



**SERVICIO NACIONAL DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS, RIEGO Y AVENAMIENTO
SENARA**

**Dirección de Investigación y Gestión Hídrica
Unidad de Gestión Hídrica**

**EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA, HIDROGEOQUÍMICA
E ISOTÓPICA DEL ACUÍFERO HUACAS TAMARINDO**

Preparado por:
Hidrogeóloga Clara Luz Agudelo Arango
lagudelo@senara.go.cr

Abril 2013



Contenido

1.	Introducción	6
2.	Agradecimientos	8
3.	Objetivos	8
3.1	Objetivo general	8
3.2	Objetivos específicos.....	8
4.	Metodología	9
5.	Generalidades	10
5.1	Ubicación.....	10
5.2	Geología	11
6.	Caracterización Hidrogeológica.....	18
7.	Vulnerabilidad a la contaminación.....	24
8.	Recarga al acuífero	26
8.1	Método de Balance hídrico	26
8.2	Método de Hidrogramas	31
9.	Descarga del acuífero	32
9.1	Extracción	32
9.2	Flujo Subterráneo.....	35
10.	Disponibilidad de Agua en el acuífero.....	38
10.1	Balance de aguas subterráneas.....	38
10.2	Rendimiento sostenible y disponibilidad de agua:	38
10.2.1	Rendimiento Seguro en función de los resultados del BAS	39
10.2.2	Rendimiento Seguro en función de lo recomendado por Ponce (2007).....	40
11.	Caracterización hidrogeoquímica e isotópica	41
11.1	Aspectos técnicos del muestreo	41
11.2	Modelo hidrogeoquímico e isotópico	43
12.	Conclusiones.....	47
12.1	Hidrogeología	47
12.2	Vulnerabilidad a la contaminación.....	48
12.3	Disponibilidad de agua	49
12.4	Hidrogeoquímica e isotopía de las aguas del acuífero.....	51
13.	Propuesta de Plan de Aprovechamiento Sostenible (PAS) del acuífero Huacas Tamarindo	53
13.1	Propuesta de Manejo del acuífero	53
13.1.1	Recomendaciones para el monitoreo del acuífero:	53
13.1.2	Recomendaciones para garantizar la cantidad del recurso:	54
13.1.3	Recomendaciones para garantizar la calidad del recurso.....	59
13.3	Líneas estratégicas de acción	¡Error! Marcador no definido.
14.	Referencias.....	69



Índice de figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio. _____	10
Figura 2. Mapa geológico del acuífero Huacas Tamarindo _____	11
Figura 3. Microfotografía de un basalto típico del Complejo de Nicoya _____	12
Figura 4. Gabro típico del Intrusivo Potrero. _____	13
Figura 5: Microfotografía de una radiolarita del Cretácico Inferior Playa Real _____	14
Figura 6. Depósitos costeros _____	15
Figura 7. Vista desde la localidad 336249/259172. Viendo hacia el suroeste, se observa a la derecha al fondo la bahía Tamarindo. _____	16
Figura 8. Aluvión del río San Andrés, cerca a la localidad de Santa Rosa _____	16
Figura 9: Depósitos finos de inundación de los aluviones del río San Andrés _____	16
Figura 10. Aluvión cerca de la población de Huacas (342268/261943). _____	17
Figura 11. Aluvión en las cercanías de Matapalo (337604/260982) _____	17
(342268/261943). _____	17
Figura 12. Los cerros al norte de la población de Santa Rosa, muestran en la base algunos depósitos coluviales, ligeramente bisectados (foto tomada de 341875/255749). _____	17
Figura 13. Perfiles hidrogeológicos esquemáticos _____	18
Figura 14: Trasmisividades del acuífero aluvial Huacas Tamarindo _____	20
Figura 15. Hidrograma de precipitación vs nivel estático, a) pozo perforado PMN-1 Cuenca cl río San Andrés, b) pozo excavado PMN-14 cuenca media del río Lajas. _____	22
Figura 16. Mapa de efluencia e influencia de los ríos Lajas, Matapalo y San Andrés _____	23
Figura 17. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación Ac. Huacas Tamarindo _____	25
Figura 18. Delimitación de zonas de recarga y ubicación de pruebas de infiltración y de suelos __	27
Figura 19. Cobertura característica del acuífero aluvial Huacas Tamarindo, boscosa en los cerros y pastos en la planicie aluvial (Foto de los alrededores de Huacas) _____	29
Figura 20. Zonificación por recarga potencial al acuífero aluvial Huacas Tamarindo _____	30
Figura 21. Isofreáticas y líneas de flujo del acuífero aluvial Huacas Tamarindo _____	35
Figura 22. Mapa de ubicación de sitios de muestreo fisicoquímico e isotópico _____	42
Figura 23. a) Diagrama Schoeller y b) Gráfico Piper _____	44
Figuras 24. Diagramas a) Stiff y b) Piper para las estaciones HT-21 muestra de agua subterránea del pozo del acueducto Huacas ubicado en la sub cuenca del río Lajas sector de Huacas y HT-27 muestra de agua superficial del río Matapalo. _____	45
Figura 25. Comportamiento isotópico del agua en el acuífero Huacas Tamarindo. _____	46
Figura 26. Comportamiento estacional isotópico de las aguas superficiales y subterráneas. ____	46
Figura 27. Gráficos de O18 vs fecha de muestreo muestra el comportamiento temporal de las aguas subterráneas _____	47



Índice de cuadros

Cuadro 1. Parámetros hidrogeológicos por unidad de recarga _____	20
Cuadro 2. Variación de los parámetros hidrogeológicos por unidad de recarga _____	21
Cuadro 3. Variación estacional de los niveles de aguas subterráneas _____	22
Cuadro 4. Precipitación media y Evapotranspiración potencial _____	28
Cuadro 5. Resumen del Balance hídrico y la recarga potencial por zonas de recarga _____	28
Cuadro 6. Recarga potencial por sector de recarga vs unidad geológica _____	30
Cuadro 7. Resumen Recarga Potencial por zona de recarga _____	31
Cuadro 8. Recarga Potencial por el método de hidrogramas de pozos _____	32
Cuadro 9. Parámetros para el cálculo de volúmenes de explotación según el uso del agua _____	33
Cuadro 10. Extracción por uso _____	34
Cuadro 11. Extracción por unidad de recarga _____	34
Cuadro 12. Niveles dinámicos máximos reportados en los pozos del acueducto BEKO _____	36
Cuadro 13. Flujo subterráneo por unidad de recarga _____	37
Cuadro 14. Balance de Aguas Subterráneas _____	38
Cuadro 15. Disponibilidad de agua del sistema acuífero Huacas - Tamarindo _____	40
Cuadro 16. Tipo de análisis y números de muestras por sitio y campaña de muestreo _____	41
Cuadro 17. Sitios de muestreo fisicoquímico e isotópico _____	41
Cuadro 18. Método de análisis de las muestras de agua recolectadas _____	43
Cuadro 19. Comportamiento isotópico anómalo del agua del pozo HT15 – casa amarilla _____	45
Cuadro 20. Pozos en proceso de concesión sin número de pozo en el ANP _____	57
Cuadro 21. Pozos perforados sin uso _____	57
Cuadro 22. Líneas de acción estratégicas para el manejo del acuífero y la construcción de los Planes de Aprovechamiento sostenible _____	61



Anexos

A1. Pozos

- A1.1 Mapa de ubicación de pozos Inventario de Pozos
- A1.2 Inventario de pozos
- A1.3 Registro de concesiones
- A1.4 Pozos de abastecimiento público
- A1.5 Pruebas de bombeo
- A1.6 Parámetros hidrológicos
- A1.7 Niveles de aguas subterránea
- A1.8 Extracción del acuífero Huacas Tamarindo

A2. Vulnerabilidad a la contaminación

- A2.1 Metodología
- A2.2 Aforos diferenciales
- A2.3 Mapas temáticos

A3. Recarga potencial

A3.1 Método Balance hídrico Schosinsky y Losilla, 2002.

- Precipitación estación Cartagena
- Evapotranspiración potencial estación Santa Cruz
- Pruebas de infiltración y muestreo de suelos
- Uso del suelo
- Hojas de cálculo Schosinsky
- Recarga potencial por sector – Método balance hídrico

A3.2 Método hidrograma de pozos

- Valores de rendimiento específico de diferentes Materiales de la corteza terrestre
- Recarga por sector – Método hidrogramas de pozos

A3.3 Rendimiento seguro teórico aplicando el concepto de Ponce 2007

A4. Análisis químicos e isotópicos

- A4.1 Código de los informes de laboratorio y número de muestra asignado por el Centro de Investigación Ambiental (CICA)
- A4.2 Reportes de laboratorio CICA Y OIEA
- A4.3 Cuadro de resultados de análisis de aguas
- A4.4 Gráficos y diagramas para análisis de los parámetros fisicoquímicos



1. Introducción

La zona donde se localiza el acuífero de Huacas Tamarindo, ubicado en la zona costera del cantón de Santa Cruz de Guanacaste en Costa Rica, se encuentra sujeta a un creciente desarrollo turístico y habitacional y enfrenta una crisis importante con respecto al desarrollo y al manejo integral y sostenible del recurso hídrico. La ocupación no planificada del territorio, ocasiona la impermeabilización de los suelos con aptitud para la recarga, el deterioro de las cuencas por la deforestación, la contaminación de sus suelos y aguas y una alta explotación de acuíferos, que están atentando con la disponibilidad del recurso hídrico ya sea por calidad o por cantidad. Esta situación ha desencadenado en conflictos por el acceso al agua de los mantos acuíferos entre las comunidades costeras de Santa Cruz con algunos representantes del sector turístico local.

La zona de los distritos Tamarindo y Cabo Velas, es una de las regiones costeras del Pacífico Norte de Costa Rica que registra mayor crecimiento turístico y económico. Según censo del 2011 del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), la población es de 6375 y 3362 habitantes, el número de viviendas es de 3825 y 2117, con un promedio de habitantes por casa de 3.1 y 3.0 respectivamente.

El acuífero Huacas-Tamarindo es considerado como de alto grado de explotación y alto grado de intervención, sobre el cual se desarrolla una actividad económica, principalmente turística, con un crecimiento acelerado no planificado.

Los estudios realizados en el acuífero Huacas Tamarindo en el año 2003 muestran un estado de estrés en el acuífero, indicando que el acuífero se encontraba en una condición de sobreexplotación, donde la recarga potencial al acuífero es similar a las extracciones de agua por medio de pozos.

Debido a esto el acuífero se encuentra con restricción a la extracción de agua por pozos desde el 2003, lo cual limita en alguna medida el crecimiento socioeconómico y causa conflictos entre las comunidades, municipalidad, desarrolladores e instituciones del estado, debido a la necesidad de satisfacer las demandas de abastecimiento público, comercio y turismo. Sin embargo, las acciones del Estado en Pro del recurso hídrico son escasas, evidencia de esto es que se sigue desarrollando intensivamente la zona lo cual conlleva a la explotación ilegal del recurso.

Solamente bajo un proceso de explotación controlada con participación de las comunidades, sector productivo e institucional se puede garantizar un manejo sostenible, es así que, uno de los fines primordiales de la investigación es darle a la municipalidad, comités, asociaciones u otro tipo de organizaciones; los instrumentos técnicos, para lograr establecer un ordenamiento y regulación de su territorio a fin de proteger la calidad y la cantidad de agua subterránea.

Es por esta razón, que el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), la Escuela Centroamericana de Geología (ECG) de la Universidad de Costa Rica (UCR), el Centro de Investigación de Contaminación Ambiental de la UCR con el apoyo de la Municipalidad de Santa Cruz y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), han unido esfuerzos con el fin de profundizar el nivel de investigación en hidrogeología y la hidrogeoquímica del acuífero, de



manera que a partir de los nuevos resultados se revalorará la condición del acuífero a fin de definir políticas para la explotación sostenible del recurso hídrico subterráneo.

La presente investigación se llevó a cabo en el marco de los siguientes convenios y proyectos:

- Proyecto Regional RLA/8/041 “Aplicación de herramientas isotópicas para el manejo de acuíferos costeros” del Organismo Internacional de Energía Atómica(OIEA) y Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), cuyo objetivo es profundizar el nivel de conocimiento en hidrogeología del acuífero Huacas Tamarindo, por medio de la aplicación de herramientas hidrogeoquímicas e isotópicas.
- Carta de entendimiento SENARA - UCR a través de la Escuela Centroamericana de Geología (ECG) “Para la ejecución de los estudios de los acuíferos Huacas, Tamarindo y Playa Grande en Santa Cruz” cuyo objetivo fue la ejecución de los estudios de geología, geofísica y de suelos de las cuencas Matapalo, San Andrés y del Estero Ventanas.
- Carta de entendimiento SENARA - UCR a través del Centro de Investigación de Contaminación Ambiental (CICA) “Para la ejecución de los estudios de los acuíferos de Huacas, Tamarindo en el cantón de Santa Cruz y los acuíferos en la zona aluvional de Parrita” cuyo objetivo fue realizar las investigaciones necesarias para la ejecución de los estudios hidrogeoquímicos de las cuencas que albergan los acuíferos de Huacas - Tamarindo en el cantón de Santa Cruz y los acuíferos en la zona aluvional de Parrita.
- Convenio de cooperación SENARA – Municipalidad de Santa Cruz “Para el manejo sostenible del recurso hídrico en el cantón de Santa Cruz, cuyo objetivo es realizar la caracterización hidrogeológica del cantón, con el fin de establecer mecanismos para el manejo y uso de las aguas subterráneas en el cantón de Santa Cruz.

La investigación contempló cuatro temas de estudio:

- Elaboración del modelo hidrogeológico conceptual.
- Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero.
- Valoración de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación.
- Caracterización hidrogeoquímica e isotópica

Con la investigación se buscó:

- 1) Profundizar el nivel de conocimiento en hidrogeología del acuífero Huacas Tamarindo, con el fin de revalorar la condición del acuífero en cuanto a disponibilidad de agua en el acuífero por medio de la realización del balance de aguas subterráneas por subcuencas, con el objeto de definir políticas para la explotación sostenible del recurso hídrico subterráneo y determinar la continuidad o no de la restricción de perforación en la zona aluvional del acuífero.
- 2) Evaluar la condición de vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas a la contaminación, según los mecanismos naturales de los suelos que recubren el acuífero, en



cuanto a su capacidad de infiltración y de atenuación natural de los contaminantes en el perfil del suelo y la aptitud de los terrenos de la cuenca para el desarrollo de actividades socioeconómicas.

- 3) Aplicar herramientas hidrogeoquímicas (iones mayoritarios) e isotópicas (deuterio y oxígeno-18), como un mecanismo para validar del modelo hidrogeológico elaborado con herramientas hidrogeológicas convencionales (geología, geofísica, muestreos de suelos, litológicas, propiedades hidráulicas, etc), específicamente en determinar las conexiones hidráulicas entre los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, y evaluar el dinamismo del sistema hidrogeológico.
- 4) Generar una propuesta de Plan de Aprovechamiento Sostenible del acuífero Huacas Tamarindo a fin de garantizar la calidad y cantidad del agua que en él se almacena.

2. Agradecimientos

Se quiere agradecer a todas las personas que colaboraron con la realización del estudio, a los vecinos de la zona y encargados de acueductos que permitieron realizar las mediciones en los pozos, a los compañeros Percy Denyer, Marco Barahona, Mario Arias de la Escuela de Geología de la UCR, en el levantamiento de la geología, geofísica y análisis de suelos, Wilson Beita, Marco Juárez Guido, Manuel Jiménez, Melvin Alpizar y Miguel González del centro de Investigación en Contaminación Ambiental de la UCR, que colaboraron en los muestreos y análisis químicos de las aguas, Luis Toro, Luis Araguas, Daniel Martínez y Jane Gerardo del Organismo de Energía Atómica, en la asesoría técnica, apoyo en capacitación y en la realización de los análisis isotópicos, al geólogo Mauricio Zúñiga quien durante su práctica profesional ayudo al procesamiento de los datos, finalmente a los compañeros de la Dirección de Investigación y Gestión Hídrica del SENARA, Rodolfo Arguedas, Katherine Briones, Rafael Matamoros, Carlos Romero, por todo el apoyo brindado.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Generar instrumentos técnicos que permitan a la Municipalidad de Santa Cruz establecer un ordenamiento y regulación de su territorio a fin de proteger la calidad y la cantidad de agua subterránea del acuífero Huacas Tamarindo, en la zona costera del cantón de Santa Cruz, Guanacaste.

3.2 Objetivos específicos

- Realizar un modelo hidrogeológico conceptual a partir de la información de la información geológica, geofísica, de suelos, litológica y de monitoreo de pozos disponible en la zona.
- Calcular la disponibilidad de agua por subcuencas del sistema acuífero Huacas Tamarindo.
- Determinar la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas de la zona en estudio.



4. Metodología

Para realizar el estudio hidrogeológico, se llevaron a cabo las siguientes actividades:

Revisión y análisis de la información existente en las bases de datos de pozos en el SENARA y la Dirección de Aguas del MINAET, de la información de datos climatológicos en la base de datos del SENARA y del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), y de estudios hidrogeológicos existente de la zona.

El levantamiento de la información geológica local (escala 1:50000), geofísica y de suelos del área de estudio fue realizado por la Escuela Centroamericana de Geología, 2009. Se realizaron 25 pruebas de infiltración y muestreos de suelos analizadas mediante los métodos de Kostiakov (también conocido como Kostiakov-Lewis) y Kostiakov modificado, 16 sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (TDEM) utilizando bobinas cuadradas de 25 m de lado. La selección de estos métodos está basada en el poder de resolución y tipo de información que proporcionan (Arias, 2002a; Arias, 2002b) y tres perfiles electromagnéticos en las cercanías del estero Tamarindo y 14 sondeos electromagnéticos (SEM), con mediciones para cada separación de bobinas (10, 20 y 40 m) y para cada modo (vertical y horizontal). Los sitios de las pruebas de infiltración y muestreo de suelos fueron seleccionados, considerando la geología de la zona, de tal manera que quedaran distribuidos sobre diferentes tipos de litología.

La determinación de las características hidráulicas e hidrogeológicas, tipo de acuífero, grado de confinamiento hidráulico, descripción de los materiales que conforman la zona no saturada y saturada del acuífero, entre otros, se basó en la interpretación de los registros de perforaciones contenidas en la base de datos del Archivo Nacional de Pozos y Manantiales del SENARA y de la información recopilada en el campo.

A partir de la descripción litológica de las perforaciones, la información geológica y geofísica se elaboró los perfiles hidrogeológicos, los cuales permitieron esquematizar la conformación del acuífero en diferentes sectores.

Para determinar la profundidad del nivel de agua subterránea, el levantamiento de las isofreáticas y la definición de la dirección del flujo subterráneo, así como cuantificar la descarga del acuífero al océano, la cual se calculó por medio de la ecuación de Darcy, se utilizó la información de la red de monitoreo de niveles de agua en 25 pozos establecida por SENARA desde el año 2002, del inventario de pozos realizado en marzo del 2010 y de los registros de perforación existente.

La evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero, se realizó utilizando la metodología GOD, propuesta por Foster, la cual evalúa tres variables fundamentales: Grado de confinamiento hidráulico del acuífero o tipo de acuífero. Ocurrencia del sustrato suprayacente en cuanto a sus características litológicas y de grado de consolidación, que determinan su capacidad de atenuación de contaminantes. Distancia o profundidad al agua en los acuíferos no confinados, o distancia o profundidad del techo del acuífero para acuíferos confinados. Para cada una de estas variables se obtiene un mapa temático de G, O y D, los cuales se superponen brindando el mapa resultante de vulnerabilidad intrínseca del acuífero.



La recarga potencial al acuífero fue calculada utilizando la metodología de Schosinsky & Losilla, la cual considera parámetros como la precipitación, evapotranspiración, capacidad de infiltración de los suelos, características físicas de los suelos, cobertura del terreno, profundidad de raíces, entre otros.

El volumen de extracción de agua subterránea por medio pozos se calculó a partir de la información recabada del inventario de pozos en campo y de la aportada por los administradores de agua para abastecimiento público, así mismo se trabajó con información de concesión de aguas y de los registros de informes de perforación y solicitudes de perforación del Archivo Nacional de Pozos y Nacientes del SENARA.

La determinación de la influencia e efluencia de los principales ríos al acuífero Huacas Tamarindo se realizó a partir del análisis de los resultados de una campaña de aforos diferenciales de ríos realizada a finales de la época seca.

Para estudiar las características hidrogeoquímicas e isotópicas se efectuaron cuatro campañas de muestreo de agua subterránea, agua superficial, estero y precipitación, los análisis para los parámetros físico-químicos fueron realizados en el Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA) de la UCR. Los análisis isotópicos fueron realizados en el Laboratorio de Espectrometría de Masas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con el apoyo financiero del Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, por sus siglas en inglés).

5. Generalidades

5.1 Ubicación

El área de estudio corresponde al acuífero coluvio aluvial Huacas Tamarindo (Figura 1), el cual se encuentra en el Pacífico Norte de Costa Rica en el cantón de Santa Cruz, provincia de Guanacaste entre las coordenadas 253000N - 265000N y 333000W - 346000W.

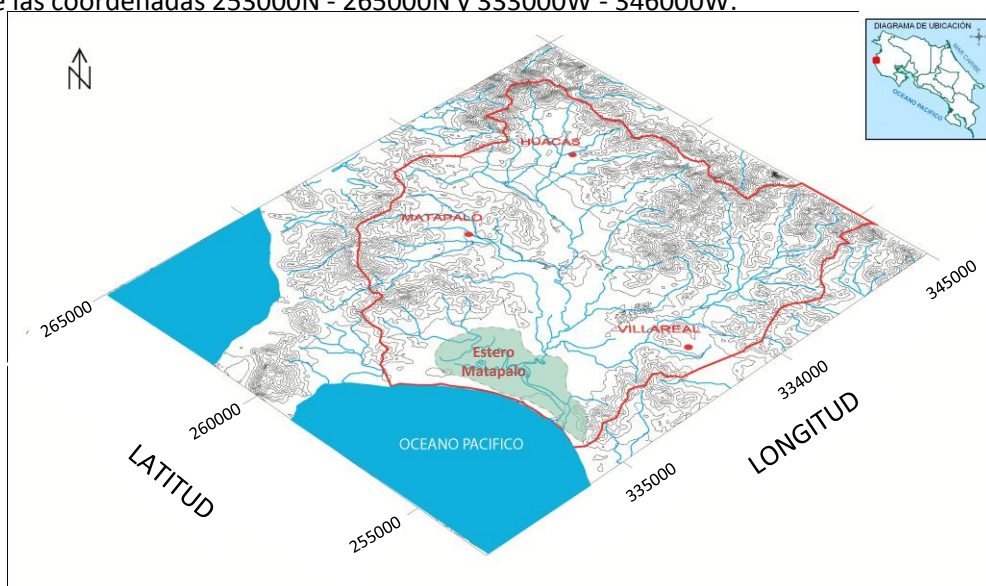


Figura 1. Ubicación del área de estudio.



El acuífero se encuentra limitado a la cuenca de los ríos Lajas y San Andrés, con un área de 85.6 km², ambos ríos descargan sus aguas al estero Matapalo al oeste de la zona de estudio, el cual a su vez se descarga al Océano Pacífico. El Estero Tamarindo drena un terreno de marisma con manglar de más de 3 km², separado del océano por un cordón de arena litoral de entre 200 y 600 m de ancho que deja una faja de agua a manera de canal que conforma el estero que desemboca al mar. Los ríos y quebradas son de carácter intermitentes.

