinco poblados principales que cubren un área aproximada de 1,7 km², el equivalente a un 1,8 % de la cuenca, que corresponden con las comunidades de: Delicias, Río Seco, Guapote, Paraíso, Junquillal, Jobos entre otras zonas aledañas. Estos poblados se caracterizan por una baja densidad en infraestructura e industrialización, no existen ciudades o urbanizaciones de gran tamaño, por el contrario, se trata de pueblos pocos densos, con casas espaciadas entre sí y con patios amplios; además, cada pueblo cuenta con canchas de fútbol (foto 5D1y 5D2).

4.4.1.5 Humedal:

El humedal se localiza en el sector sureste del área de estudio, en la desembocadura del río Andamojo al Océano Pacífico, y en la confluencia entre el río Andamojo y el río Venado. El mismo tiene un área de 1,9 km² para un 2% del área de la cuenca.

En el gráfico 4 se observa la distribución porcentual del uso de suelo para la cuenca en estudio.

Gráfico 4: Distribución del uso de suelo en la cuenca Andamojo



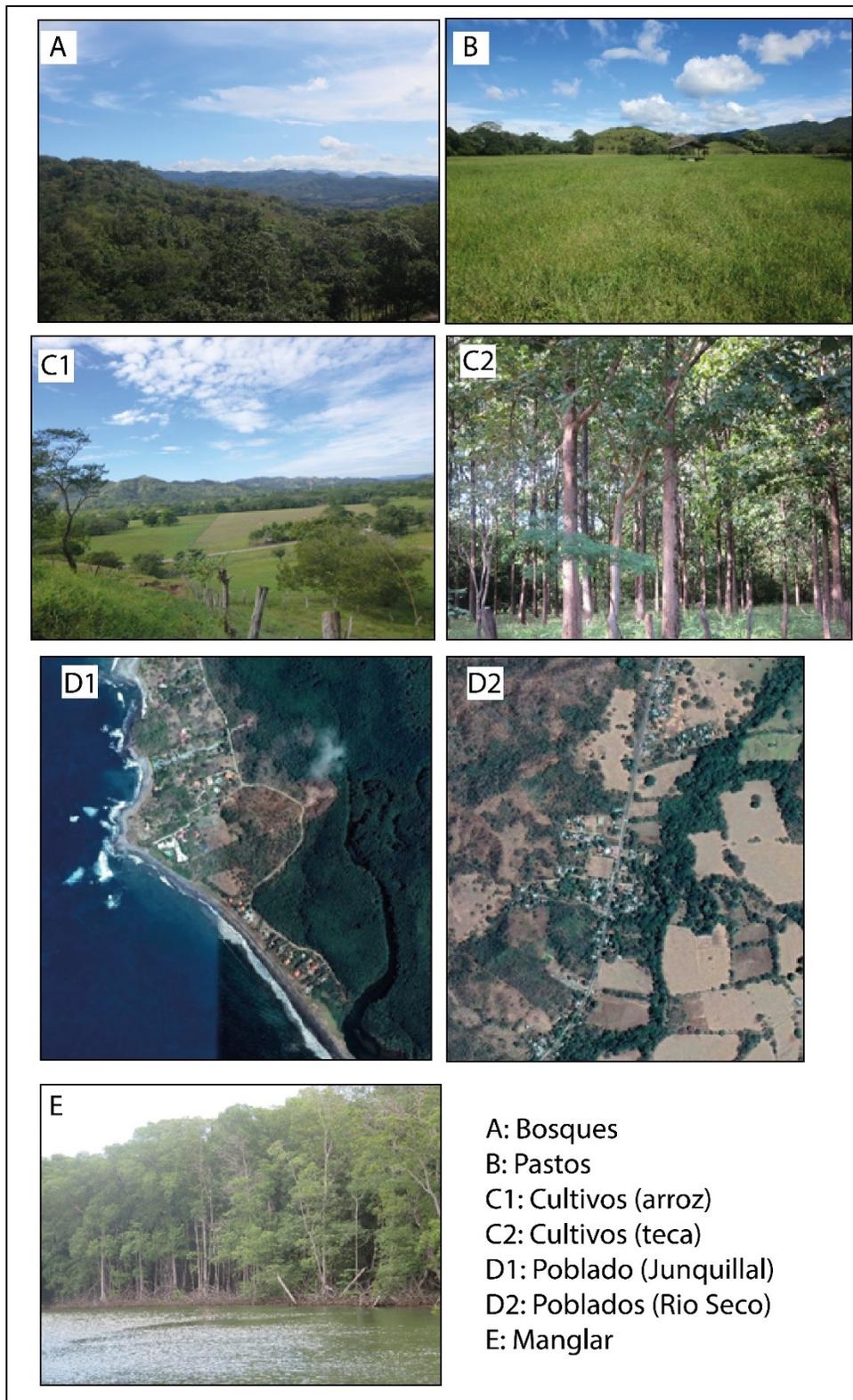


Foto 5: Distintos usos de suelo en la cuenca Andamojo, Santa Cruz, Guanacaste

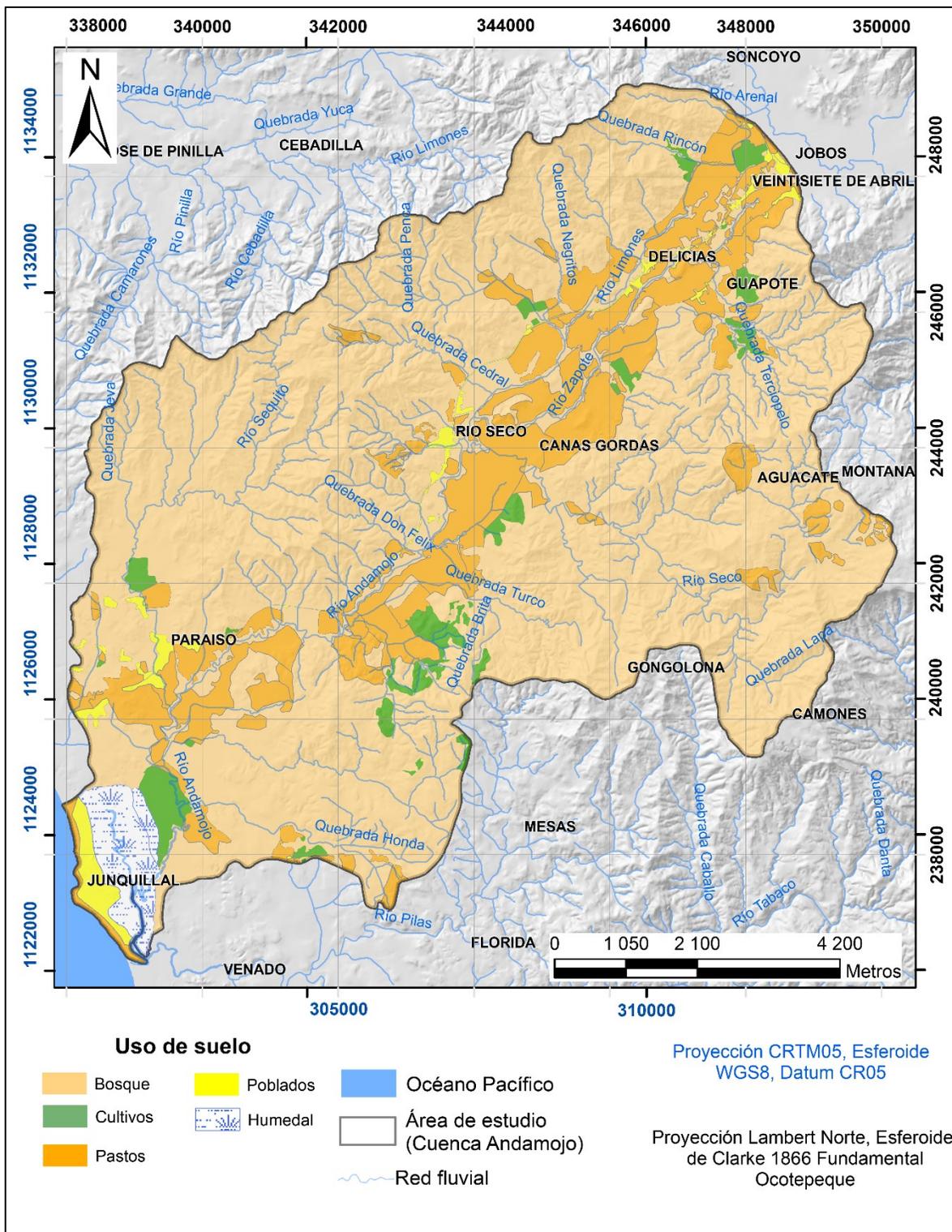


Figura 22: Mapa de uso de suelo de la cuenca Andamojo. Elaboración propia a partir de imágenes satelitales de Google Earth (2018) y trabajo de campo.

4.4.2 Fracción de lluvia interceptada por el follaje

Para la determinación de la fracción de lluvia interceptada por el follaje, se requiere de tres parámetros que son: la precipitación mensual, el coeficiente de retención del follaje y la retención de lluvia en el follaje.

4.4.2.1 Coeficiente de retención en el follaje (Cfo)

La metodología de Schosinsky (2006) define al coeficiente de follaje como el porcentaje de lluvia mensual que es retenida en el follaje, para lo cual se asigna un valor igual a 0,20 para bosques densos, mientras que para los restantes usos de suelo se asigna un valor de 0,12 (figura 23).

Como en la metodología de Schosinsky (2006), el uso de suelo para los poblados no tiene una clasificación como tal, y debido a que los poblados del área de estudio se caracterizan por ser poco densos, con patios amplios, y la impermeabilización por asfaltado es poca, ya que no se encuentra urbanizada, se le asigna un valor de Cfo igual a 0,06 (Es decir la mitad del Cfo 0,12 indicado anteriormente para los restantes usos de suelo). Por otro lado, para el área correspondiente al humedal, se le asignó un valor de 0,2, debido a que la zona presenta un follaje similar al de los bosques densos (figura 21). Pese a esto, como se observará más adelante, debido a la naturaleza del humedal, se considera como una zona de descarga, donde, donde no hay infiltración, por lo tanto, los valores resultantes del balance en los humedales quedan en 0.

4.4.2.2 Retención

Para el cálculo de la retención de lluvia por el follaje se presentan tres condiciones:

- Si P es menor o igual a 5 mm/mes, la $Ret = P$
- Si el producto de $(P)*(Cfo)$ es mayor o igual a 5 mm/mes, la $Ret = (P)*(Cfo)$
- Si la P es mayor a 5 mm/mes y el producto $(P)*(Cfo)$ menor a 5 mm/mes, la $Ret = 5$

Donde:

Cfo = Coeficiente de retención del follaje. Para bosques muy secos el $Cfo = 0,20$, y para otros el $Cfo = 0,12$.

P = Precipitación mensual (mm/mes).

Ret = Retención de lluvia en el follaje (mm/mes)

Para obtener la retención de lluvia en el follaje (Ret) se procede a convertir los mapas de precipitación (P) y de Coeficiente de retención del follaje (Cfo) que inicialmente se realizaron en formato *shape* a formato ráster, asignándoles un tamaño de píxel de 2x2 m (Esto en concordancia con el tamaño de los polígonos del uso de suelo). Posteriormente se utilizó álgebra de mapas (programa ArcGIS 10) para ejecutar las operaciones explicadas anteriormente, esto se realiza para cada uno de los meses del año, es decir se obtuvieron 12 mapas, que posteriormente se suman para generar el mapa de retención de lluvia por el follaje anual (figura 24).

Se resalta la influencia del patrón de la cuadrícula original de la precipitación, donde las zonas con mayor retención se localizan en los límites este y sur, formando parte de bosques, con valores entre 502 y 581 mm, mientras que las zonas ocupadas por los poblados, presentan la menor retención en el follaje, del área de estudio, con valores entre 164 y 190 mm.

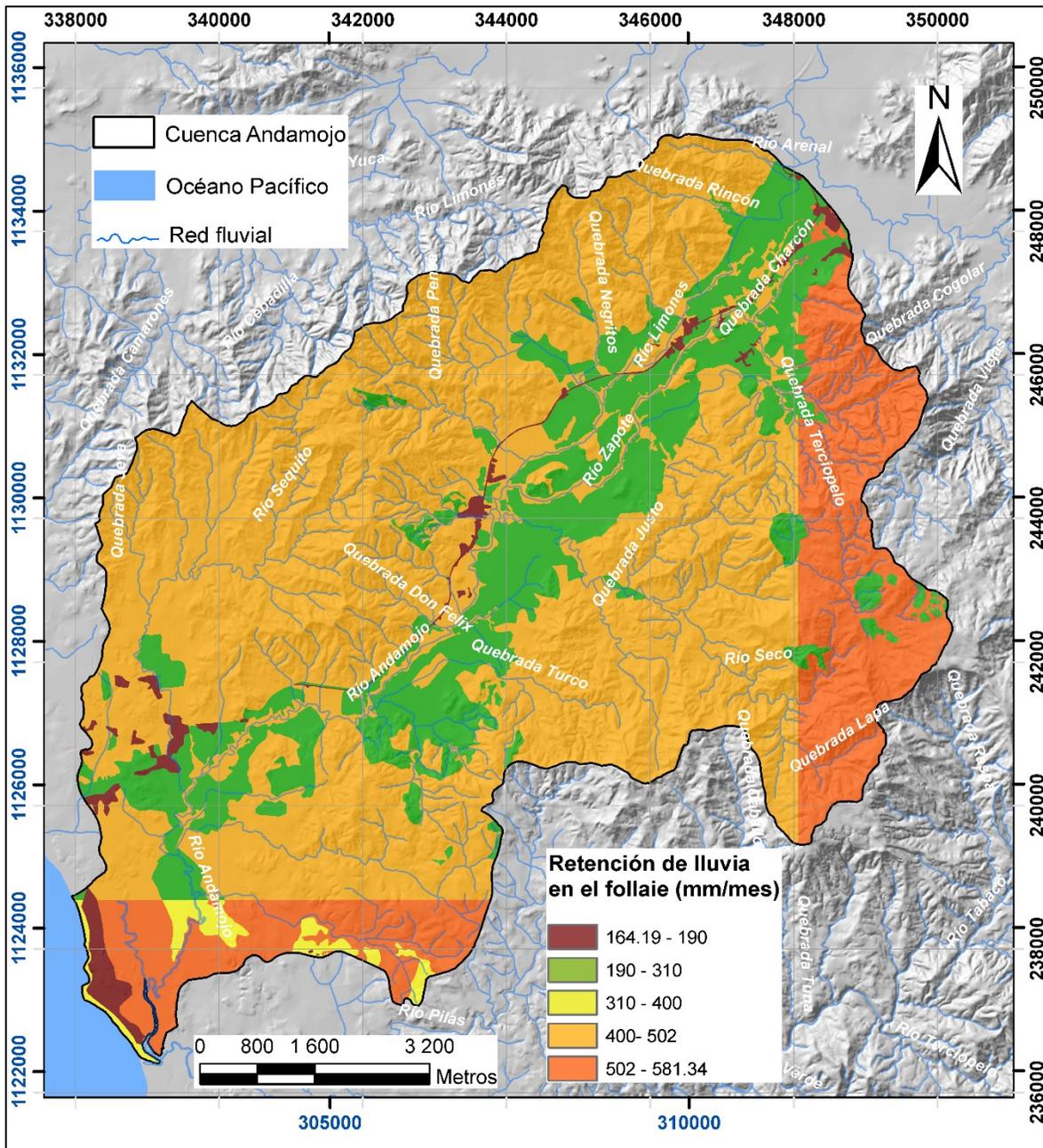


Figura 24: Mapa de retención de lluvia en el follaje

4.4.2.3 Infiltración

La infiltración es el proceso mediante el cual, el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo (Chow et al., 1986).

Para la determinación del coeficiente de infiltración, se debe contar con datos de infiltración básica del suelo expresada en milímetros por día (f_c), que corresponde con la permeabilidad del suelo saturado en los primeros 30 cm de profundidad (Schosinsky, 2006). Esta variable se obtuvo a partir de la realización de pruebas de infiltración que fueron distribuidas en el área de estudio (figura 25). Se utilizaron los datos de conductividad hidráulica de las pruebas de infiltración realizadas en esta investigación, en el mes de noviembre del 2018, así como las elaboradas por Granados (2018).

Las pruebas se realizaron empleando la metodología de doble anillo, para esto se utilizó un anillo externo y uno interno, con la finalidad de analizar las condiciones superficiales de cada suelo en particular.

Es importante resaltar que, para cada uno de los sitios, se tomaron al menos 4 muestras de suelo para su respectivo análisis en laboratorio, que estuvo a cargo del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica, estos análisis corresponden a la textura de suelo, capacidad de campo, punto de marchitez, densidad aparente, densidad de partículas y porosidad. Estos últimos cinco parámetros se explicarán más adelante (foto 6).

Las pruebas de infiltración fueron distribuidas de manera que se abarcara todas las litologías existentes, y que su distribución espacial cubriera la mayor parte del área de la cuenca, sin embargo, hay zonas que no se pudieron cubrir, ya sea por las condiciones topográficas, condiciones climáticas o negación de ingresos a fincas por parte de propietarios. Es importante recalcar que, en la zona de estudio, se dan variaciones significativas en la textura de suelo en cortas distancias, lo que suele ser una característica recurrente en suelos heterogéneos; esto condujo a que se eligiera una distribución espacial de las pruebas de infiltración a conveniencia, pero intentando ser lo más representativo posible y con criterio profesional. (figura 25).

Cada prueba consistió en la medición de los descensos del nivel del agua por infiltración durante dos horas y se utilizó agua sin sedimento. Además, se seleccionaron sitios lo menos alterados posible.

Los resultados fueron tabulados contemplando la diferencia de altura Δh entre el cambio temporal de la medición Δt y posteriormente se realizó una curva de ajuste por mínimos cuadrados con la finalidad de contemplar los cambios debido a posibles desvíos del promedio de los datos medidos en el campo (Anexo 5).



Foto 6: Pruebas de infiltración P15 y P17, en la fotografía de la derecha se observa parte de las muestras que fueron trasladadas para el respectivo análisis de laboratorio.

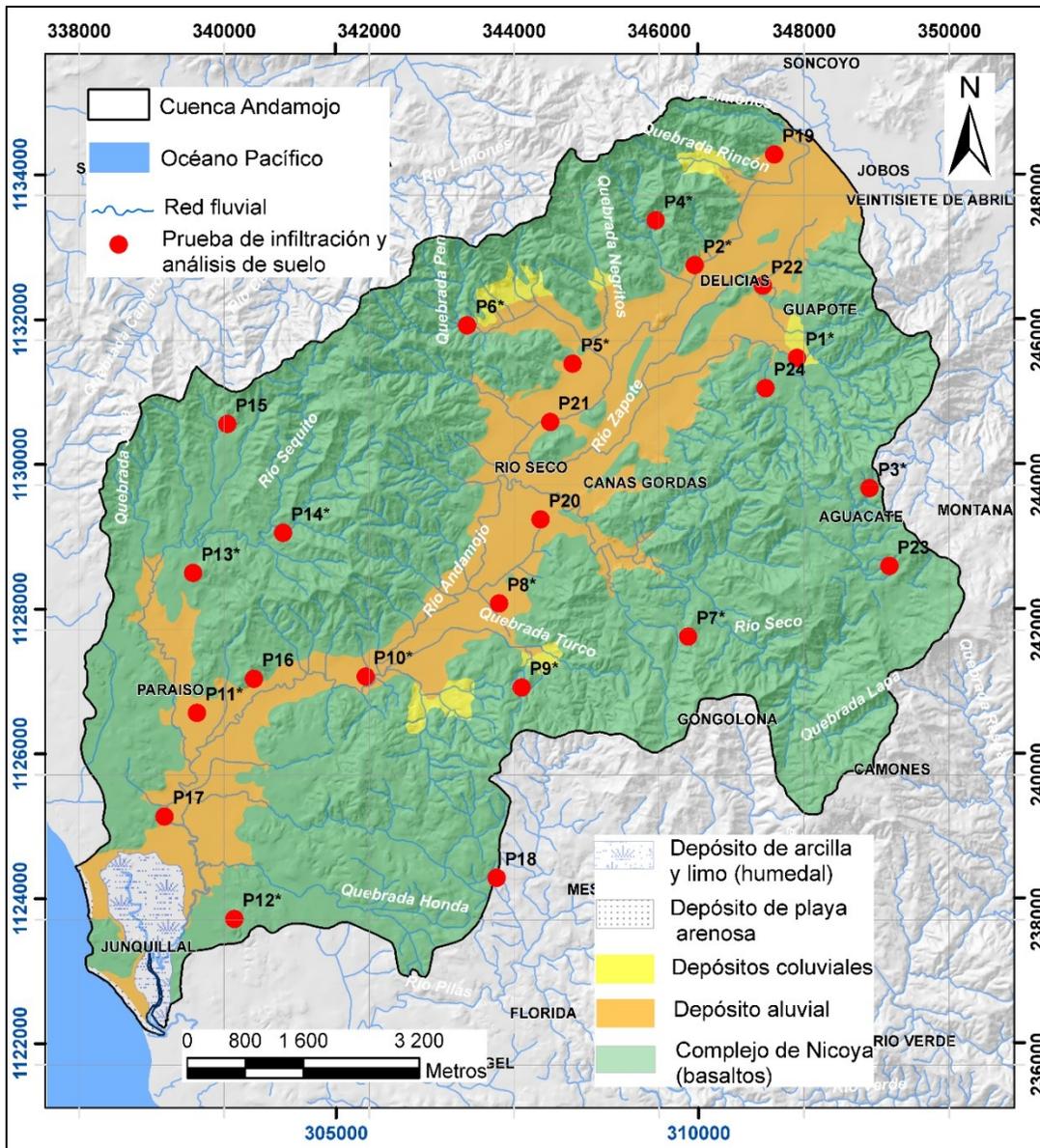


Figura 25: Mapa de ubicación de las pruebas de infiltración y análisis de suelos

4.4.2.4 Fracción que infiltra por la textura del suelo (K_{fc})

Schosinsky (2006), expresa que otro de los factores influyentes en la infiltración de lluvia en el suelo, es el coeficiente de infiltración por la textura de suelo (K_{fc}), y expone tres condiciones, para el cálculo de este:

- Si f_c se encuentra entre 16 y 1568 mm/día, entonces el $K_{fc} = 0,267 \ln(f_c) - 0,000154f_c - 0,723$.
- Si f_c es menor a 16 mm/día, entonces el $K_{fc} = 0,0148f_c/16$.
- Si f_c es mayor de 1568 mm/día, entonces el $K_{fc} = 1$.

Donde:

f_c = Infiltración básica del suelo.

K_{fc} = Coeficiente de infiltración (fracción que infiltra por la textura del suelo).

Los resultados para cada prueba de infiltración se muestran en la tabla 7.

Tabla 7: Ubicación de las pruebas de infiltración y Coeficiente de infiltración para cada una de ellas.

Código	Este	Norte	f_c (mm/día)	K_{fc}	Textura del suelo	Autor
P1*	347902	245756	2193.91	1.000	franco arcillo arenoso	Vargas (2018)
P2*	346492	247036	1059.51	0.979	arcilloso	
P3*	348902	243956	691.04	0.924	franco arcillo arenoso	
P4*	345952	247655	2978.42	1.000	franco arenoso	
P5*	344806	245675	1977.695	1.000	arena franca	
P6*	343352	246205	1911.82	1.000	franco arcillo arenoso	
P7*	346402	241906	1337.05	0.996	franco	
P8*	343792	242365	870.69	0.968	franco arenoso	
P9*	344102	241206	1621.45	1.000	franco arcilloso	
P10*	341952	241356	1037.00	0.977	franco	
P11*	339627	240855	1896.02	1.000	franco arenoso	
P12*	340142	238006	2614.16	1.000	franco arenoso	
P13*	339571	242787	1405.47	0.998	franco arcilloso	
P14*	340812	243340	790.47	0.945	franco arenoso	
P15	340044	244843	659	0.908	arcilloso	Este proyecto
P16	340412	241326	287	0.744	franco arcilloso	
P17	339179	239423	236	0.700	franco arcillo limoso	
P18	343758	238577	2868	0.961	arcilloso	
P19	347588	248565	58	0.351	franco arcilloso	
P20	344364	243525	202	0.663	franco arcilloso	
P21	344498	244869	52	0.326	franco arcilloso	
P22	347431	246752	121	0.538	franco arcilloso	
P23	349178	242882	1981	1.000	franco	
P24	347468	245338	176	0.630	franco arcilloso	

Los resultados de laboratorio indican que la textura del suelo es variable, lo cual puede estar influenciado por los distintos grados de meteorización, variación en la composición mineral, uso del suelo, entre otros aspectos.

El área de influencia por el K_{fc} , se determinó por medio de polígonos de Thiessen; se eligió este método debido a que otros procedimientos como el “*Kriging*” por ejemplo requieren que la distribución de probabilidad de los datos sea normal. Al realizar el análisis de los datos, se observó una gran variación en los valores de infiltración en pequeñas distancias, lo cual se interpretó se debe a la heterogeneidad del suelo (figura 26).

Una vez generado el mapa de los polígonos de Thiessen, este se transformó a un mapa ráster. Es importante aclarar que como los poblados están conformados por infraestructura y zonas verdes, se decidió asignar un valor de K_{fc} igual a $K_{fc} * 0,5$, es decir, el coeficiente de infiltración se divide entre dos, por ser un área que contiene techos de casas e impermeabilización del terreno por asfalto en la carretera, y no se debe asumir para este caso, que el K_{fc} está en función únicamente de la textura del suelo, más bien este coeficiente tiene una disminución generada por dicha infraestructura (figura 26).

Por otro lado, al humedal, se le asigna un valor de K_{fc} igual a cero, debido a que por naturaleza es una zona saturada, por lo que no existe infiltración alguna, se considera una zona de descarga y no de recarga.

Para lograr que tanto el humedal como los poblados obtuvieran dichos valores, se procedió a realizar un ráster, al que se le asigna un valor de 0,5 para los poblados, y un valor de 0 para el humedal, mientras que al resto de usos de suelo se le asignó un valor de uno, para conservar su valor original, posteriormente este ráster se multiplicó por el ráster que se obtuvo de K_{fc} originalmente, donde se obtiene el producto de la figura 26.

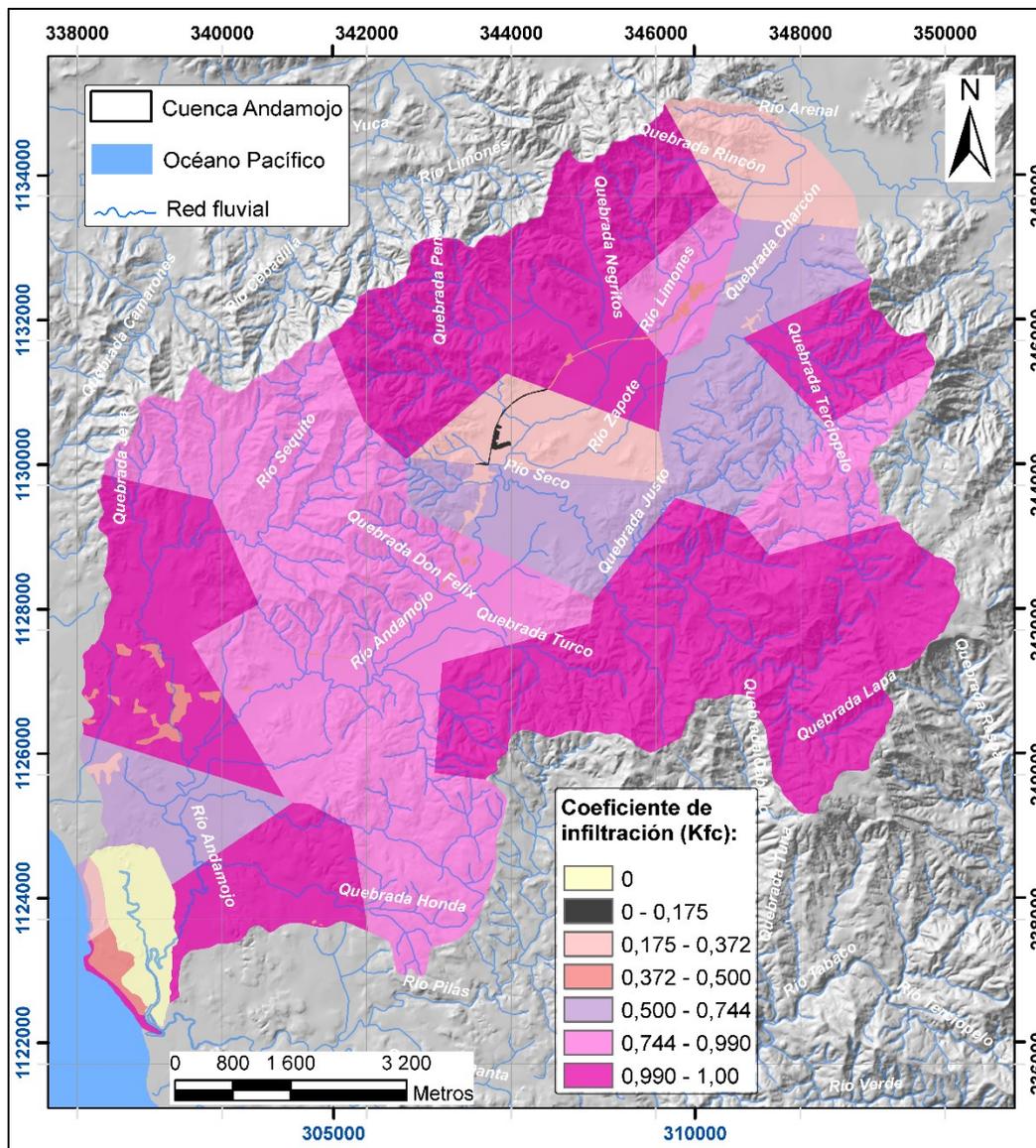


Figura 26: Mapa de coeficiente de infiltración para el área de estudio

4.4.2.5 Fracción que infiltra por efecto de la pendiente (K_p)

Para la obtención del K_p , se generó un mapa de pendientes a partir del Modelo de Elevación Digital base del proyecto, posteriormente se aplicó una reclasificación para los intervalos de porcentaje de pendiente y con base en la clasificación de Schosinsky (2006) se asigna un valor de K_p correspondiente al rango de pendiente del terreno (tabla 8) y se obtuvo el resultado de la figura 27.

La topografía del área de estudio es variable, sin embargo, la pendiente que cubre la mayor parte del área es mayor al 7%, y generalmente coincide con las partes altas de la cuenca, mientras que los porcentajes bajos tiene una variación entre 0-0,4% y 0,4-2% y generalmente corresponden con los sectores de pastizales y poblados (figura 27). Como se ha mencionado anteriormente, el área ocupada por el humedal, no recibe recarga, por lo que se creó otro ráster al que se le asignó un valor de cero, el cual al ser multiplicado por el ráster resultante del Kfc, da como resultado una infiltración de cero, por efecto de la pendiente.

4.4.2.3 Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal (Kv).

Para la asignación del coeficiente de infiltración por efecto de la cobertura vegetal, se utilizaron los valores definidos por Schosinsky & Losilla (2001), según se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9: Coeficientes por la vegetación

Uso de suelo	Valor de Kv
Pastos	0,18
Bosques	0,20
cultivos	0,10
Humedal	0
Poblados	0,09

El valor de 0,09 para los poblados fue justificado anteriormente (figura 28).

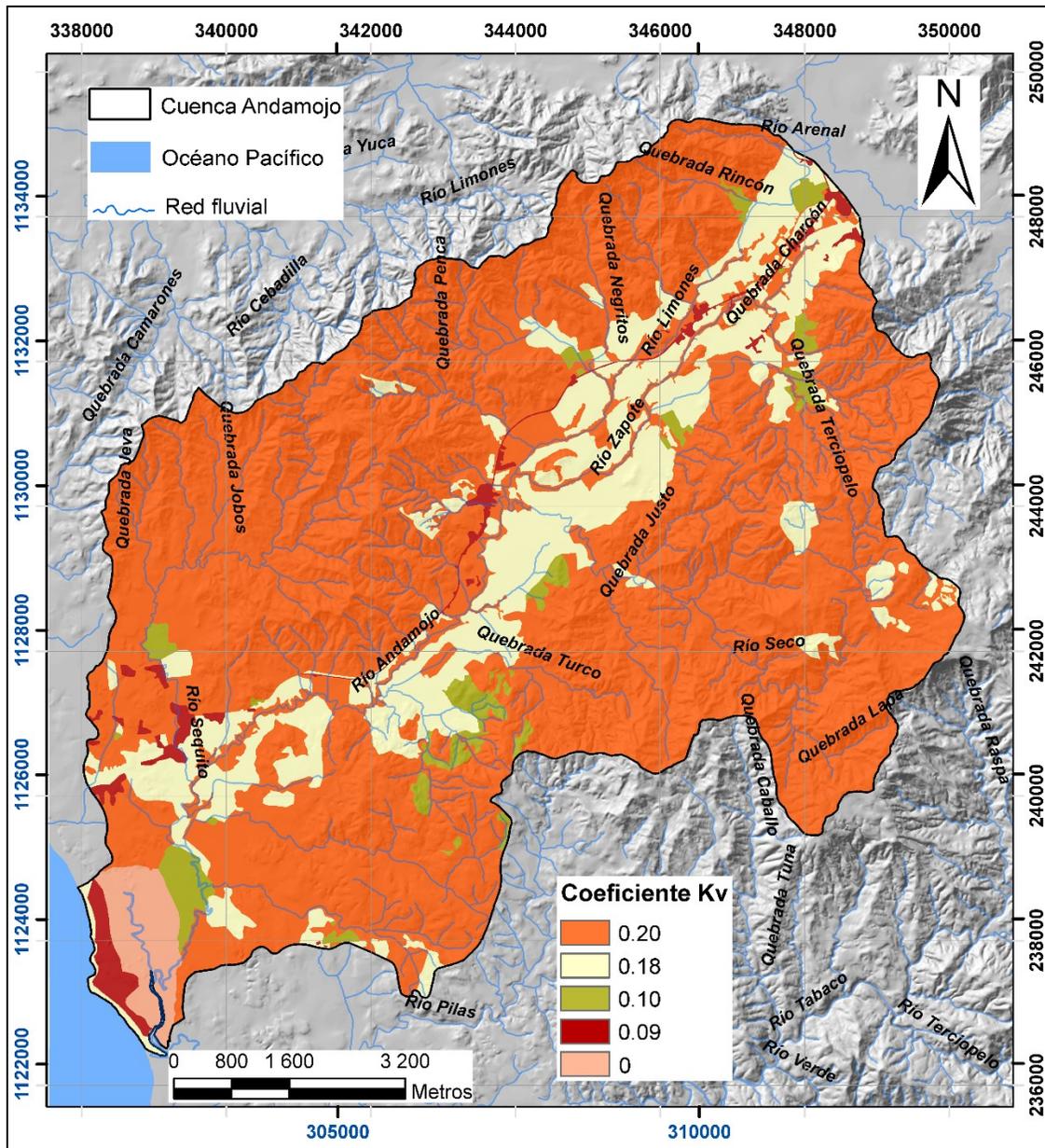


Figura 28: Mapa de coeficiente de infiltración por efecto de la cobertura vegetal (Kv)

4.4.2.6 Coeficiente de infiltración del suelo (Ci)

Aplicando álgebra de mapas, mediante Sistemas de Información Geográfica, se calculó el coeficiente de infiltración del suelo (Ci), este se obtiene al sumar los coeficientes por la textura del suelo (Kfc), por efecto de la vegetación (Kv) y por

efecto de la pendiente (K_p), el resultado está en función de las siguientes condiciones, establecidas en la metodología de Schosinsky (2006):

- Si $K_p+K_v+K_{fc}$ es mayor a 1, entonces $C_i = 1$
- Si $K_p+K_v+K_{fc}$ es menor o igual a 1, entonces $C_i = K_p+K_v+K_{fc}$

En la figura 28 se muestran los resultados, donde se observa que el coeficiente de infiltración es menor en el sector norte y una parte de la cuenca media con valores que entre 0,20 - 0,66, en este caso debe considerarse que estas zonas presentan una baja conductividad hidráulica con relación a la totalidad del área de la cuenca. Las zonas boscosas y los pastos presentan los valores más altos de C_i , estos van desde 0,95 a 1. Esto sugiere que existe una conductividad hidráulica alta en las partes montañosas de la cuenca y, por otro lado, en el sector de pastos con pendientes bajas, se favorece la infiltración de agua en el subsuelo (figura 28).

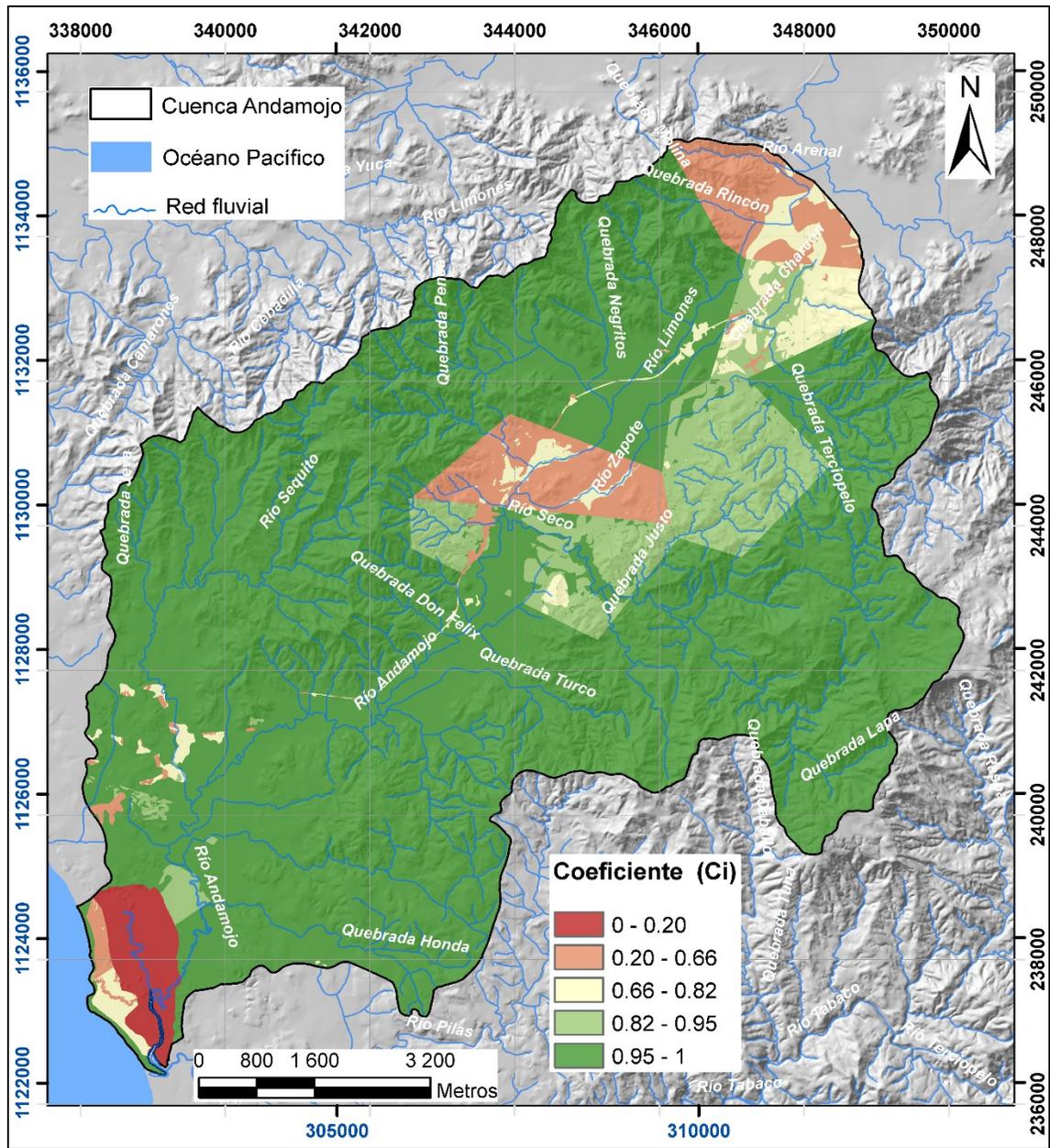


Figura 29: Mapa de coeficiente de infiltración del suelo (Ci)

4.4.2.7 Infiltración pluvial mensual (Pi)

Para el cálculo de esta variable se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$P_i = (C_i) (P - R_{et})$$

Donde:

P_i = Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en (mm/mes)

C_i = Coeficiente de infiltración (adimensional).

P = Precipitación mensual (mm).

Ret = Retención de lluvia mensual por follaje (mm).

En este caso si el C_i es mayor a 1, entonces el C_i es igual a 1.

Aplicando álgebra de mapas se formula la ecuación anterior para los 12 meses del año, de ello se obtiene que en los meses de enero y febrero la precipitación que infiltra fue prácticamente nula, además se determinó que es a partir del mes de marzo que esta variable tiene un ascenso, con un pico máximo en los meses de julio y agosto con 477 mm y 484 mm respectivamente y a partir de dichos meses se da una disminución hasta finalizar el año.

Finalmente se realiza la sumatoria de los 12 mapas para obtener la precipitación que infiltra anual (figura 30). A nivel general la mayor precipitación que infiltra se da en los pastos, cultivos y en la fracción boscosa de la parte baja de la cuenca que limita al este con el humedal del área de estudio, estas zonas poseen una precipitación que infiltra entre los 2052 y 2503 mm anuales, seguidamente las zonas boscosas presentan una precipitación que infiltra entre 1842 y 2052 mm anuales. Los sectores donde se genera menor precipitación que infiltra es en la parte media de la cuenca, donde posiblemente la alta impermeabilidad debido a la presencia de suelos arcillosos, juega un papel importante en dicho parámetro, en este caso la P_i presenta valores entre 1232 y 450 mm/año. En cuanto al área ocupada por el humedal tiene una P_i igual a cero, ya que por naturaleza es una zona de descarga.

lluvia mensual se obtiene mediante la siguiente ecuación propuesta por (Schosinsky, 2006):

$$ESC = P - Ret - P_i$$

Donde:

Esc = Escorrentía superficial (mm/mes)

P = Precipitación (mm/mes)

Ret = Retención de lluvia mensual por el follaje (mm/mes)

P_i = Precipitación que infiltra (mm/mes).

Con esta información se generaron 12 mapas correspondientes a los meses del año, y se sumaron para obtener un mapa de escorrentía superficial anual (figura 31). Se identificó que las zonas de mayor escorrentía corresponden en primer lugar con el humedal, en este caso los valores se encuentran entre 1000 y 2279 mm, ya que en los terrenos saturados o inundados por descarga del acuífero e interacción marina no se da infiltración (P_i) y puesto que la Escorrentía se ve muy influenciada por la precipitación (P) se obtienen valores altos. Además de esta zona, se identifica la parte media y alta de la cuenca, propiamente en los poblados de Rio Seco/ Cañas Gordas y Soncoyo / Veintisiete de Abril respectivamente con valores entre 500 y 1500 mm. Es importante recalcar que estas zonas poseen un suelo arcilloso, de bajas conductividades hidráulicas y por ende hay una menor P_i en el subsuelo. Por otro lado, los valores de escorrentía superficial tienden a ser menores en las zonas boscosas y partes montañosas, con valores entre 0 y 100 mm, ya que, en estos lugares, existe una mayor retención de lluvia en el follaje.