El estero de Tamarindo, forma parte del Parque Nacional Las Baulas y del Refugio Natural de Vida Silvestre de Tamarindo, constituye un gran estuario, manglar y bosque tropical seco, y es uno de los sitios de anidación de la tortuga Baula, que es la tortuga más grande del mundo y que se encuentra en peligro de extinción, según la Convención para el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Flora y Fauna (CITES). En 1993 el Estero de Tamarindo obtuvo la declaratoria de Humedal de importancia Mundial por la Convención RAMSAR.

5.2 Geología

La geología de la zona de estudio fue levantada por el geólogo Percy Denyer de la Escuela Centroamericana de Geología, como parte de los aportes acordados en el convenio marco suscrito entre la Universidad de Costa Rica (UCR) y el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA) y, sustentado en la carta de entendimiento específica para la ejecución de los estudios de los acuíferos Huacas, Tamarindo y Playa Grande en el cantón de Santa Cruz. Los documentos elaborados “Geología, suelos y geofísica de las cuencas Matapalo, San Andrés y Estero Ventanas” de septiembre del 2008 y “Detalle de los depósitos cuaternarios” de julio del 2009, sustentan la base geológica utilizada para el estudio. La descripción geológica se retoma de dichos documentos (Figura 2).

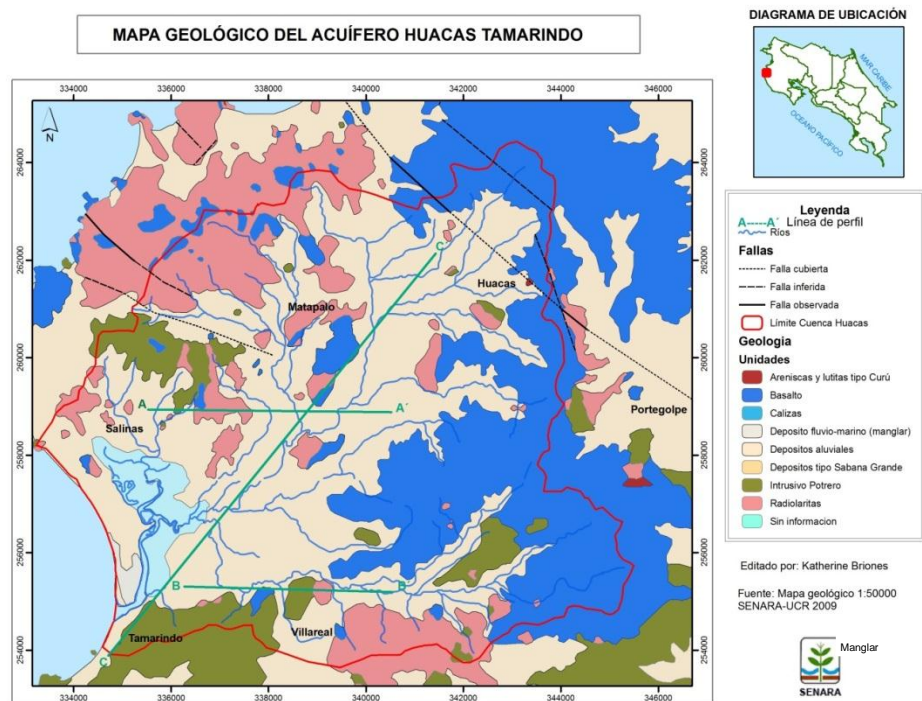
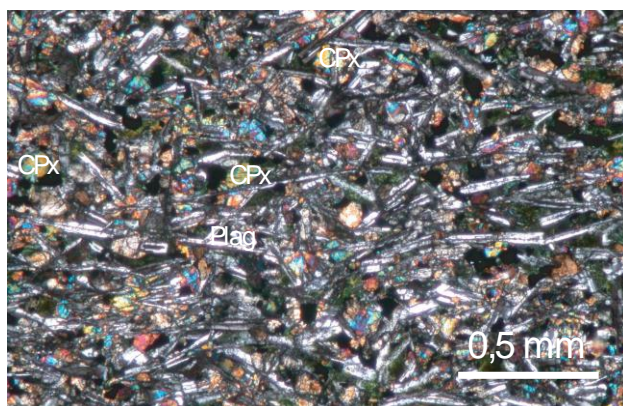


Figura 2. Mapa geológico del acuífero Huacas Tamarindo



- **Basaltos**

Corresponden con la Unidad Matapalo y la unidad Esperanza (Kuijpers, 1979 y 1980) o al Complejo Inferior (Gursky, H.-J. 1989 y Gursky, H.-J. & Schmidt-Effing, 1983). Sin embargo, en este trabajo no se hacen diferenciaciones geoquímicas, sino únicamente se utilizaron criterios de campo. Los basaltos son de color verde a gris oscuro. Destaca la ausencia de basaltos en almohadilla, muy citados y descritos en algunos trabajos previos. Su textura es afanítica (Figura 3), hasta ligeramente porfírica, observándose a veces fenocristales de plagioclasa, augitas y opacos.



**Figura 3. Microfotografía de un basalto típico del Complejo de Nicoya
(Muestra tomada cerca de Huacas)**

Los minerales de alteración del tipo clorita y/o óxidos de hierro son los más frecuentes. En general se presentan muchas vetillas de calcedonia, ceolitas, ópalo, y rara vez, de calcita. El alto grado de fracturamiento presente indica el intenso tectonismo que los ha afectado. La mayoría de los basaltos se originaron en un vulcanismo intraplaca. Con base en la geoquímica hecha hasta la fecha (Ragazzi, 1996; Sinton et al., 1997; Beccaluva et al., 1999, Hauff et al., 2000), se concluye que su origen geotectónico como parte del evento del Plateau Caribe (Donnelly, 1973, 1992; Denyer et al., 2006). Su signatura geoquímica corresponde con el Punto Caliente de Galápagos (Hauff et al., 2000).

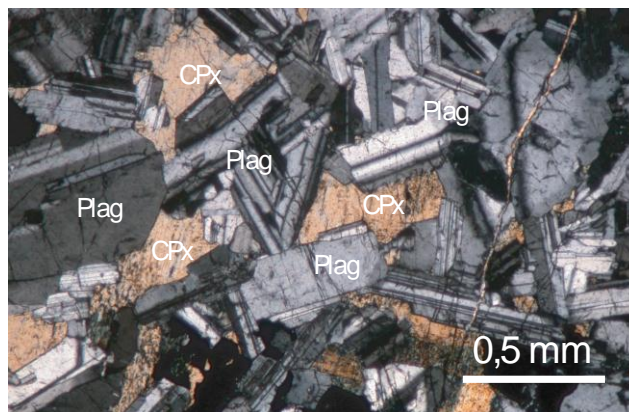
- **Intrusivo Potrero**

Está compuesto por gabros, doleritas y en menor grado plagiogranitos. Está distribuido. El cuerpo total cubre un área superior a los 200 km², y se ubica principalmente al nor-noreste del área de estudio. Los gabros (hasta microgabros o doleritas) son macroscópicamente de coloración oscura, dé una textura porfírica y muy rica en minerales máficos con acumulaciones esféricas centimétricas de piroxenos. Es muy común encontrarlos como diques o "sills", que en algunas ocasiones están representados por cumulitas de bitownita, descritas anteriormente por Burgois et al. (1984). A nivel microscópico (Figura 4) presentan una textura holocristalina-hipidiomórfica-intergranular a ligeramente subofítica con fenocristales de plagioclasa (tipo labradorita), augita títanifera, algunos opacos, rara vez apatito, olivino, y comúnmente cloritas y nontronitas (?) como minerales de alteración. A veces son difíciles de diferenciar de los basaltos, sobre todo a nivel



macroscópico, para lo cual ayuda el tipo de meteorización, que en los intrusivos presenta arenitización muy destacante.

Relacionados con estos intrusivos se presentan diques de doleritas con nódulos de anortositas (An 88-83) (Tournon, 1984), los cuales se caracterizan por un aumento del diámetro de los cristales de las paredes hacia el centro. Los diámetros van de centimétricos en las paredes hasta decimétricos en el centro; las plagioclasas son redondeadas sin zonación y flotan homogéneamente en la dolerita. La alteración se da en forma de arenitización. Este tipo de dique se ha relacionado con cratones del Arcaico donde las plagioclasas alcanzan diámetros superiores a los 30 cm y actualmente estos diques se encuentran asociados con intrusiones generadas en puntos calientes, dorsales, dorsales asísmicas y fallas transformadas. En el punto caliente de Galápagos se está dando este mismo proceso, con formación de cristales de anortita superiores a los 3 cm (Phinney & Morrison, 1988). En muchas ocasiones, como en Cabo Velas (Figura 2), al norte de Tamarindo, los gabros presentan una transición a plagiogranitos. Los cuales son rocas intrusivas de coloración blanzuca, textura holocristalina, rica en minerales leucocráticos (cuarzo y feldspatos sódicos) así como algunos máficos del tipo hedenbergita (?). Tournon (1984), denomina a estos intrusivos como "Intrusivo de Ocotál" al cual lo describe como un granófilo de baja temperatura (1010-1018°C) y de baja presión y lo relaciona con las doleritas como una cristalización simultánea de dos líquidos inmiscibles entre sí, con lo cual los autores concuerdan; pues no se observa un contacto definido, sino más bien una transición entre el plagiogranito y el gabro, como en playa Carbón (Cabo Velas).



**Figura 4. Gabro típico del Intrusivo Potrero.
Muestra tomada al sur de El Encanto
Plag=plagioclase, CPx=clinopiroxeno**

- **Radiolaritas**

Forman parte de la Unidad Matapalo o la Formación Punta Conchal (H.-J. Gursky, 1989), aunque subordinadamente existen radiolaritas en la Unidad Esperanza (Kuijpers. 1979 y 1980; Baumgartner, 1987). Se encuentran concentrada en el sector SW del área mapeada, entre el poblado de Huacas, playa Cabuya (latitud 261 N, longitud 333 E, hoja Matapalo) y punta Salinas (latitud 269.5 N, longitud 340 E, en la hoja Matapalo). También se presentan al sur de Cartagena (hoja Belén) y al norte y sur de Sardinal (hoja Carrillo Norte).



Se trata de rocas de origen pelágico de grano fino a muy fino, estratificadas en estratos milimétricos a centimétricos. Presentan variedad de coloraciones (rojo, verde, amarillo, blanco). Se encuentran replegadas en pliegues cerrados hasta isoclinales, siendo los tipo chevron muy frecuentes, dando a estas rocas un aspecto caótico. Frecuentemente se encuentran asociadas con mineralizaciones de manganeso y hierro, resultado de una alteración hidrotermal, lo que provoca además que las radiolaritas se conviertan en jaspes y pedernales de colores rojo y amarillo muy intensos. El proceso está relacionado con un vulcanismo exhalativo de fondo oceánico como el que se está dando actualmente en la dorsal Galápagos (Kuijpers & Denyer, 1979; Denyer & Kuijpers, 1979). Las mineralizaciones de manganeso se presentan en forma diseminada y en nódulos (Figura 5).

Dado el alto grado de tectonismo es difícil determinar su espesor. Kuijpers (1979) lo considera de unos 30 metros, Sprechmann (1984) de unos 40 metros, Gursky H.-J. (1989) indica que el espesor original alcanzó un mínimo de 50 m, pero que ha sido disminuido por actividad tectónica, ígnea o erosión. Presenta una fuerte deformación tectónica (pliegues isoclinales-chevron) y un alto grado de fallamiento. Destaca una gran plasticidad durante la deformación, la cual pudo haberse visto favorecida con el calentamiento de las radiolaritas por el intrusivo. En algunos lugares, como en el Cerro Encanto (Latitud 265 N, longitud 337 E) y Cuesta Huacas (latitud 261,5 N, longitud 343,6 E), dieron paso a metamorfismo de contacto. En ambos sitios las cornubianitas no se presentan plegadas; en el Cerro Encanto sirven como substrato a los pliegues plásticos. Baumgartner (1984 y 1987), con base en los restos de radiolarios, ha logrado una zonificación temporal, concluyendo que existen asociaciones de radiolarios de diferentes edades que van desde el Jurásico Medio (Bajociense) en la zona de Huacas-Cartagena, hasta Jurásico Superior-Cretácico Inferior en el arca de Brasilito y Playa Concha.

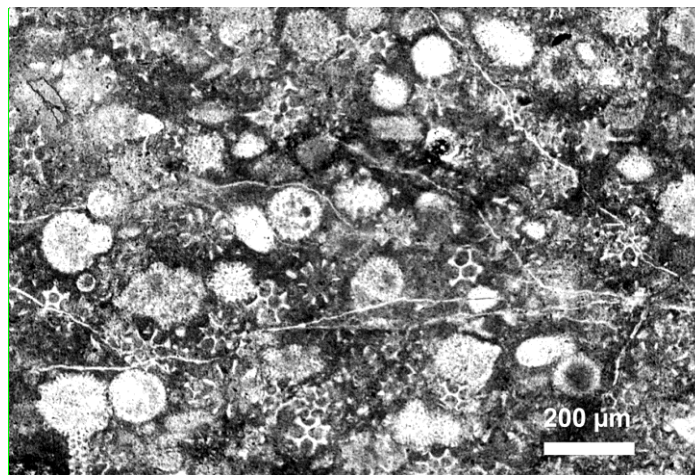


Figura 5: Microfotografía de una radiolarita del Cretácico Inferior Playa Real (localidad KL-13 en mapa original). Esta sección muestra una dominancia de *pantanelliidos*.

Las radiolaritas se caracterizan por estar sumamente replegadas, en parte por un mecanismo sinsedimentario. El plegamiento es muy plástico, lo cual puede haber sido provocado por el calentamiento del intrusivo. El comportamiento de las radiolaritas refleja que están controlados en gran parte por la presencia de las masas ígneas (Arias, 1992).



- **Cobertura sedimentaria**

Existen afloramientos de la cobertura sedimentaria del Cretácico y Paleoceno, los cuales se pueden observar en el mapa de la figura 2, entre Playa Grande y El Encanto, corresponde con una secuencia de sedimentos pelágicos tipo Sabana Grande sobreyacidos por areniscas y lutitas tipo Curú en Punta Conejo (Denyer & Arias, 1993, Rivera, 1990). Un pequeño afloramiento de calizas de Barrahonda cerca a Cabo Velas (Denyer & Arias, 1993).

- **Depósitos aluviales y fluvio-marinos recientes**

Se distinguieron cuatro unidades cuaternarias en la zona de estudio, a saber:

- Depósitos costeros
- Marismas y pantanos
- Aluvión
- Coluvio y suelos residuales

Los depósitos costeros (p.e. en la localidad /333635/258368) corresponden con arenas no consolidadas, en general de granulometría media, a veces laminadas (ver Figura 6). Con presencia de fragmentos de corales de 2-3 cm de diámetro, fragmentos angulosos de radiolarita y con restos de conchas. Se pudieron observar espesores máximos de 2 m, localizados longitudinalmente paralelos a la línea de costa actual (ver Mapa Geológico Figura 3).



Figura 6. Depósitos costeros (localidad /333635/258368)

Los marismas y pantanos corresponden con el estero Tamarindo (Ventanas), que cubre un área ligeramente menor a los 5 km². Es abastecido por los ríos Matapalo y San Andrés. Los aluviones cubren una extensa zona, como se puede apreciar en la figura 7.



Figura 7. Vista desde la localidad 336249/259172. Viendo hacia el suroeste, se observa a la derecha al fondo la bahía Tamarindo.

Los aluviones están compuestos por intercalaciones de conglomerados brechosos, arenas gruesas, medias y finas, así como algunos estratos limosos. En general son de color café claro, hasta cremoso. A veces presentan laminaciones (Figura 8) y/o estratificación cruzada poco desarrollada.



Figura 8. Aluvión del río San Andrés, cerca a la localidad de Santa Rosa (339987/255320). Nótese la laminación de las arenas finas y limos. Los conglomerados brechosos son centimétricos, subangulosos y en contacto por matriz.

En varias localidades se puede observar que los aluviones corresponden con planicies de inundación en las llanuras cercanas a la costa (Figura 9).



Figura 9: Depósitos finos de inundación de los aluviones del río San Andrés en las cercanías del poblado de Villareal (338600/255540).



En otros casos, se nota un aluvión más grueso, compuesto por conglomerados de clastos redondeados y en contacto por clasto, intercalados con arenas conglomerádicas y gruesas (Figuras. 10 y 11).



Figura 10. Aluvión cerca de la población de Huacas (342268/261943).



Figura 11. Aluvión en las cercanías de Matapalo (337604/260982)

Al borde de las serranías formadas por basaltos, gabros, diabasas y radiolaritas se han formado depósitos poco desarrollados de pie de monte, los cuales se encuentran ligeramente bisectados por los cursos juveniles de agua y muestran una incipiente formación de suelo. Estos depósitos representan la transición entre los cerros y las planicies aluviales (Figura 12). Se pueden diferenciar estos depósitos, de los aluviones, debido a la morfología ligeramente más irregular y su pendiente más fuerte.



Figura 12. Los cerros al norte de la población de Santa Rosa, muestran en la base algunos depósitos coluviales, ligeramente bisectados (foto tomada de 341875/255749).

- **Fallamiento**

Es una región que ha sufrido un intenso tectonismo en el pasado geológico, pero que actualmente tiene una relativa calma tectónica. Esto, sumado a que la gran disección, causa que las fallas importantes son difíciles de trazar. Evidencias de cizalla se encuentran en cada afloramiento, causado no solo por una tectónica sino por varios períodos y estilos tectónicos. Dentro de las fallas más importantes destaca la falla N40W que tiene una traza de una longitud de 20 km; atraviesa parte de las hojas Belén, Matapalo y Punta Gorda (Figura 2). El movimiento es vertical, en que el



bloque noreste subió con respecto al suroeste. Esto se determinó por el escarpe visible en el campo, en las imágenes satelitarias y en las fotos aéreas. En la cercanía de El Llano (hoja Matapalo) se mapearon dos fallas, una N15W y otra N50W, ambas son dextrales, con base en los criterios de Petit (1987). Otras fallas sinestrales han sido mapeadas por Escalante (s.f.) en la hoja Punta Gorda y tienen rumbo N-S y NNE.

6. Caracterización Hidrogeológica

Las unidades litológicas presentes en la zona de estudio corresponden a sedimentos coluvio aluviales que constituyen la principal unidad acuífera de la zona y a basaltos, radiolaritas e intrusivos del Complejo de Nicoya que conforman el basamento del acuífero coluvio aluvial, estas rocas además conforman la parte alta de la cuenca.

Con base en la interpretación de la información litológica de los registros de perforación (Anexo 1. Información de pozos), geología (Figura 2) y geofísica se levantó tres perfiles hidrogeológicos esquemáticos de la zona (Figura 13).

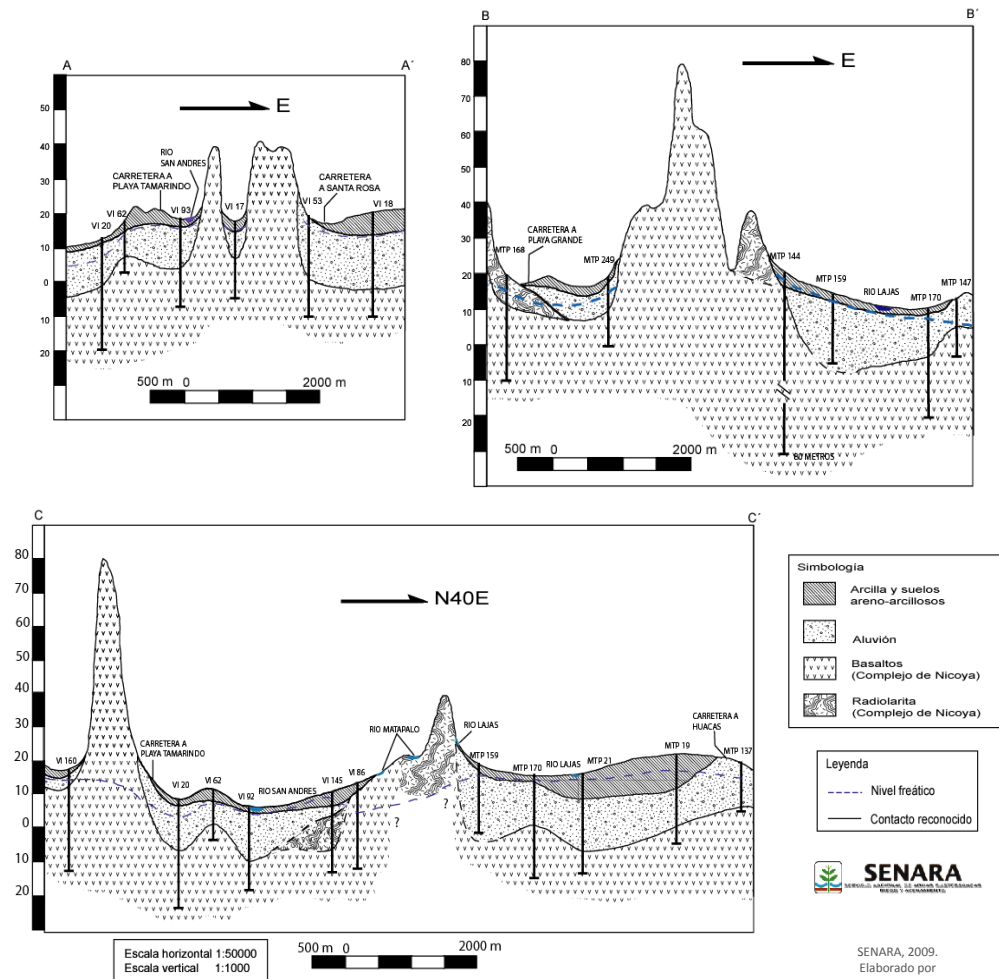


Figura 13. Perfiles hidrogeológicos esquemáticos



Hidrogeológicamente las unidades de basaltos y radiolaritas desarrollan acuíferos de bajo potencial con caudales que varían entre 1 a 4 lps, dependiendo del grado de fracturación y meteorización de la roca y se encuentran en comunicación hidráulica con los acuíferos aluviales, mientras que, la unidad de intrusivos se considera de muy bajo potencial acuífero.

En los sedimentos cuaternarios coluvio aluviales se desarrollan acuíferos con moderada capacidad de producción con caudales reportados de 3 lps a 30 lps, dependiendo de la granulometría del material captado.

El acuífero coluvio aluvial de Huacas Tamarindo presenta una extensión de 48 Km². Se comporta como un acuífero libre en la mayor parte de la zona, con variación espacial a libre cubierto en la parte baja de la cuenca y en algunos sectores de la cuenca alta, en estas zonas el acuífero puede variar temporalmente a semiconfinado debido a la fluctuación de los niveles de agua subterránea, comportándose como libre cubierto desde mediados de la época seca a inicio de la época lluviosa cuando se presentan los niveles de agua subterránea más profundos y como semiconfinado el resto del año (ver en Anexo 2. mapa de ocurrencia).

Los materiales que conforman el acuífero coluvio - aluvional corresponden a sedimentos de granulometría variable desde arenas gruesas a gravas arenosas, aunque localmente pueden presentarse pequeños lentes de materiales finos. El espesor máximo del acuífero es de 20 metros.

El acuífero se encuentra cubierto por sedimentos no consolidados en la parte baja en las inmediaciones del estero Tamarindo, arenas y suelos areno arcillosos que recubren la mayor parte del área y por último algunos sectores con coberturas de arcillas y limos. El espesor de esta capa que recubre el acuífero varía entre 1 y 10m, registrándose los mayores espesores en los alrededores del poblado de Huacas. Aunque algunos sectores de la cuenca presentan una cobertura de materiales de baja permeabilidad como arcillas y limos, los espesores observados varían entre 1 y 6m, que le brindan poca protección al acuífero dado que algunas excavaciones para la adecuación de obras podrían destapar el acuífero.