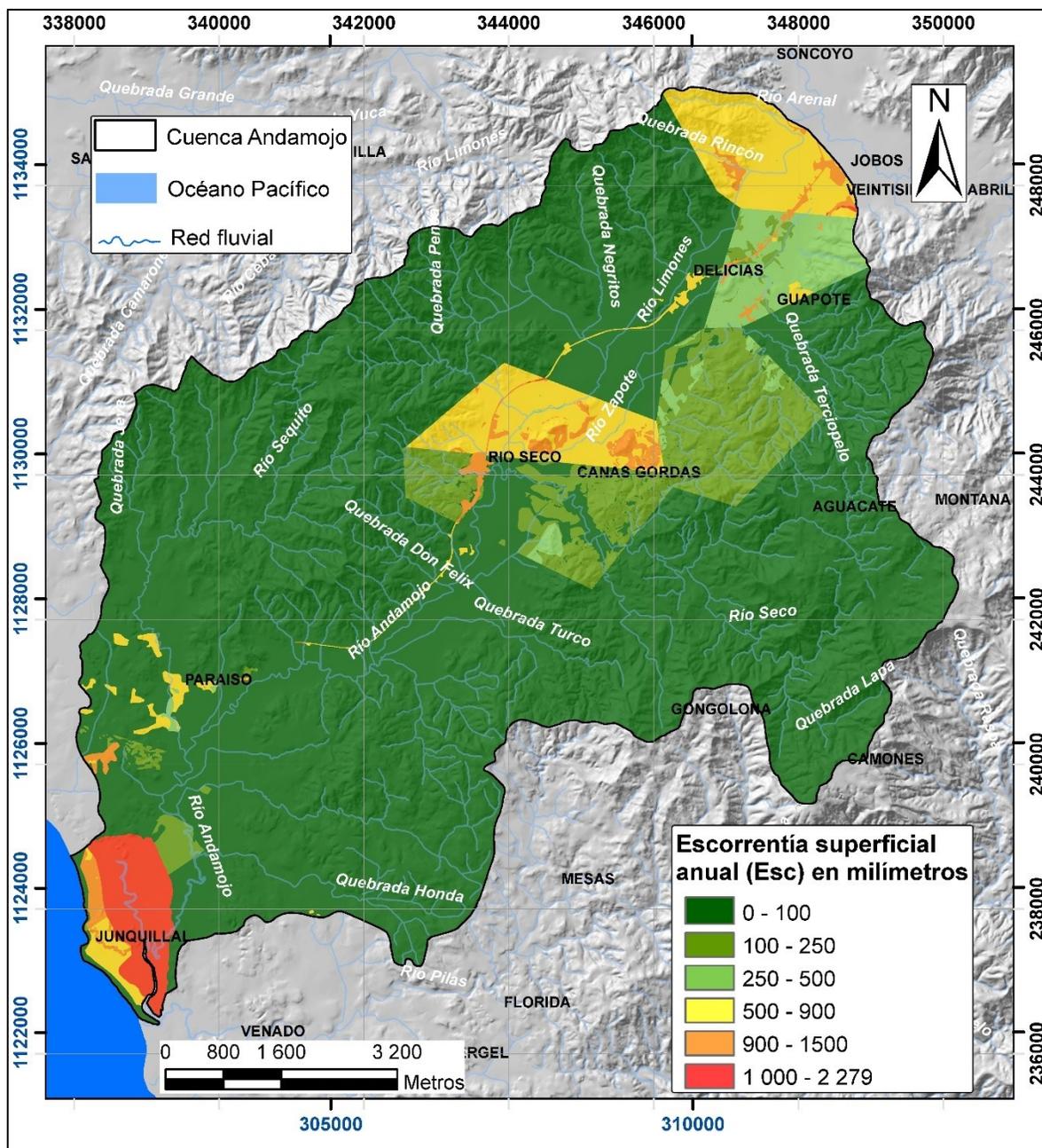


Figura 31: Escorrentía superficial anual, para la cuenca Andamojo

4.4.4 Balance de suelos

Para desarrollar el balance de suelos se requieren datos de la infiltración mensual en el suelo por la lluvia (sección 4.4.2.5), la capacidad de campo, el punto de marchitez y la densidad aparente, estas tres últimas variables se obtuvieron por medio de análisis en el laboratorio del CIA (Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica), que fueron tomadas en cada uno de los sitios donde fueron realizadas las pruebas de infiltración. En la tabla 10 se muestran los resultados de dichos parámetros. Además, es necesario conocer la profundidad aproximada de las raíces extractoras de agua, ya que según Schosinsky (2006), el balance se realiza en un prisma de 1 metro de lado por la profundidad de las raíces en m de hondo.

Tabla 10: Parámetros de CC, PM y DA en porcentaje por peso de suelo seco.

Código	X	Y	Capacidad de campo (CC)%	Punto de marchitez (PM)%	Densidad aparente (g/cm ³)	Textura del suelo	Autor
P1*	347902	245756	33	26	0.8	franco arcillo arenoso	Esta investigación
P2*	346492	247036	49	44	1.3	arcilloso	
P3*	348902	243956	67	60	1.2	franco arcillo arenoso	
P4*	345952	247655	43	39	1.2	franco arenoso	
P5*	344806	245675	42	38	1	arena franca	
P6*	343352	246205	51	40	1.1	franco arcillo arenoso	
P7*	346402	241906	61	54	1.2	franco	
P8*	343792	242365	46	39	1.2	franco arenoso	
P9*	344102	241206	60	52	1.2	franco arcilloso	
P10*	341952	241356	39	33	0.8	franco	
P11*	339627	240855	49	40	1.1	franco arenoso	
P12*	340142	238006	32	27	1	franco arenoso	
P13*	339571	242787	32	24	0.9	franco arcilloso	

P14*	340812	243340	37	31	1	franco arenoso	Vargas (2018)
P15	340044	244843	31	28	1.3	arcilloso	
P16	340412	241326	45	35	1.2	franco arcilloso	
P17	339179	239423	40	32	1.1	franco arcillo limoso	
P18	343758	238577	33	29	1.2	arcilloso	
P19	347588	248565	38	28	1.5	franco arcilloso	
P20	344364	243525	39	31	1.2	franco arcilloso	
P21	344498	244869	40	28	1.2	franco arcilloso	
P22	347431	246752	40	29	1.4	franco arcilloso	
P23	349178	242882	44	27	1.3	franco	
P24	347468	245338	35	22	1.4	franco arcilloso	

4.4.4.1 Profundidad de las raíces

La forma natural de extracción de agua del suelo es mediante las raíces de la planta y la transpiración que ocurre en ellas (Schosinsky, 2006).

La profundidad de las raíces se asigna con la información comprobada en el campo, además, se complementó con información de Schosinsky (2006), Allen (2006), FONAFIFO (2003) y ITTO (s.f.). Para los bosques se utilizó una profundidad de raíces de 2000 mm, mientras que para los pastos se usó 500 mm, los cultivos se dividen en arroz y teca, para los que se les asignó un valor de 500 mm y 400 mm respectivamente. En el caso del humedal se asignó un valor de cero, debido a las razones indicadas en las secciones 4.4.2.1 y 4.4.3. En el caso de los poblados, se utilizó un valor de 500 mm, tomando en cuenta que son áreas con casas de habitación u otras edificaciones que por lo general poseen patios, canchas de fútbol entre otras zonas verdes. A partir de dicha información se genera un mapa ráster como el representado en la figura 32.

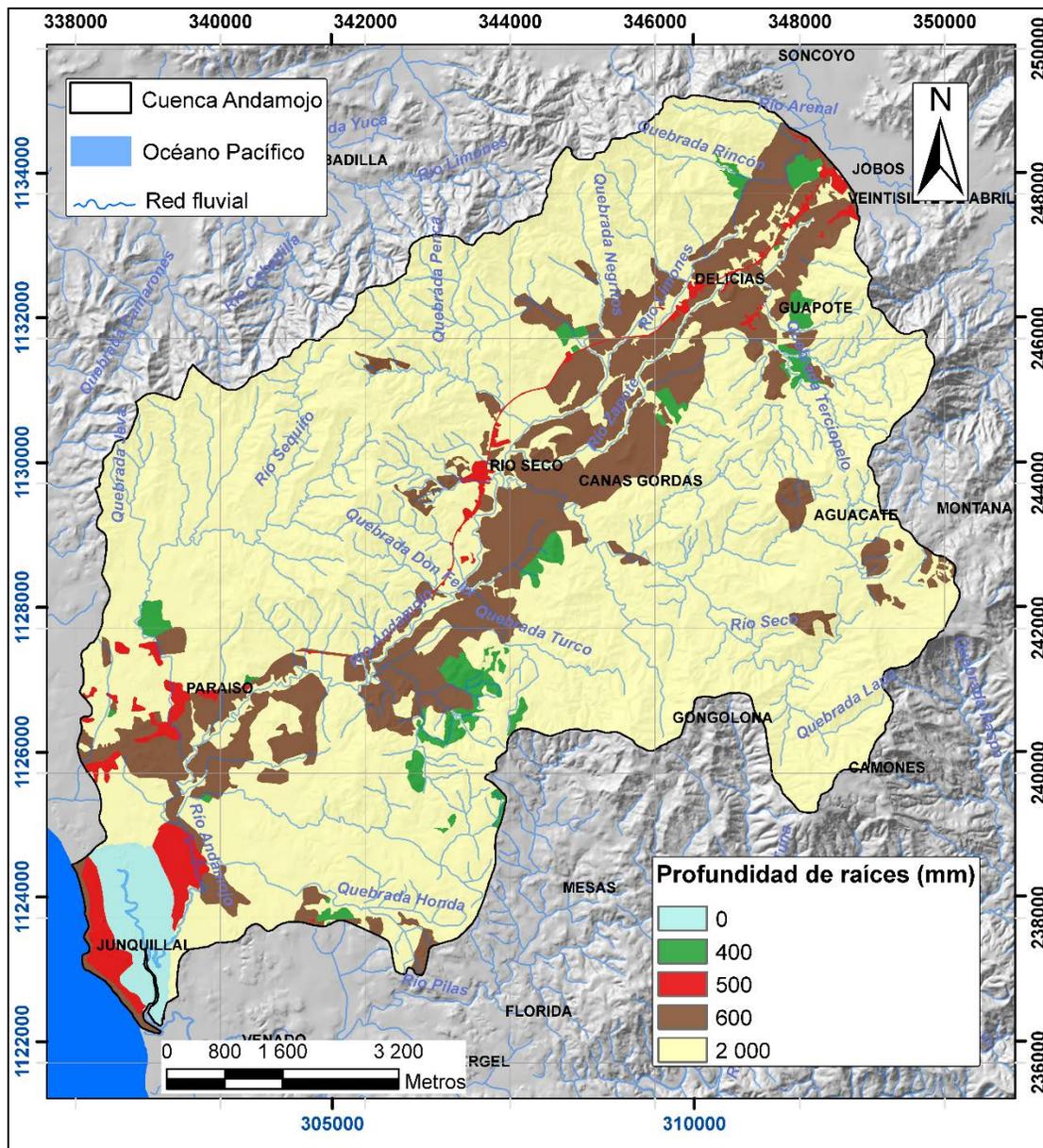


Figura 32: Mapa de profundidad de raíces

4.4.4.2 Capacidad de campo, Punto de marchitez y Densidad aparente

La máxima humedad que puede presentar un suelo que no esté saturado, es igual a la capacidad de campo, es decir cuando la planta tiene la máxima capacidad de transpiración. Mientras que la mínima humedad que puede tener un suelo es

aproximadamente igual al punto de marchitez, ya que, si un suelo presenta humedades menores, la planta muere (Schosinsky, 2006).

Para utilizar los datos de capacidad de campo y punto de marchitez (tabla 10) en lo que resta del balance de suelos, debe aplicarse la conversión de unidades de porcentaje por peso de suelo seco a milímetros, con la finalidad de que los cálculos sean consistentes y en un mismo sistema de unidades. Para esto se realizaron los mapas ráster de capacidad de campo y punto de marchitez en porcentaje por peso de suelo seco, y el de densidad aparente en g/cm^3 (figura 33), para cada uno de ellos se construyeron polígonos de Thiessen para determinar las zonas de influencia y posteriormente se debe convertir de porcentaje por peso de suelo seco a unidades de milímetros empleando la siguiente ecuación mediante álgebra de mapas (Schosinsky, 2006):

$$(\text{CC} (\%) \times \text{DA} (\text{g/cm}^3) \times \text{prof. Raíces (mm)}) / 100 = \text{CC (mm)}.$$

$$(\text{PM} (\%) \times \text{DA} (\text{g/cm}^3) \times \text{prof. Raíces (mm)}) / 100 = \text{PM (mm)}.$$

Donde:

CC = Capacidad de campo.

PM = Punto de marchitez.

DA = Densidad aparente en gramos por centímetro cúbico.

Prof. raíces = Profundidad de las raíces en milímetros.

% = Porcentaje por peso de suelo seco.

Los resultados se pueden observar en las figuras 34 y 35.

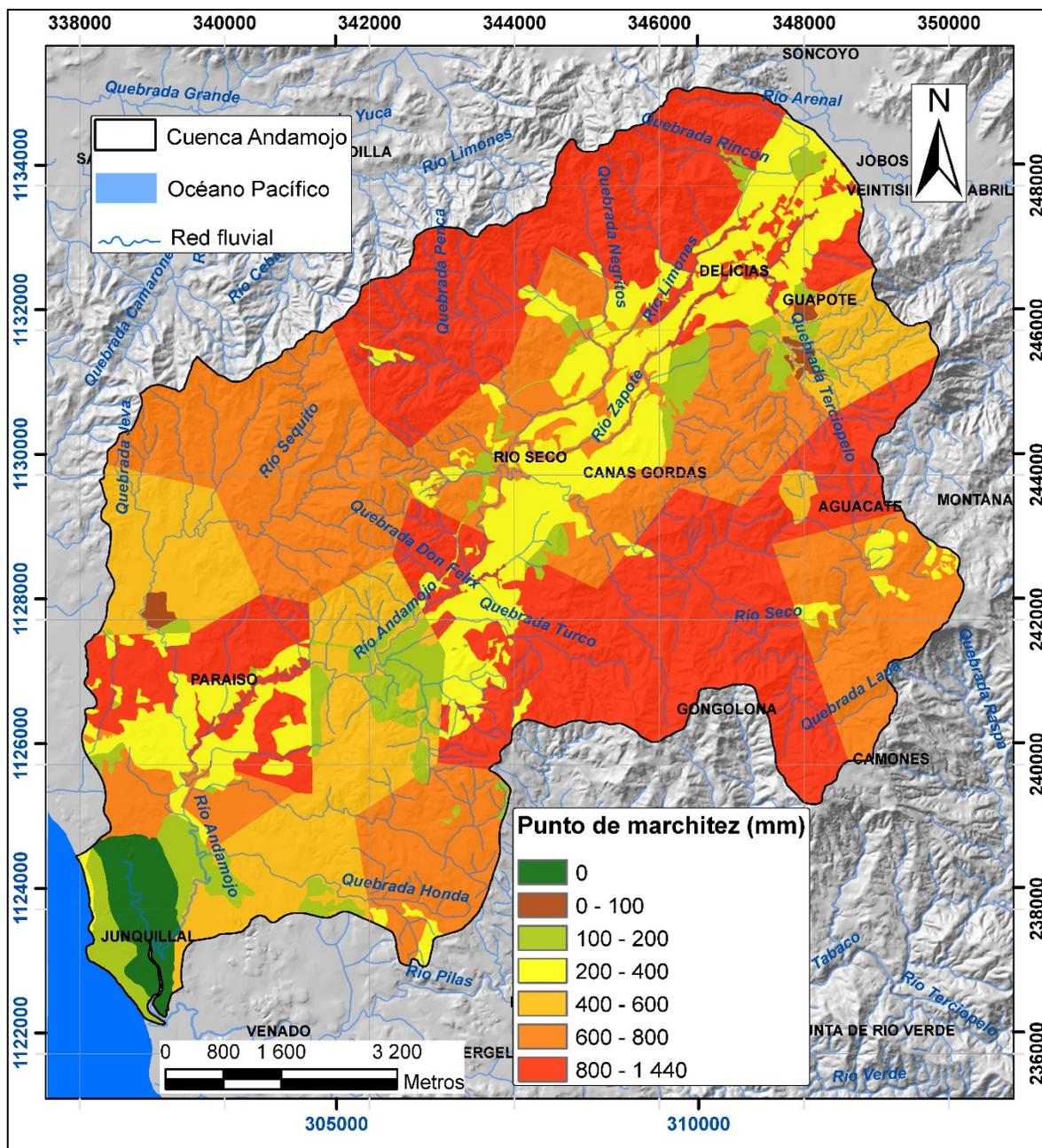


Figura 34: Mapa de punto de marchitez en milímetros para el área de estudio.

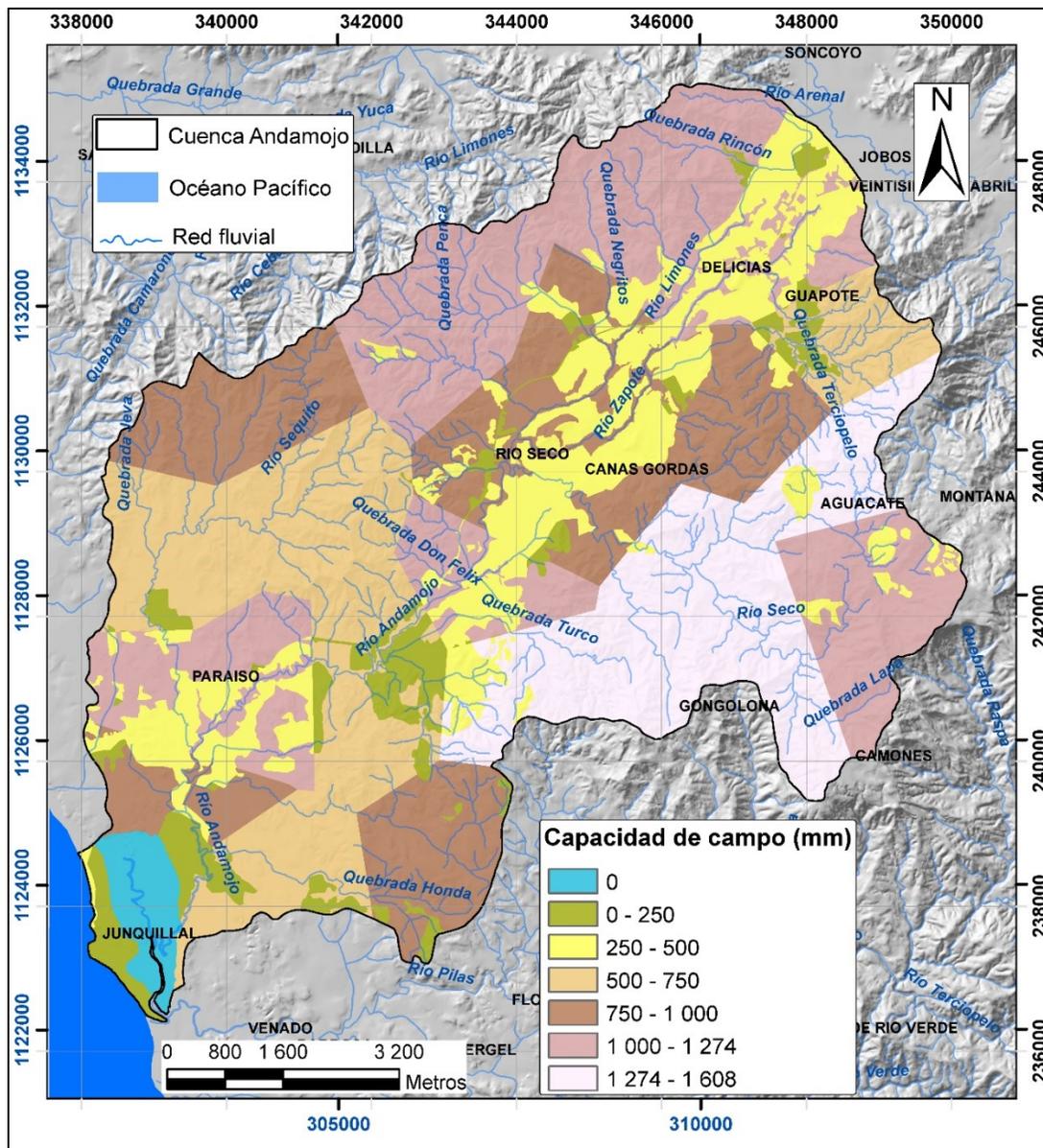


Figura 35: Mapa de capacidad de campo en milímetros, para la zona de estudio

4.4.4.3 Evapotranspiración Potencial (ETP)

4.4.4.3.1 Evapotranspiración

La evapotranspiración en una zona donde hay vegetación es la transpiración de la planta cuando el suelo está a capacidad de campo, más la evaporación del suelo.

La mayor capacidad de evapotranspiración de un cultivo es cuando el suelo está a capacidad de campo; y cuando la humedad del suelo es menor a la capacidad de campo, las hojas de las plantas van cerrando estomas, para transpirar menos y a economizar agua, sin embargo, cuando la humedad del suelo llega al punto de marchitez permanente, la planta no transpira y muere (Schosinsky, 2006).

4.4.4.3.2 Evapotranspiración potencial (ETP)

Schosinsky (2006) asume que la Evapotranspiración potencial es la evapotranspiración promedio de la cuenca, y para el cálculo de esta variable, sugiere aplicar la ecuación de Blaney & Criddle (ONU, 1972). Los parámetros necesarios para el cálculo corresponden con la temperatura media mensual en grados Celsius (tabla 11), y el porcentaje de horas luz solar mensual con respecto al año (%), que en este caso fueron tomadas de Calvo (1999), esto al no contar con un dato de luz solar propiamente para el área de estudio (tablas 12 y 13). En el presente trabajo se utilizó la ecuación de Blaney & Criddle (ONU, 1972).

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

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial mensual en milímetros por mes (mm/mes)

PS = Porcentaje de horas de luz solar mensual con respecto al año en porcentaje (%). Según Calvo (1999)

T = Temperatura media mensual en grados Celsius (°C)

Tabla 11: Temperatura media mensual (Durán et al.,2019)

Mes	Temperatura media en las áreas de influencia (°C)		
	E1.2	E2.2	E2.3
Enero	25.63	25.61	25.15
Febrero	27.59	27.61	27.03
Marzo	28.64	28.72	28.22
Abril	29.18	29.43	29.08
Mayo	27.60	27.97	27.69
Junio	25.50	25.68	25.49
Julio	24.94	25.08	24.93
Agosto	24.88	25.03	24.86
Septiembre	24.95	25.09	24.87
Octubre	24.76	24.89	24.68
Noviembre	24.85	25.00	24.72
Diciembre	25.50	25.64	25.16

Tabla 12: Porcentaje de horas luz solar mensual (Calvo, 1999)

Mes	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PS %	8.13	7.47	8.45	8.37	8.81	8.6	8.86	8.71	8.25	8.34	7.91	8.1

Tabla 13: Evapotranspiración potencial mensual calculada para las estaciones o áreas de influencia de la cuenca Andamojo. Método de Blaney & Criddle, ONU (1972)

Mes	Ener	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
ETP1	162	155	180	180	183	171	173	170	162	163	154	161
ETP2	162	155	180	181	185	171	174	171	162	163	155	161
ETP3	160	153	178	180	184	171	173	170	161	162	154	159

Donde: ETP1 = E1.2, ETP2 = E2.2, ETP3= E2,3 (áreas de influencia)

Importante mencionar que, una vez ocurrida la precipitación, el agua que infiltra llena los poros del suelo, para llevarlo a capacidad de campo, y cuando el aguacero termina, se da el proceso de evapotranspiración, donde las raíces toman el agua de los poros del suelo, si la cantidad de infiltración es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y cumplir la necesidad de evapotranspiración, el sobrante de agua es lo que percola al acuífero (Schosinsky, 2006).

En el caso de la cuenca analizada, la evapotranspiración presenta valores mayores en los meses de marzo, abril y mayo, siendo este último el que presenta los valores

máximos entre 183,2 mm y 183,73 mm. Mientras que a partir del mes de junio la evapotranspiración comienza a disminuir hasta el mes de febrero, siendo este mes el que reporta valores menores, entre 153,4 mm y 155,39 mm de ETP (Tabla 13).

4.4.4.4 Mes de inicio del balance

Para determinar el mes en el que debe iniciar el balance, Schosinsky (2006) sugiere que se asigne la capacidad de campo (CC) como la humedad inicial (Hsi) al mes posterior a los meses consecutivos donde la precipitación que infiltra (Pi) es mayor a la evapotranspiración potencial (ETP). Para esto se realizaron los mapas ráster de evapotranspiración potencial de los doce meses del año y al restarlos con los de precipitación que infiltra mensual, se obtuvo que los meses de mayo hasta octubre cumplen con esta condición, por lo tanto, se elige el mes de noviembre para el inicio del balance, ya que Schosinsky (2006) asume que este es el momento en el que el suelo tiene la máxima humedad.

4.4.4.5 Coeficientes de humedad

Schosinsky (2006) indica que existen dos coeficientes de humedad al final del mes, el C1 que es el coeficiente de humedad antes de que ocurra la evapotranspiración y el C2 que es el coeficiente de humedad después de que ocurre la evapotranspiración. Para calcular el C2 se requiere de la evapotranspiración potencial real (ETR1). Estos parámetros se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$C1 = \frac{Hsi - PM + Pi}{CC - PM}$$

$$C2 = \frac{Hsi - PM + Pi - ETR1}{CC - PM}$$

$$ETR1 = (C1) (ETP)$$

Donde:

C1 = Coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración.

C2 = Coeficiente de humedad al final del mes después de que ocurra la evapotranspiración.

Hsi = Humedad del suelo inicial (mm).

PM = Punto de marchitez (mm).

CC = Capacidad de campo (mm).

ETR1 = Evapotranspiración potencial real (mm/mes).

Se debe tomar en cuenta que, los coeficientes C1 y C2 no deben ser superiores a 1, ni menores a 0, siendo que, si un valor es mayor a 1, el coeficiente será igual a 1, y en caso de ser negativos, a este se le asigna un cero.

La obtención de estos coeficientes se realizó para los 12 meses del año, utilizando el álgebra de mapas.

4.4.4.5.1 Humedad Disponible

Para continuar con el cálculo del balance hídrico se requiere obtener la humedad disponible (HD), que es la humedad que pueden tomar las raíces de las plantas, para poder evapotranspirar según Schosinsky (2006). Para eso se aplicó la siguiente ecuación:

$$HD = HSi + Pi - PM$$

Donde:

HD = Humedad disponible (mm/mes).

Hsi = Humedad de suelo inicial, al inicio del mes (en mm).

Pi = Precipitación que infiltra (mm/mes).

PM = Punto de marchitez (mm).

Se realizaron doce mapas de humedad disponible correspondientes a los 12 meses del año, empleando álgebra de mapas mediante Sistemas de Información Geográfica, que posteriormente se suman para obtener un dato de humedad disponible anual como el que se observa en la figura (figura 36). Del mismo se desprende que los valores de humedad disponible anual entre 2000 y 3000 mm son muy recurrentes en un área extensa de la cuenca, y se dan específicamente en zonas ocupadas por bosques y pastos. Los sectores que presentan valores menores de humedad disponible corresponden con los poblados, aunque exista vegetación presente en las edificaciones.

Los valores altos de humedad disponible se concentran al este de la cuenca Andamojo, en las inmediaciones de los poblados de Aguacate y Canas Gordas/Guapote. Mientras que los sectores de menor humedad disponible se localizan en los sectores de la cuenca media y alta, respectivamente Rio Seco y Jobs / Veintisiete de Abril. El mes de agosto reporta mayor humedad disponible con un máximo de 823,4 mm, y el mes de abril presenta la menor humedad disponible con un valor de 106,7 mm.

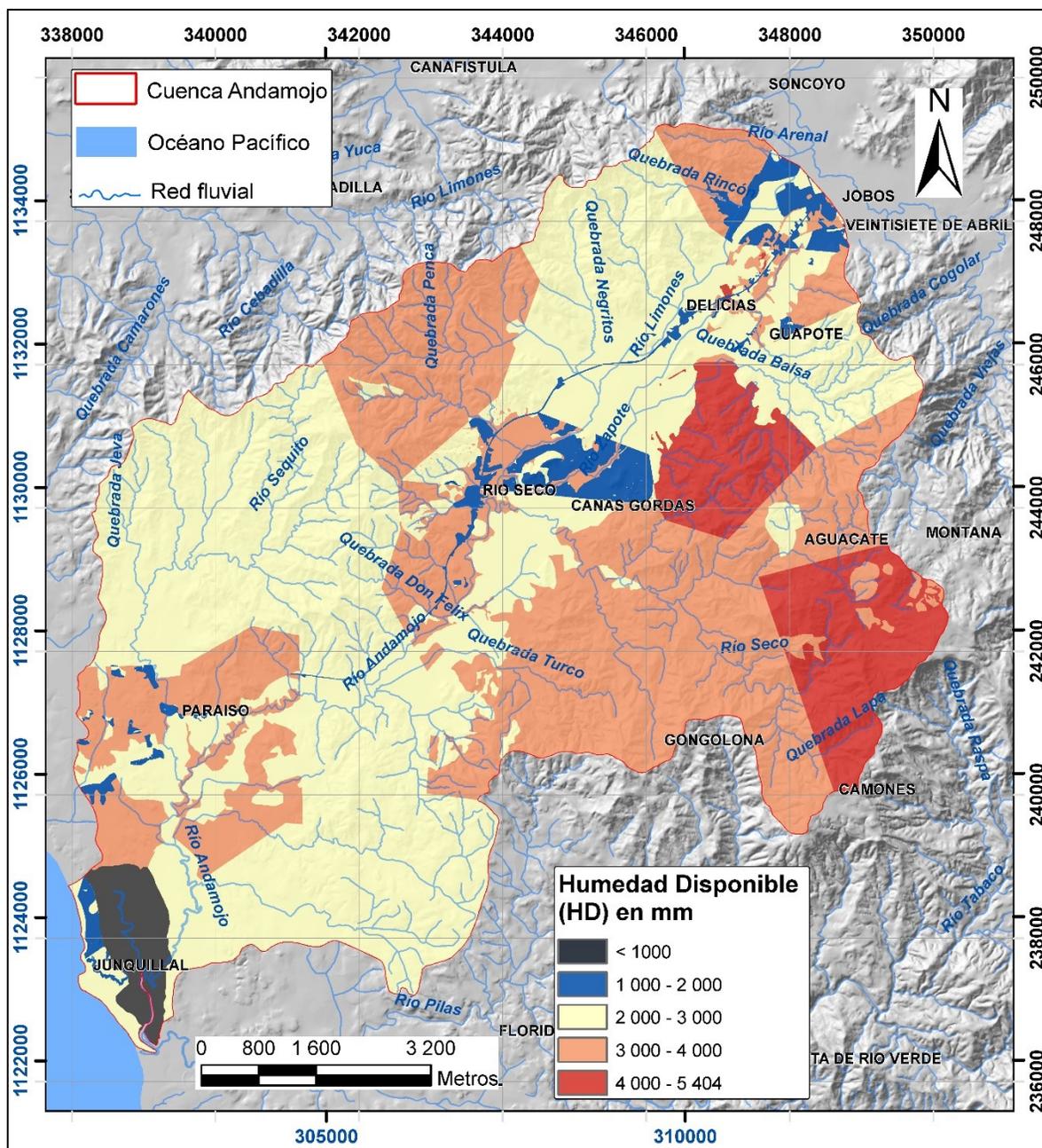


Figura 36: Mapa de humedad disponible, para la cuenca Andamajo

4.4.4.6. Evapotranspiración real (ETR) durante el mes.

Schosinsky (2006) estima que el coeficiente promedio de humedad del mes, corresponde al promedio de C1 y C2. Debe tomarse en cuenta que si la humedad disponible (HD) es menor que la evapotranspiración real tentativa promedio del mes

(ETPR), la planta no podrá evapotranspirar esa cantidad, por lo que la Evapotranspiración Real (ETR) corresponderá a la humedad disponible, mientras que si la humedad disponible (HD) es mayor a la evapotranspiración real tentativa mensual (ETPR), la evapotranspiración real (ETR) de la planta será igual a la ETPR. Para esto se aplica la siguiente ecuación:

$$ETPR = ((C1+C2) / 2) * ETP$$

Si ETPR es menor o igual a HD, entonces $ETR = ((C1+C2) / 2) * ETP$

Si ETPR es mayor que HD, entonces $ETR = HD$

Donde:

ETPR= Evapotranspiración potencial real tentativa (mm/mes)

ETR = Evapotranspiración real promedio de la zona (mm/mes).

C1 = Coeficiente de humedad máximo, sin considerar la evapotranspiración.

C2 = Coeficiente de humedad mínimo considerando evapotranspiración calculada con C1.

ETP = Evapotranspiración potencial (mm/mes).

Estos cálculos se realizaron para cada mes, utilizando la herramienta de álgebra de mapas posteriormente estos se suman para obtener un valor anual (figura 37).

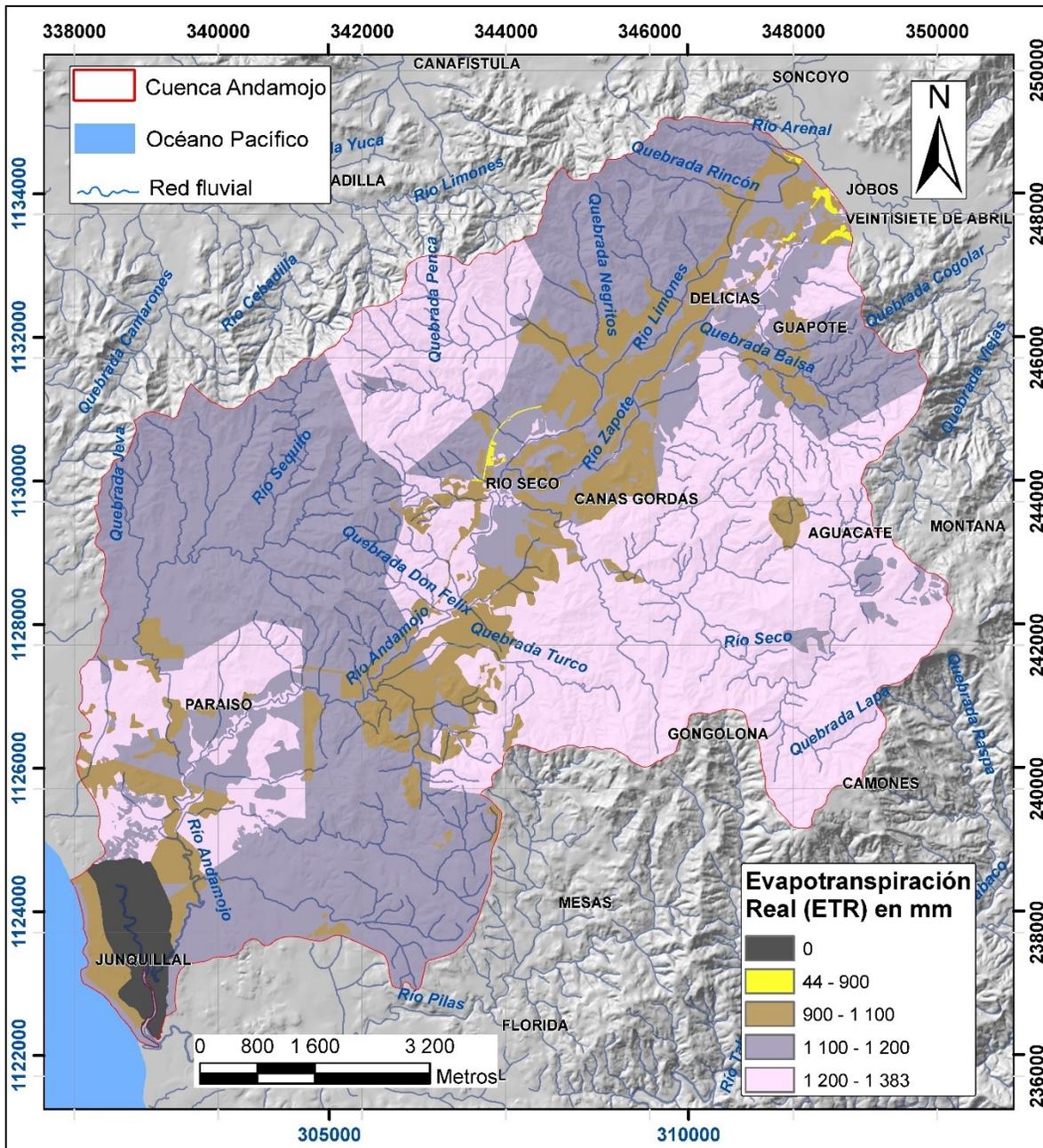


Figura 37: Mapa de evapotranspiración real, para la cuenca Andamajo

Los valores de Evapotranspiración real anual, refleja que los pastos y algunos sectores de cultivos presentan valores bajos en relación al área total, entre 900 y 1100 mm, mientras que las zonas boscosas presentan los valores más altos en el área de estudio para este parámetro, estos valores están en el rango de 1200 y 1383 mm, esto ocurre en la cuenca media y en un sector al suroeste del área de estudio. En contraste, el mes que presenta la menor ETR es abril con valores de

hasta 34,7 mm, mientras que mayo es el mes con mayor ETR, con valores de hasta 783,7 mm.

4.4.4.7. Cálculo para el Hsf.

Para obtener la humedad final (Hsf) del mes de noviembre (mes de inicio del balance de suelos) y posteriormente la de los meses restantes, se aplica la siguiente ecuación, según la metodología de Schosinsky (2006):

Si $(HD + PM - ETR)$ es menor que la capacidad de campo, $HSf = HD + PM - ETR$.

Si $(HD + PM - ETR)$ es mayor o igual que la capacidad de campo, $HSf = CC$

Donde:

HD = Humedad disponible (mm/mes)

PM = Punto de marchitez (mm).

ETR = Evapotranspiración real promedio de la zona, ocurrida durante el mes [mm/mes].

4.4.4.8. Recarga Potencial al acuífero (RP)

Una vez que la cantidad de agua que infiltra haya sido suficiente para llevar el suelo a capacidad de campo y satisfacer la evapotranspiración, entonces el agua que sobra es la que recargará el acuífero y se calcula de la siguiente forma Schosinsky, (2006):

$$Rp = Pi + HSi - HSf - ETR$$

Donde:

Rp = Recarga potencial mensual (mm/mes).

Pi = Precipitación que infiltra (mm/mes).

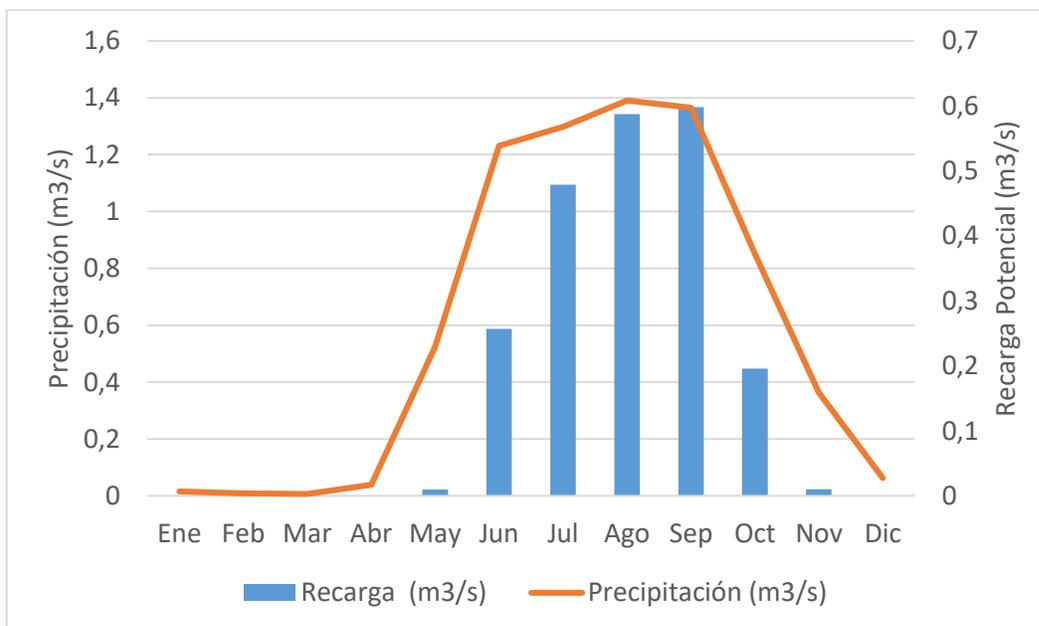
HSf = Humedad del suelo al final del mes (mm).

ETR = Evapotranspiración real (mm/mes).

Nuevamente se aplicó álgebra de mapas, y se generaron los 12 mapas mensuales, que se sumaron para obtener la recarga potencial anual. Mediante el álgebra de mapas se realizaron los 12 mapas de recarga potencial y se sumaron para obtener la recarga potencial anual (figura 38)

En el gráfico 5 se puede observar que durante los meses de enero hasta abril no hubo recarga potencial, esto debido a que la precipitación para esos meses fue bastante baja (aunque no nula), y no es hasta el mes de abril que inician las precipitaciones con una mayor intensidad, siendo agosto el mes con mayor precipitación, con un valor total de 1,4 m³/s, mientras que el mes con mayor recarga potencial es septiembre con un valor total de 0,598 m³/s (valores entre 0 y 293,6 mm). Posterior a esto hay un descenso en las precipitaciones para el resto del año, lo que influye de igual manera en la disminución de la recarga potencial hasta el mes de diciembre con una recarga nula.

Gráfico 5: Datos de precipitación y recarga potencial para el área de estudio



Según los resultados obtenidos se tiene que la recarga potencial anual en el área de estudio varía entre los 12 -1423 mm por año, y ocurre de mayo a noviembre.

Las zonas cubiertas de pastos y en su mayoría los cultivos, son los sectores donde ocurre mayor recarga potencial anual, con valores entre 900 y 1423 mm por año,

esto se debe a que son áreas generalmente de bajas pendientes y además la cobertura vegetal es menos densa al tratarse de pastos y cultivos de teca, lo cual no favorece la retención por el follaje, permitiendo la recarga potencial al acuífero, aunado a esto la profundidad de raíces es menor en estos sectores, sin embargo, debe recordarse que la textura de suelos y las conductividades hidráulicas, en estas zonas son bastante heterogéneas. Geológicamente, estas zonas están cubiertas por los depósitos aluviales y suelos regolíticos del Complejo de Nicoya.

Las áreas donde ocurre menor recarga, se localizan en la parte alta y media de la cuenca, específicamente al norte y noreste del poblado de Rio Seco, y al sureste de los poblados de Veintisiete de Abril, Soncoyo y Jobos, esto en el límite norte de la cuenca Andamojo, estos valores varían entre 44 y 500 mm anuales, estas zonas están ocupadas en su mayoría por pastos y sectores de pie de monte (boscosas en menor cantidad), que presenta condiciones de permeabilidad en el subsuelo bastante bajas, al tratarse de un terreno arcilloso de bajas conductividades hidráulicas, según los resultados del trabajo de campo realizado en ese sector, razón por la cual existe una mayor resistencia en el subsuelo a permitir la infiltración y por lo tanto menor recarga potencial.

Como ya se ha explicado anteriormente el área ocupada por el humedal, presenta una recarga potencial de cero, al ser una zona de descarga del acuífero.

Con el mapa de recarga potencial (figura 38), se pudo contabilizar que la cuenca Andamojo presenta una recarga total anual de 67 400 487,12 m³. Si se clasifica la recarga potencial por formación litológica, la unidad de Complejo de Nicoya (basaltos) tiene una recarga potencial de aproximadamente 52 108 801,2 m³, mientras que para la unidad de depósitos aluviales hay una recarga potencial aproximada de 15 286 091,3 m³, siendo la primera litología la que presenta mayor recarga potencial, esto debido a que cubre un área mayor, sin embargo debe recordarse que la unidad de depósitos aluviales presenta los mayores valores de recarga potencial por m².

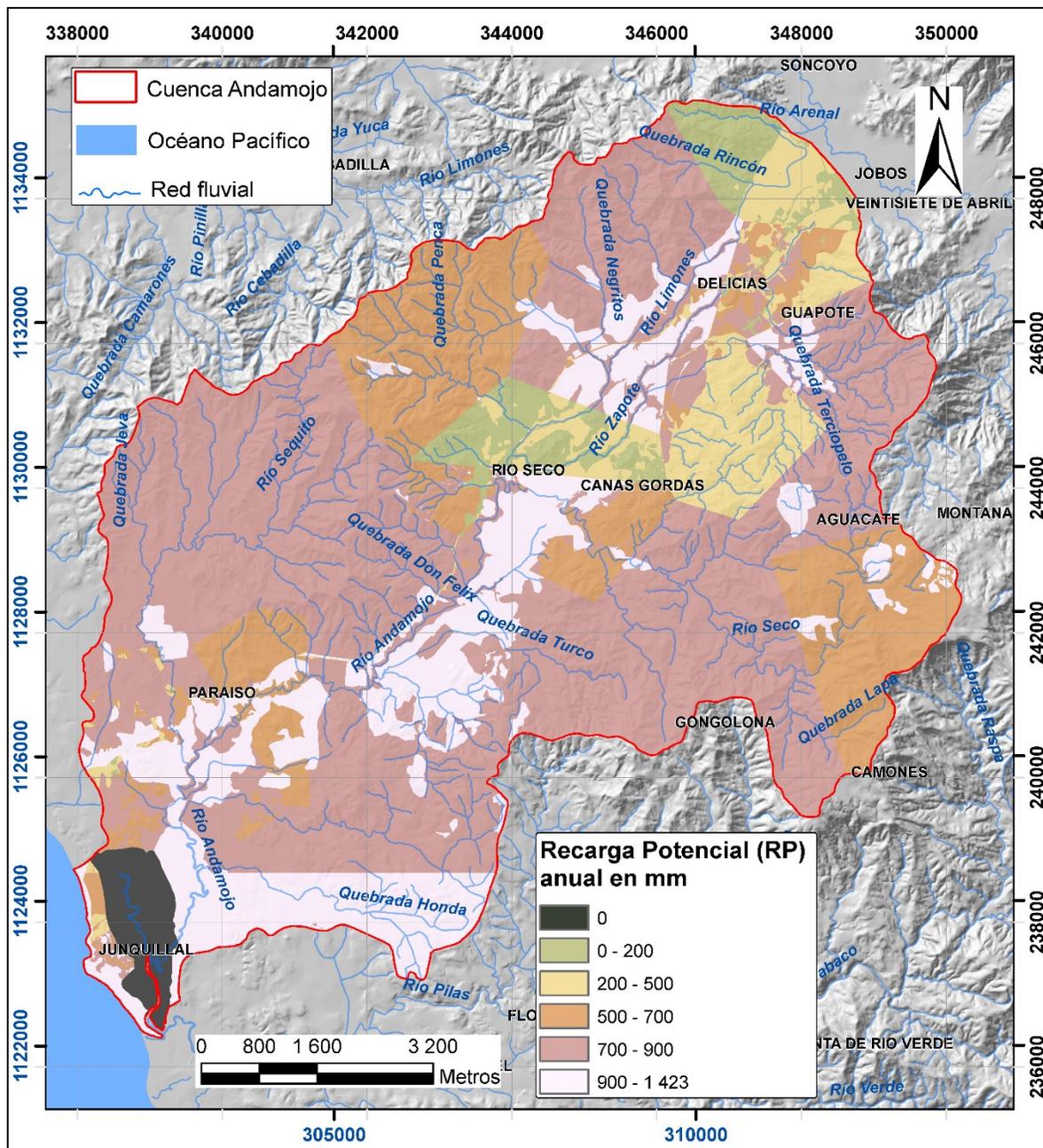


Figura 38: Recarga potencial anual para la cuenca Andamojo. Elaboración propia.