Los parámetros físicos y radios de influencia del acuífero por subcuenca o zona de recarga presentados en el Anexo1, cuadro 1 y en la figura 14, se calcularon en base a la reinterpretación 31 pruebas de bombeo existentes en el área de estudio (Anexo 1).

En las subcuencas del río Zapote (sector de Huacas), Qda. Palmar y subcuenca baja del río Lajas y del río San Andrés (sector del Llano), se registran transmisividades altas del orden de 1000 m²/día, asociado a sedimentos aluviales de granulometría gruesa y a la ubicación de los pozos cercanos a las márgenes de los ríos; en las subcuencas alta del río San Andrés (sector Santa Rosa) y baja del río San Andrés (sector del Llano) con valores medios del orden de los 400 m²/día en sectores donde los pozos captan tanto materiales aluviales de granulometría gruesa como basaltos fracturados y en las subcuencas de Playa Grande, alta y media del río Lajas, río Matapalo y el sector del campo de pozos Refundores en la cuenca baja del río San Andrés se registran transmisividades bajas menores de 250 m²/día para pozos que captan aluviones finos de poco espesor y/o basaltos fracturados o radiolaritas del Complejo de Nicoya (cuadro 1 y figura 14).



Cuadro 1. Parámetros hidrogeológicos por unidad de recarga

Zona de Recarga o Subcuenca	litología captada	Datos actuales (pruebas de bombeo posteriores al 2000)					Registros viejos (pruebas de bombeo posteriores al 2000)				
		Q (lps)	K (m/día)	T (m ² /d)	S	RI _{24h} (m)	Q (lps)	K (m/día)	T (m ² /d)	S	RI _{24h} (m)
1	R	0,15		3	<u>1,00E-02</u>	26,0					
2a	A y B	2,00		27	<u>1,00E-02</u>	77,4					
2b	A						12,80	168,5	1440	<u>3,00E-03</u>	1010
2c	A	2,78	10,3	246	<u>1,00E-02</u>	235	7,00	9,6	115	<u>1,00E-02</u>	161
2d	A						2,37	173,2	1039	<u>3,00E-03</u>	883
2e	A y R	8,00	9,4	75	<u>1,00E-02</u>	130					
2f	A _{fino}	1,00	2,4	33	<u>1,00E-02</u>	86	5,00	2,1	30	<u>1,00E-02</u>	82
	A y R	17,00	88,6	1701	<u>1,00E-02</u>	619					
3a	B						2,37	36,5	219	<u>1,00E-02</u>	222
	A	13,00	26,0	434	<u>1,54E-04</u>	2514	5,10	24,3	405,0	<u>1,54E-04</u>	2428,9
	A y B	8,00	29,7	178	<u>3,90E-02</u>	101					
3b-LL	A y B	3,50	47,8	430	<u>3,00E-03</u>	568	2,00	41	1083	<u>1,00E-02</u>	494
	A	21,00	699,0	4893	<u>3,00E-03</u>	1916					
3b- Rf	A y B	4,80	4,1	48	<u>2,00E-02</u>	70					

Zona de recarga o Subcuenca: 1: Playa Grande, 2a : Cuenca alta Río Lajas, 2b: Río Zapote, 2c : Río Matapalo, 2d: Qda Palmar, 2e: Cuenca media Río Lajas, 2f: Cuenca baja Río Lajas, 3a: Cuenca alta río San Andrés (sector Santa Rosa), 3b-LL: Cuenca baja Río San Andrés (sector El Llano), 3b-Rf: Cuenca baja Río San Andrés (campo pozos Refundores) 4a: sector de Playa Grande, 4b: sector de Tamarindo

Material captado: A: Aluvi3n, A y R: Aluvi3n y radiolaritas, A y B: Aluvi3n y basalto, B: Basalto, R: Radiolaritas

K: conductividad hidraulica, T: trasmisividad, S: coeficiente de almacenamiento (2,00E-02 obtenido de Prueba de bombeo, 1,00E-02 asignado), RI_{24h}: Radio de influencia con tb 24 h

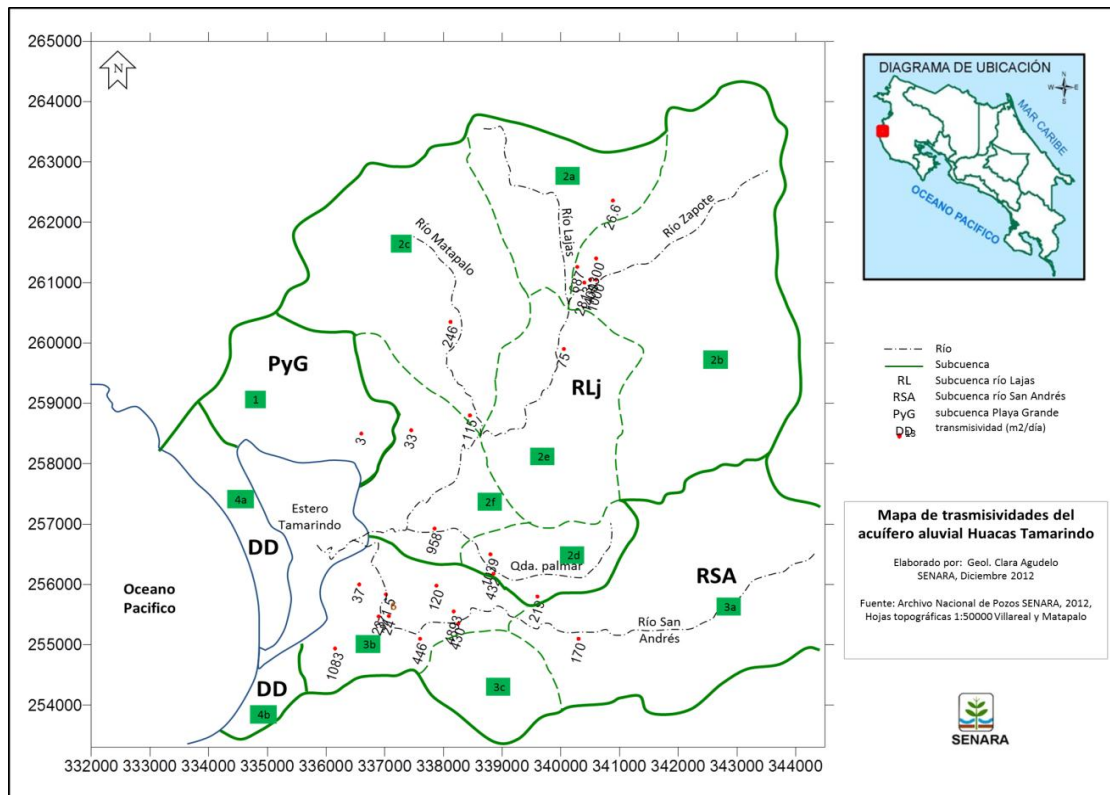


Figura 14: Trasmisividades del acuífero aluvial Huacas Tamarindo

El coeficiente de almacenamiento por subcuenca y material en los casos donde no se contaba información, se asumió basado en los datos existentes, en el análisis de los informes de perforación y del modelo hidrogeológico elaborado. Se presentan sectores donde el acuífero se



encuentra semiconfinado con valores de S de 3,0E-03 a 1,54E-04 correspondientes a su vez a los sectores de alta trasmisividad y que presentan mayor productividad, y sectores correspondientes a acuíferos libres con valores de S de 1.0E-2 a 3,90E-02.

La permeabilidad en general varía de 2 a 50m/día, aunque algunos sectores de las cuencas río Zapote, Qba. Palmar y Baja del río Lajas la permeabilidad varía de 88 a 173m/día, asociado a aluviones gruesos de alta trasmisividad. En el sector del Llano se presenta los valores extremos en conductividad y trasmisividad el cual está asociado a un pozo del acueducto de Villareal de alta productividad, perforado a menos de 10m de la margen derecha del río San Andrés.

En cuanto a los radios de influencia de los pozos para tiempos de bombeo de 24 horas continuas, se tiene que los pozos que captan los aluviones gruesos en las subcuencas del río Zapote, cuenca baja del río Lajas, Qda Palmar y la subcuenca alta (Santa Rosa) y baja del río San Andrés (sector El Llano), los radios de influencia se extienden entre 500m y 2500m, y pozos que captan materiales más finos, basaltos fracturados y/o radiolaritas en dichas subcuencas, así como, en el resto de las subcuencas, los radios de influencia esperados son del orden de los 20 a 240m.

En el sector del campo de pozos refundores, en la cuenca baja del río San Andrés, los pozos captan el acuífero aluvial de poco espesor y roca meteorizada del Complejo de Nicoya. El acuífero está cubierto por una capa de arcilla de menos de 3 m de espesor y se comporta como semiconfinado en la época lluviosa y hasta mediados de la época de seca y como libre a finales de la época de seca. El sector presenta baja conductividad de 2.1 a 12.9m/día, baja trasmisividad de 23 a 120m²/día, con caudales de producción actuales de 2.5 a 8 l/sg y radios de influencia de 50 a 205m considerando un coeficiente de almacenamiento para la zona de 0,02, de acuerdo al valor registrado en el pozo Pozo ILG-777 (Virgilio) en marzo del 2006, sin embargo, si se asigna un coeficiente típico para acuíferos semiconfinados de 0,001, los radios de influencia se incrementan, siendo el rango de valores de 225 a 900m (Anexo 1). Las pruebas de bombeo analizadas son de poca duración menores a 200 minutos, por lo cual no se puede determinar si existe presencia de barreras negativas o positivas.

En el cuadro 2 se presenta el rango de variación de los parámetros hidrogeológicos por unidad de recarga y materiales asociados indicados anteriormente.

Cuadro 2. Variación de los parámetros hidrogeológicos por unidad de recarga

Parámetro	Rangos	Q (lps) asociado	Zonas de Recarga asociadas	Materiales
K (m/d)	2 -10		2c, 2e, 2f, 3b-rf	Afinos, Afinos-B, Afinos-R, B, R
	20-50		3a y 3b-LL	Agruesos y Agruesos-B
	85-175		2b, 2d y 2f	Agruesos y Agruesos-R
	699		3b-LL	Agruesos-B en margen río
T (m ² /d)	3-250		1, 2a, 2c, 2e, 2f, 3a y 3b-rf	Afinos, Afinos-B, Afinos-R, B y R
	400-450		3a y 3b-LL	Agruesos y Agruesos-B
	1000-1700		2b, 2d y 2f	Agruesos y Agruesos-R
	4893		3b-LL	Agruesos-B en margen río
S	1.0E-2 a 3,90E-02		1, 2a, 2c, 2e, 2f, 3a, 3b-rf	Afinos, Afinos-B, Afinos-R, Agruesos-R, B, R
	3,0E-03 a 1,54E-04		2b, 2d, 2f, 3a y 3b-LL	Agruesos-R, Agruesos-B en margen río
Rl _{24h} (m)	20-240	0,15 – 8	1, 2a, 2c, 2e, 2f, 3a y 3b-rf	Afinos, Afinos-B, Afinos-R, B y R
	500-900	2 – 3,5	2d y 3b-LL	Agruesos y Agruesos-B
	1000-2500	5,1 – 21	2b, 2f, 3a y 3b-LL	Agruesos, Agruesos-R y Agruesos-B en margen río



Los hidrogramas de pozos de la figura 15, muestran el comportamiento típico de las aguas subterráneas en el acuífero, en el cual se observa una relación directa de las aguas subterráneas y la precipitación, ya que los cambios en los niveles del acuífero corresponden a los cambios en la precipitación de la zona, indicando una recarga rápida del agua del acuífero.

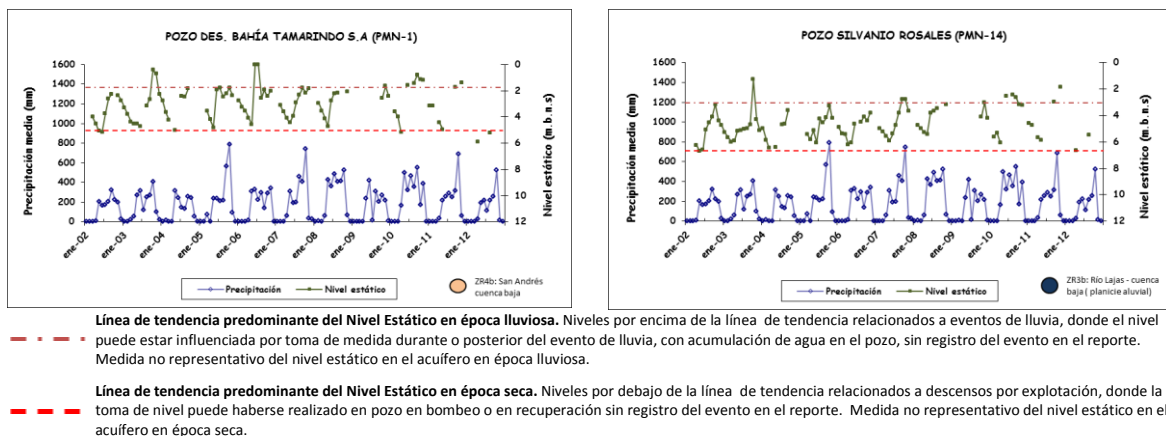


Figura 15. Hidrograma de precipitación vs nivel estático, a) pozo perforado PMN-1 Cuenca cl río San Andrés, b) pozo excavado PMN-14 cuenca media del río Lajas.

Este comportamiento se observa en toda la zona en los 25 pozos que conforman la red de monitoreo de niveles, donde los niveles más someros en la época de lluvia.

A partir de la línea de tendencia predominante indicada en los gráficos de monitoreo de niveles del Anexo 1, se determinó la variación estacional de los niveles de aguas subterráneas entre la época seca y la lluviosa, siendo la media de 3.3 m para el sistema acuífero Huacas Tamarindo, con valores extremos de 2,1m a 5,4m (cuadro 3).

Cuadro 3. Variación estacional de los niveles de aguas subterráneas

POZO	Subcuenca	Sector	Dh (m)	Dh media por sector (m)	Dh media por subcuenca (m)
PMN-17	Río Lajas	2a Cuenca alta	3,0	3,0	3,3
PMN-18		2b Río Zapote	2,1		
PMN-19			4,4	2,7	
PMN-14		2c Río Matapalo	2,5		
PMN-16			2,8		
PMN-11		2d Qda Palmar	3,4	3,4	
PMN-13			3,2		
PMN-20		2e cuenca media		3,6	
PMN-21			2,1		
PMN-22			5,4	3,7	
PMN-15		2f Cuenca baja	4,8		
PMN-12			2,5		
PMN-8	Río San Andrés		3,9	3,1	3,3
PMN-8a		3a Santa Rosa	3,4		
PMN-9			1,9		
PMN-1			3,3	3,4	
PMN-1A		3b Cuenca baja	3,9		
PMN-2			2,6		



PMN-2A			2,7
PMN-3			3,6
PMN-4			>4,9
PMN-5			1,6
PMN-6			4,0
PMN-7			3,2
PMN-10			4,2

En el acuífero aluvional se presentan dos zonas de profundidad de agua subterránea bien diferenciadas, la primera hacia la parte baja del acuífero en la cual los niveles del agua subterránea se encuentran a una profundidad menor a 5 metros y la segunda hacia la parte alta con niveles entre 5 y 10 m de profundidad. Dichas zonas se pueden observar en el mapa de profundidad del agua subterránea elaborado con base en los registros de niveles de la época de estiaje, en el Anexo 2.

A fin de determinar los tramos de los ríos en los cuales estos aportan agua al acuífero y por ende es vulnerable a la contaminación, se realizó una campaña de aforos diferenciales en los ríos Matapalo, San Andrés y Lajas en la época de estiaje del 16 al 18 de marzo del 2009, en la cual se determinó las zonas de influencia y efluencia de los ríos al acuífero Huacas Tamarindo de la figura 16. Los datos de la campaña de aforos se presentan en el Anexo 2.

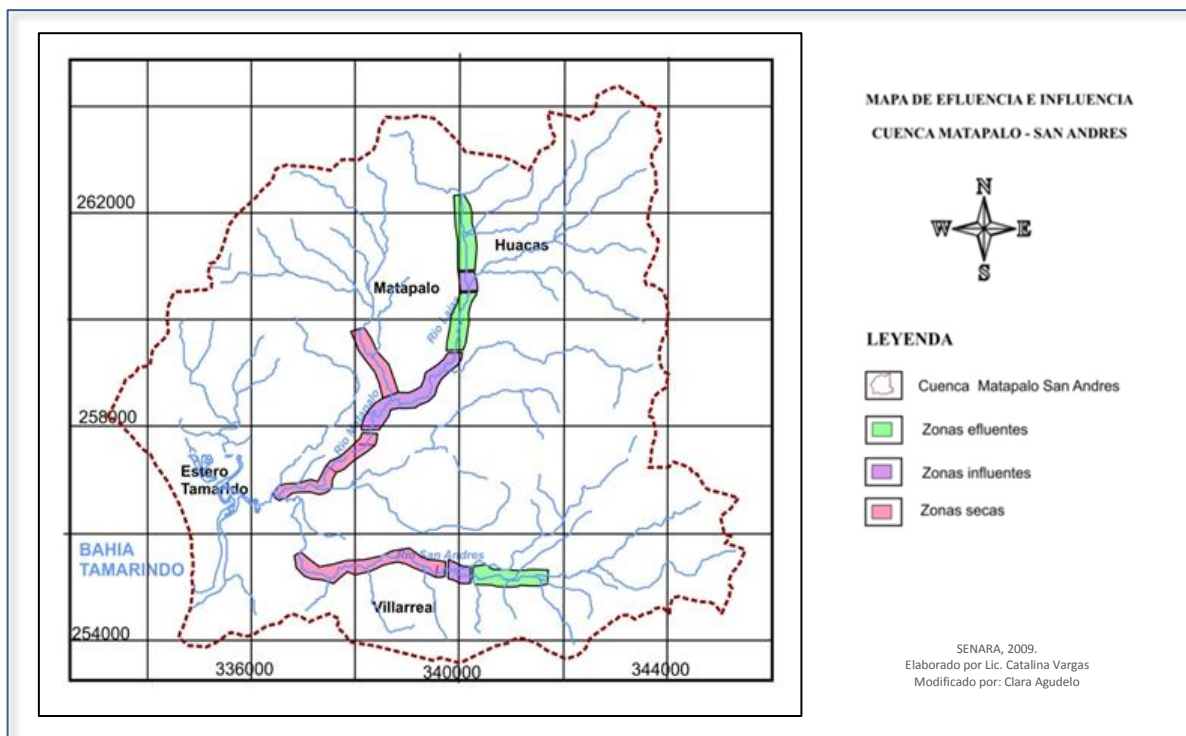


Figura 16. Mapa de efluencia e influencia de los ríos Lajas, Matapalo y San Andrés

En la cuenca alta de los ríos Lajas y San Andrés estos se comportan como efluentes y reciben agua de los acuíferos en la época seca y son de carácter permanente, en la cuenca media se comportan como influentes aportando agua al acuífero, y en la cuenca baja se encuentran secos perdiendo su carácter de ríos permanentes.



7. Vulnerabilidad a la contaminación

La caracterización de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero, se realizó utilizando la metodología GOD, considerando el escenario más crítico, final de época seca e inicio de la lluviosa. La delimitación de la zona de vulnerabilidad extrema fue retomada del estudio realizado por el geólogo Mario Arias Salguero de la Escuela de Geología de la UCR determinada mediante la aplicación de métodos geofísicos y redefinida con base en la información de geología de detalle.

La información utilizada para el levantamiento de los mapas temáticos de GOD (Anexo 2), fue la Información de geología, suelos y geofísica de las cuencas Matapalo, San Andrés y el estero Ventanas, el análisis de informes hidrogeológicos locales, de pruebas de bombeo y de registros litológicos de pozos, así como la elaboración de 3 perfiles hidrogeológicos, que permitieron establecer un modelo hidrogeológico conceptual de las cuencas en estudio.

A nivel general se resalta los siguientes resultados obtenidos:

- Variable G - Grado de confinamiento hidráulico del acuífero: El acuífero se comporta como un acuífero no confinado o libre, con variación en la parte baja de la cuenca y en algunos sectores de la cuenca alta a acuífero no confinado cubierto a semiconfinado debido a la fluctuación de los niveles de agua subterránea, comportándose como no confinado cubierto desde mediados de la época seca a inicio de la época lluviosa cuando se presentan los niveles de agua subterránea más profundos y como semiconfinado el resto del año.

Variable O - Ocurrencia del sustrato suprayacente: El acuífero presenta principalmente tres tipos de coberturas principales, sedimentos no consolidados en la parte baja del acuífero en las inmediaciones del estero Tamarindo (delimitación tomada de Arias, 2008), arenas y suelos arenos arcillosos que recubren la mayor parte del área y por último algunos sectores con coberturas de arcillas y limos. Es importante notar que aunque algunos sectores de la cuenca presentan una cobertura de materiales de baja permeabilidad como arcillas y limos, los espesores observados varían entre 1 y 6m, que le brindan poca protección al acuífero dado que algunas excavaciones para la adecuación de obras podrían destapar el acuífero.

- Variable D - Distancia o profundidad al agua: para esta variable se analizó la información de niveles correspondiente a los meses de abril, mayo y junio, correspondiente a los meses del final de la época seca e inicio de la lluviosa. Se obtuvo dos zonas de la primera en la cual los niveles se encuentran a una profundidad menor a 5 metros y la segunda con niveles entre 5 y 10 m de profundidad.

Como resultado de la sobreposición de los tres mapas temáticos se obtuvo el mapa vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Huacas Tamarindo de la figura 17, dentro de las cuales se destaca las siguientes zonas de vulnerabilidad:

- Extrema: corresponde a la parte baja del acuífero en las inmediaciones del estero Tamarindo, caracterizado por acuífero libre no cubierto, sedimentos no consolidados, niveles de agua menores a 5 m.



- Alta: acuífero libre no cubierto a libre cubierto, sedimentos suprayacentes de arenas a suelos areno arcillosos y niveles de agua subterránea entre 5 y 10 m.
- Media: donde el acuífero es libre cubierto, con material suprayacente de arcillas y limos de poco espesor y niveles de agua subterránea menores a 5m.