4.5 Hidrogeoquímica.

Para determinar la composición química del agua subterránea, se recolectaron ocho muestras de agua, siete de ellas provenientes de pozos perforados y una corresponde con un pozo excavado. Estas muestras se codificaron y se enviaron para su respectivo análisis de laboratorio. Las distribuciones de estos análisis se muestran en la figura 39. Como parte del control de calidad se tomaron duplicados.

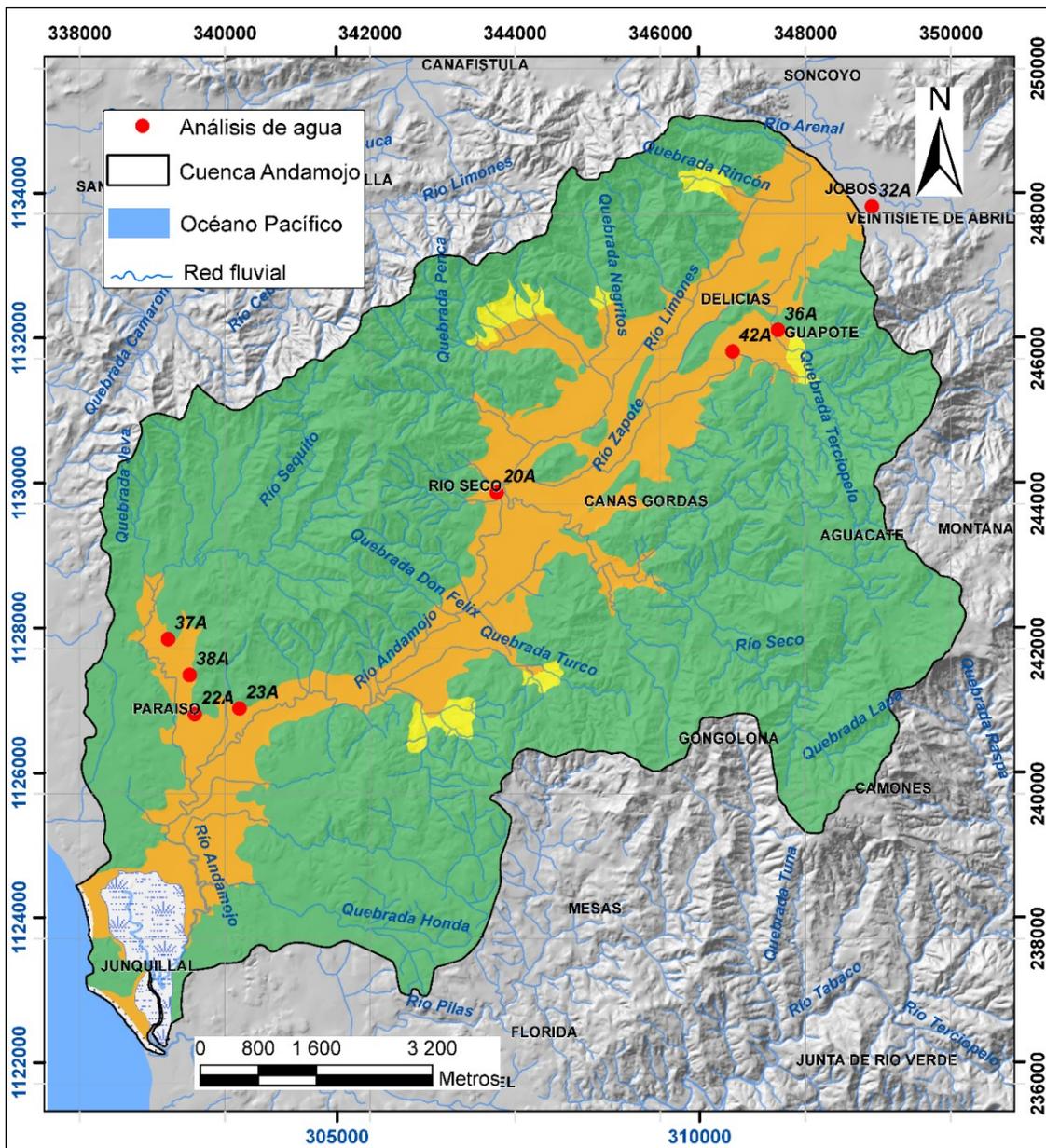


Figura 39: Ubicación de las muestras de agua, en el área de estudio

Estas muestras fueron rotuladas y posteriormente llevadas a los laboratorios (CIA y Aquylasa) para realizarse los análisis de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , SiO_2 , F^- , Al^{3+} , AS_{total} , Cd_{total} , Pb_{total} , Ni_{total} , NO_3^- , además en el campo se tomaron los parámetros de temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto (anexo 4), con el fin de determinar las condiciones químicas del agua y determinar si los resultados se encuentran dentro del valor máximo admisible del reglamento para la calidad de agua potable, según el decreto N° 38924-S publicado en la Gaceta el 12 de enero del 2015.

Del total de muestras analizadas la mayoría cumplen con lo establecido en el reglamento para la calidad de agua, con excepción de las muestras 23A y 36A, las cuales presentan un valor que supera el máximo admisible en la conductividad eléctrica.

La muestra 23A, fue tomada a 3,2 km de playa Junquillal, como dato importante, en las inmediaciones del pozo, se identificó un drenaje de bajo caudal, el cual podría estar descargando aguas residuales que a su vez podrían estar incrementando la conductividad eléctrica del agua subterránea; además debe mencionarse que este sector (Paraíso) se inunda con facilidad, generalmente en los meses de agosto y octubre, donde son recurrentes temporales y fuertes precipitaciones, aunado a esto la infraestructura de este pozo está a nivel de superficie, lo que lo hace aún más susceptible a la contaminación por aguas de escorrentía, residuales por la descarga de casas. Adicionalmente, dicha muestra arroja un valor de STD (Sólidos Totales Disueltos) de 795 mg/L, el cual es el valor más alto entre todas las muestras analizadas, lo que concuerda con los datos de conductividad eléctrica.

La muestra 36A se ubica en el sector noreste de la cuenca Andamojo, a unos 12 km de la costa, por esta razón se descarta la influencia por intrusión salina en este punto, y más bien se asocia con la acción antrópica, ya que las concentraciones de iones como Na^+ y K^+ son mayores en esta muestra respecto a las demás, y debido

a que existe una vivienda relativamente cerca de este pozo, no se descarta que exista influencia por descarga de agua residuales.

Para dar una clasificación química del agua subterránea, se utilizó el programa *Diagrammes 5.1*, con el cual se creó un diagrama de Piper, el cual a partir del porcentaje de aniones y cationes de las muestras clasifica el agua subterránea como bicarbonatada cálcica y magnésica (figura 40), esta composición química es indicadora de aguas subterráneas meteóricas poco profundas y frescas. El aporte del magnesio es posible esté asociado al contenido en los minerales de piroxeno que conforman los basaltos y que se meteorizan a partir de dicha litología.

Debe mencionarse que, del total de pozos analizados, únicamente la muestra 20A tomada del pozo VI-15 (base de datos del SENARA) cuenta con información geológica y del armado, esto debido a que no fue posible localizar todos los pozos de la base de datos del SENARA, además algunos de ellos no contaba con las características mínimas para ser muestreados, tales como una salida de agua próxima a la tubería, o que el sistema de cloración se ubicara después de la salida de agua para la toma de muestras, entre otras limitaciones. Por lo que es difícil poder clasificar cuales muestras de agua corresponden a un acuífero o a otro. Sin embargo, en el diagrama de Piper no se identifican mezclas de composiciones, más bien todas las muestras caen dentro de una misma clasificación química.

La muestra 42A corresponde al pozo excavado M1 de Guapote, la muestra 36A es un pozo perforado al que no se pudo medir el nivel ni cuenta con información litológica.

Debe indicarse que en este proyecto no fue posible realizar el análisis de isótopos estables, por ende, no se calculó el tiempo de residencia del agua, ni el origen con exactitud, sin embargo, se recomienda utilizar estas técnicas en el futuro.

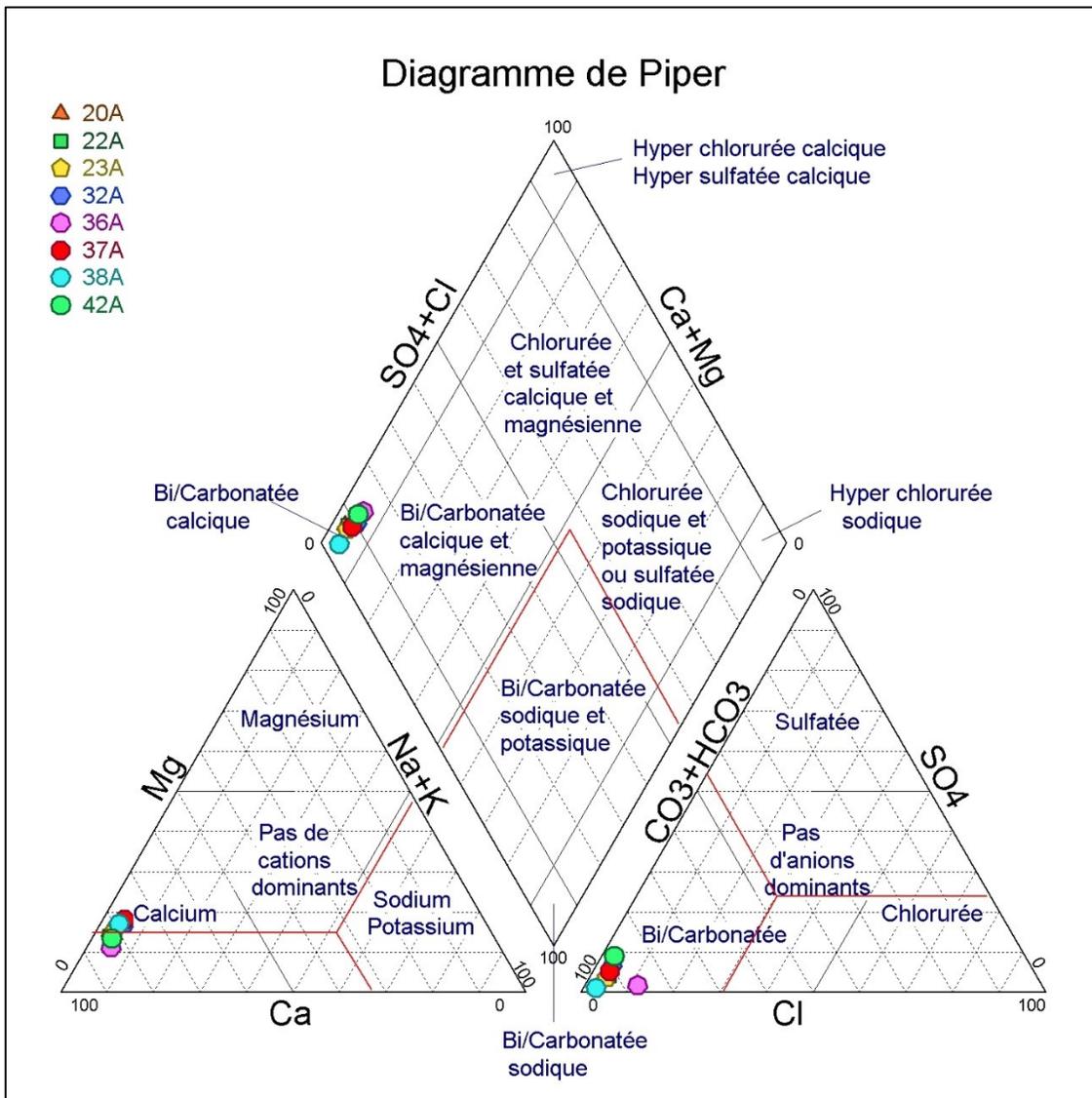


Figura 40: Diagrama de Piper para los análisis de agua en pozos

4.6 Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero, para el área llana de la cuenca Andamojo.

La vulnerabilidad es la sensibilidad del acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante expuesta (Foster & Hirata, 1988). En este capítulo se va a obtener la vulnerabilidad intrínseca del acuífero, a partir de la metodología GOD (Foster et al., 2002) que caracteriza la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en función de:

- Grado de confinamiento hidráulico del acuífero en consideración.
- Ocurrencia del sustrato suprayacente.
- Distancia al agua (profundidad al nivel del agua en acuíferos)

Se parte del esquema de la figura 41 propuesto por (Foster et al., 2002) en el cual se muestran las variables requeridas, las cuales se determinaron a partir del análisis de información litológica de pozos (base de datos de SENARA), perfiles hidrogeológicos generales de la cuenca y los niveles de agua en pozos medidos en el mes de octubre de 2018, se tomó dicho mes ya que normalmente es considerado como uno de los meses más lluviosos del año, por lo que sería cuando el nivel esté más cerca de la superficie, además se complementa con 7 datos de pozos medidos en el mes de agosto del 2018.

Es importante aclarar que este capítulo se desarrolló únicamente para el área plana de la cuenca en estudio, ya que es donde hay mayor densidad de información hidrogeológica para desarrollar esta metodología. De igual forma se aclara que este método si bien es cierto es permitido aplicarlo en Costa Rica, se debe tomar como medida preventiva y no definitiva en la zona de estudio ya que el área analizada es a escala 1:50 000 y muchos detalles se obvian o son generalizados, en caso de querer utilizar los resultados para la gestión del recurso y toma de decisiones se recomienda usar una escala que brinde mayor detalle.

4.6.1 Variable G o Grado de confinamiento hidráulico del acuífero:

Esta variable se analizó a partir de la información de pozos de la base de datos del SENARA e información de niveles medidos en el campo durante este proyecto.

La información del pozo DI-94 (anexo 3) ubicado en la localidad de Veintisiete de Abril, reporta en el nivel de agua subterránea un aumento de 1 metro, cuando se perfora a los 38 m de profundidad, en este caso la zona no saturada se describe como arcilla con arenas, con predominancia de las arcillas, sin embargo para poder clasificar esta área del acuífero como confinada, sería necesario realizar mediciones mensuales del nivel estático, con el fin de verificar dicha condición en el tiempo y descartar que se deba únicamente a un período de fuertes precipitaciones (temporal) como la ocurrida en el 2018 para el mes de octubre. Por esta razón el acuífero en esta zona se clasificó como no confinado cubierto. Lo mismo ocurre con el pozo M4, que al inicio de la perforación reporta un nivel estático a los 0 metros, posteriormente a los 17 metros de perforación (arenas y gravas) el nivel desciende 20 cm y a los 40 metros de profundidad una vez perforada la roca basáltica, el nivel de agua asciende de nuevo a 0 metros (tabla 10). Es importante recalcar que al pozo M4, se le realizaron mediciones de nivel de agua en los meses de agosto, octubre, noviembre y diciembre del 2018 y en febrero de 2019, en los cuales únicamente para el mes de octubre del 2018, se determinó un nivel de 72 cm por arriba de la superficie, los meses restantes mostraban niveles bastante superficiales pero no surgentes, esta misma condición se repite para el pozo M2 (tabla 10), donde para el mes de octubre el nivel de agua medido fue de 42 cm por arriba de la superficie. Por tanto, la condición acuífera específicamente para este sector de Paraíso, se podría clasificar como libre cubierto.

La información hidrogeológica obtenida de los demás pozos no reporta confinamiento o algún indicativo de surgencia, por esta razón, el acuífero en estas áreas se interpreta como libre, sin embargo, es recomendable realizar mediciones constantes con altímetros o equipos de mayor exactitud que confirmen esta condición, por ejemplo, sensores de presión.

Se debe mencionar que tanto en la información de pozos de la base de datos del SENARA como lo observado en el campo (a niveles superficiales), en general la zona no saturada presenta un horizonte arcilloso, pero no es continuo, ya que existen capas de arenas y gravas en algunos casos de menor espesor que aportan un grado importante de permeabilidad, además, el material arcilloso-arenoso regolítico presenta una conductividad hidráulica que permite una importante infiltración de agua al subsuelo.

Por tanto, se asigna lo siguiente:

$G = 0.8$ en sectores donde posiblemente el acuífero se comporta como libre

$G = 0.6$ en sectores donde posiblemente el acuífero se comporta como libre cubierto.

Una vez asignada la variable G a cada uno de los sitios de estudio, se establecen áreas de influencia mediante polígonos de “*Thiessen*”.

4.6.2 Variable O (Ocurrencia del sustrato suprayacente):

Esta variable se realiza a partir de información de pozos y comprobación de campo. Para esto se analizan las zonas no saturadas en 17 puntos donde hay pozos perforados en la parte plana de la cuenca, se distingue el espesor de arcillas, limos y de gravas, y se le asigna el valor correspondiente propuesto en la metodología GOD (figura 41). En caso de que en la zona saturada existan dos horizontes con el mismo espesor, pero distinta textura, se aplica el promedio de la variable O para cada una de las texturas. En caso de que en la zona no saturada existan materiales de texturas y espesores diferentes, se asigna el valor de O (figura 30) al espesor dominante, ya que es muy posible que sea determinante en el comportamiento de la infiltración de fluidos en el subsuelo. Además de la información litológica de pozos, se utilizaron 3 sitios donde se tienen datos de textura en al menos los primeros 20 cm de suelo. Con esta información se determinó el área de influencia mediante polígonos de “*Thiessen*”.

4.6.3 Variable D (Distancia al agua del acuífero):

La variable D se determinó a partir de los niveles de agua subterránea medidos en pozos excavados en su mayoría. Se elige el mes de octubre del 2018, debido a que se detectaron niveles de agua subterránea bastante someros respecto a los meses restantes, por lo que se estaría evaluando el escenario más crítico para la variable D. Cabe resaltar que los niveles de agua subterránea de los pozos M1, M14, M17, M22, M23, M27 y M30, se tomaron en el mes de agosto, ya que durante octubre las fuertes precipitaciones inhabilitaron varios de los caminos internos que se utilizan para llegar a dichos pozos. A los datos se les asignó la variable D establecida en la metodología de Foster et al. (2002) y se clasificaron como se indica en la tabla 14.

Tabla 14: Niveles de agua medidos en el mes de octubre

Pozo	X	Y	Nivel de agua subterránea	Parámetro D
M1*	346990	246094	5.90	0.8
M2**	339586	241097	0.42	0.9
M3	340200	241176	1.06	0.9
M4**	339497	240783	0.72	0.9
M5	346912	246633	4.66	0.8
M6	347434	246373	3.70	0.9
M7	347731	245983	7.51	0.8
M8	348094	247273	4.96	0.8
M9	348682	247744	1.10	0.9
M10	348140	248000	1.35	0.9
M11	347911	247566	0.82	0.9
M12	347590	248584	1.24	0.9
M13	347616	247277	0.97	0.9
M14*	344930	243895	3.81	0.9
M15	344043	241949	3.83	0.9
M16	343609	242051	1.62	0.9
M17*	341395	241146	3.87	0.9
M18	339415	240766	0.23	0.9
M19	339447	240975	0.53	0.9
M20	339312	240588	3.64	0.9
M21	339309	239847	1.16	0.9
M22*	339826	238635	0.67	0.9

M23*	339925	238638	2.15	0.9
M24	343033	242535	1.64	0.9
M25	344216	245271	0.72	0.9
M26	345681	245913	1.00	0.9
M27*	334380	244628	1.93	0.9
M28	343637	243972	1.42	0.9
M29	344302	243664	0.73	0.9
M30*	343811	243698	3.03	0.9

*Nivel medido en el mes de agosto del 2018.

**Nivel sobre la superficie.

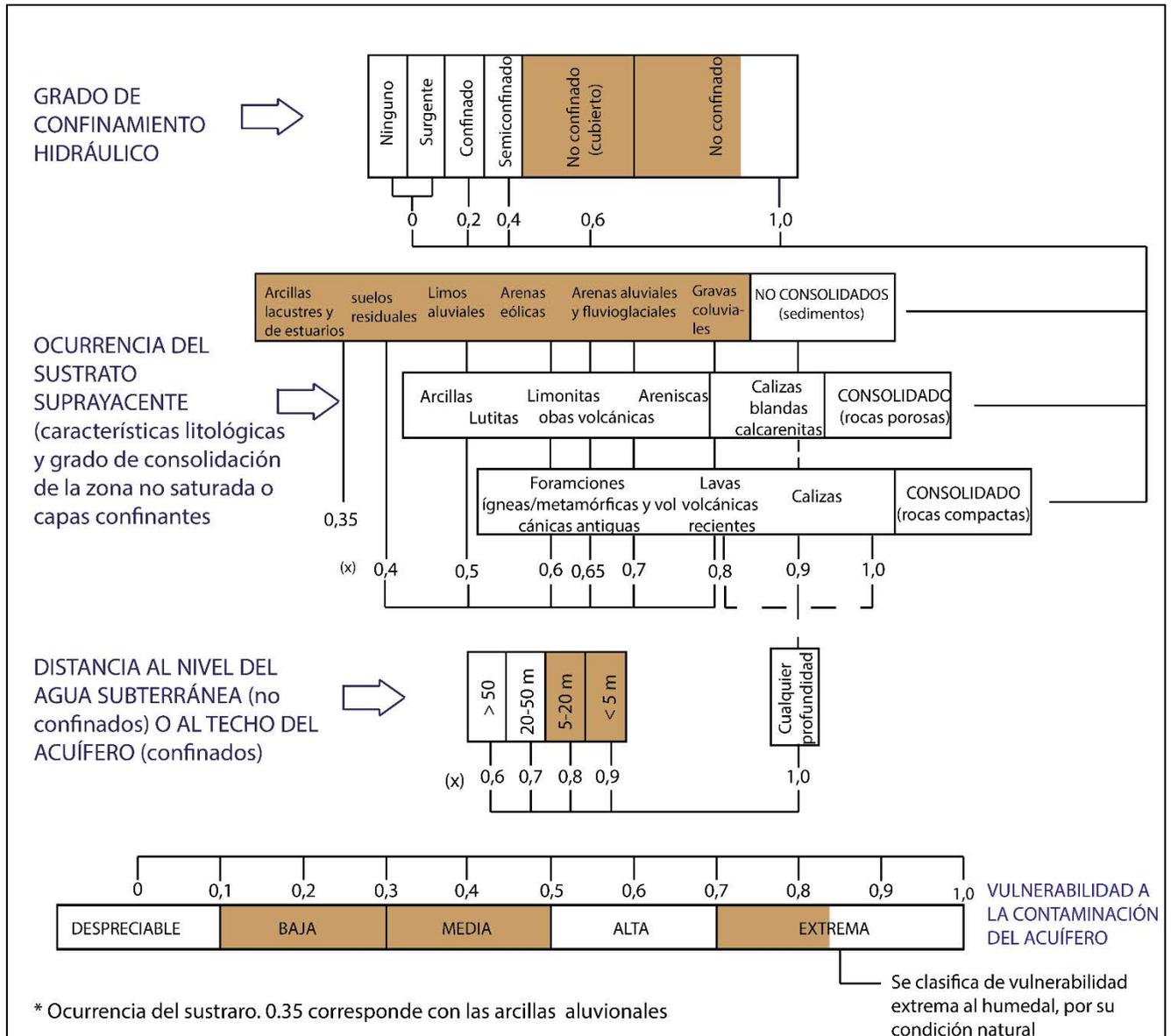


Figura 41: Esquema para la aplicación de la metodología GOD. Tomada de Foster et al. (2002). Se resalta en color café los rangos utilizados en este estudio.

Posteriormente se procedió a convertir los mapas desde el formato shape a formato ráster y finalmente realizó la multiplicación de los tres mapas para obtener el mapa de vulnerabilidad que se muestra en la figura 42.

Se determinó que parte de las localidades de Rio Seco, Cañas Gordas y el sector oeste de Soncoyo, presentan una vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del

acuífero moderada, mientras que para el área restante la vulnerabilidad a la contaminación es baja.

El área que forma el humedal, al suroeste de la cuenca Andamojo, por su naturaleza se clasificó como de vulnerabilidad extrema.

Según lo dispuesto en la Ley orgánica del Ambiente N°7554, los humedales son clasificados como: *“ecosistemas con dependencia de regímenes acuáticos, naturales o artificiales, permanentes o temporales, lénticos o lóticos, dulces, salobres o salados, incluyendo las extensiones marinas hasta el límite posterior de fanerógamas marinas o arrecifes de coral o, en su ausencia, hasta seis metros de profundidad en marea baja”*

Además, se debe tomar en consideración que el artículo 41 de la Ley Orgánica del Ambiente menciona que: *“Se declaran de interés público los humedales y su conservación, por ser de uso múltiple, estén o no estén protegidos por las leyes que rijan esta materia”*.

Además, como así lo cita la Política Nacional de Humedales: *“Con la ratificación de la Convención relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas (Convención de Ramsar) aprobada mediante Ley N°7224 de 7 de abril de 1991, la cual está vigente a partir del 8 de mayo de ese año, se adquirió el compromiso de la conservación y el uso racional de los humedales mediante acciones locales y nacionales, con la cooperación internacional, como contribución al logro de un desarrollo sostenible”*.

En el anexo 6 se representa un mapa con la ubicación de los pozos utilizados para las variables, G, O y D, además en la tabla 14 y anexo 2 se muestran las coordenadas de cada pozo.

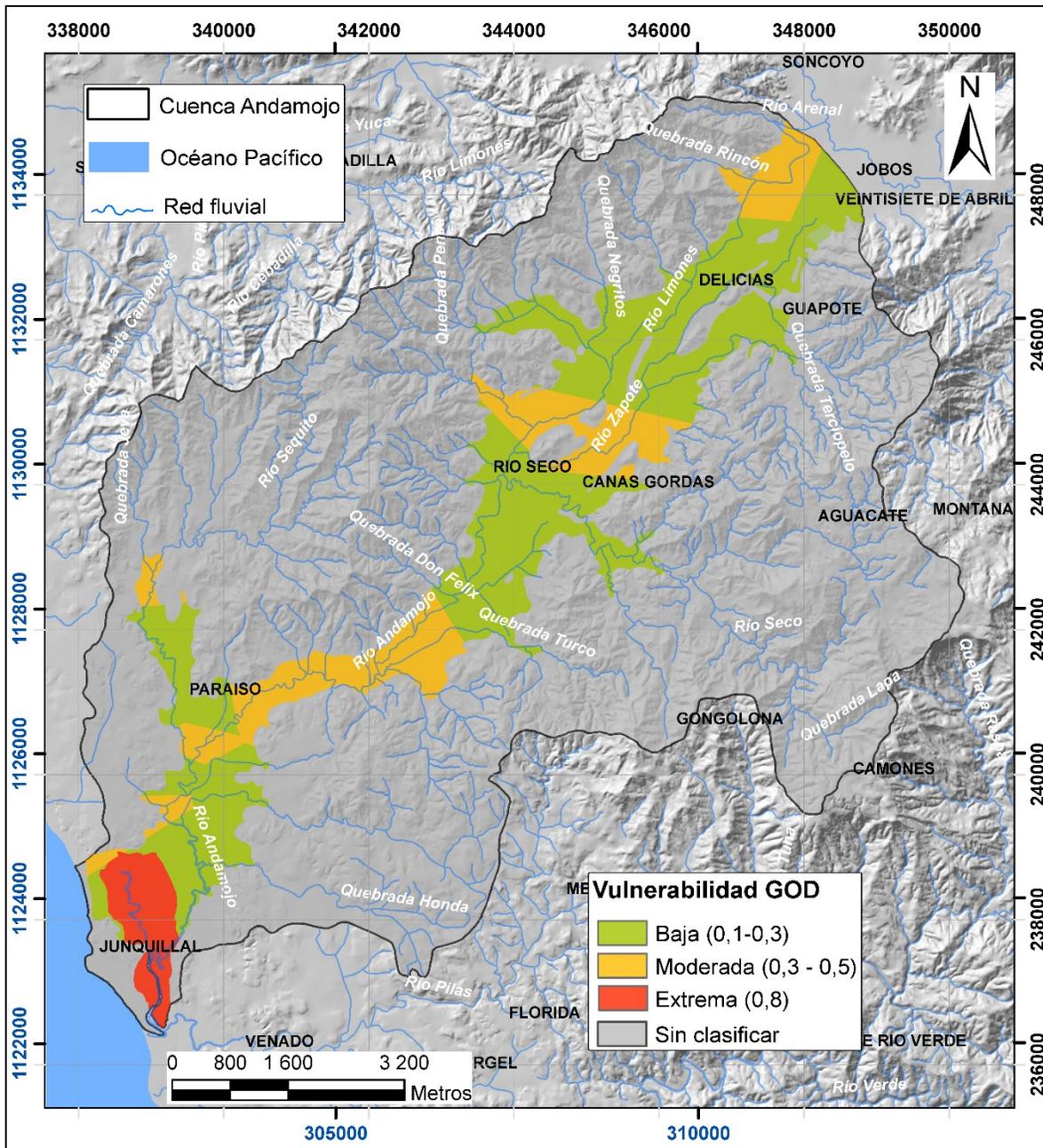


Figura 42: Mapa de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero para el área llana de la cuenca Andamojo, Santa Cruz, Guanacaste. Elaboración propia.

4.7 Modelo hidrogeológico conceptual

A partir de la información generada y resultante de los capítulos anteriores se propone un modelo hidrogeológico conceptual para la cuenca Andamojo, con el fin

de representar la dinámica externa y el comportamiento del flujo subterráneo, y la recarga de la zona (figura 43).

La cuenca Andamojo está conformada por la unidad hidrogeológica aluvial, en las partes llanas de la cuenca, mientras que, hacia las zonas montañosas, se compone de lavas basálticas (unidad Hidrogeológica Complejo de Nicoya (basaltos)). Estas lavas normalmente presentan una superficie regolítica de importancia hidrogeológica para la generación de acuíferos, y es posible que estas lavas manifiesten fisuramiento en profundidad debido a la porosidad secundaria.

La longitud del acuífero aluvial es de 12,6 km, tiene un espesor promedio de 17,4 m y un ancho muy variable entre 0,5 - 2,7 km, además se comporta como libre con sectores clasificados como libre cubierto, cuyo nivel se ubica entre 1 y 11 m.b.n.s, con rendimientos entre 1 y 21 l/s, para un promedio de 6,6 l/s y transmisividades que varían entre 141,3 m²/d y 614 m²/d, con una dirección del flujo subterráneo preferencial hacia el suroeste, con un gradiente de 0,009 al norte de la cuenca, y de 0,004 hacia la cuenca baja. La clasificación química del agua subterránea para dicho acuífero es bicarbonatada cálcica magnésica.

La unidad hidrogeológica del Complejo de Nicoya (basaltos), presenta un acuífero con al menos dos niveles, el más superficial localizado en el regolito, presenta características similares a la porosidad intergranular, tiene un espesor entre 1 - 12 m, para un promedio aproximado de 4,40 m, con rendimientos entre 0,5 l/s - 11 l/s, el nivel estático promedio se ubica a los 5,45 m aproximadamente. El segundo nivel está limitado a sectores fisurados de los basaltos sanos, donde el nivel de agua subterránea se localiza entre los 6,24 m.b.n.s y los 75 m.b.n.s, con caudales reportados entre 6 - 0,75 l/s, y una transmisividad de 10 m²/día - 478 m²/día.

La precipitación total anual de la cuenca es de 225 587 732,9 m³, para un promedio mensual de 2475 mm, la evapotranspiración real promedio es de 167,8 mm, y la recarga potencial total para el período de estudio es de 67 400 487,12 m³ por año (2 137,25 l/s), la cual representa un 30% de la precipitación total de la zona.

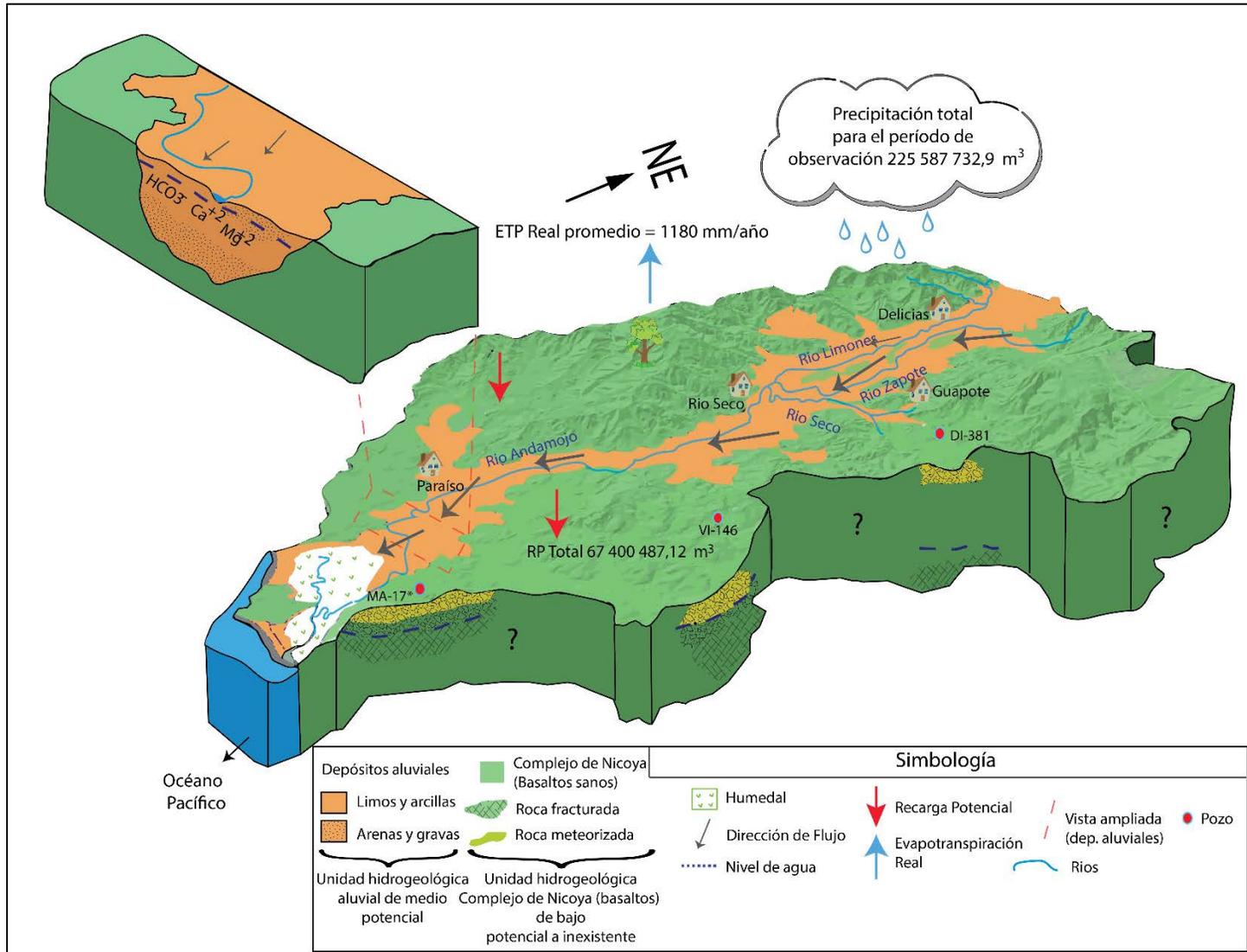


Figura 43: Modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca Andamojo, Santa Cruz, Guanacaste. Elaboración propia.

Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones:

- La geología local se conforma por tres unidades geológicas que son: la unidad de depósitos coluviales, la unidad de depósitos aluviales y la unidad inferior que corresponde con lavas del Complejo de Nicoya.
- La unidad aluvial está compuesta por limos arenas y grava, mientras que el Complejo de Nicoya está formado por lavas basálticas color gris oscuro, con fracturas en su mayoría cerradas y vetas. Dicha unidad comúnmente presenta un horizonte superior conformado por regolito, mientras que a mayor profundidad se comporta de forma masiva y/o con fisuras.
- El área de estudio se encuentra afectada por el sistema de fallas los Chanchos, además de la Falla Limones-Cañas, y otras asociadas a ellas, que hacen que la zona tenga un control estructural de importancia hidrogeológica. Como indicio de esto, se localizaron “charcos” sobre quebradas y ríos de la cuenca, en su mayoría alineados a estas estructuras.
- El patrón de drenaje rectangular, es el dominante en la cuenca Andamojo, el cual se asocia al control estructural de la zona.
- Se determinó un comportamiento influente en la mayor parte de la sección medida de los ríos Andamojo / Zapote, mientras que en dos tramos localizados en el poblado de Río Seco y al noroeste de la quebrada Turco, el río tiene un comportamiento efluente.
- La precipitación total anual para el período de observación de los años 1980 a 2017 es de 225 587 732,9 m³.
- En cuanto a la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo se tiene que la recarga potencial anual en la cuenca Andamojo es de aproximadamente de 67 400 487,12 m³ por año (2 137,25 l/s), la cual representa un 30% de la precipitación total de la zona.
- La composición química del agua extraída del acuífero aluvial Andamojo es bicarbonatada cálcico magnésico.

- La vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero aluvial Andamojo, en las inmediaciones de las localidades de Rio Seco, Cañas Gordas y el sector oeste de Soncoyo, es moderada, mientras que el área restante la vulnerabilidad a la contaminación es baja. Se le asigna vulnerabilidad extrema al humedal por su importancia ecosistemática.
- Con el modelo hidrogeológico conceptual se confirma la existencia de un acuífero en el regolito de los basaltos del Complejo de Nicoya el cual se transmite mediante fracturas hasta profundidades de 75 m.b.n.s. Además, se determinó un acuífero aluvial y principal, con un espesor promedio de 17 m., con una dirección de flujo orientado preferencialmente hacia el SW.
- El caudal medio para el acuífero aluvial Andamojo, es de 3 l/s, mientras que en el acuífero fisurado Andamojo es de 2,5 l/s., Según la clasificación del SENARA (1992) la Unidad hidrogeológica aluvial, presentan un potencial acuífero medio, mientras que la Unidad hidrogeológica del Complejo de Nicoya (basaltos), corresponde con un potencial acuífero bajo a inexistente.
- Los pozos que captan el Complejo de Nicoya tienen reportes de caudal relativamente bajos, posiblemente asociado a la naturaleza de los basaltos, los cuales son masivos, pero con fracturas cerradas y vetas, que hacen que el medio sea muy heterogéneo como para permitir un mayor flujo del agua.
- A partir del análisis anterior, se confirma la hipótesis formulada en esta investigación, a excepción de lo propuesto para la Unidad hidrogeológica aluvial, donde inicialmente se pensaba que el potencial acuífero era bajo, sin embargo, se pudo confirmar que el potencial acuífero es medio.

5.2 Recomendaciones:

- Realizar análisis detallados en las partes montañosas de la unidad del Complejo de Nicoya, como geofísica y piezómetros de investigación, para generar parámetros hidráulicos que permitan caracterizar con más detalle el acuífero para esa zona; además es importante establecer una campaña de medición de estructuras geológicas, tales como fallas, estrías de falla, fracturamiento, entre otros.
- Realizar aforos durante un período de observación representativo, a lo largo del río principal de la cuenca Andamojo, o instalar limnigrafos en sectores estratégicos, como en las inmediaciones del pueblo Delicias (cuenca alta), y en las cercanías de Paraíso (cuenca baja), para estudiar con más detalle la conexión hidráulica entre los ríos y el acuífero regional.
- Realizar más pruebas de bombeo en pozos de ambas unidades hidrogeológicas para conocer una mayor aproximación de la transmisividad de dichos acuíferos.
- Realizar mediciones preferiblemente mensuales de fluctuación de niveles en pozos de la red de monitoreo, y extender la red hacia las partes montañosas de la cuenca con el fin de establecer o descartar zonas de confinamiento, además es necesario establecer un período de observación representativo que permita establecer una línea base del nivel estático, que permita determinar cambios importantes en el acuífero, como por ejemplo estrés por sobreexplotación.
- Realizar mediciones constantes con altímetros o equipos de mayor exactitud, por ejemplo, sensores de presión, que confirmen el comportamiento libre en el acuífero aluvial.
- Tomar muestras de agua de pozos para clasificación hidrogeoquímica en las partes montañosa del Complejo de Nicoya. Además, analizar parámetros microbiológicos para determinar su potabilidad, tanto en pozos que captan.

- Realizar un muestreo de agua, en los “charcos” o “empozamientos de agua” localizados en la cuenca Andamojo, para determinar su clasificación hidrogeoquímica e incluir análisis isotópicos de oxígeno 18 y deuterio.
- Realizar un análisis de la densidad de drenaje para identificar asociaciones litológicas que permitan identificar sitios con mayor escorrentía y compararlo con los resultados del balance hídrico.
- Realizar un análisis del control estructural hacia el norte - noreste y aforar los ríos de dicha zona para saber si tienen el mismo comportamiento efluente observado hacia la parte media de la cuenca.
- Establecer alianzas con las ASADAS y ONG de la zona, para que estas entidades sean de apoyo en el monitoreo del acuífero, y que, además, este sea de una forma integrada, participativa y periódica.

6. Referencias

- ALAN, A., 2017: Caracterización hidrogeológica de un sector de la cuenca tectónica del río Grande: Comunidad de Nambí de Nicoya y sus alrededores.
- ALLEN, R.G., 2006: Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requisitos de agua de los cultivos. - 299 págs. FAO, Roma.
- ARCE, G., ALBERTO, J., GÓMEZ, C. & SANCHEZ, M., 2012: Meteorización química, procesos y formas resultantes. <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/default.htm> [Consulta: 1de octubre del 2020].
- ARELLANO, F. & VARGAS, A., 2000: Casos de contaminación por intrusión salina en acuíferos costeros de la Península de Nicoya (Costa Rica). Rev. Geol. Amér. Central. 25: 77-84.
- ARIAS, M., 2018: Realización de sondeos eléctricos verticales (SEV) en sitios seleccionados de Guanacaste. Centro de investigaciones en Ciencias Geológicas [Inf. Interno].
- ASAMBLEA LEGISLATIVA DE LA REPÚBLICA DE COSTA RICA., 1995: Ley Nº 7554, Ley Orgánica del Ambiente.- Diario Oficial de la Gaceta, alcance del 4 de octubre de 1995.
- ASTORGA, Y., (s.f.): Situación del Recurso Hídrico. -39 págs. Décimo quinto Informe Estado de la nación en desarrollo humano sostenible, San José, Costa Rica.
- BOLAÑOS, A., 1973: Anteproyecto del puente sobre el río Andamojo. -51 págs. Univ Costa Rica, San José [Tesis Lic].
- BRAVO, J., PICÓN, J., & RODRÍGUEZ., Q., 2014: Fragmentación del bosque de manglar ante el desarrollo turístico del pacífico norte costarricense: estudio de caso., Rev. Geográfica. Amér. Central. 52: 103-116.
- CALVO, J., 1999: Principios de hidrología forestal tropical.- 136 págs. Inst. Tecnol. Costa Rica, Esc.Ing. Forestal, Cartago, Costa Rica.
- CALVO, J., 1999: Principios de hidrología forestal tropical.- 136 págs. Inst. Tecnol. Costa Rica, Esc.
- CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R. & MAYS, L.W., 1994: Hidrología aplicada. Mac Graw Hill, Santa Fé, Bogotá.-584 págs., Costa Rica.
- CUSTODIO B. & LLAMAS E. 1983: Hidrología Subterránea. Ed. Omega, Barcelona. -1157 Págs.