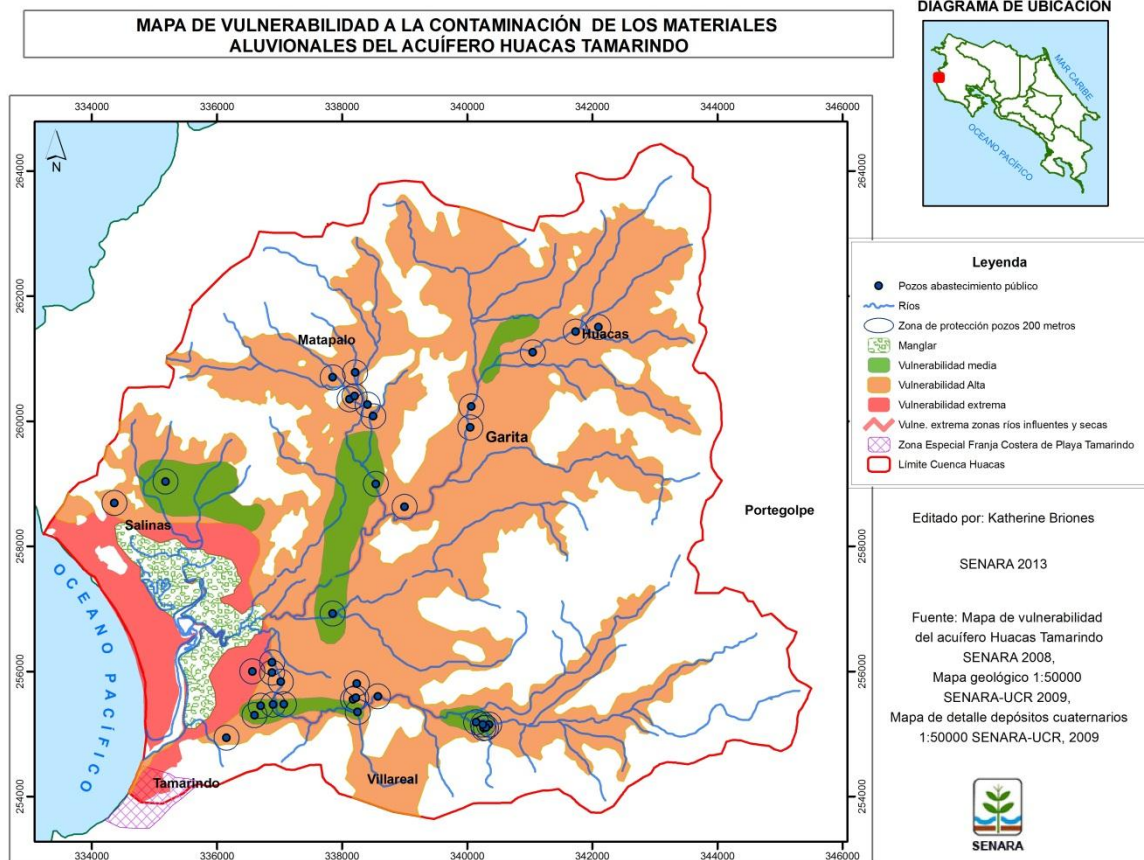


Figura 17. Mapa de vulnerabilidad a la contaminación Ac. Huacas Tamarindo

En el mapa de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos aluviales se incluye además de las zonas definidas por el método GOD, los tramos de río influentes al acuífero y la demarcación de otras zonas de importancia para la protección del recurso hídrico subterráneo, como es un radio de 200m alrededor de los pozos de abastecimiento público y que corresponde a la zona de protección establecida en el Artículo 31 de la Ley N. 276 de Aguas de 1942.

Así mismo, se indican la franja costera de playa Tamarindo delimitada por SENARA en diciembre del 2007, en cuanto a que la zona tiene medidas de manejo en función de su estado de desarrollo actual, zona de alto desarrollo de infraestructura no planificada con un manejo no adecuado de las aguas residuales.

Aunque no se incluye en el mapa de vulnerabilidad otros pozos diferentes a los de abastecimiento público, es importante indicar la importancia del manejo apropiado de los pozos de otros usos



sean estos de tipo excavado o perforado, dado que representan puntos vulnerables al acuífero. Un mal manejo de los mismos, podría causar la filtración de agua a través de su ademe que llegaría directamente a los acuíferos. Por lo cual debe evitarse el desarrollo de actividades contaminantes en sus inmediaciones y respetarse el radio de protección establecido por Ley.

El mapa resultante de la figura 17 corresponde a la modificación del mapa elaborado en diciembre del 2008, basado en la integración de nueva información como es geología de detalle de los depósitos cuaternarios (UCR, junio 2009), del levantamiento georeferenciado de los pozos de abastecimiento en público y de los resultados de aforos diferenciales. En el anexo 2 se presenta los datos de respaldo y mapas temáticos del análisis de vulnerabilidad, los cuales corresponden a la versión original del 2008.

En el mapa resultante no se valora la condición de vulnerabilidad a la contaminación para otras unidades litológicas diferentes a las aluvionales, ya que se carece de información adecuada para su valoración; igualmente, en este mapa no se indica condiciones en función de la recarga, dado que en el apartado 7.1 se realiza la evaluación de la misma.

8. Recarga al acuífero

8.1 Método de Balance hídrico

La recarga potencial al acuífero fue calculada utilizando la metodología de Schosinsky & Losilla (2000), la cual considera parámetros como la precipitación, evapotranspiración, capacidad de infiltración de los suelos, características físicas de los suelos, cobertura del terreno, profundidad de raíces, entre otros.

La recarga de los acuíferos se da como recarga directa en los suelos que recubren el acuífero aluvional y como recarga lateral por flujo subterráneo desde las unidades de basaltos y radiolaritas y por flujo subsuperficial en las zonas de laderas.

La cuenca de estudio se subdividió por criterio hidrológico y geomorfológico en cuatro unidades de recarga, correspondiente al sector de Playa Grande (ZR-1) que descarga sus aguas al estero Tamarindo, la subcuenca del río Lajas (ZR-2), la subcuenca del río San Andrés (ZR-3) y la zona de descarga directa al mar (ZR-4) (Figura 18). A su vez las subcuencas del río Lajas y del río San Andrés fueron divididas en sectores de acuerdo a sus características de infiltración.

Para cada una de estas unidades de recarga se determinó la recarga potencial, el flujo subterráneo, las extracciones actuales y el flujo de retorno, variables indispensables para el realizar el balance de aguas del acuífero (BAS), determinar la disponibilidad de agua en el sistema, el rendimiento seguro (RS) y la cantidad de agua aprovechable adicional.

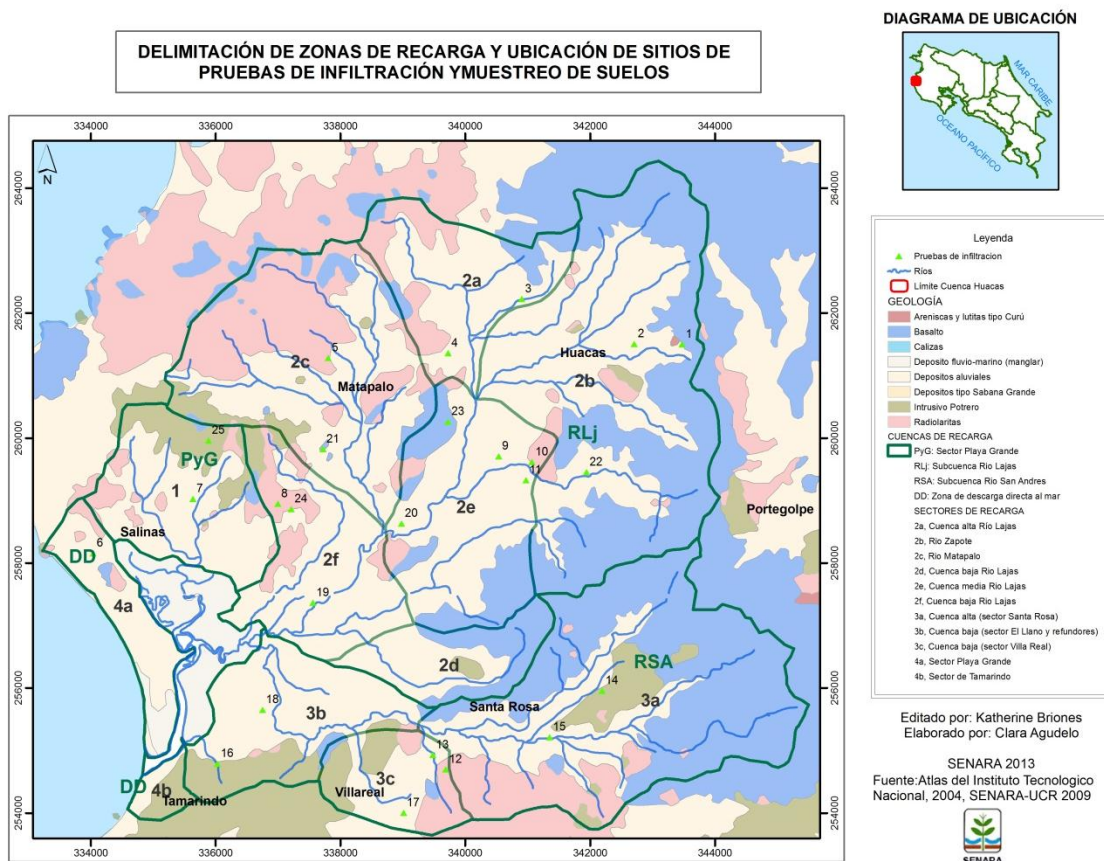


Figura 18. Delimitación de zonas de recarga y ubicación de pruebas de infiltración y de suelos

La zona se caracteriza por presentar un periodo seco de diciembre a abril y un periodo lluvioso de mayo a noviembre.

Los datos de precipitación utilizados corresponden a la estación Cartagena, ubicada en la cuenca del río Nimboyores al este del área de estudio, en las coordenadas 262349N– 339343E, registra una precipitación media para el periodo de registro 1968 – 2012 de 1875 mm anuales, con valores mínimos de 1126 mm anuales y máximos de 2919 mm (cuadro 4 y anexo 3). Para efectos del balance hídrico se trabajó con la precipitación media anual del mismo periodo de análisis (1995 – 2010) que para la evapotranspiración potencial, con un valor de 2050 mm anuales.

La evapotranspiración potencial utilizada se retomó del estudio de SENARA (Junio 2012), la cual fue calculada según metodología de Hargreaves y Samani (1985), utilizando los datos climáticos promedios mensuales periodo 1995 a 2010 de la estación Santa Cruz No. 74053 (Lat. 10°17'N Long. 85°25'O, Altitud 285m) administrada por el Instituto Meteorológico Nacional (cuadro 4 y anexo 3).



Cuadro 4. Precipitación media y Evapotranspiración potencial

Parametro (Estación)	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	media anual
Pmedia (Cartagena)	0,2	2,5	6,1	35,4	280,4	266,5	204,4	274,3	388,9	424,4	157,0	10,1	2050,3
ETP (Santa Cruz)	138,74	138,13	173,02	176,28	163,34	144,99	150,3	154,36	143,39	137,82	126,32	129,3	1775,99

El geólogo Marco Barahona de la Escuela de Geología de la UCR realizó para esta investigación 25 pruebas de infiltración de tipo doble anillo con un tiempo de duración de 120 minutos, analizadas mediante los métodos de Kostiakov (también conocido como Kostiakov-Lewis) y Kostiakov modificado (SENARA-UCR, 2009).

Ecuación método Kostiakov (ecuación 1)

$$\frac{dl}{dt} = ba(t)^{b-1}$$

Ecuación método Kostiakov modificado (ecuación 2)

$$\frac{dl}{dt} = \alpha_1 \cdot t^{(-\beta)} + fc$$

En dichos sitios se realizó además muestreo de suelos, los cuales fueron analizadas en el Laboratorio de Geotecnia de la Escuela Centroamericana de Geología, donde se determinó la granulometría (porcentajes de finos, arenas y grava), clasificación granulométrica, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, clasificación BSI, peso unitario húmedo del suelo, peso unitario seco del suelo, contenido de humedad y gravedad específica. Los valores para los parámetros de capacidad de campo, punto de marchitez y porosidad, fueron tomados de la literatura, de acuerdo con el análisis granulométrico para cada muestra (Fetter, 2001; Tindall & Kunkel, 1999; Valverde Conejo, 2000; Ley et al., 2008).

En la figura 17 se muestra la ubicación de los sitios de pruebas y muestreo y en el Cuadro 5 y el Anexo 3 se presenta los datos de infiltración, características de suelos y parámetros utilizados para el cálculo del balance hídrico de suelos.

Cuadro 5. Resumen del Balance hídrico y la recarga potencial por zonas de recarga

Zonas de recarga	M	Unidad litológica	Fc (mm/día)	δ (kg/m3)	CC	PM	PR (mm)	Kp	Kv	LL	cobertura	Rp (mm)	%P que recarga
2a-2c	2	Aluvión c. alta - influen. radiol	60	1,42	39	25	750	0,15	0,18	0,12	pastizal	208,3	10%
1-2b-3c	5	Aluvión c. alta - infl basal e intr	170	1,31	33	16	750	0,15	0,18	0,12	pastizal	538,4	26%
2f	1	Aluvión cuenca baja (Lajas)	360	1,22	30	12	750	0,20	0,18	0,12	pastizal	618,7	30%
2d-2e	4	aluvion parte media (Lajas)	666	1,25	39	24	750	0,20	0,18	0,12	pastizal	633,3	31%
3b	4	Aluvión parte baja (San Andres)	666	1,25	39	24	750	0,10	0,18	0,12	pastizal	633,3	31%
3a	1	Aluvión parte alta (San Andres)	8064	1,09	38	22	500	0,10	0,18	0,12	Pastizal	652,3	32%
general	3	basalto	528	1,29	34	20	1300	0,06	0,20	0,20	Bosque	427,0	21%
general	2	intrusivo	576	1,26	39	25	1300	0,06	0,20	0,20	Bosque	429,4	21%
general	4	radiolarita	473,76	1,19	35	21	1300	0,06	0,20	0,20	Bosque	435,0	21%

M: N° muestras de suelos e infiltración, fc: Capacidad de infiltración, δ : densidad aparente, CC: Capacidad de Campo, PM: Punto de Marchitez, PR: Profundidad raíces, KP: coeficiente infiltración por pendiente, KV: coeficiente infiltración por vegetación, LL: Lluvia retenida, RP: Recarga potencial



La capacidad de infiltración determinada para las diferentes unidades geológicas existentes en la cuenca de estudio, indican para las unidades aluvionales presentan mejores capacidades de infiltración en las planicies baja y media con un valor medio de 360 a 660 mm/día y en la cuenca alta del río San Andrés de 8000mm/día, que para las planicies altas del Río Lajas con una capacidad media del orden de 60 a 170 mm/día. Los basaltos, radiolaritas e intrusivos que conforman las laderas presentan capacidad de infiltración altas con valores medios de 576, 474 y 528 mm/día respectivamente.

En cuanto al uso del suelo se trabajó con la información estudio de IPS-SENARA del 2003 (Anexo3) y comprobación de campo, la cobertura predominante es la de pastos en las zonas de planicie aluvial y bosques producto de la regeneración natural en las zonas de montaña (ver fotos en las Figuras 7, 11 y 19). En la zona de Santa Rosa, la cobertura de los aluviones se diferencia de las otras zonas de aluviones por la presenta una cobertura de bosques poco densos y pastos. En cuanto a la profundidad de las raíces, se asignó con base en las observaciones de campo a la zona de aluviones valores de 750mm, a excepción de la zona de Santa Rosa cuya profundidad es del orden de los 500mm, mientras que en los basaltos, radiolaritas e intrusivos se observa suelos más profundos mayores a los 1300mm.



Figura 19. Cobertura característica del acuífero aluvial Huacas Tamarindo, boscosa en los cerros y pastos en la planicie aluvial (Foto de los alrededores de Huacas)

Las unidades litológicas de alta recarga se consideran las de valores de RP igual o superior al 25% de la precipitación media anual, de media recarga las de valores de RP correspondiente entre un 10 y 25% de la precipitación y de baja recarga las unidades con valores iguales o menores del 10% de la precipitación (figura 20).

La recarga potencial de la cuenca de estudio es de 1218,8 lps (Cuadro 6), dándose la mayor recarga al sistema acuífero Huacas Tamarindo en los aluviones con un 57% de la RP, seguido por los de basaltos con un 23,8% de la RP, las radiolaritas con un 12,9% de la RP, mientras que en los intrusivos solo se da el 6,3% de la recarga potencial al acuífero.

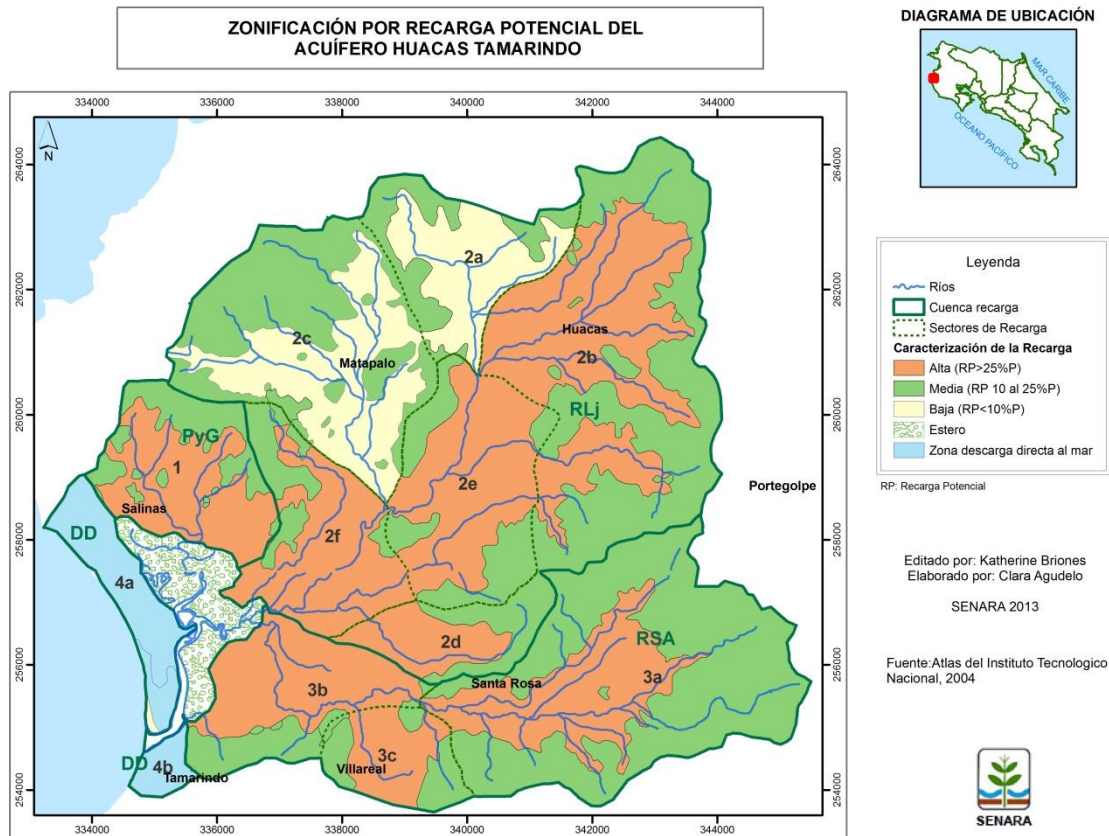


Figura 20. Zonificación por recarga potencial al acuífero aluvial Huacas Tamarindo

Cuadro 6. Recarga potencial por sector de recarga vs unidad geológica

Zona de recarga	Sector	Área (Km ²)	RP Aluvión (lps)	RP Basalto (lps)	RP Intrusivo (lps)	RP Radiola. (lps)	Recarga Potencial (lps)	RP/ km ² (lps/Km ²)
Playa Grande	1. Playa Grande	5,85	67,2	1,2	16,1	9,0	93,4	16,0
	2a. Parte alta Río Lajas	5,50	23,8	8,2	0,0	17,8	49,8	9,1
Río Lajas	2b. Sector Río Zapote	17,04	147,2	105,4	1,7	7,1	261,3	15,3
	2c. Sector Río Matapalo	11,53	37,3	12,0	8,4	60,6	118,2	10,2
	2d. Sector Qda. Palmar	3,23	34,5	18,7	1,8		55,0	17,0
	2e. planicie media R.Lajas	7,74	107,8	25,5		6,9	140,1	18,1
Río San Andrés	2f. Planicie baja R.Lajas	6,05	91,9	0,3	3,7	14,8	110,7	18,3
	3a. parte alta (Sta Rosa)	15,8	75,7	116,4	17,5	30,7	240,3	15,2
	3b. parte baja (Llanito)	5,64	83,6	1,6	17,7	0,9	103,8	18,4
	3c. parte central (Villareal)	3,00	25,6	1,4	9,9	9,2	46,1	15,4
Caudal por unidad litológica (l/s)		81,4	694,4	290,7	76,7	156,9	1218,8	15,0
Recarga / Unidad litológica (%)			57,0%	23,8%	6,3%	12,9%		



Los sectores de mayor aporte al sistema acuífero Huacas Tamarindo corresponden al 2b con 261,3lps y 2e con 140,1lps en la subcuenca del río Lajas y al sector 3a con 240,3,2lps para la subcuenca del río San Andrés, con un aporte del 52,7% de la recarga del sistema dada en el 50% del área del acuífera.

Los sectores de menor aporte al sistema acuífero en función al área de recarga corresponden al 2a con 49,8lps y 2c con 118,2lps en la subcuenca del río Lajas, con un aporte del 13,8% de agua al sistema dada en el 21% del área acuífera.

Por otro lado, aunque el aporte al sistema en litros por segundo para los sectores 2d y 3c es bajo (55 y 46,1lps respectivamente), estos sectores se consideran como de buenas condiciones para la recarga dado su aporte por kilómetro cuadrado (17% y 15,4%), el cual es sustancialmente mayor que para los sectores 2a y 2c de la subcuenca del río Lajas (9,1% y 10,2% respectivamente).

Los sectores 2f y 3d correspondientes a las cuencas bajas de los ríos Lajas y San Andrés respectivamente, presentan resultados altos de recarga por Km², sin embargo la recarga potencial podría estar ligeramente sobreestimada, dado que como se indicó en el apartado 5, en esos sectores se presentan zonas donde los acuíferos se comportan libres durante todo el año y en otras zonas el acuífero se comporta como semiconfinado en algunos meses de la época lluviosa y en los cuales no se presentaría recarga directa al acuífero por medio de los aluviones que lo recubren.

En cuanto a la recarga potencial por subcuencas (Cuadro 7), se tiene 735,2 lps de la subcuenca del río Lajas, 390,2 lps de San Andrés y 93,4 lps de Playa Grande. La recarga por kilómetro cuadrado es de 14,4 lps/Km² para la Subcuenca de Lajas y de 16 lps/Km² para las otras dos subcuencas.

Cuadro 7. Resumen Recarga Potencial por zona de recarga

Subcuenca	Área	Recarga Potencial (l/s)	RP por Km ² (lps/Km ²)
1. Playa Grande	5,9	93,4	16,0
2. Río Lajas	51,1	735,2	14,4
3. RíoSan Andres	24,4	390,2	16,0
Total	81,4	1218,8	

8.2 Método de Hidrogramas

A modo de comprobación del valor de recarga potencial calculado por el método de Balance hídrico, se realizó además, la determinación de la recarga basado en hidrogramas de pozos, a partir de la información de variación de niveles determinada mediante la red de monitoreo de pozos (cuadro 3).

$$R = A * Dh * RE$$

A = Área (m2)

Dh = Lámina de saturación (m)

RE = Rendimiento específico (adimensional)



La lámina de saturación o variación de niveles aplicada para la unidad corresponde al valor medio por sector de recarga determinado mediante los hidrogramas de pozos (cuadro 3), mientras que a las unidades de basaltos, radiolaritas e intrusivos, se aplicó el valor determinado para el pozo PMN 15, ubicado en las radiolaritas.

El valor asignado de rendimiento específico corresponde a un valor teórico tomado Rodríguez, C., Vargas, N., Jaramillo, O., Piñeros, A. & Cañas, H., 2010, en el cual se compila los resultados obtenidos de rendimiento específico de diferentes estudios a nivel mundial (Anexo 3).

20% aluviones y gravas (Walton, 1970 y Rodríguez, 1984)

8% basaltos (UGS, 1987)

0,01% Radiolaritas y Gabros (Sanders, 1988)

Los resultados por unidad litológica se presenta en el cuadro 8 y los cálculos por sector de recarga se presenta en el anexo 3.

Cuadro 8. Recarga Potencial por el método de hidrogramas de pozos

Unidad Litológica	Volumen de agua (l/sg)
Aluviones	854,8
Basaltos	261,4
Radiolaritas	0,1
Intrusivos	0,2
	1116,5

El resultado obtenido (recarga 1116,5lps) por el método de hidrograma de pozos con base en valor teórico de rendimiento específico, es inferior en 102,2 lps al obtenido por el método de balance hídrico (1218,7 lps).

Aunque el valor obtenido por el método de hidrograma de pozos es menor y por ende más conservador al obtenido por balance hídrico, se consideró para efectos de determinar la disponibilidad de agua en el acuífero, utilizar el valor de este último (RP=1218,7 lps), dado que el determinado por hidrograma se basa en valores teóricos de rendimiento específico y no se cuenta en la zona con valores del mismo que permitan determinar su aplicabilidad.

9. Descarga del acuífero

9.1 Extracción

Se realizó el inventario de pozos a partir de la información existente en el Archivo Nacional de Pozos del SENARA, Archivo de Concesiones de MINAE, visita a acueductos de la zona y levantamiento en campo (Anexo 1). En el área se inventariaron 211 pozos:

- 169 perforados (26 sin explotación) y 42 excavados (6 sin explotación).
- 50 de los pozos se encuentran registrados tanto en SENARA como en MINAE (33 de ellos con concesión otorgada), 94 pozos solo en SENARA, 32 pozos solo en MINAE (14 de ellos



con concesión otorgada) y no cuentan con número de pozo en el Archivo Nacional de Pozos y 35 pozos no se encuentran registrados en ninguna de las dos instituciones.

- 42 pozos son de acueductos, de los cuales solo 30 se encuentran en uso y solo 18 cuentan con número de registro del ANP-SENARA (Anexo 1).

La asignación del caudal y régimen de explotación (horas y meses de bombeo) de los pozos a efectos de realizar la estimación de la extracción, se realizó, según la información existente y con base en el siguiente nivel de prioridad.

<u>Caudal de explotación</u>	<u>régimen de explotación</u>	
Actual reportado	<u>Horas de bombeo por día</u>	<u>Meses de bombeo por año</u>
Recomendado de explotación	Recomendado	Continuo a concesionados
Concesionado	Continuo a concesionados	Estimado según uso
De prueba de bombeo	Estimado por uso	
Esperado en el permiso de perforación		
Estimado por uso según tabla adjunta		

Para efectos del cálculo de la extracción, se utilizó el régimen de según el tipo de uso reportado, los parámetros del cuadro 9 para la asignación de caudales, horas al día de bombeo y meses al año de bombeo, para los pozos que carecían de dicha información, así mismo, para los pozos donde se utilizó el caudal concesión se consideró este a régimen de bombeo continuo.

Cuadro 9. Parámetros para el cálculo de volúmenes de explotación según el uso del agua

USO	l/s	h/día	meses	USO	l/s	h/día	Meses
Abast. Publ	9,5	24	12	Domestico	0,5	8	12
Riego	7,0	16	7	Domest-Rieg	1,8	24	12
Turístico	4,0	24	12	Riego-Dom-Turis	7,0	24	12
Abrevadero	2,8	6	12	Varios	3,3	12	12
Agroindustrial	3,8	24	12	Fuera De Uso	0		
Industrial	5,8	24	12	Piezómetro	0		
Urbanístico	4,5	24	12				

SENARA 2004

El principal uso en la zona es de abastecimiento público con 30 pozos que extraen 226,1 lps, seguido por el uso turístico- urbanístico con 39 pozos que extraen 158,1 lps y riego con 27 pozos que extraen 46,4 lps. Otros usos registrados son doméstico, industrial, abrevadero y varios. 32 pozos no se encuentran en uso y de 8 pozos no se cuenta con información de caudal dado que se encuentran en proceso de concesión y no presenta la información de los mismos. En el cuadro 10 se presenta la extracción de agua en el acuífero en lps, por tipo de pozo y tipo de uso, en el Anexo 1, se presenta el registro completo de pozos existentes en la zona con sus características de uso y caudal de extracción.



Cuadro 10. Extracción por uso

tipo de uso	# pozos perforados	caudal lps	# pozos excavados	caudal lps
Ab. Público	30	226,1		
Doméstico	40	26,1	30	4,2
Riego y Rie-dom	27	46,4		
Industrial	1	0,8		
Tur, Urb. y Tur-Rie-Dom	39	158,1		
Abrevadero	2	1,2		
Varios	2	3,0		
sin uso	26	0,0	6	0
Sin Inf. en proceso de conces.	2	-	6	-
TOTAL	169	461,6	42	4,2

La mayor parte de los pozos concesionados e inscritos se registran con caudal otorgado inferior a los caudales reportados en campo, por ejemplo el pozo ASR-2 del Acueducto de Santa Rosa con un caudal concesionado de 7,12 lps y el reportado por el acueducto es de 13 lps), así mismo, varios de los pozos concesionados cuentan con varios registros de concesión otorgada o en proceso de otorgamiento, por ejemplo, el pozo MTP-76 del acueducto de Matapalo, el cual aparece con tres números de concesión (543, 688 y 688) con un caudal total de 10,62 lps, sin embargo según reportó el acueducto, el pozo MTP-76 fue sacado de operación y sustituido por el pozo que se encuentra en operación actualmente con un caudal actual de 2 lps y en el sitio no se registra un tercer pozo. Esta información se registra en el Anexo 1 numerales A1-3 y A1-8.

La extracción en la cuenca es de 465,8 lps, teniéndose las mayores extracciones (Cuadro 11) en el sector del Río Zapote en la planicie alta del río Lajas (136,3 lps) y en la cuenca baja del río San Andrés (121,1 l/s).

Cuadro 11. Extracción por unidad de recarga

Zona de recarga o Subcuenca	Sector	N° Pozos	Volumen de explotación m3/año	caudal de extracción lps
Zona 1: Playa Grande		21	885.427	28,5
Zona 2: Río Lajas	2a : Río Lajas Cuenca alta	7	376.358	12,1
	2b: Río Zapote	30	4.238.283	136,3
	2c : Río Matapalo	26	645.719	20,8
	2d: Qda Palmar	4	246.525	7,9
	2e: Cuenca media R. Lajas	34	1.747.941	56,2
	2f: Cuenca baja R. Lajas	18	1.062.305	34,2
Zona 3: Río San Andrés	3a y 3c: Sectores Santa Rosa - Villareal	17	1.322.879	42,5
	3b: Sector Llanito y refundidores	33	3.766.625	121,1
Zona 4: Descarga al mar	4a: sector de Playa Grande	16	41.472	1,3
	4b: sector de Tamarindo	5	158.216	5,1
	TOTAL	211	14.491.751	465.8



En el balance de aguas subterráneas no se incluyó la extracción de 6,3 lps de 21 pozos registrados en la zona de descarga directa al mar, la cual se da principalmente en 5 pozos en el sector de Tamarindo y 8 pozos excavados en el sector de Playa Grande; los 8 pozos perforados en el sector de Playa Grande se salinizaron y fueron abandonados.

Si se estima el caudal de bombeo considerando todos los pozos a un régimen de bombeo continuo de 24 horas al día, el caudal de bombeo sería de 544l/s, sin embargo este escenario se considera poco probable.

Para efectos del balance de aguas se considera como flujo de retorno o el flujo de agua que vuelve al sistema después de ser utilizada en los diferentes usos un 20% de la extracción equivalente a 91,9 lps para las zonas de recarga 1, 2 y 3.

9.2 Flujo Subterráneo

Los mapas de profundidad del agua subterránea y de isofreáticas (figura 21), se levantaron con la información de niveles de pozos registrados en la base de datos de SENARA (Pozos MTP-VI), de la red de monitoreo de niveles del SENARA (Pozos PMN) con un periodo de registro de 2002 al 2012 y del monitoreo de niveles del acueducto de BEKO (pozos BK). Se utilizó la información de 51 pozos de los meses de marzo, abril y mayo, correspondiente a los meses del final de la época seca e inicio de la lluviosa, donde se encuentran los niveles más abatidos (anexo 1).

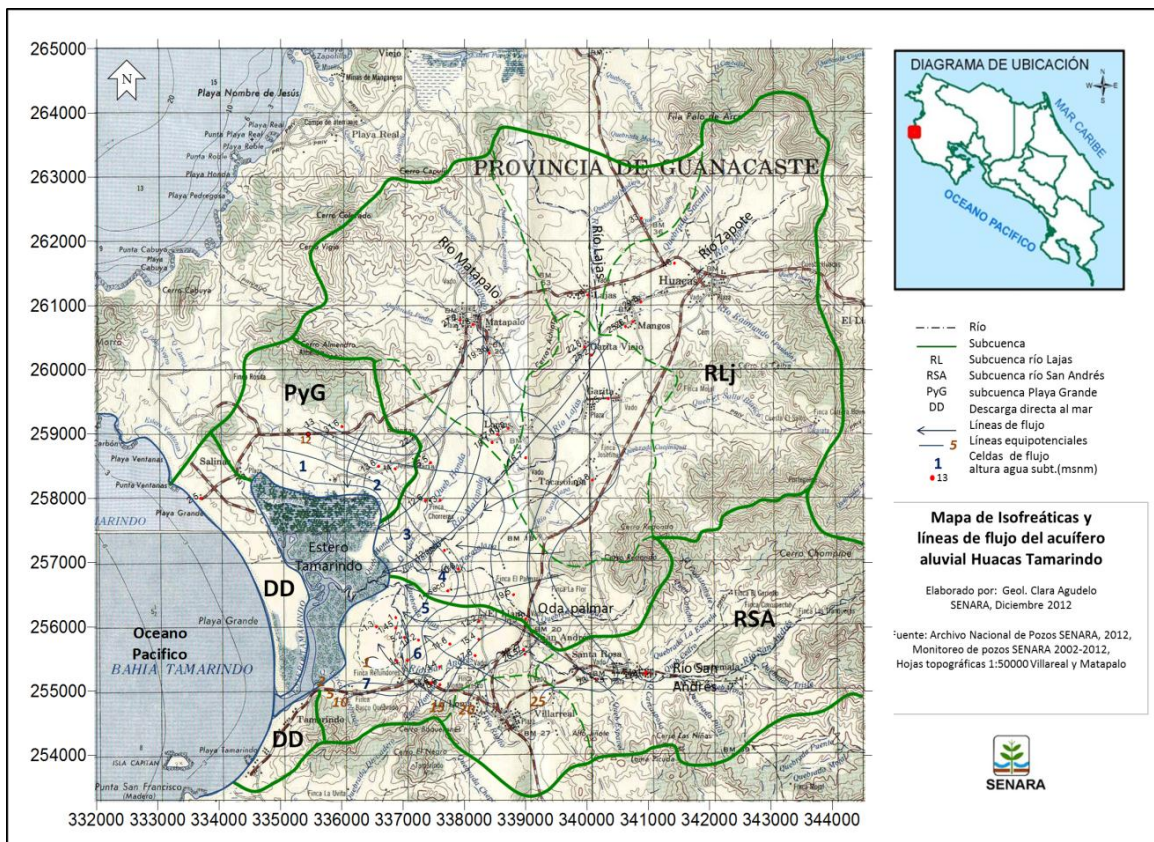


Figura 21. Isofreáticas y líneas de flujo del acuífero aluvial Huacas Tamarindo



Cabe resaltar que en general en la zona no se evidencian cambios relevantes en los niveles del acuífero durante el periodo de monitoreo del acuífero del año 2002 al año 2012, a excepción de la zona de planicie baja de la subcuenca del río San Andrés, donde se ubican el campo de pozos refundores del acueducto Beko (administración traspasada al AyA en el 2009), donde se tienen descensos de los niveles estáticos evidenciados en los siguientes datos:

- El pozo excavado identificado como PMN-4 de la red de monitoreo de pozos registro en los años 2002 a 2004 nivel de agua durante los meses de la época seca, en el año 2005 se reportó seco en abril y mayo, en el 2006 se reportó seco de marzo a junio, y a partir del 2007 se encontró seco en el mes de febrero hasta el mes de agosto. El pozo PMN-4 se encuentra a aproximadamente 174m del pozo VI-92 (Virgilio - campo de pozos Refundores).
- El pozo VI-92 del campo de pozos Refundores identificado como Guanacaste presentó un nivel estático para el mes de julio, de 2m en el año 1996 y de 6,04m para el año 2006, sin embargo, se presentan un comportamiento similar en la precipitación de los años anteriores (1995 con 2619mm y 2005 con 2440mm de lluvia) y en la precipitación de los años 1996 y 2006 entre los meses de abril a julio (inicio de la época de recarga):

Año	Abr	May	Jun	Jul	Total May-Jun
1996	0	249,9	303,7	342,8	896,4
2006	12,5	308,9	327,7	226,0	862,6

- los pozos del acueducto de Beko identificados en el cuadro de profundidad de agua en el Anexo 1 como BK-4 y BK-5 (Virgilio y Guanacaste) reportan niveles estáticos por debajo del nivel del mar a -1.45 msnm (mayo 2003) y - 1.3 msnm (junio 2006) respectivamente.
- Dicha zona está sujeta a una explotación intensiva con niveles de bombeo o dinámicos por debajo del nivel del mar, reportado en los pozos BK-1 al BK-6 (Cuadro 12).

Cuadro 12. Niveles dinámicos máximos reportados en los pozos del acueducto BEKO

POZO	PROPIETARIO	ND MAXIMO (msnm)	FECHA DE REGISTRO ND
BK-1	Albin	-15,13	may-03
BK-2	Pochote	-6,35	abr-93
BK-3	Papaturro	-8,95	jun-06
BK-4	Virgilio	-2,25	abr-93
BK-5	Guanacaste	-11,85	may-06
BK-6	Palmas	-2,63	abr-93

- La explotación intensiva del campo de pozos refundores y en el sector del Llano puede estar provocando la inversión del gradiente hidráulico, disminuyendo el caudal de descarga del acuífero al estero en ese sector, como se observa en el mapa de isofreáticas de la Figura 21 (cuadrante 255.000-256.500 / 336.000-337.000).



Otros datos relevantes de los efectos de la explotación de pozos son:

- El pozo 5 del acueducto de Playa Grande identificado como MTP245, fue sacado de producción por contaminación por cloruros de sus aguas, dicho pozo se encuentra cerca del estero Tamarindo, el cual podría ser la fuente de la contaminación. Este pozo fue nuevamente puesto en operación.
- Los pozos PMNe-23 y PMNe-24 se encuentran secos. De acuerdo a lo indicado por el dueño de la Finca El Silencio (PMNe-23), dichos pozos presentaban agua durante todo el año. Indicó que los mismos se secaron luego de la entrada en operación de los pozos del acueducto Tamarindo (VI-145 y AcT-2). Estos pozos se encuentran a una distancia de 383.9 m del PMNe-23 y 317 m del PMNe-24, lo cual ratifica los altos valores teóricos de radios de influencia de 618 m determinados para el bombeo simultaneo de los pozos.
- Gran parte de los pozos de abastecimiento público se ubican cercanos a las márgenes de los ríos y quebradas de la zona (Anexo 1, ver mapa de pozos de abastecimiento público).

La dirección del flujo subterráneo predominantemente es hacia el sur oeste en las subcuencas del río Lajas y Playa Grande y hacia el oeste en la subcuenca del río San Andrés, descargando las aguas hacia al estero Matapalo (figura 21).

El caudal de descarga por flujo subterráneo fue determinado por medio de la ecuación de Darcy en 524 lps (Cuadro 13).

Cuadro 13. Flujo subterráneo por unidad de recarga

Parámetro	Playa grande			Río Lajas		Río San Andrés	
	1	2	3	4	5	6	7
Celda de flujo							
T (m ² /a)	250	40	970	970	970	350	250
I	0,013	0,025	0,013	0,011	0,022	0,020	0,033
l (m)	1200	1050	675	725	475	925	1050
Q (m ³ /día)	3750	1050	8184	7814	10239	6475	8750
Q (l/s)	43,4	12,2	94,7	90,4	118,5	74,9	101,3
Qsub (l/s)	55.6			303,7		176.2	

En cuanto a la descarga del acuífero por flujo base a los ríos y quebradas existentes en la subcuenca, se considera que al encontrarse estos secos al final de la época seca y ser de carácter intermitente sin presencia de flujo base en la época de estiaje, el flujo base es cero para cálculos de disponibilidad. En la planicie baja del río Lajas, existen algunos humedales de carácter permanente que son alimentados en la época seca directamente por el acuífero, estos no presentan descarga a los ríos durante dicha época. La descarga al estero en época de estiaje corresponde al flujo profundo.

De acuerdo con los vecinos de la zona, los ríos San Andrés y Lajas fueron en épocas pasadas de carácter permanente, por lo cual se puede concluir que la deforestación de la cuenca y la explotación de aguas subterráneas han ocasionado un desequilibrio en el régimen hídrico de la zona.



10. Disponibilidad de Agua en el acuífero

10.1 Balance de aguas subterráneas

El balance de aguas subterráneas del cuadro 14 mediante el cual se determina el agua de recarga potencial que no ingresa al acuífero y que escurre sobre la superficie, se realizó basado en la siguiente ecuación.

$$\text{BAS} = \text{Entradas} - \text{Salidas}$$
$$\text{BAS} = (\text{RP} + \text{FR}) - (\text{Ext} + \text{FP})$$

Cuadro 14. Balance de Aguas Subterráneas

Subcuenca	Area (Km ²)	Recarga Potencial (lps)	Caudal de extracción (lps)	Flujo de retorno (lps)	Flujo Profundo (lps)	BAS (lps)	RS 20% RP (lps)	Caudal disponible (lps)
Playa Grande	5,9	93,4	28,5	5,7	55,6	15,0	18,7	-3,63
Río Lajas	51,1	735,2	267,4	53,5	303,7	217,6	147,0	70,53
Río San Andrés	24,4	390,2	163,6	32,7	176,2	83,1	78,0	5,06

El caudal de recarga potencial que no ingresa al sistema acuífero y que escurre sobre la superficie (BAS) se determinó en 15 lps para la Subcuenca de Playa Grande equivalente al 16,1% de la recarga potencial, 217,6 para la Subcuenca del río Lajas equivalente al 29,6 % de la RP y 83,1 lps equivalente al 21,3% de la RP para la Subcuenca del río San Andrés.

10.2 Rendimiento sostenible y disponibilidad de agua:

El Rendimiento sostenible de un acuífero, puede considerarse como un balance hídrico donde se contempla el agua recargada, el flujo subterráneo, el agua extraída, retornos y la descarga que alimenta a los ecosistemas naturales (MINAET, AYA & SENARA, 2010).

En relación al concepto de rendimiento seguro de un acuífero, se retoma algunos conceptos indicados por Ponce en el 2007:

El concepto tradicional de rendimiento seguro, que iguala el rendimiento seguro con la recarga natural está errado y ha sido ampliamente desacreditado. El rendimiento sostenible no puede ni debe igualarse a la recarga natural. El rendimiento sostenible es un blanco móvil, a ser determinado después de un estudio y de una valoración cuidadosa de todos los aspectos referentes a la utilización del agua subterránea. Indica además que, este se puede expresar como un porcentaje de la recarga.

En ausencia de estudios holísticos detallados, un valor de referencia del rendimiento sostenible se puede tomar como toda o una fracción apropiada de la media global de la percolación profunda, estimada como el 2% de la precipitación, o bien como un porcentaje de la recarga. En teoría, una estimación razonablemente conservadora de rendimiento sostenible sería el 10% de la recarga, los valores medios puedan ser alrededor del 40%, con los valores menos conservadores alrededor del 70%. En la práctica, valores más altos que el 10% pueden reflejar la necesidad de tomar en



cuenta otros factores. Serán necesarios estudios locales y regionales detallados para determinar si este valor se puede aumentar.

Indica que, el concepto actual de rendimiento sostenible representa un compromiso entre teoría y práctica. La sostenibilidad va mano a mano con la conservación; cuanta más conservadora es la política propuesta o adoptada, más sostenible será. La sostenibilidad puede ser fomentada con un manejo adecuado que busca capturar la recarga rechazada, propiciar la recarga artificial limpia, y disminuir [o limitar] la recarga artificial negativa. Un acercamiento holístico a la sostenibilidad del agua subterránea considera los aspectos hidrogeológicos, hidrológicos, ecológicos, socioeconómicos, tecnológicos, culturales, institucionales y legales de la utilización del agua subterránea, en un tratamiento sin costura, intentando establecer un compromiso razonable entre los varios intereses en conflicto.

Los servicios naturales que brindan los acuíferos están asociados con el mantenimiento de los ecosistemas terrestres y acuáticos que dependen de la descarga natural. La conservación del flujo de base parece ser la única manera práctica de asegurar que la captura de agua subterránea no termina por secuestrar toda la descarga natural.

La sostenibilidad del agua subterránea puede ser propiciada mediante el aumento de la recarga de tres maneras:

1. Capturando la recarga rechazada;
2. Promoviendo la recarga artificial limpia, y
3. Reduciendo la recarga artificial negativa.

10.2.1 Rendimiento Seguro en función de los resultados del BAS

El valor recomendado como rendimiento seguro o factor de seguridad para acuíferos con estudios de detalle que se ha recomendado en estudios anteriores realizados por el SENARA es de un 20% de la recarga potencial al acuífero.

Este factor de seguridad se considera necesario de aplicar para el acuífero Huacas Tamarindo, dado:

- La heterogeneidad del medio acuífero (sectores con comportamiento temporal de acuíferos semiconfinados).
- La carencia de pozos de monitoreo en la cuenca baja de la planicie que permita monitorear el comportamiento de la explotación en relación a la descarga natural del acuífero hacia el Estero Matapalo.
- No se contempló el efecto de la impermeabilización de los suelos por cobertura infraestructura, aunque se estima un efecto actual bajo.
- El balance hídrico fue determinado para valores medios mensuales de precipitación y evapotranspiración potencial (ETP), no considera condiciones extremas.



- La inexistencia de estaciones meteorológicas totales en o cercana a la zona de estudio, que permita determinar la ETP propia de la zona (ETP determinada con base en una estación Santa Cruz).
- La posible existencia de pozos adicionales no inventariados y contabilizados.
- La posibilidad de disminución de la recarga a futuro por efecto de temporalidad y cambio climático, cambio de uso del suelo.

Es importante resaltar que el comportamiento del sistema está directamente relacionado a la precipitación (acuífero de rápida respuesta a la precipitación) y que la determinación de la recarga potencial se realizó basado en la precipitación media de la zona, por lo cual un período de sequía podría afectar temporalmente la cantidad de agua aprovechable del acuífero.

Basado en los resultados del BAS indicado anteriormente (Cuadro 14, apartado 10.1), aunque todas las subcuencas presentan excedente de agua, se considera que, bajo el esquema de rendimiento seguro del 20% de la recarga potencial (Cuadro 15), las subcuencas de los Río Lajas y Río San Andrés cuentan con un caudal disponible para su aprovechamiento adicional de 70,53 lps y 5,06 lps respectivamente, mientras que la Subcuenca de Playa Grande, presenta valores negativos de disponibilidad de agua para su aprovechamiento de -3,63 lps.

Cuadro 15. Disponibilidad de agua del sistema acuífero Huacas - Tamarindo

Subcuenca	Caudal disponible (lps)
Playa Grande	-3,63
Río Lajas	70,53
Río San Andrés	5,06

En la zona de descarga al mar no se recomienda la explotación del agua subterránea, dada las condiciones de salinización que presentaron los pozos en la zona de Playa Grande y al alto desarrollo de infraestructura no planificada con un manejo inadecuado de las aguas residuales en la zona costera de playa Tamarindo.

10.2.2 Rendimiento Seguro en función de lo recomendado por Ponce (2007)

Aplicando el concepto de rendimiento sostenible indicado por Ponce (2007),

$$RS_{n\%} = n\% RP$$
$$QD_{n\%} = RS_{n\%} - (Q_{Ext} - Q_{Ret})$$

con el valor de 40% de la recarga potencial (anexo 3 y cuadro 15), la disponibilidad de agua en el acuífero varía, en relación con la determinada con estudios de detalle por medio del Balance de Aguas Subterráneas (Anexo 3), aumentando para todas las subcuencas (Río Lajas 80,1lps, Río San Andrés 25,2lps y Playa Grande 14,6lps) y con valor positivo para Playa Grande.