- DENYER, P., MONTERO, W. & ALVARADO, G. E., 2003: Atlas Tectónico de Costa Rica.- 55 págs. Ed. Univ. Costa Rica, San José, Costa Rica.
- DENYER,P., AGUILAR, T. & MONTERO, W., 2013: Mapa geológico de la hoja Villarreal.-Escala1:50 000, Ed. UCR, San José.
- DENYER,P., AGUILAR, T. & MONTERO, W., 2013: Mapa geológico de la hoja Diríá.-Escala1:50 000, Ed. UCR, San José.
- DENYER,P., AGUILAR, T. & MONTERO, W., 2013: Mapa geológico de la hoja Marbella.-Escala1:50 000, Ed. UCR, San José.
- DENYER,P., AGUILAR, T. & MONTERO, W., 2014: Cartografía geológica de la Península de Nicoya, Costa Rica.-207págs. Ed. UCR, San José.
- DURAN, A et al 2020: Efectos del cambio climático observado sobre el ciclo hidrológico y la disponibilidad de recurso hídrico en la región chorotega. Proyecto: N°B7507. Financiado por el MICITT
- FONAFIFO., 2008: Manual para productores de teca (*Tectona grandis*. L.f). <http://www.FONAFIFO.go.cr/media/1332/manual-para-productores-de-teca.pdf> [Consulta: 1 de marzo del 2020].
- Foster, S. & Hirata, R., 1988: “Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data.-86 págs. WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual. Lima, Perú.
- FOSTER, S., HIRATA, R., GOMES, D., D’ELIA, M. & PARIS, M., 2002: Protección de la calidad del agua subterránea. -115 págs. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial.
- GRANADOS, R., 2018: “Estudio de la capacidad de infiltración de los suelos en las Cuencas Pinilla-Andamojo, zona sur del cantón de Santa Cruz, y el cantón de Nandayure, Guanacaste”.- 84 págs. Independiente [Inf. Interno].
- HERRERA, J., 1980: Hidrogeología de la cuenca del Río Andamojo, Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica. – 53 págs. Univ. Costa Rica [Tesis Lic].
- HERRERA, J., 2016: Recurso hídrico y saneamiento: “avances y desafíos”.- 40 págs. Estado de la Nación. San José, Costa Rica., Ing. Forestal, Cartago, Costa Rica.
- INGENIERÍA CIVIL., 2008: Medidores de Flujo. <http://ingevil.blogspot.com/2008/10/medidores-de-flujo.html> [Consulta: 1 de marzo del 2020].
- INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL., 2009: Estación 72187 San José

- INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION (ITTO)., s.f.
<http://www.tropicaltimber.info/es/specie/teca-tectona-grandis/> [Consulta: 25 de agosto del 2020].
- KRÁSNÝ, J., 1993: Classification of transmissivity magnitude and variation.-
Groundwater, 31: 230-236.
- MOLINERO, J., 2005: Tipos de acuíferos.
<https://es.slideshare.net/EdwinLoisZutaGabriel/tipos-acuiferos> [Consulta: 21 de abril del 2020]
- MONGE, M., 2015: Estudio Hidrogeológico y Balance Hídrico de los acuíferos de Playa Potrero y Playa Brasilito, Santa Cruz, Guanacaste.-150 págs. Univ. Costa Rica, San José [Tesis Lic].
- MONTERO, W. & DENYER, P., 2011: Fallamiento neotectónico de la Península de Nicoya y su relación con el escarpe tectónico del arco Centroamericano.-
Rev. Geol. Amér. Central. 45: 9-52.
- MORA, D., 1978: Aspectos hidrogeológicos de la Península de Nicoya. – 81 págs. Univ. Costa Rica, San José [Tesis Lic].
- ONU, 1972: Manual de instrucciones, estudios hidrológicos.- 540 págs. ONU Publ. N° 70, San José,
- PODER EJECUTIVO., 2017: Decreto N° 40244-MINAE-PLAN Oficialización de la política nacional de humedales.- Gaceta N° 68, Alcance 76 del 5 de abril de 2017.
- QUESADA, R., 2007: Los Bosques de Costa Rica. IX Congreso Nacional de Ciencias. Instituto Tecnológico de Costa Rica: 1-16.
- QUIRÓS, J., 1987: Términos chorotegas en la toponimia guanacasteca.-Letras 15-16-17.
- REBOLLO, L., s.f.: Movimiento del agua en el subsuelo.
https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PD-GA-ASIG/PD-ASIG-67044/TAB42351/T4-Movimiento%20del%20agua%20en%20el%20subsuelo.pdf [Consulta 14 de mayo del 2020].
- RODRIGUEZ, H., 2010: Estudios hidrogeológicos en las cuencas Diríá, Andamojo y Nimboyores Santa Cruz, Guanacaste. -36 págs. SENARA [Inf. Interno].
- SCHOSINSKY, G., 2006: Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. - 34-35: 13-30, Rev. Geol. Amer. Cent.

SENARA, 1992: Mapa hidrogeológico de la península de Nicoya. Dirección de Aguas Subterráneas y Estudios Básicos. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento. San José, Costa Rica.

SINGHAL , B.B.S, & GUPTA, R.P., 2010: Applied Hydrogeology of Fractured Rocks. Springer . 2 Edición. 429 págs

Van Zuidam, R. A., 1986: Aerial Photointerpretation in Terrain Analysis and Geomorphologic Mapping. 442: 42-197. The Hague, The Netherlands: Smits.

VARGAS, I., 2018: Diagnósticos hidrogeológicos de la subcuenca de Andamojo-Pinilla y el cantón de Nandayure, Guanacaste.-87 págs. SENARA [Inf. Interno].

Anexo 1: Resumen del modelo planteado a partir de cada uno de los SEV. Tomado de Arias (2018).

SEV 1 Error 3,18					SEV 2 Error 3,88				
Capas	Resistividad (Ω)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación	Capa	Resistividad (Ω)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación
1	45	0,5	0,5	A	1	15,1	3,2	3,2	C
2	19,7	3,78	4,28	B	2	153	0,164	3,36	H
3	198	0,979	5,26	H	3	11,7	0,461	3,82	B
4	10,4	8,06	13,13	B	4	5,71	0,823	4,65	B
5	154			E	5	8,68	9,79	14,4	B
					6	108			E

SEV 3 Error 3,94					SEV 4 Error 5,62				
Capas	Resistividad (Ω)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación	Capas	Resistividad (Ω)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación
1	18,9	3,32	3,32	C	1	11	19,5	19,5	B
2	85,4	0,54	3,86	H	2	48	1,71	21,5	C
3	1,54	1,36	5,22	B	3	145	1,58	22,8	D
4	45,5	0,598	5,82	C	4	301			E
5	122	8,02	13,8	H					
6	33,6	18,8	32,7	C					
7	241			E					

SEV 5 Error 3,11					SEV 6 Error 3,13				
Capas	Resistividad (Ω)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación	Capas	Resistividad (Ω)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación
1	20	0,174	0,714	A	1	24,5	0,55	0,55	A
2	10	0,916	1,63	B	2	59,6	0,697	1,25	C
3	33,8	9,45	11,1	C	3	6,67	0,855	2,1	B
4	152			E	4	26	13,6	15,7	C
					5	468			E

SEV 7 Error 3,1					SEV 8 Error 3,37				
Capas	Resistividad (Ω)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación	Capas	Resistividad (Ω)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación
1	47,2	0,5	0,5	A	1	28,7	1,41	1,41	A
2	6,64	0,445	0,945	B	2	10	7,39	8,8	B
3	78,5	0,703	1,65	C	3	127			E
4	20	18	19,6	C					
5	118			E					

SEV 9 Error 5,72					SEV 10 Error 3,6				
Capas	Resistividad (Ω)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación	Capas	Resistividad (Ω)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación
1	29	1,55	1,55	C	1	7,02	0,5	0,5	B
2	17,8	5,45	7,01	C	2	10,5	10,9	11,4	B

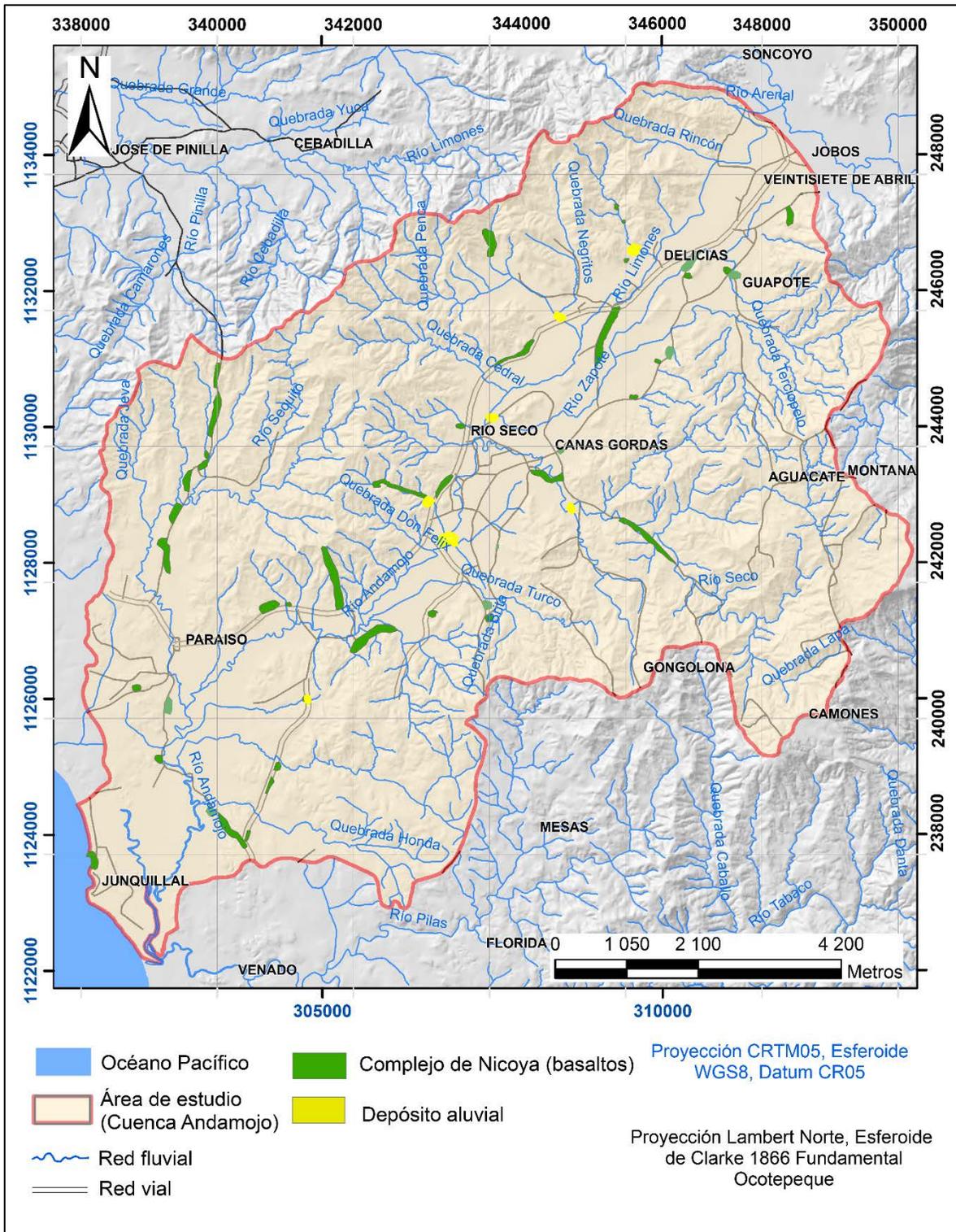
3	77,6	50,9	57,9	C	3	4,97	4,17	15,6	B
4	331			E	4	96,8			E
SEV 11 Error 3,24					SEV 12 Error 1,69				
Capas	<i>Resistividad</i> (Ω)	<i>Espesor</i> (m)	<i>Profundidad</i> (m)	<i>Interpretación</i>	<i>Capa</i>	<i>Resistividad</i> (Ω)	<i>Espesor</i> (m)	<i>Profundidad</i> (m)	<i>Interpretación</i>
1	16,3	0,5	0,5	C	1	21,11	0,8098	0,8098	A
2	57,7	0,57	1,07	H	2	2,969	0,08718	0,897	B
3	17,3	16,2	17,3	C	3	15,28	9,881	10,78	C
4	23,3	17,1	34,3	C	4	26,05	5,665	16,44	C
5	134			E	5	136,7			E
SEV 13 Error 2,91									
Capas	<i>Resistividad</i> (Ω)	<i>Espesor</i> (m)	<i>Profundidad</i> (m)	<i>Interpretación</i>					
1	20,1	0,568	0,568	A					
2	11,8	9,46	10	B					
3	40,9	11,6	21,6	C					
4	12,4	35,1	56,7	I					
5	410			E					

A: Relleno de calle, B: Capas de arcillas posiblemente con alto contenido de humedad, C: Capas de arenas o gravas, D: Zona de roca meteorizada y/o fracturada con matriz arcillosa, E: Roca masiva relacionada al basamento local, F: Roca del basamento más fracturada y con posible presencia de nivel de agua, G: Radiolaritas correlacionadas en campo, H: Bloques aluviales posiblemente envueltos en una matriz escasa de arcilla, I: Gravas saturadas correlacionadas con pozo VI-158.

Sondeos Eléctricos Verticales distribuidos en la cuenca Andamojo, realizados por Arias (2018)

Código	Coordenadas Lambert Norte	
	X	Y
SEV-1	347671	248832
SEV-2	348328	247635
SEV-3	345426	246313
SEV-4	345961	245943
SEV-5	345948	244821
SEV-6	343642	244540
SEV-7	344435	243720
SEV-8	345231	244156
SEV-9	339213	242419
SEV-10	339707	240908
SEV-11	343432	242276
SEV-12	343206	241698
SEV-13	339786	239368

Anexo 2. Mapa de afloramientos



Anexo 3. Pozos base de datos del SENARA

Pozo	X	Y	Prof (m)	Fecha	Litología	NE (m)	ND (m)	Rejilla (m)	Coficiente de almacenamiento	T (m ² /d)	Q (L/s)
DI-376	348100	246950	24	10/6/2006	0-1 m: suelo areno-arcilloso. 1-18 m: Rocas coluvio aluviales alteradas, originadas a partir del Complejo de Nicoya. 18-24 m: Rocas del Complejo de Nicoya, en estado de poca alteración.	8	10	-	-	-	Qrec = 5
DI-381	346235	242140	114	26/11/2006	0-11m: Suelo arcilloso naranja a amarillo, asociado a meteorización del Complejo de Nicoya. 11-110m: Basaltos gris consolidados, sanos sin fracturas del Complejo de Nicoya. 110-114: Basaltos con presencia de fracturas secundarias, consolidados Complejo de Nicoya	75	-	-	-	-	3 l/s
DI-6	349000	248050	37,9	20/10/1966	0-3.5 m: Suelo. 3.5-15 m: Arcilla café. 15-17: Arena fina. 17-25 m: Arcilla café. 25-37m roca triturada.	1,06	15,24	28-38m	-	-	6 l/s

VI-56	339400	240750	24,5	17/4/1989	0-9 m: Aluvión. Constituido por gran cantidad de bloques y fragmentos de lavas basálticas color marrón y negro, y otros fragmentos de radiolaritas, todo en una matriz escasa, terrosa y con arenas gruesas. 9-13 m: Basaltos alterados. Constituyen el techo del Complejo de Nicoya. Permeabilidad aparente es muy alta 13-24,5m: Basaltos algo alterados y muy fracturados de color gris oscuros y negros y verdosos, la permeabilidad aparente es muy alta (tipo secundario).	1,83. Después de los 13 metros, hay un incremento en el nivel del agua (en los basaltos fracturados) sube a 1,83 m. El nivel varió de 8-10 anteriormente.	-	0-24m	-	-	-
VI-96	339460	240650	20	13/4/1998	0-2: Suelo útil. Areno-arcilloso. 2-6 m: Capas de arenas finas. 6-12 m: Capa de aluvión grueso. 12-16: Capa de aluvión fino. 16-19 m: Capa de aluvión grueso. 19-20 m: Complejo de Nicoya alterado.	4	12	8-20m	-	-	10 l/s
VI-210	338760	247985	120	11/7/2011	0-2 m: Suelo arcilloso. 2-120 m: Lavas basálticas fracturadas del Complejo de Nicoya.	21,13	115	35-120m	-	0,5 m ² /día	1 l/s

DI-94	348650	248100	40	9/8/1976	<p>0-17 m: Arcilla color café, con arena. Las proporciones de arena son variables, pero siempre predomina la materia arcillosa. En los primeros metros se ve la influencia del material orgánico del suelo. Permeabilidad baja a nula.</p> <p>17-19 m: Arena, con arcilla color café. Es un horizonte con características más arenosas que toda la sección anterior. Hay clastos que pueden clasificarse como grava por su tamaño (hasta de 1,5 cm). Permeabilidad media a alta.</p> <p>19-22 m: Arcilla color gris. Densa y plástica. Horizonte impermeable.</p> <p>22-38 m: Arena con grava y arcilla. Este grueso horizonte, aunque heterogéneo en cierta manera puede agruparse como una sola unidad, en la cual predominan las fracciones arenosas y de grava sobre las arcillas, Magnífica permeabilidad. Composición del aluvión: Basaltos y areniscas probablemente originadas en el Complejo de Nicoya</p> <p>38-46 m: Areniscas color café, muy silíceas con algo de material calcáreo. Hay evidencia de fracturación meteorización a través de fracturas. Nota: A partir de 38 metros el nivel estático subió un metro. Hay evidencia de interstratificación de arcillas.</p> <p>46-48m: Complejo de Nicoya Constituido por areniscas, fragmentos silíceos, bastante calcáreos</p> <p>48-50 m: Areniscas color verde oscuro. Alto contenido de sílica. Permeabilidad aparente muy baja o nula. Formación Rivas.</p>	3,48	2,905	17-19 m / 22-37 m	-	141 (método de Walton) 1946,57 (método de Jacob)	12,3 l/s
-------	--------	--------	----	----------	--	------	-------	-------------------	---	--	----------

MA-17	340221	237392	50		0,0 m- 6,0 m: Suelo arcillosos color naranja. 6,00 m-12,0 m Limo arcillosos con bloques de basalto, asociados con meteorización del Complejo de Nicoya. 12,0 m - 50,0 m: Basaltos grises a negros, con fracturas secundarias, Complejo de Nicoya.	12	10,34	18-50	-	478 m ² /día	3,5 - 6 l/s
VI-128	341325	241650	18	8/4/2002	0-1 m: Suelo arcilloso negro. 1-8 m: Arenas y arcillas. 8-18 m: Grava media limpia.	3 m	-	6-18m	-	-	1 l/s
VI-134	344690	245690	25	14/5/2003	0-3 m: Arcillas. 3-24 m: Arenas gruesas, aluvión fino sin arcilla. 24-25 m Basaltos del Complejo de Nicoya.	3	-	12-25m	-	-	1 l/s
VI-137	340550	241250	20	7/2/2006	0-2 m: Capa de suelo orgánico. 2-4 m: Capas de arenas. 4-11 m: Capas de material aluvional. 11-18m: Capas de limos color negro. 18-20 m: Rocas del complejo de Nicoya.	5	-	7-20m	-	-	1 l/s

VI-212	338700	242000	25	18/3/2012	<p>0-2,5m: Arcilla café rojiza P.A. muy baja.</p> <p>2,5-4: Sedimentos limo arenosos P.A. Baja</p> <p>4-7m: Sedimentos derivados de la roca muy alterada. Textura arenosa con pequeños fragmentos sanos de roca basáltica. Poca Arcilla. P.A. Media.</p> <p>15-22: Alternan tramos de roca basáltica sana y alterada del C. Nicoya P.A. Baja.</p> <p>22-25: Arcilla color gris claro con fragmentos de rocas ígneas muy alteradas. Posible zona de fallamiento. P.A. muy baja.</p>	6,74	11,23	5,4 - 20,4	0,3	<p>NE: 6,24, Caudal constante de bombeo : 0,5 l/s ▲s = 0,80 m, T= 10m²/día</p> <p>-----</p> <p>NE: 6,24 Caudal constante de bombeo : 0,5 l/s ▲s = 2,56 m, T1 = 3 m² /día. Coeficiente de almacenamiento (S):0,3</p> <p>-----</p> <p>NE: 6,24 Caudal constante de bombeo : 0,5 l/s ▲s = 0,79 m, T2 = 10 m²/día.</p> <p>-----</p> <p>Q=0,5 L/s</p>	0,5 l/s
--------	--------	--------	----	-----------	--	------	-------	------------	-----	---	---------

										Tiempo de bombeo : 720 min Nivel dinámico al final del bombeo : 11.23 m Abatimiento total: 4,99 m.	
VI-138	343925	241750	23	1/6/2004	0-1 m: Suelo orgánico. 1-15 m: Capas de arenas de depositación aluvial. 15-22 m: Rocas del Complejo de Nicoya alterado. 22-23 m: Rocas Complejo de Nicoya, bastante fresco.	8	13	8-23m	-	-	5 l/s
VI-141	339170	240000	80	13/12/2005	0-7m: Suelo amarillento con bloques y clastos, 7-18m: Basaltos altamente meteorizados color café. 18-25m: basaltos grises verdoso consolidados, moderadas fracturas. 25-80m: IDEM anterior, consolidados con fracturas.	5	8	22-80m	-	-	2,5 l/s

VI-146	343350	239425	23	29/3/2005	0-10 m: Rocas detríticos heterogéneas, color café. 10-13 m: Rocas del Complejo de Nicoya alterado color azulado. 13-33 m: Rocas del Complejo de Nicoya, poco alterado, pero si fracturado.	10	29	10-33m	-	-	0,5 l/s
VI-148	338950	241870	20	17/2/2005	0-5m: Arcillas suelos alterados color negro, 5-8m: Roca Alterada Cascajo. 8-20m: basalto del complejo de Nicoya	4	-	8-20m	-	-	3 l/s
VI-153	339310	239220	20	4/5/2005	0-9 m: Arcillas suelos alterados. Intercalado con arenas y un cascajo amarillo. 9-21 m: Roca alterada y meteorizada Complejo de Nicoya. 21-23 m: Roca masiva con pátinas, y fracturas, Complejo de Nicoya	9m	12	12-23m	-	-	3 l/s
VI-158	340018	239621	30	6/10/2005	0-5m: Suelo arcilloso de coloración negra y café. 5-23m: materiales sueltos, arenas medias a gruesas, gris oscuro. 23-30m: gravas redondeadas color café.	0,15 m	-	12-27m	-	-	-
VI-177	339304	241679	45	9/4/2007	0-8 m: Arcillas color café naranja, plasticidad media. 8-18 m: Gravas y arenas redondeadas (aluvión). 18-45 m: Basaltos grises a rojizos, con presencia de fracturas, meteorizados.	1	-	18-28m	-	-	0,8 l/s
VI-186	339480	247750	25	4/7/2007	0-1,9m: Suelo orgánico con raíces, color rojizo. 1,9-18m Intercalación de lentes de lutitas con lentes arenosos. 18-25m: Intercalación de lentes arenosos con lutitas.	7	16	5-25m	-	-	0,5 l/s

VI-187	339700	247820	35	4/7/2007	0-1,5m: Suelo orgánico con raíces, color rojizo. 1,5-12m: Intercalación de lutitas con lentes arenosos. 12-15m: capa arenosa fina con pocos lentes arcillosos. 15-24m: Intercalación de lentes de lutitas con lentes arenosos.	7	9	5-24m	-	-	1,07 l/s
VI-192	338752	239835	100	19/7/2007	0-75m: Sedimentos cuaternarios poco consolidado, se observan desde materiales arcillosos en la sección superficial hasta arenas con basaltos en la base. 75m-100m: Basaltos fracturados del Complejo de Nicoya	70 m	-	50-100m	-	-	-
VI-199	338864	242762	22 m	1/6/2009	0-1m: Suelo. 1-11m: Limos. 11-13m: Basaltos meteorizados. 13-22m: Basaltos sanos.	2,8	4,5	3-22m	-	-	1,5 l/s
VI-21	339650	241100	29	16/12/1975	0-1m: Arcilla. 1-8m: Arcilla con arena. Con una arcilla poco plástica envolviendo fragmentos arenosos de escoria, ácidos y basaltos verdes. Baja permeabilidad. 8-17m Grava, bastante limpia de un tamaño que oscila entre 1 mm y 1 cm. La permeabilidad es alta. 17-18m: Arcilla: horizonte arcilloso, envuelve fragmentos muy finos de arena y grava. Baja permeabilidad 18-20m: Grava: Ídem a 8-17 m. 20-29m: Arena y grava arcillosa, de color café claro, es una mezcla de diversos materiales con algo de arcilla. Poca permeabilidad.	0,36	0,6	8-16 y 18-28m	-	614m2/día	7 l/s