No se considera como dato final de caudal disponible para extracción adicional, el caudal determinado por este método, dado que el mismo no evalúa la descarga natural del sistema



acuífero por flujo subterráneo, el cual, es contemplado en la disponibilidad determinada en el inciso a) de este mismo apartado, con base en los estudios de detalle de Balance de Aguas Subterráneas (BAS).

11. Caracterización hidrogeoquímica e isotópica

11.1 Aspectos técnicos del muestreo

Para estudiar las características de flujo, determinar las conexiones hidráulicas entre los cuerpos de agua superficiales y subterráneos y evaluar el dinamismo del sistema hidrogeológico, se efectuaron cuatro campañas de muestreo de agua subterránea, agua superficial, estero y precipitación, dos de los cuales se realizaron durante la estación seca (abril - 2008 y marzo -2009) y los otros dos durante la estación lluviosa (septiembre y noviembre del 2008), en las que se levantó en 29 sitios de muestreo, 99 muestras para análisis químicos y 72 muestras para análisis isotópicos

El tipo de análisis y número de muestras por sitio de muestreo y por campaña se presenta en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Tipo de análisis y números de muestras por sitio y campaña de muestreo

Muestreo	Fisicoquímico					Isotópico				
	PP	PE	AS	ES	LL	PP	PE	AS	ES	LL
1	19	3	1	0	0	12	2	1	0	0
2	16	3	5	1	0	11	3	4	1	1
3	15	3	5	1	1	11	3	4	1	0
4	17	3	4	1	1	11	3	3	1	0
Total	67	12	15	3	2	45	11	12	3	1

Tipo de muestra: PP: Pozos perforados; PE: Pozos excavados; AS: Agua superficial; ES = Estero; LL = Agua lluvia

Los sitios de muestreo con la descripción general de los mismos se presentan en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Sitios de muestreo fisicoquímico e isotópico

	Nombre del sitio de muestreo	Latitud	Longitud	Precisión	Altitud	Tipo de muestra	Tipo de muestreo	Prof. muestra (m)	
								mín.	máx.
HT1	Aeropuerto Tamarindo (PMN-2)	337762	255732	GPS	15	pm	Puntual		24.3
HT2	Los tornillos (PMN-3 VI94)	337252	255793	GPS	14	pm	Puntual	25	29.4
HT3	Ac. Beko Virgilio (Pz 1BB - ILG777)	336866	255967	GPS	7.3	pb	Puntual		16
HT4	Ac. Beko Las Palmas (Pz 9 manglar - ILG776)	336881	256142	GPS	6.5	pm	Puntual		12.7
HT5	Ac. Tamarindo (Tam Pz 3 ferretería - VI20)	336152	254939	GPS	8	pb	Puntual	25	32.6
HT6	Ac. Tamarindo llanito pozos 1 y 2 (VI145)	337848	256925	GPS	17	pb	Puntual		24
HT7	Ac. Edward Wenrich (Pz 2 Russell)	334747	253675	GPS	7	pb	Puntual	-	-
HT8	Asada Sta Rosa (Pozo 2 redondel - VI142)	340143	255187	GPS	30	pb	Puntual		30
HT9	Asada sta rosa (Pozo 3 Mitchel)	340263	255092	GPS	30	pm	Puntual	14	16.7
HT10	Acueducto Rural de Lomas	338999	258631	GPS	21	pb	Puntual		20
HT11	Jorge Leal (exc. el cocodrilo)	337366	257965	GPS	17	eb	Puntual		8.2
HT12	Ac. Playa Grande (pozo 5 - MTP245)	334360	258692	GPS	6	pb	Puntual		50
HT13	Ac. Playa Grande campo de pozos Ventanas	333837	259686	GPS	16	pb	Puntual	-	-
HT14	Don Greivin - Py Grande	334235	258347	GPS	4	eb	Puntual		6
HT15	Casa amarilla - Py Grande	335305	256578	GPS	4	eb	Puntual		5
HT16	Resid. Py Grande -F2 (Enrique el español)	335313	259031	GPS	18	pb	Puntual		-
HT17	Asada Matapalo 1 (MTP76)	338208	260778	GPS	28	pb	Puntual		12
HT18	Asada Matapalo 2 (AM-2)	338498	260078	GPS	30	pb	Puntual		23
HT19	Marcial Lopez (ILG 81)	340806	260432	GPS	29	pb	Puntual		16.7
HT20	Garita Vieja (MTP70)	340066	260234	GPS	28	pb	Puntual		21.6
HT21	Ac. Huacas redondel (MTP20)	342097	261505	GPS	50	pb	Puntual		30



HT22	Ac. Playa Grande (pozo 7 - MTP249)	335177	259035	GPS	18	pb	Puntual	20
HT23	Humedal Jorge Leal - el cocodrilo	337603	257970	GPS	13	humedal	Puntual	
HT24	Quebrada Tacasolapa	337850	256950	1:50000	14	río	Puntual	
HT25	Río San Andrés	339800	255300	1:50000	xxx	río	Puntual	
HT26	Río Lajas	340150	260500	1:50000	xxx	río	Puntual	
HT27	Río Matapalo	338300	261000	1:50000	xxx	río	Puntual	
HT28	Estero Matapalo	340150	260500	1:50000	xxx	estero	Puntual	
HT29	Estación La Garita	337603	257970	GPS	xxx	lluvia	Compuesta	

pm = pozo de monitoreo
pb = pozo de bombeo

La ubicación de los sitios se muestra en la Figura 22.

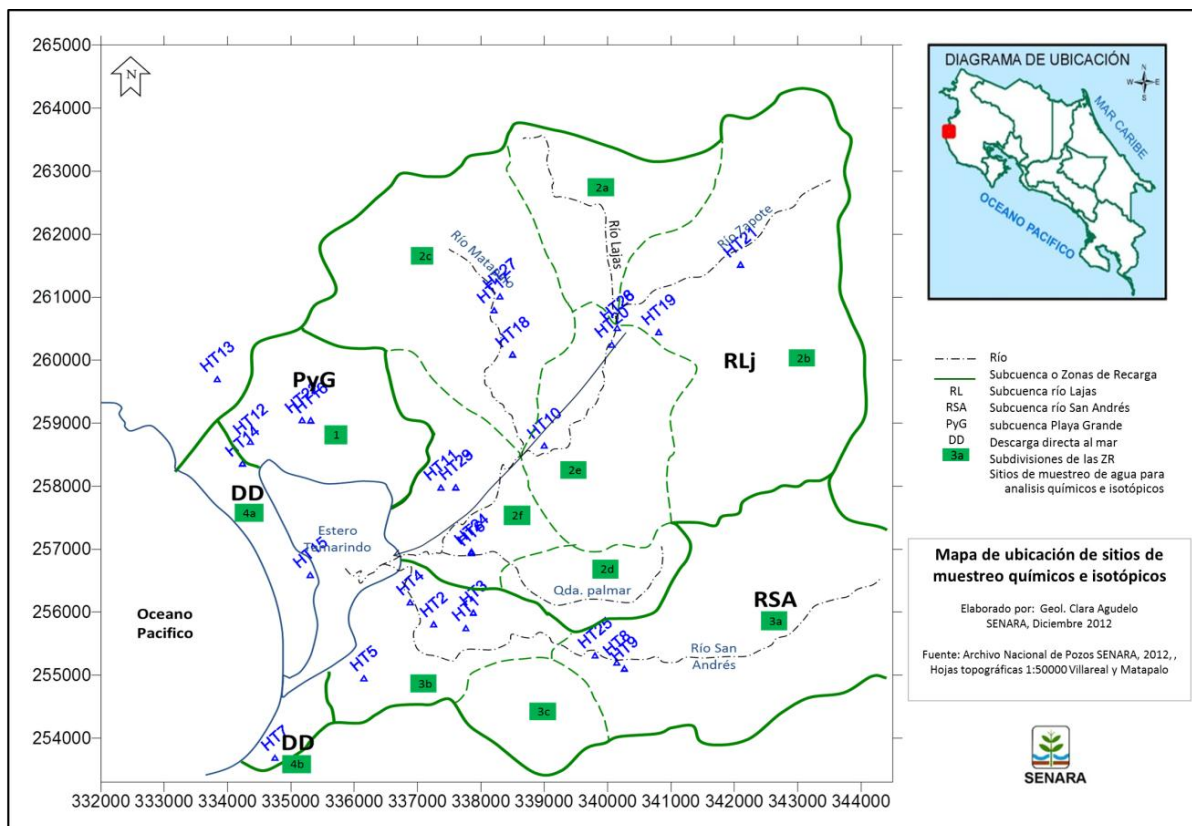


Figura 22. Mapa de ubicación de sitios de muestreo físico-químico e isotópico

La toma de muestra fue realizada por técnicos del Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA) de la UCR y personal de SENARA, las muestras recolectadas son simples, a excepción de las muestras de precipitación que son compuestas. Los pozos con bomba instalada fueron muestreados utilizando la misma, los pozos profundos y excavados sin equipo de bombeo fueron muestreados utilizando un muestreador bailer.

Las botellas utilizadas fueron debidamente esterilizadas en laboratorio con agua destilada y se realizó la limpieza en campo con el agua del sitio de muestreo. Las muestras por sitio fueron recogidas en dos botellas de plástico de 2 litros (aniones, cationes) y una de vidrio de 50 ml (isotopos) cada una debidamente identificada con el código del sitio de muestreo, código de la



muestra, fecha de recolección y tipo de análisis a realizar. Las muestras fueron almacenadas en hieleras para su transporte al laboratorio.

Los análisis de conductividad eléctrica, temperatura, grado de acidez y dureza, iones mayoritarios fueron realizados en el Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA) de la UCR. Estos análisis químicos ambientales (MAQA) fueron realizados de acuerdo con el American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater". 21a. Edición. 2005. Las incertidumbres corresponden a incertidumbres expandidas con un factor de cobertura de 2 ($k=2$) con un nivel de confianza del 95%.(Cuadro 18).

Los parámetros de alcalinidad parcial ($\text{mg CO}_3^{2-}/\text{L}$) y alcalinidad total ($\text{mg HCO}_3^-/\text{L}$) se realizaron en el campo de acuerdo con el método de análisis MAQA 6/09.

Para el tratamiento de los datos se utilizó gráficos de Stiff y Piper para la caracterización química del agua, así como gráficos de correlación de parámetros.

Cuadro 18. Método de análisis de las muestras de agua recolectadas

Tipo de análisis	Unidades	Método de análisis
Calcio	(mg L^{-1})	MAQA 9/08
Br^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}	(mg L^{-1})	MAQA 20/09
Conductividad	($\mu\text{S}/\text{cm}$)	MAQA 29/05
Dureza Total	($\text{mg CaCO}_3 \text{L}^{-1}$)	MAQA 13/06
Hierro	(mg L^{-1})	MAQA 23/06
Magnesio	(mg L^{-1})	MAQA 9/08 & 13/06
pH	(pH a 20,0 °C)	MAQA 24/04
Sodio, Potasio	(mg L^{-1})	MAQA 31/06
Temperatura	(°C)	MAQA 32/06

Los análisis isotópicos de desviación del radio isotópico para isótopos ambientales de deuterio (^2H) y oxígeno-18 (^{18}O), fueron realizados en el Laboratorio de Espectrometría de Masas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con el apoyo financiero del Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, por sus siglas en inglés).

Además se determinó las propiedades físicas como conductividad eléctrica, temperatura, grado de acidez y dureza, iones mayoritarios y la desviación del radio isotópico para isótopos ambientales de deuterio (^2H) y oxígeno-18 (^{18}O). Para el tratamiento de los datos se elaboraron los diagramas de Stiff, Schoeller y Piper para la caracterización química del agua, así como gráficos de correlación de parámetros (Anexo 4).

11.2 Modelo hidrogeoquímico e isotópico

Los reportes de los laboratorios y resultados hidrogeoquímicos de las muestras se presentan en el Anexo 4. De las 99 muestras de agua analizadas se descartaron, por inconsistencia en los resultados de los iones de magnesio y sodio en relación a los contenidos típicos de la zona 4 muestras de la primera campaña y por una mala toma de las muestras en pozos clorados una muestra de las campañas segunda y tercera y dos muestras de la cuarta campaña.



Los valores de conductividad varían de 250 a 680 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el pH varía entre 6.8 y 8.3. Las concentraciones de CO_3 y Fe para todas las muestras analizadas se encontraron por debajo del límite de detección de $1.6 \text{ mg CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ y $0.093 \text{ mg Fe} \cdot \text{L}^{-1}$.

En el diagrama de Schoeller (Figura 23a) y en la gráfica de Piper (Figura 23b), se observa que las aguas superficiales y subterráneas de pozos profundos y excavados presentan un mismo comportamiento, se clasifican como bicarbonatadas cálcicas que se relaciona con aguas jóvenes o de corta residencia en el acuífero, no se observa influencia del agua del estero del tipo sódica clorurada.

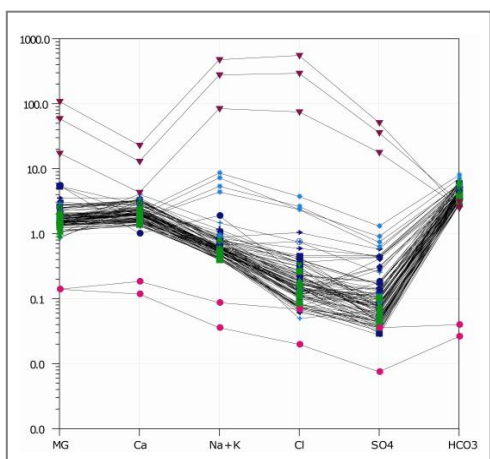


Fig. 23a

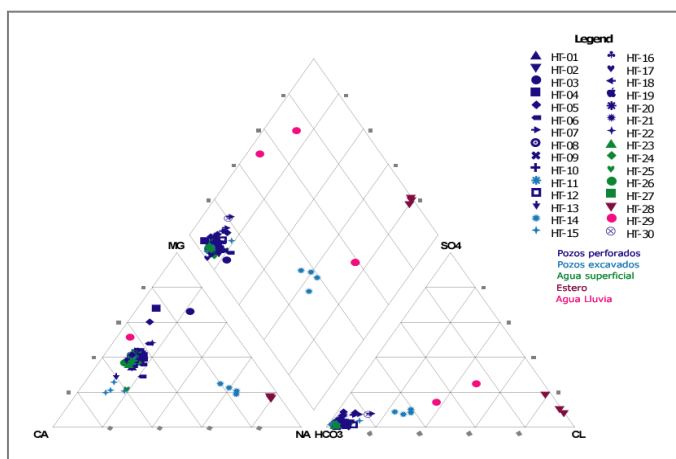


Fig. 23b

Figura 23. a) Diagrama Schoeller y b) Gráfico Piper

En el Anexo 4 se presentan los diagramas de Schoeller y las gráficas de Piper de análisis de los muestreos químicos todas las muestras analizadas.

En la zona no se evidencian cambios espaciales importantes en el comportamiento hidrogeoquímico de las aguas subterráneas y superficiales. Solo las cuatro muestras del pozo excavado HT15 - Casa amarilla se salen del comportamiento típico de bicarbonatadas cálcicas, presentando concentraciones más altas de Na y Cl. Estos pozos se ubican en la barra arenosa de Playa Grande en la zona donde se cerraron los pozos perforados existentes por problemas de salinidad.

Los diagramas de Stiff de la Figura 24a muestran el comportamiento típico del agua subterránea y el agua superficial en la zona de estudio, en los cuales en cuatro muestreos no se observa cambios estacionales importantes, sin embargo, al observar en detalle en el diagrama de Piper de la Figura 24b las aguas subterráneas muestran una variación estacional, teniéndose que la muestra del mes más seco (abril) presenta menor contenido de Na, Cl y SO_4 que la muestra de la estación más lluviosa (septiembre), las otras dos muestras (marzo mediados de la época seca y noviembre final de la época lluviosa) se ubican entre las dos muestras de los dos meses extremos.

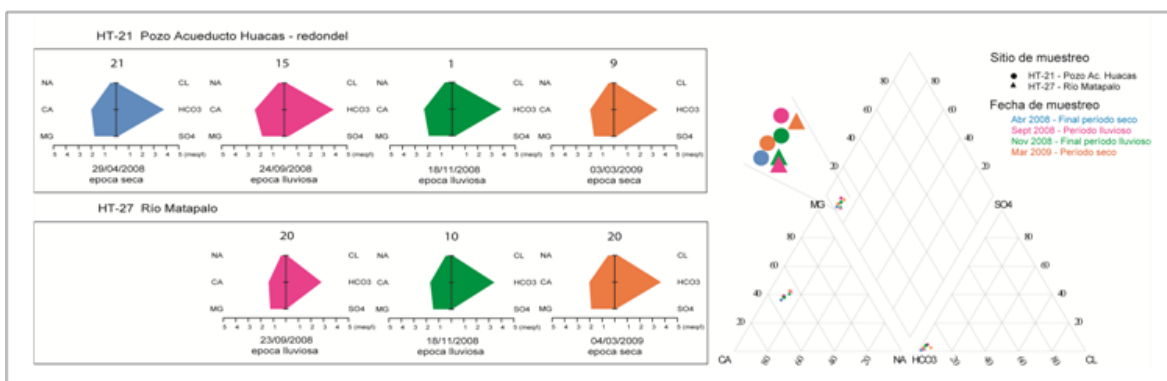


Fig. 24a

Fig. 24b

Figuras 24. Diagramas a) Stiff y b) Piper para las estaciones HT-21 muestra de agua subterránea del pozo del acueducto Huacas ubicado en la sub cuenca del río Lajas sector de Huacas y HT-27 muestra de agua superficial del río Matapalo. Las muestras son representativas de la química para el agua de la zona de estudio de tipo bicarbonatadas cálcicas.

Los resultados isotópicos de los cuatro muestreos se presentan en la cuadro 10. De las 72 muestras de agua analizadas se descartó por inconsistencia en los resultados las muestras del pozo excavado HT15 – Casa amarilla de la tercera y cuarta campaña de muestreo, cuyo comportamiento podría estar influenciado por agua lluvia (cuadro 19). Estos muestreos se salen del comportamiento isotópico típico en la zona, donde el mes más empobrecido corresponde a noviembre al final de la época lluviosa. Estos resultados concuerdan con lo obtenido en los análisis fisicoquímicos, además presenta los mayores valores de conductividad en los meses lluviosos. Este comportamiento podría estar relacionado a contaminación por agua lluvia.

Cuadro 19. Comportamiento isotópico anómalo del agua del pozo HT15 – casa amarilla

Período	Fecha de muestreo	$\delta^2\text{H}$ vsmw ‰	δ^{18} vsmow ‰	δ -excess(‰)	Conductividad
Final período seco	2008/04/29	-43.3	-6.42	8.0	398.5
Período lluvioso	2008/09/23	-50.0	-7.39	9.1	628.5
Final período lluvioso	2008/11/19	-67.0	-9.21	6.6	463
Período seco	2009/03/04	-57.1	-8.18	8.3	383.8

En la gráfica de la Figura 25 se observa el comportamiento isotópico de las aguas subterráneas, las aguas superficiales, del estero y de la única muestra de lluvia analizada. Para efectos del análisis se presenta en el gráfico la recta meteórica mundial (RMM) definida por Craig en 1961 y la recta meteórica del Valle del río Tempisque (RMT) determinada por Gómez y Arredondo en 1990 a partir de las lluvias mensuales de las estaciones ubicadas en la provincia de Guanacaste en el Pacífico Norte de Costa Rica.

Se observa que todas las muestras se encuentran desplazadas de las RMM y RMT, ubicadas entre ambas rectas, a excepción de las muestras de estero de la tercera y cuarta campaña de muestreo tomadas al final de la época lluviosa y a mediados de la época seca respectivamente y la muestra del río Lajas de la cuarta campaña de muestreo. Estas muestras se encuentran desplazadas de la RMT y por debajo de la misma, indicando un efecto de evaporación en la zona y temporalidad,



donde las muestras de los meses secos se encuentran más enriquecidas isotópicamente que las muestras de la época de lluvia.

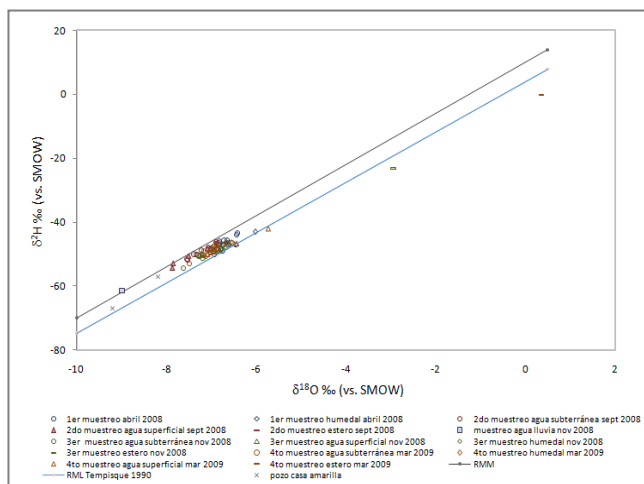


Figura 25. Comportamiento isotópico del agua en el acuífero Huacas Tamarindo.

Se puede observar en la Figura 26 una relación directa en el comportamiento estacional de las aguas superficiales y subterráneas con relación a los períodos de lluvia y sequía teniéndose una tendencia similar de las aguas superficiales y las aguas subterráneas tanto en la época seca (abril 2008 y marzo del 2009) como en la lluviosa (septiembre y noviembre del 2008), con un empobrecimiento en el mes más lluvioso (septiembre) y mayor enriquecimiento isotópico en el mes más seco (abril). Los resultados isotópicos de las muestras en los meses de noviembre y marzo se ubican entre los muestreos de los dos meses extremos.

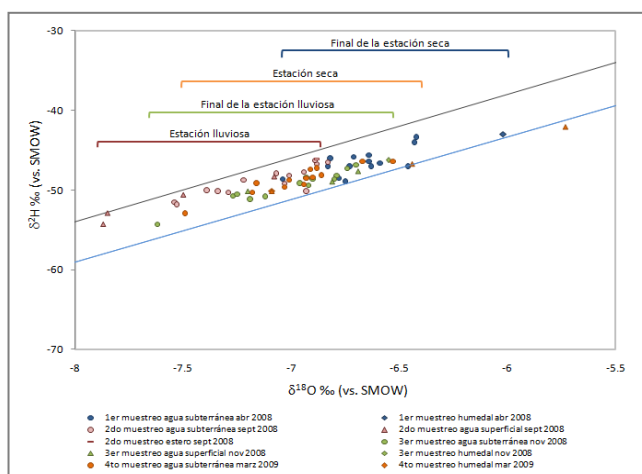


Figura 26. Comportamiento estacional isotópico de las aguas superficiales y subterráneas.

Las muestras del mes de septiembre se ubican más cerca de la RMM con relación al resto de las muestras, indicando posiblemente que estas se encuentran afectadas por un proceso de evaporación mayor. Este comportamiento temporal de las aguas subterráneas claramente



marcado indica una rápida respuesta a la lluvia, con un corto tiempo de residencia de las aguas en el acuífero, lo cual concuerda con los resultados del monitoreo de niveles y reafirma la condición dinámica y vulnerable del acuífero.

En relación al comportamiento espacial de las aguas en el acuífero, se observan dos zonas bien diferenciadas (Figura 27). La primera zona corresponde a las cuencas de los ríos Lajas y San Andrés y la segunda zona corresponde a la cuenca de Playa Grande. En los gráficos de O18 versus fecha de muestreo se observa que para las cuencas de Lajas y San Andrés las aguas más enriquecidas se dan a final de la época seca en el mes de abril, mientras que para la zona de Playa Grande las aguas se encuentran más enriquecidas en el mes de marzo a mediados de la época seca que en el mes de abril.

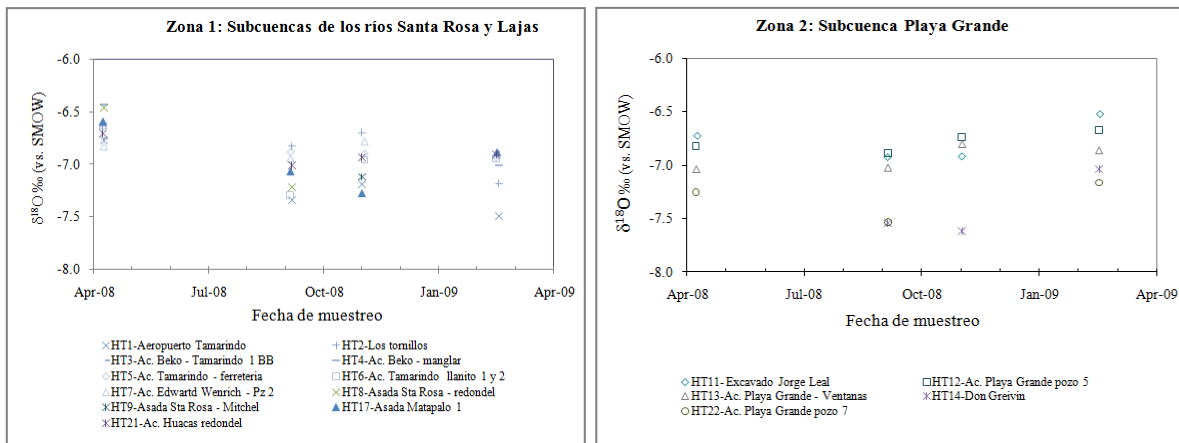


Figura 27. Gráficos de O18 vs fecha de muestreo muestra el comportamiento temporal de las aguas subterráneas, para las subcuencas Santa Rosa y Lajas y la subcuenca de Playa Grande.

12. Conclusiones

12.1 Hidrogeología

En los sedimentos cuaternarios coluvio aluviales se desarrollan acuíferos libres con variación espacial a libre cubierto y variación temporal para estos últimos a semiconfinados, de moderada a buena capacidad de producción con caudales reportados de 3 lps a 25 lps. En las unidades de basalto y radiolaritas, dependiendo del grado de fracturación de la roca, se desarrollan acuíferos de bajo potencial con caudales que varían entre 1 a 4 lps y se encuentran en comunicación hidráulica con los acuíferos aluviales, mientras que, la unidad de intrusivos se consideran de muy bajo potencial acuífero.

Los materiales que conforman el acuífero coluvio - aluvional corresponden a sedimentos de granulometría variable desde arenas gruesas a gravas arenosas, aunque localmente pueden presentarse pequeños lentes de materiales finos. Se encuentra cubierto por arenas y suelos areno arcillosos en la mayor parte del área y algunos sectores presentan coberturas de arcillas y limos. El espesor máximo del acuífero es de 20 metros.



La transmisividad en el acuífero varía de acuerdo al tipo de material, granulometría y espesor captado, siendo estas altas mayores a los 1000 m²/día para las unidades aluvionales de las subcuencas del río Zapote (sector de Huacas), Qda. Palmar y subcuenca baja del río Lajas y Subcuenca baja del río San Andrés (sector del Llano) donde los pozos captan materiales aluvionales de granulometría gruesa y se encuentran cercanos a los ríos, valores medios del orden de los 400 m²/día en la subcuenca alta del río San Andrés (sector Santa Rosa) y baja del río San Andrés (sector del Llano) donde los pozos captan tanto los materiales aluvionales como basaltos fracturados y valores bajos menores de 250 m²/día en el resto de las zonas donde los pozos captan aluviones finos, radiolaritas y/o basaltos fracturados del Complejo de Nicoya.

Los radios de influencia (RI) para condiciones de explotación de 24 horas de bombeo continuo, están directamente relacionados a las condiciones de confinamiento y trasmisividad del acuífero, teniéndose los valores altos de RI altos, mayores a 1000m, en los sectores donde el acuífero se comporta como semiconfinado, RI medios de 500 a 900m en los sectores donde el acuífero se comporta como libre y la trasmisividad es de media a alta y RI bajos, menores de 240m en sectores donde el acuífero se comporta como libre y de baja trasmisividad.

La profundidad del agua subterránea en el acuífero aluvional es somera, con una profundidad menor a 5 metros en la parte baja del acuífero y entre 5 y 10 m de profundidad en la cuenca alta.

De los resultados del monitoreo de pozos, se evidencia una relación directa de las aguas subterráneas y la precipitación, ya que los cambios en los niveles del acuífero en los pozos corresponden con los cambios en la precipitación de la zona, indicando una recarga rápida del agua del acuífero. La variación estacional media de los niveles de aguas subterráneas es de 3.3 m entre la época seca y la lluviosa.

En la zona no se evidencian cambios relevantes en los niveles del acuífero durante el período de monitoreo del acuífero del año 2002 al año 2012, a excepción de la zona de planicie baja de la subcuenca del río San Andrés donde se ubican el campo de pozos refundores, donde se tienen niveles estáticos y dinámicos por debajo del nivel del mar y una posible inversión en el gradiente hidráulico en relación al estero Tamarindo, sin embargo esto debe ser valorado con pruebas de bombeo de larga duración con pozos de observación.

12.2 Vulnerabilidad a la contaminación

El mapa de vulnerabilidad presentado en este estudio corresponde a la modificación del mapa elaborado en diciembre del 2008, basado en la integración de nueva información como es geología de detalle (SENARA-UCR, junio 2009), del levantamiento georeferenciado de los pozos de abastecimiento en público y de los resultados de aforos diferenciales.

En el mapa de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero aluvial se destacan las siguientes zonas de vulnerabilidad y elementos de manejo:

- Vulnerabilidad Extrema: corresponde a la parte baja del acuífero en las inmediaciones del estero Tamarindo, caracterizado por acuífero libre no cubierto, albergado en sedimentos no



consolidados, niveles de agua menores a 5 m y los tramos de los ríos y quebradas en las cuencas media y baja, donde se comportan como influentes aportando agua al acuífero

- Vulnerabilidad Alta: acuífero libre no cubierto a libre cubierto, con sedimentos suprayacentes de arenas a suelos areno arcillosos y niveles de agua subterránea entre 5 y 10 m.
- Vulnerabilidad Media: donde el acuífero es libre cubierto, con material suprayacente de arcillas y limos de poco espesor y niveles de agua subterránea menores a 5m. La cobertura de arcilla varían entre 1 y 6m. La cobertura del acuífero en zonas de media vulnerabilidad le brinda protección al acuífero, sin embargo, esta protección puede variar o desaparecer, si las excavaciones para la adecuación de obras eliminan parcial o totalmente la capa protectora.
- Zona especial franja costera de playa Tamarindo: corresponde a la la franja costera de playa Tamarindo delimitada por SENARA en diciembre del 2007. Presenta en la parte baja condiciones de extrema vulnerabilidad, sin embargo, dado su alto desarrollo con infraestructura no planificada y el manejo no adecuado de las aguas residuales, se recomiendan medidas especiales de manejo en función de su estado de desarrollo actual.
- Radio de 200m alrededor de los pozos de abastecimiento público que se encuentran en operación y que corresponde a la zona de protección establecida en el Artículo 31 de la Ley N. 276 de Aguas de 1942.

Aunque no se incluye en el mapa de vulnerabilidad otros pozos diferentes a los de abastecimiento público, es importante indicar la importancia del manejo apropiado de los pozos de otros usos sean estos de tipo excavado o perforado, dado que representan puntos vulnerables al acuífero. Un mal manejo de los mismos, podría causar la filtración de agua a través de su ademe que llegaría directamente a los acuíferos. Por lo cual debe evitarse el desarrollo de actividades contaminantes en sus inmediaciones y respetarse el radio de protección establecido por Ley.

La escala base de la información utilizada para la zonificación de vulnerabilidad corresponde a 1:50000, por lo cual los límites entre las diferentes zonas de vulnerabilidad no deben ser tomados como rangos rígidos y tajantes, sino como indicadores de la existencia de diversas categorías de terreno, correspondientes a zonas de transición entre las zonas establecidas, así mismo, podría darse variaciones puntuales dentro de las mismas zonas establecidas producto de condiciones hidrogeológicas propias del sitio y que por la escala de trabajo no se visualizan, es así que, debe considerarse que los mapas están sujetos a un mejoramiento conforme avance la obtención de datos nuevos y se tenga más conocimiento de las condiciones hidrogeológicas.

12.3 Disponibilidad de agua

La zona se caracteriza por presentar un periodo seco de diciembre a abril y un periodo lluvioso de mayo a noviembre, que corresponde a la época donde se da la recarga.

La evaluación de la disponibilidad de agua en el acuífero Huacas Tamarindo, se realizó por unidades de recarga, correspondientes la subcuenca del río Lajas, la subcuenca del río San Andrés y al sector de Playa Grande que descargan sus aguas al estero Tamarindo. Para cada una de estas



unidades de recarga se consideró la recarga potencial, el flujo subterráneo, las extracciones actuales y el flujo de retorno.

No incluyó para efectos de determinación de disponibilidad la zona de descarga directa al mar, dado que en la misma no se recomienda la explotación del agua subterránea, dada las condiciones de salinización que presentaron los pozos en la zona de Playa Grande y al alto desarrollo de infraestructura no planificada con un manejo inadecuado de las aguas residuales en la zona costera de playa Tamarindo.

La recarga potencial determinada por el método de Balance Hídrico para condiciones medias de precipitación y evapotranspiración, se determinó en 1218.8 lps, teniéndose un aporte al sistema acuífero por unidad litológica de 57% de los aluviones, 23,8% desde los basaltos, 12,9% las radiolaritas y 6,3% en los intrusivos.

Las unidades litológicas de alta recarga se consideran las de valores de RP igual o superior al 25% de la precipitación media anual, correspondiente a la mayor parte de las zonas de aluvión, excepto en los sectores 2a (cuenca alta del Río Lajas) y 2c (Río Matapalo), de media recarga las de valores de RP correspondiente entre un 10 y 25% de la precipitación correspondiente a las unidades de basalto, radiolaritas e intrusivos y de baja recarga las unidades con valores iguales o menores del 10% de la precipitación, correspondiente a los aluviones en los sectores 2a (cuenca alta del Río Lajas) y 2c (Río Matapalo).

En el área se inventariaron 211 pozos (169 perforados y 42 excavados) de los cuales, 33 pozos se encuentran inscritos en el ANP-SENARA y cuentan con concesión de agua del MINAE para su explotación, 14 cuentan con concesión de agua otorgada por el MINAE pero no se encuentran inscritos en el ANP-SENARA, 32 no se encuentran en explotación, y los 128 pozos restantes se encuentran en explotación de manera irregular.

La mayor parte de los pozos concesionados e inscritos se registran con caudal otorgado inferior a los caudales reportados en campo, así mismo varios de los pozos concesionados cuentan con varios registros de concesión.

La extracción en las subcuencas de análisis de disponibilidad es de 459,4 lps a través de 190 pozos, teniéndose las mayores extracciones en el sector del río Zapote (136,3lps) y en la planicie baja del río San Andrés (121,1 l/s). El flujo de retorno o el flujo de agua que vuelve al sistema después de ser utilizada se estimó en un 20% de la extracción, correspondiente a 91,9 lps.

El caudal asignado al Acueducto Villareal (68,9 lps) corresponde al caudal máximo a producir por los pozos de acuerdo a los resultados de las pruebas de bombeo, actualmente la explotación es menor pero a efectos del balance se asigna su potencial máximo, considerando que el Acueducto pretende la explotación futura a ese caudal.

En la zona no se evidencian cambios relevantes en los niveles del acuífero durante el periodo de monitoreo del acuífero del año 2002 al año 2012, a excepción de la zona de planicie baja de la subcuenca del río San Andrés, donde se ubican el campo de pozos refundores, donde se tiene cambios en los niveles del acuífero, con un descenso del nivel estático en comparación a los



registros históricos y valores del mismo por debajo del nivel del mar. Así mismo, la disminución el caudal de descarga del acuífero al estero producto de la explotación del acuífero, puede estar provocando el descenso del nivel estático indicado y la inversión del gradiente hidráulico en ese sector.

De acuerdo con los vecinos de la zona, los ríos San Andrés y Lajas fueron en épocas pasadas de carácter permanente, por lo cual se puede concluir que la deforestación de la cuenca y la explotación de aguas subterráneas han ocasionado un desequilibrio en el régimen hídrico de la zona. Al encontrarse estos secos al final de la época seca y ser de carácter intermitente sin presencia de flujo base en la época de estiaje, el flujo base se considera en cero para cálculos de disponibilidad.

La descarga natural por flujo subterráneo del acuífero aluvional se da hacia el estero Matapalo y a algunos humedales de carácter permanente existentes en la planicie baja del río Lajas. La descarga natural se determinó por medio de la ecuación de Darcy en 524 lps.

El balance de aguas subterráneas en las tres cuencas analizadas indica que existe una fracción de la recarga potencial que no ingresa al acuífero y que escurre sobre la superficie, de 15 lps para la Subcuenca de Playa Grande equivalente al 16,1% de la recarga potencial, 217,6 para la Subcuenca del río Lajas equivalente al 29,6 % de la RP y 83,1 lps equivalente al 21,3% de la RP para la Subcuenca del río San Andrés.

Para el acuífero aluvial Huacas Tamarindo, se consideró un 20% de la recarga potencial del acuífero como factor de seguridad y rendimiento sostenible y un 80% de la recarga potencial para su explotación. Es así que, aunque todas las subcuencas presentan excedente de agua y no se encuentra en sobreexplotación, se considera que, bajo el esquema de rendimiento seguro, las subcuencas de los Río Lajas y Río San Andrés cuentan con un caudal disponible para su aprovechamiento adicional de 70,5 lps y 5,1 lps respectivamente, mientras que la Subcuenca de Playa Grande, no se recomienda su explotación adicional dado que presenta valores negativos de disponibilidad de agua de -3,63 lps.

Este factor de seguridad se considera necesario de aplicar para el acuífero Huacas Tamarindo, de acuerdo a los aspectos indicados en el apartado 9.2 inciso a), entre los cuales se resalta el hecho que el balance hídrico fue determinado para valores medios mensuales de precipitación y evapotranspiración potencial (ETP) y no considera condiciones climáticas extremas, que no existen de estaciones meteorológicas totales en o cercana a la zona de estudio que permita determinar la ETP propia de la zona y la heterogeneidad del medio acuífero.

El desarrollo de nuevas actividades está condicionado a la disponibilidad de agua en el acuífero, la cual depende directamente de la recarga.

12.4 Hidrogeoquímica e isotopía de las aguas del acuífero

Para estudiar las características de flujo, determinar las conexiones hidráulicas entre los cuerpos de agua superficiales y subterráneos y evaluar el dinamismo del sistema hidrogeológico, se efectuaron cuatro campañas de muestreo de agua subterránea, agua superficial, estero y



precipitación, dos de los cuales se realizaron durante la estación seca (abril - 2008 y marzo -2009) y los otros dos durante la estación lluviosa (septiembre y noviembre del 2008).

Las aguas del acuífero son bicarbonatadas-cálcicas que se relaciona con aguas jóvenes o de corta residencia en el acuífero. En la zona no se evidencian cambios espaciales importantes en el comportamiento hidrogeoquímico de las aguas subterráneas y superficiales. Solo las cuatro muestras del pozo excavado HT15 - Casa amarilla se salen del comportamiento típico de bicarbonatadas cálcicas, presentando concentraciones más altas de Na y Cl. Estos pozos se ubican en la barra arenosa de Playa Grande en la zona donde se cerraron los pozos perforados existentes por problemas de salinidad.

La química de las aguas e isotopía de las aguas no evidencia contaminación por intrusión salina en el acuífero. Con base en los valores de $\delta^{2}\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$, las aguas subterráneas y superficiales se agrupan entre la Recta Meteórica Mundial y la Recta Meteórica del Tempisque, esto indica un mismo origen para las aguas superficiales y las subterráneas.

Las muestras de agua subterránea, superficial y del estero se desplazan de la Recta Meteórica Mundial, indicando un efecto de evaporación en la zona y temporalidad, donde las muestras de los meses secos se encuentran más enriquecidas isotópicamente que las muestras de la época de lluvia.

A partir de los isotopos, se observa una rápida respuesta del acuífero a la lluvia, con una tendencia similar de las aguas superficiales y las aguas subterráneas tanto en la época seca (abril 2008 y marzo del 2009) como en la lluviosa (septiembre y noviembre del 2008), además los muestreos de la época seca se encuentran más enriquecidos isotópicamente y muestran posiblemente un efecto de evaporación mayor que en la época lluviosa.

Este comportamiento de las aguas subterráneas indica una rápida respuesta a la lluvia, con un corto tiempo de residencia en el acuífero, lo cual concuerda con los resultados del monitoreo de niveles y reafirma la condición vulnerable del acuífero.

Los resultados isotópicos y fisicoquímicos validan el modelo conceptual del acuífero, el cual muestra una rápida respuesta estacionaria a los periodos de lluvia y sequía, una inmediata recarga, la presencia de aguas recientes en el acuífero indicando tiempos de residencia cortos de las aguas, una relación hidráulica del acuífero con los ríos y una alta vulnerabilidad a la contaminación del sistema acuífero.

El uso combinado de herramientas hidrogeoquímicas (iones mayoritarios) e isotópicas (deuterio y oxígeno-18) permitió mejorar y validar el modelo hidrogeológico elaborado con herramientas hidrogeológicas convencionales (geología, geofísica, muestreos de suelos, litológicas, propiedades hidráulicas, etc), específicamente en determinar las conexiones hidráulicas entre los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, y evaluar el dinamismo del sistema hidrogeológico.

La incorporación de herramientas isotópicas en las investigaciones de acuíferos permite incrementar la certeza científica que sustenta las herramientas para el ordenamiento territorial,



como son los mapas de vulnerabilidad a la contaminación y la zonificación de recarga, con el fin de regular el manejo y aprovechamiento de los acuíferos.

13. Propuesta de Plan de Aprovechamiento Sostenible (PAS) del acuífero Huacas Tamarindo

Como paso siguiente de la investigación es realizar las recomendaciones para el manejo del acuífero bajo el esquema de desarrollo sostenible y la propuesta para la construcción del Plan de Aprovechamiento Sostenible del Acuífero Huacas Tamarindo, a fin de garantizar la calidad y cantidad del agua que en él se almacena y del que depende al 100% las comunidades y actividades que se desarrollan en las subcuencas de análisis.

13.1 Propuesta de manejo del acuífero

13.1.1 Recomendaciones para el monitoreo del acuífero:

- 1) A fin de mejorar el modelo hidrogeológico del acuífero, contar con datos técnicos de zonas con poca o escasa información y mantener actualizado el Balance de Agua Subterránea y Disponibilidad del acuífero, se considera necesario las siguientes acciones de monitoreo a realizar por parte del MINAE, AyA y SENARA.
 - Realizar la construcción de tres piezómetros de observación para el levantamiento de la litología, parámetros hidráulicos del acuífero y la medición automática de niveles y conductividad en la zona baja del acuífero, los cuales deberán estar ubicados entre el estero Tamarindo y los pozos de abastecimiento público ubicados en la zona de refundores, el Llanito y Playa Grande.
 - Mantener las mediciones de niveles en la red de monitoreo actual con una periodicidad trimestral con medición en los meses de enero, abril, julio, octubre, mientras se adecua una red de monitoreo automático de nivel y conductividad de al menos un pozo en cada uno de los sectores de recarga y los tres piezómetros de observación recomendados en el punto anterior.
 - Las nuevas perforaciones aprobadas en el acuífero deben contar con pozos de observación, los cuales deberán ser acondicionados con medidores automáticos de niveles y conductividad.
 - Dada la heterogeneidad de los suelos que recubren el acuífero, se recomienda realizar nuevas pruebas de infiltración y muestreo de suelos en todas las áreas de recarga, con una densidad de muestreo de al menos una muestra por kilómetro cuadrado.
 - Dado la cercanía de los pozos de abastecimiento a los cuerpos de agua superficial, los cuales son influentes al acuífero (cuenca media y baja), debe implementarse el monitoreo y control de la calidad de agua de los pozos para consumo humano.



- Los datos del monitoreo deben ser digitalizados por los entes recolectores de la información y ser remitidos al MINAE y SENARA para el registro de los datos de monitoreo en una base de datos institucional que integre toda la información del acuífero.

Los recursos generados por el canon de aprovechamiento y canon de vertidos en la zona deben ser enfocados para realizar las acciones de monitoreo y control del acuífero Huacas Tamarindo, recomendadas en el estudio.

- 2) La Municipalidad de Santa Cruz deberá realizar el levantamiento de uso del suelo en el acuífero y de cargas contaminantes, para determinar el riesgo a la contaminación del acuífero y de los pozos de abastecimiento público. En las zonas de alto riesgo identificadas deberá tomar las acciones pertinentes para mitigar o disminuir el riesgo hacia el recurso.
- 3) MINAE, AyA y SENARA deberán revisar al 2018 el estado del acuífero en cuanto al Balance de Agua Subterránea y Disponibilidad del acuífero con base en los resultados de los monitoreo de niveles, características de los suelos, de la nueva información generada por la perforación de los nuevos pozos de abastecimiento público, de información meteorológica de la estación a implementar en la subcuenca por parte del SENARA, de los resultados del proceso ordenamiento de la condición de explotación del recurso hídrico en la zona de estudio recomendado en el punto 13.1.2 y del mapa de uso del suelo actual generado por la municipalidad.

13.1.2 Recomendaciones para garantizar la cantidad del recurso:

Se considera necesario dada la poca disponibilidad de agua en el sistema acuífero Huacas Tamarindo, se realice las siguientes acciones de protección, remediación y asignación del recurso:

- 1) Restringir la perforación de pozos en toda el área de **la subcuenca Playa Grande**, así como en los **sectores de descarga directa al mar**.

En el pozo N°5 del acueducto de Playa Grande, se debe implementar medidor de niveles y de conductividad, para dar seguimiento a su comportamiento durante el bombeo y en los periodos de reposo, con el fin de evitar la contaminación del acuífero por aguas salobres y el daño del mismo, dado que este pozo registro contaminación por sales en años anteriores. Si se detecta incremento de los valores de conductividad debe detenerse el bombeo del mismo y evaluar su estado para determinar si puede ser bombeado bajo otro régimen, sin aumentar el nivel de ingreso de la cuña y el riesgo del acuífero. Si se da contaminación debe procederse al es el cierre del mismo y perforar un pozo que sustituya el caudal del pozo N°5 fuera del área de influencia del estero. El pozo N°5 puede mantenerse como piezómetro de monitoreo y control del acuífero.

- 2) En la **subcuenca del río San Andrés**, reducir la explotación en el **campo de pozos Refundores** total o parcialmente (al menos el 50%) enfocado a recuperar el equilibrio hidráulico entre el acuífero y el estero Tamarindo.



Adicionalmente, a la reducción de la explotación en el **campo de pozos Refundores**, debe reducirse el periodo de bombeo (regímenes de bombeo cortos y periodos de descanso de mínimo 2 horas) y adaptarse apagadores automáticos de niveles en los pozos, a fin de reducir el abatimiento de los pozos, el cual preferiblemente debe ser sobre el nivel del mar (registrado actualmente hasta de 15m por debajo del nivel del mar). El régimen de bombeo óptimo debe ser establecido de acuerdo a pruebas de caudal variable.

Perforar uno o dos pozos en el sector del Llanito o en el sector de Santa Rosa para cubrir el desabastecimiento del Acueducto de Tamarindo producto de la reducción de la explotación en el **campo de pozos Refundores**, con un caudal de extracción máximo equivalente al de los pozos sacados de operación en el sector de Refundores, más los 5,1 lps disponibles en la subcuenca.