VI-15	343800	244200	30	24/6/1975	<p>0-1,82m: Suelo color café tobáceo con diversos fragmentos arcillosos, permeabilidad nula, plasticidad alta.</p> <p>1,82-3,70 m: Arcilla con diferentes fragmentos piroclásticos, permeabilidad nula, plasticidad alta.</p> <p>3,70-4,58 m: Grava de color café rojizo, grisácea, un poco Con un poco de arcilla.</p> <p>4,58-5,48 m: Gravas, tobas, lavas, gravas subredondeadas, tobas de 1-5 mm, color café claro. Tiene poca arcilla.</p> <p>5,48-6,40 m: Fragmentos ígneos angulares color gris, con algo de arcilla. Presenta manchas de oxidación.</p> <p>6,40-8,83 m: Gravas, fragmentos ígneos piroclastos, fragmentos ígneos color gris y café.</p> <p>8,83-10,05m: Fragmentos ígneos de color gris, compactados con una marcada tendencia al hábito prismático triangular, al igual que las anteriores componen la mayoría de la muestra. También hay tobas, café de diferentes tonalidades, recristalizadas. Los ígneos son de tamaños entre 1 y 2 cm. Las tobas son algo más pequeñas. El material está meteorizado y presenta arcillas en cantidades apreciables rodeándolo. Pocos piroclastos. Permeabilidad buena.</p> <p>10,05 - 11,00 m: Gravas y fragmentos ígneos del mismo tamaño. Las gravas subredondeadas y los fragmentos ígneos siguen presentado caras planas. Contiene un poco más de arcillas que la anterior. La permeabilidad es buena.</p>	2,98	11,7	17-23 y 23-29	-	-	11,23 l/s
-------	--------	--------	----	-----------	--	------	------	---------------	---	---	-----------

VI-15	343800	244200	30	24/6/1975	<p>11-12,50 m: Material volcánico heterogéneo, poca arcilla, permeabilidad es mejor que la que presenta antes.</p> <p>12,50-15,25m: Material ígneo y gravas igual a 10,05 (?). Predominan las gravas que son de origen ígneo también.</p> <p>15,25 - 17,00 m: Arena de origen volcánico en general subredondeada. Mezclado con un poco de arcilla Permeabilidad regular a mala.</p> <p>17,00- 23,75 m: Grava fina compuesta de material volcánico.</p> <p>23,75 - 30,00 m: Material color gris, muy cristalizado, con alto contenido de cuarzo. La roca es sana, densa, la permeabilidad es baja.</p>	2,98	11,7		-	-	11,23 l/s
-------	--------	--------	----	-----------	---	------	------	--	---	---	-----------

M4?	339490	240778	40	30/10/2017	<p>0-1 m: Lastre y suelo orgánico limoso. P.A. Baja</p> <p>1-2 m: Arcilla negra plástica. P.A.: Muy baja</p> <p>2-5 m: Arcilla gris de consistencia blanda. P.A.: Muy baja</p> <p>5-10 m: Arenas de textura media a gruesa con gravillas con ≈ 20 % de limo. Permeabilidad aparente: Media</p> <p>10 – 17: Arenas textura media a muy gruesa con gravas, gravillas y ≈ 15 – 20 % de limo. Permeabilidad aparente: Media-alta. P.A.: Media.</p> <p>17 – 25: Roca basáltica muy alterada Se presentan fragmentos rocosos deleznales en matriz de arena muy gruesa. P.A.: Muy alta</p> <p>25 – 34: Basaltos poco alterados y con fracturas al inicio. P.A.: Media</p> <p>34 – 40: Roca basáltica del Complejo de Nicoya; sana y dura, color gris oscuro a negro. Permeabilidad aparente: Muy baja</p>	<p>0 al inicio.</p> <p>A los 17 m el nivel es de 0,20 m.</p> <p>A los 40 m de profundidad el nivel ascendió a 0 m (nivel del suelo)</p>	7,88 a las 51 horas	6-24 m y 30-36 m	0,005 y 0,0001	<p>primeros 60 minutos</p> <p>T1: 178 y a partir de 60 minutos</p> <p>T2 : 358</p>	21
-----	--------	--------	----	------------	--	---	---------------------	------------------	----------------	--	----

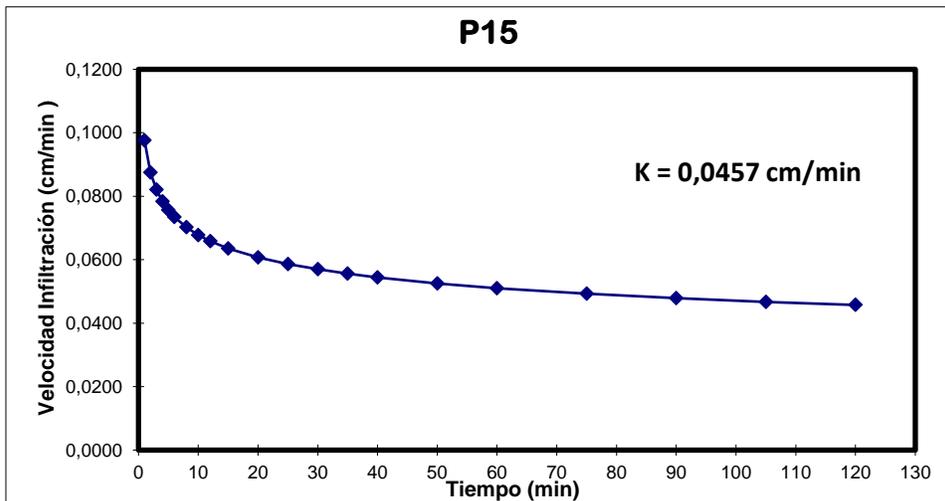
Anexo 4. Análisis Químicos en agua de pozos

Código de muestra	T°C	OD Campo	CaCO3	CE (µS/cm) campo	pH	STD (mg/l)	HCO3- (mg/L)	SO4	Cl (mg/L)	NO3 (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)
20A	29	6,71	192,8	370	6,93	759	244	8,4	5,1	2,1	8,2	0,1
22A	28,2	4,06	184,5	345	6,4	251	244	8,4	6,2	0,5	9,3	0,2
23A	28,3	2,87	207,0	421	6,28	795	305	9,5	6,9	0,2	11,5	0,4
32A	28,3	2,8	150,0	361	6,16	229	244	13,7	5,7	1,7	11,9	0,1
36A	29,9	5,79	220,0	430	7,45	337	244	4,1	18,3	3,11	15,7	0,3
37A	28,9	5,4	121,0	300	5,99	268	183	8,3	4,2	0,23	8,3	0,2
38A	29,2	5,03	154,0	400	6,17	273	244	2,1	4	0,11	9,1	0,2
42A	29,2	ND	164,0	300	5,86	235	244	19,6	4,2	ND	10	0,2
Código de muestra	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	F (mg/L)	Al (mg/L)	Sílice (mg/L)	Arsénico (µg/L)	Cadmio (µg/L)	Plomo (µg/L)	Níquel (µg/L)	N-NH4+ (mg/L)	N-UREICO (mg/L)	P (mg/L)
20A	41,2	21,6	0,5	0,1	22	3	0,5	<5	<20	ND	ND	0,1
22A	36,5	18,9	0,5	0,1	21	3	0,5	<5	<20	ND	ND	ND
23A	44,2	24	0,5	0,1	23	3	0,5	<5	<20	ND	ND	0,1
32A	41,4	20,1	0,5	--	49	3	0,5	5	20	ND	ND	0,1
36A	52,7	18,1	0,5	0,1	38,5	3	0,5	5	20	ND	ND	ND
37A	34,2	17,3	0,5	0,1	31,8	3	0,5	5	20	ND	ND	ND
38A	42,7	20,2	0,5	0,1	33,9	3	0,5	5	20	ND	ND	0,1
42A	40,2	16,2	0,5	0,1	31,6	3	0,5	5	20	0,3		0,1

Código de muestra	Fe (mg/L)	Zn (mg/L)	Cu (mg/L)	Mn (mg/L)	S (mg/L)	CO3 (cmol/L)
20A	ND	ND	ND	ND	2,5	ND
22A	ND	ND	ND	ND	2,5	ND
23A	ND	ND	ND	ND	2,3	ND
32A	ND	ND	ND	ND	2,9	ND
36A	ND	ND	ND	ND	2,6	ND
37A	ND	0,1	ND	ND	1,4	ND
38A	ND	0,2	ND	ND	1,9	ND
42A	ND	ND	ND	ND	2,7	ND

ND: No detectado por el laboratorio.

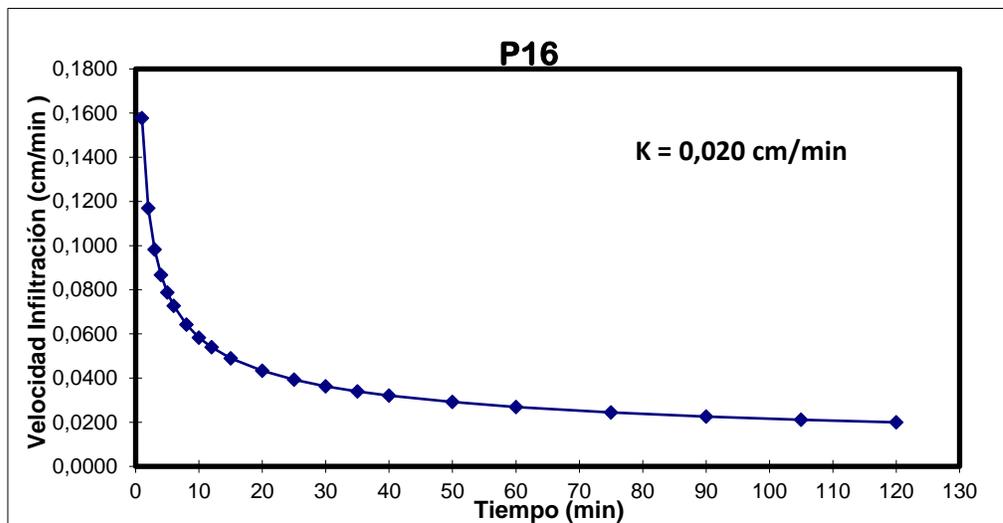
Anexo 5. Pruebas de infiltración del área de estudio



Prueba: P15. Coordenada:

Tipo de suelo (campo): Limo con arcilla, café oscuro.

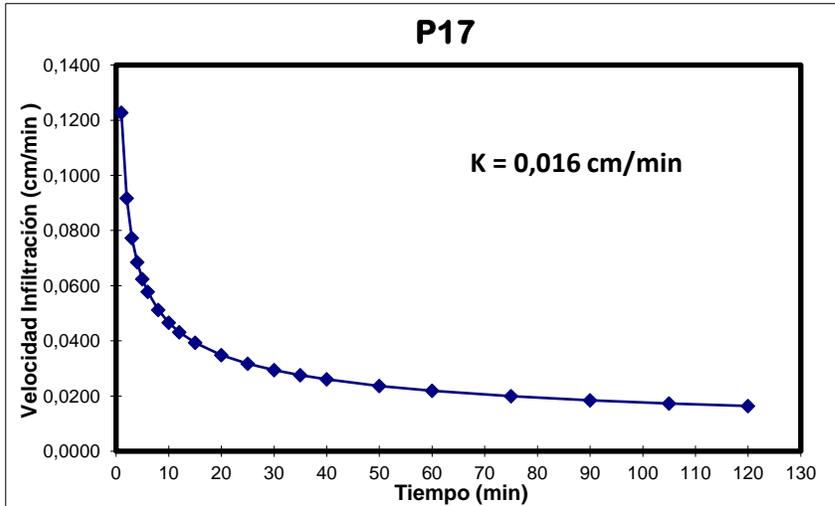
Uso de suelo: Bosque



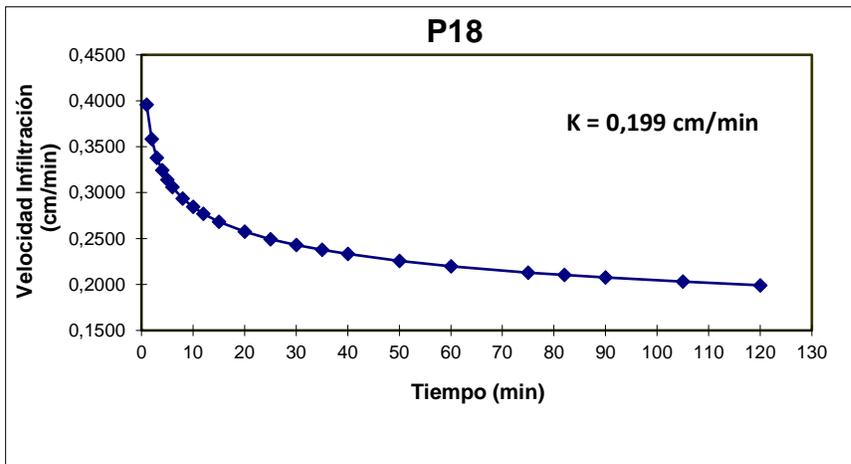
Prueba: P16. Coordenada:

Tipo de suelo (campo): Limo arcilloso café oscuro

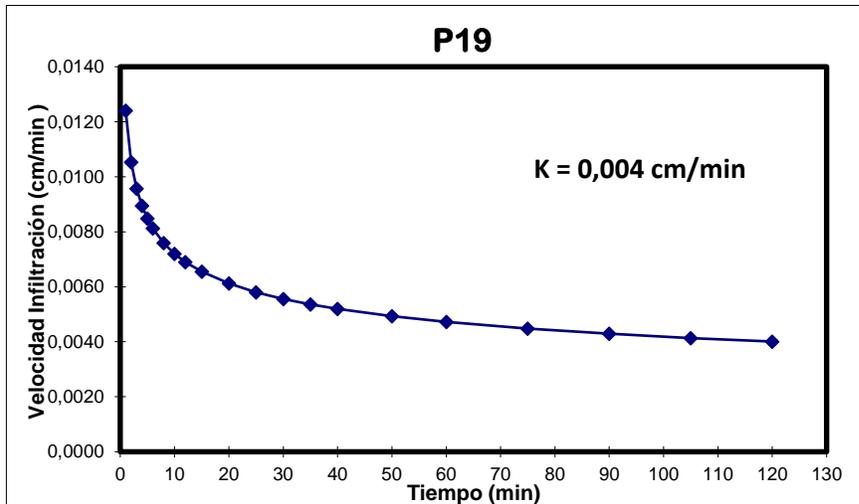
Uso de suelo: Cultivos



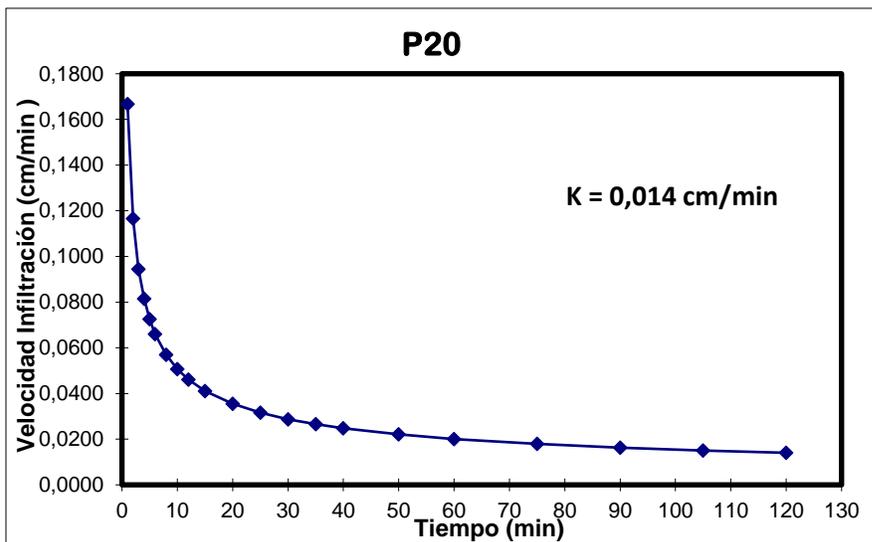
Prueba: P17. Coordenada:
 Tipo de suelo (campo): Limo arcilloso, café oscuro.
 Uso de suelo: Bosque



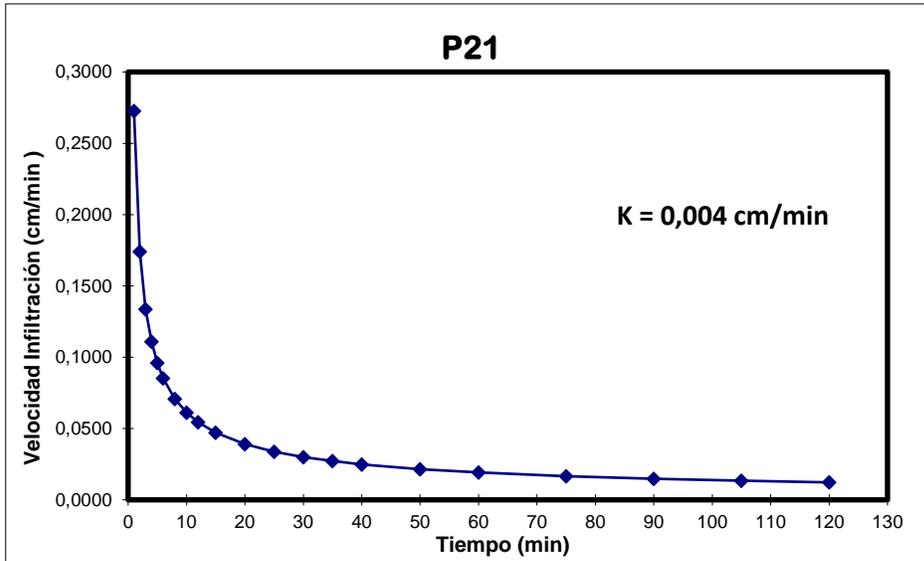
Prueba: P18. Coordenada:
 Tipo de suelo (campo): Limo con arena, rojizo (suelo residual Complejo Nicoya)
 Uso de suelo: Bosque



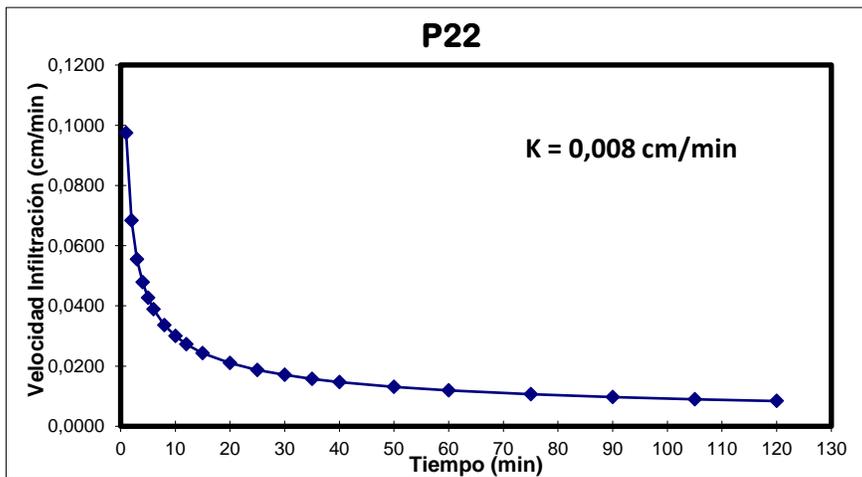
Prueba: P19. Coordenada:
 Tipo de suelo (campo): Capa superficial orgánica arcillosa (5 cm), en la parte inferior una capa de limo.
 Uso de suelo: Pastos.



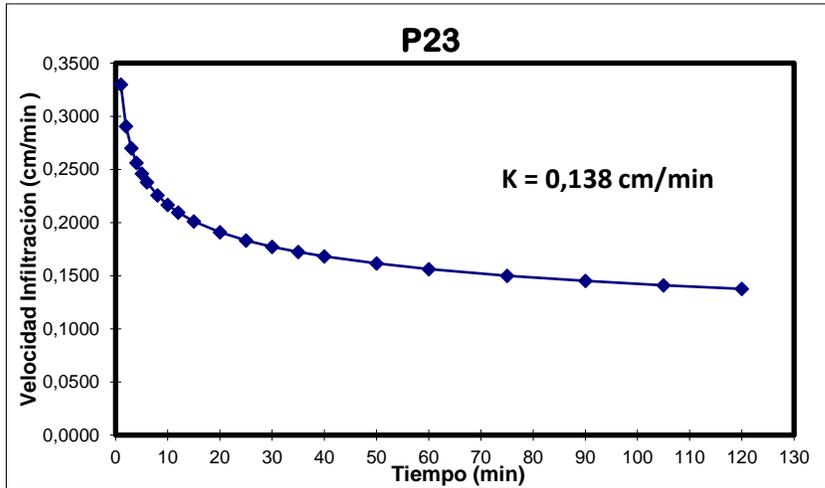
Prueba: P20. Coordenada:
 Tipo de suelo (campo): Arcilla limosa, café oscuro
 Uso de suelo: Pastos



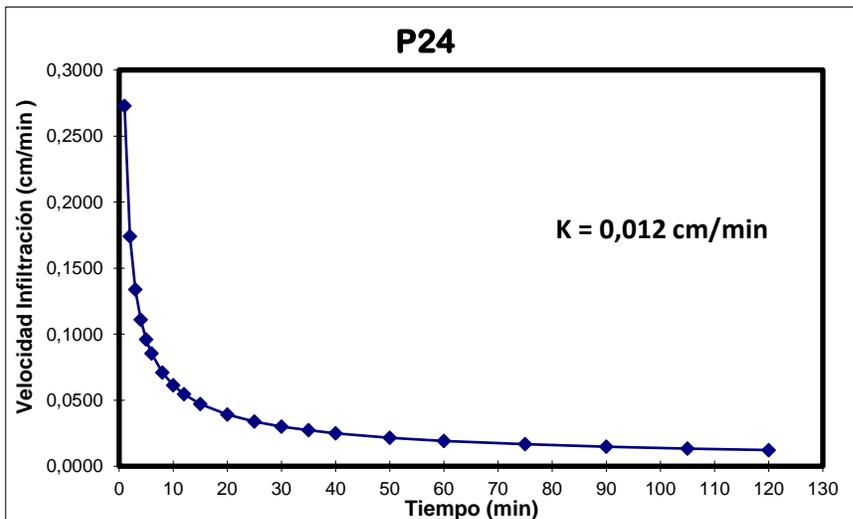
Prueba: P21. Coordenada:
 Tipo de suelo (campo): Limo arcilloso, café oscuro
 Uso de suelo: Pastos



Prueba: P22. Coordenada:
 Tipo de suelo (campo): Arcilla limosa, café oscuro
 Uso de suelo: pastos



Prueba: P23. Coordenada:
 Tipo de suelo (campo): Limo con algo de arena (suelo residual)
 Uso de suelo: Bosque y pasto



Prueba: P24. Coordenada:
 Tipo de suelo (campo): Limo arcilloso
 Uso de suelo: Pastos