Restringir la perforación de pozos en toda el área de la subcuenca, a excepción de lo anteriormente recomendado.

Dado la situación actual de desabastecimiento de uso se recomienda evaluar la posibilidad de uso del caudal no aprovechado actualmente por el Acueducto Villareal, para otros sistemas de acueducto, dado que los pozos no están siendo actualmente explotados a su potencial máximo.

El Acueducto de Villareal debe proceder con el cierre permanente de los pozos PMN.26.e y PMN.27.e, ubicados en la propiedad de Santiago Rosario Obando y perforados por el acueducto sin los permisos respectivos, ya que los mismos no van a ser utilizados para el abastecimiento del acueducto dado el bajo caudal de producción (de acuerdo a las indicaciones del personal fue de 3,5 lps). El cierre debe realizarse bajo la supervisión del Departamento de Aguas del MINAE o del SENARA.

- 3) En la **subcuenca del río Lajas**, permitir la perforación de nuevos pozos de abastecimiento en forma escalonada y monitoreada, con un caudal máximo de aprovechamiento adicional de 70,5 lps.

Se considera que la mejor alternativa para cubrir parcialmente la demanda para abastecimiento público actual en la zona de estudio, es la perforación de un campo de pozos para el abastecimiento de los diferentes sistemas de acueducto existente y no la perforación aislada de pozos para cada acueducto.

La perforación de los pozos (ya sea de manera aislada o bien por campo de pozos) debe ser condicionada a la realización de estudios de diseño y factibilidad para garantizar el mejor aprovechamiento del recurso hídrico. Así mismo, se recomienda la construcción de pozos de monitoreo, el acondicionamiento de caudalímetros y sensores de niveles en los pozos a perforar y el monitoreo continuo de niveles todos los pozos que conformen la red del acueducto o acueductos a abastecer.

Se debe considerar en los estudios de diseño y factibilidad la alta vulnerabilidad del recurso a la contaminación a fin de garantizar las medidas de manejo necesarias para garantizar su



sostenibilidad en cuanto a su calidad a futuro. Se debe velar por que los pozos a perforar se ubiquen fuera de zonas donde se desarrollan actualmente actividades contaminantes o se tenga mal manejo de las aguas residuales.

Las mejores condiciones para la perforación del campo de pozos, se estiman en los sectores planicie baja del río Lajas, río Zapote y qda. Palmar.

Se recomienda guardar una distancia mínima de retiro de 1km al estero Matapalo, a otras humedales de 500m dado los altos radios de influencia en la planicie baja de la subcuenca del río Lajas y de 100m a ríos y quebradas de acuerdo a lo establecido en el artículo 8 de la Ley de aguas. Distanciamientos menores a los recomendados deben ser condicionados a estudios previos con perforación de pozos de investigación en el sitio propuesto.

Para los pozos del Llanito del acueducto rural de Tamarindo, debe reducirse el periodo de bombeo (régimenes de bombeo cortos y periodos de descanso de mínimo 2 horas), con bombeo preferiblemente no simultaneo y adaptarse apagadores automáticos de niveles en los pozos, a fin de reducir el abatimiento de los pozos, el cual preferiblemente debe ser sobre el nivel del mar (registrado actualmente hasta de 6m por debajo del nivel del mar) y reducir los conos de abatimiento. El régimen de bombeo óptimo debe ser establecido de acuerdo a pruebas de caudal variable.

Se debe realizar el diagnostico de capacidad actual de los acueductos existentes de la cuenca y las necesidades para el abastecimiento futuro, de previo a permitir la perforación de pozos de abastecimiento nuevos en la zona.

- 4) En relación a los pozos existentes, dado que de los 211 pozos existentes en la zona solo 33 cuentan con numero de pozo y concesión otorgada; y a fin de mantener un registro de pozos e inventario de las extracciones actualizado y poner en orden la condición de explotación del recurso hídrico en la zona de estudio, se recomienda al MINAE realizar las siguientes acciones:
 - Asignar número a los pozos perforados sin numeración y que se encuentran en uso, para su registro en el Archivo Nacional de pozos del SENARA
 - Actualizar el registro de concesiones del MINAE bajo consulta a concesionarios y verificación de campo de los pozos, coordenadas de ubicación y caudales concesionados, dado que la información consignada en las concesiones no coincide en mucho de los expedientes con la información recolectada en campo.
 - Realizar una campaña para el aprovechamiento del recurso bajo la figura de la concesión, para todos los pozos que se encuentran en uso de manera irregular, ya sea registrados en el ANP sin concesión o bien perforados sin permiso. Solicitar a los propietarios de los pozos que no se acojan a la campaña el cierre permanente de los mismos, con material impermeable a lo largo de su ademe y bajo la presencia de funcionarios de MINAE o del SENARA.



- Condicionar la renovación de las concesiones existentes y el otorgamiento de nuevas concesiones de pozos al levantamiento de la ubicación (topográfico o GPS), registro fotográfico, instalación de caudalímetros y medidores de nivel en los pozos y entrega al MINAE y SENARA del informe anual de los reportes de caudal de extracción y de niveles en el acuífero y reporte anual de calidad del agua para consumo humano en época de estiaje.

El caudal máximo a concesionar debe ser el indicado en el presente estudio, si el caudal a concesionar es mayor al indicado en este estudio, debe restarse el mismo al caudal disponible en la cuenca determinado bajo el esquema de rendimiento seguro, o si bien, el caudal concesionado es menor, debe sumarse el mismo al caudal disponible.

Los pozos en proceso de concesión sin número de registro en el ANP y a los cuales no se les asignó caudal de explotación para el cálculo de disponibilidad de agua en el acuífero (cuadro 20), en caso de ser otorgada la concesión debe restarse el caudal concesionado al caudal disponible en la cuenca determinado bajo el esquema de rendimiento seguro. En caso de ser denegada, se debe realizar el sellado permanente del pozo.

Cuadro 20. Pozos en proceso de concesión sin número de pozo en el ANP

pozo	concesión	Estado de la concesión	tipo
AV-4	542	SOLICITUD NUEVA	Perf.
C5	542	SOLICITUD NUEVA	Perf.
C7	699	SOLICITUD NUEVA	Perf.
C8	699	SOLICITUD NUEVA	Perf.
C15	13269	SOLICITUD NUEVA	exc
C17	13852	SOLICITUD NUEVA	exc
C19	14405	SOLICITUD NUEVA	exc
C20	14405	SOLICITUD NUEVA	exc
C21	14405	SOLICITUD NUEVA	exc
C23	15059	SOLICITUD NUEVA	exc
C24	15458	SOLICITUD NUEVA	Perf.

- Realizar el sellado permanente de los pozos perforados sin uso indicados en el estudio (Cuadro 21). En caso que los mismos se encuentren en uso y se les otorgue la concesión, debe restarse el caudal concesionado al caudal disponible en la cuenca determinado bajo el esquema de rendimiento seguro.

Cuadro 21. Pozos perforados sin uso

pozo	concesión	Estado de la concesión	Estado en el ANP	Uso reportado en el ANP
MTP16			Perf.	Ab. Público.
MTP72			Perf.	Ab. Público.
MTP73			Perf.	Ab. Público.
MTP194			Denegado	Doméstico
MTP206			No se perf.	Doméstico
MTP209			No se perf.	Doméstico
MTP-337	14513	CANCELADO	sellado	dom-tur-rie
VI72			Perf.	sellado



VI73			Perf.	sellado
VI74			Perf.	sellado
VI75			Perf.	sellado
VI76			Perf.	sellado
VI77			Perf.	sellado
VI78			Perf.	sellado
VI79			Perf.	sellado
ILG776			Perf.	Ab. Público.
C18	13888	DENEGADO		DENEGADO
PMN-2			perf	sin uso
PMN-2A			perf	sin uso
PMN.27.e			perf	sin uso
PMN.26.e			perf	sin uso

- Una vez concluido el proceso anterior de registro y concesión de los pozos, debe recalcularse el caudal de explotación del acuífero y la disponibilidad de agua en el mismo.

Así mismo, mantener actualizado el balance de aguas conforme la asignación de concesiones y de permisos de perforación.

- 5) Toda actividad que se desee desarrollar debe presentar, de previo a la aprobación de los permisos por parte de la Municipalidad, la carta de disponibilidad de agua brindada por un acueducto de la zona.

Debe denegarse cualquier actividad nueva que se pretenda desarrollar y cuyo sistema de abastecimiento de agua para su operación sea por medio de pozos no registrados y concesionados.

- 6) El desarrollo de nuevas actividades está condicionado a la disponibilidad de agua en el acuífero, la cual depende directamente de la recarga y por ende del mantenimiento de las condiciones de la misma. La impermeabilización por infraestructura afectará directamente la recarga al sistema, por lo cual, se recomienda para mejorar las condiciones de recarga al acuífero y mitigar el efecto por impermeabilización:

- Incentivar la reforestación de la zona de recarga.
- Incentivar el uso de tecnología limpia para la captación del agua lluvia y la recarga inducida al acuífero.

- 7) La CAPTACIÓN Y TRASVASE DE AGUA DESDE LOS ACUÍFEROS NIMBOYORES Y CAÑAS y la disminución de la captación de agua en el sistema acuífero Huacas Tamarindo, se considera como la mejor alternativa para el abastecimiento de agua y desarrollo futuro de la zona de estudio.



13.1.3 Recomendaciones para garantizar la calidad del recurso

- 1) El mapa de vulnerabilidad a la contaminación de los materiales aluvionales del acuífero Huacas-Tamarindo se debe aplicar en conjunto con la matriz de “Criterios de Uso del Suelo según la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos para la protección del recurso hídrico” aprobada mediante Acuerdo 3303 de la Junta Directiva del SENARA. Esta matriz es aplicable a los mapas de vulnerabilidad y define los usos de la tierra y las actividades que se puedan desarrollar en cada una de las zonas vulnerabilidad identificadas sin causar un deterioro al recurso hídrico subterráneo.

Las actividades potencialmente contaminantes que requieran de la remoción de suelo para su operación y que se deseen desarrollar en las zonas del acuífero aluvional, requieren de un estudio hidrogeológico detallado donde se evalúe la vulnerabilidad específica del acuífero a la contaminación según las nuevas condiciones proyectadas y el riesgo de contaminación del acuífero ante la actividad a realizar, dado que, la valoración de vulnerabilidad realizada contempla la vulnerabilidad del acuífero aluvional a las actividades desarrolladas a nivel del suelo y no a actividades que se desarrollen a nivel del subsuelo (sistemas sépticos, tanques de almacenamiento subterráneos, etc), donde se varía las condiciones evaluadas de cobertura y profundidad.

Revisar y actualizar (si corresponde) el mapa de vulnerabilidad de acuerdo a los resultados obtenidos por las nuevas perforaciones y evaluaciones puntuales. En la zona de extrema recarga se debe realizar un levantamiento topográfico, uso de suelo actual, geológico e hidrogeológico de detalle, a fin de verificar condición de vulnerabilidad y determinar el riesgo a la contaminación de dicha zona en una escala 1:10000 o de mayor detalle.

- 2) Se deben respetar las zonas de protección a fuentes de agua (ríos, manantiales, humedales, pozos, etc), establecidas tanto en los artículos 8 y 31 de la Ley de Aguas, como en el Artículo 33 de la Ley Forestal. Estas áreas fueron creadas con el fin de asegurar que se mantenga las condiciones de físicas y biológicas adecuadas para la conservación de los recursos, mediante la conservación de la cobertura y la vegetación, en ellas no se deben realizar actividades humanas que pongan en peligro la calidad y cantidad del agua.

El manejo inapropiado de los pozos sea cual sea su uso, o bien sea cual sea su tipo (excavado o perforado), podría causar la filtración de agua a través de su ademe que llegaría directamente a los acuíferos, por lo cual debe evitarse el desarrollo de actividades contaminantes en sus inmediaciones.

- 3) Se debe evitar el vertido de aguas, sustancias y materiales contaminados a los ríos y quebradas de la zona, dado que estos se comportan como influentes al acuífero, es decir, aportan agua al mismo existiendo una relación directa río - acuífero, por lo cual se categorizaron como zonas de vulnerabilidad extrema a la contaminación. Es importante resaltar que la mayor parte de los pozos de abastecimiento público se ubican en las cercanías de los cursos de agua superficial, donde parte del agua extraída por ellos corresponde a las aguas del acuífero y otra parte a aguas superficiales.



- 4) En cuanto a las áreas laterales del acuífero que conforman la parte alta de la cuenca, estas son parte de las zonas de recarga al acuífero que aportan agua al acuífero como flujo lateral y por ende son susceptibles a la contaminación, es así que su protección y manejo es fundamental para la conservación del recurso hídrico, en estas zonas deben restringirse el desarrollo de actividades de alto impacto y alta cobertura.

13.2 Construcción de los PAS

El objetivo **Plan de Aprovechamiento Sostenible** es lograr la aceptación e implementación de las recomendaciones para el manejo sostenible del acuífero Huacas Tamarindo, por parte de la Municipalidad, los habitantes de las cuencas que conforman la zona de estudio, los acueductos de la zona, las instituciones involucradas en el manejo y aprovechamiento de los recursos hídricos (AyA, SENARA y MINAE), instituciones con injerencia en la toma de decisiones para el desarrollo de la zona (SETENA, SINAC, SALUD, entre otros) y los desarrolladores.

Como se expuso en el apartado 10.2, Ponce (2007) indica que la sostenibilidad puede ser fomentada con un manejo adecuado que busca capturar la recarga rechazada, propiciar la recarga artificial limpia, y disminuir [o limitar] la recarga artificial negativa. Un acercamiento holístico a **la sostenibilidad del agua subterránea considera los aspectos hidrogeológicos, hidrológicos, ecológicos, socioeconómicos, tecnológicos, culturales, institucionales y legales de la utilización del agua subterránea, intentando establecer un compromiso razonable entre los varios intereses en conflicto.**

La estrategia global de Global Water Partnership. 2009-2013 sostiene que el desarrollo sostenible no será alcanzado sin un mundo con seguridad hídrica. Un mundo con **seguridad hídrica** integra la preocupación por el valor intrínseco del agua con su uso para la supervivencia y bienestar del hombre. Implica erradicar la responsabilidad fragmentada por el agua e integrar la gestión de los recursos hídricos a través de todos los sectores -finanzas, planificación, agricultura, energía, turismo, industria, educación y salud.

La Cumbre Mundial sobre Alimentación de 1996, definió la **seguridad alimentaria** como aquella que se da cuando todas las personas tienen en todo momento acceso físico y económico a alimentos suficientes, seguros y nutritivos para satisfacer sus necesidades alimenticias a fin de poder llevar una vida activa y sana.

Es así que el **Plan de Aprovechamiento Sostenible** puede ampliar, variar y mejorar las **propuestas de Manejo** indicadas en el estudio, con el trabajo en conjunto de los actores involucrados en el proceso, buscando el mejor escenario de aprovechamiento del recurso bajo la visión de **“Gestión territorial para la seguridad hídrica y alimentaria”**.

SENARA y la **Municipalidad de Santa Cruz** deben elaborar la estrategia para la construcción de los PAS en consenso con los actores. Las acciones básicas para la construcción de los PAS son las siguientes:



- Divulgación de los resultados del estudio y propuestas de manejo
- Creación de una comisión para la Gestión de los Recursos Hídricos, la cual debe llevar a cabo la construcción, seguimiento y control de los PAS.
- Capacitación a los miembros de la comisión y tomadores de decisión
- Construcción del PAS del acuífero Huacas Tamarindo en consenso con los actores
- Seguimiento y control de los PAS.

13.3 Líneas estratégicas de acción

En el cuadro 22 se integra las acciones identificadas para el manejo del acuífero (apartado 13.1) y la construcción de los Planes de Aprovechamiento Sostenible (apartado 13,2) del acuífero Huacas Tamarindo, el tipo de medida (permanente, temporal, puntual o limitada) y las instituciones o actores involucrados para el cumplimiento de las mismas.



Cuadro 22. Líneas de acción estratégicas para el manejo del acuífero y la construcción de los Planes de Aprovechamiento sostenible

Líneas estratégicas	Acción			Tipo de medida	Instituciones Involucradas
	Corto (a 1 año)	Mediano (1 a 3 años)	Largo (4 a 5 años)		
13.1. PROPUESTA DE MANEJO DEL ACUÍFERO					
13.1.1 Recomendaciones para el monitoreo del acuífero					
1)		Construcción de tres piezómetros de observación en la zona baja del acuífero y Adecuación de una red de monitoreo automático de niveles y conductividad		temporal	MINAE, AyA y SENARA
	Medición trimestral de niveles en la red de monitoreo actual			permanente	MINAE, AyA y SENARA
		Adecuación y medición de una red de monitoreo automático de niveles y conductividad		permanente	MINAE, AyA y SENARA
		realizar nuevas pruebas de infiltración y muestreo de suelos con una densidad de muestreo de al menos una muestra por km ²		temporal	MINAE, AyA y SENARA
	Condicionar las nuevas perforaciones en el acuífero a contar con pozos de observación			permanente	MINAE
		Monitoreo y control de la calidad de agua de los pozos de Ab. Público para consumo humano		permanente	Acueductos de la zona
		Registro de los datos de monitoreo en una base de datos		permanente	Acueductos de la zona - MINAE - SENARA
2)		Levantamiento de uso del suelo en el acuífero		puntual	Municipalidad de Santa Cruz
		Levantamiento de cargas contaminantes		puntual	Municipalidad de Santa Cruz



Líneas estratégicas	Acción			Tipo de medida	Instituciones Involucradas
	Corto (a 1 año)	Mediano (1 a 3 años)	Largo (4 a 5 años)		
		Determinar el riesgo a la contaminación del acuífero y de los pozos de ab. público		puntual	Municipalidad de Santa Cruz
		Implementar acciones pertinentes para mitigar o disminuir el riesgo hacia el recurso		permanente	Municipalidad de Santa Cruz
3)			Revisar el estado del acuífero en cuanto al BAS y la disponibilidad del acuífero	permanente	MINAE, AyA y SENARA
13.2.1 Recomendaciones para garantizar la cantidad del recurso					
1)	Restringir la perforación de pozos en toda el área de la subcuenca Playa Grande, así como en los sectores de descarga directa al mar			permanente	MINAE y SENARA
	Implementar medidor de niveles y de conductividad, en el pozo N°5 del acueducto de Playa Grande, para dar seguimiento a su comportamiento durante el bombeo y en los periodos de reposo.			permanente	Acueducto Playa Grande
2)	Restringir la perforación de pozos en la subcuenca del río San Andrés			permanente	MINAE, AyA y SENARA
		Reducir la explotación en el campo de pozos Refundores y perforar uno o dos pozos en el sector del Llanito o en el sector de Santa Rosa para cubrir el desabastecimiento		permanente	AyA
	En el campo de pozos Refundores reducir el periodo de bombeo (regímenes de bombeo cortos y periodos de descanso de mínimo 2 horas) y adaptarse apagadores automáticos de niveles en los pozos			permanente	AyA



Líneas estratégicas	Acción			Tipo de medida	Instituciones Involucradas
	Corto (a 1 año)	Mediano (1 a 3 años)	Largo (4 a 5 años)		
	Proceder con el cierre permanente de los pozos PMN.26.e y PMN.27.e ubicados en la propiedad de Santiago Rosario Obando y perforados por el acueducto			permanente	Acueducto Villareal, MINAE y SENARA
	Evaluar la posibilidad de uso del caudal no aprovechado por el Acueducto Villareal, para otros sistemas de acueducto, dado que los pozos no están actualmente siendo explotados a su capacidad máxima.			puntual	MINAE
3)	En la subcuenca del río Lajas, permitir la perforación de nuevos pozos de abastecimiento en forma escalonada y monitoreada, con un caudal máximo de aprovechamiento adicional de 70,5 lps.			Limitada	MINAE y SENARA
		Perforación de pozos o campo de pozos en la subcuenca del río Lajas para cubrir el abastecimiento público actual, condicionado a estudios de diseño y factibilidad, acondicionamiento de caudalímetros y sensores de nivel y conductividad y pozo testigo y retiro de fuentes de agua		Limitada	MINAE y SENARA



Líneas estratégicas	Acción			Tipo de medida	Instituciones Involucradas
	Corto (a 1 año)	Mediano (1 a 3 años)	Largo (4 a 5 años)		
	Los pozos del Llanito del acueducto de Villareal, se debe reducir el periodo de bombeo (regímenes de bombeo cortos y periodos de descanso de mínimo 2 horas) y adaptarse apagadores automáticos de niveles en los pozos.			permanente	Ac. Rural Tamarindo
	Realizar el diagnóstico de capacidad actual de los acueductos existentes de la cuenca y las necesidades para el abastecimiento futuro			puntual	AyA y acueductos de la zona
4)	Asignar número a los pozos perforados sin numeración y que se encuentran en uso			puntual	MINAE
	Actualizar el registro de concesiones del MINAE bajo consulta a concesionarios y verificación de campo			puntual	MINAE
	Realizar una campaña para el aprovechamiento del recurso bajo la figura de la concesión para todos los pozos que se encuentran en uso de manera irregular			puntual	MINAE
	Realizar el sellado permanente de los pozos perforados sin uso indicados en el estudio			permanente	MINAE
	Condicionar la renovación de las concesiones existentes y el otorgamiento de nuevas concesiones de pozos a los requisitos indicados (cudalímetros, medidores de nivel...)			permanente	MINAE



Líneas estratégicas	Acción			Tipo de medida	Instituciones Involucradas
	Corto (a 1 año)	Mediano (1 a 3 años)	Largo (4 a 5 años)		
		Mantener actualizado la condición de explotación del recurso hídrico en la zona de estudio y recalcularse el caudal de explotación del acuífero y la disponibilidad de agua en el mismo		permanente	MINAE
5)	Exigir carta de disponibilidad de agua brindada por un acueducto de la zona de previo a la aprobación de permisos municipales a actividades nuevas			permanente	Municipalidad de Santa Cruz
	Denegar cualquier actividad nueva que se pretenda desarrollar y cuyo sistema de abastecimiento de agua para su operación sea por medio de pozos no registrados y concesionado			permanente	Municipalidad de Santa Cruz
6)	Incentivar la reforestación de la zona de recarga			permanente	Municipalidad de Santa Cruz y Fonafifo
	Incentivar el uso de tecnología limpia para la captación del agua lluvia y la la recarga inducida al acuífero			permanente	Municipalidad de Santa Cruz
7)			Captación y trasvase de agua desde los acuíferos Nimboyores y Cañas y la disminución de la captación de agua en el sistema acuífero Huacas Tamarindo	permanente	AyA, MINAE, SENARA y Municipalidad de Santa Cruz



Líneas estratégicas	Acción			Tipo de medida	Instituciones Involucradas
	Corto (a 1 año)	Mediano (1 a 3 años)	Largo (4 a 5 años)		
13.3.1 Recomendaciones para garantizar la calidad del recurso					
1)	Aplicar en conjunto con el mapa de vulnerabilidad, la matriz de "Criterios de Uso del Suelo según la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos para la protección del recurso hídrico"			permanente	Municipalidad de Santa Cruz
	Actividades potencialmente contaminantes que requieran de la <u>remoción de suelo</u> , requieren de un estudio hidrogeológico			permanente	Municipalidad de Santa Cruz
		Revisar y actualizar el mapa de vulnerabilidad, de acuerdo a los resultados obtenidos de las nuevas perforaciones y de evaluaciones puntuales.		permanente	SENARA
		En la zona de extrema recarga realizar un levantamiento topográfico, uso de suelo actual, geológico e hidrogeológico de detalle, a fin de verificar condición de vulnerabilidad y determinar el riesgo de dicha zona, en una escala 1:10000 o de mayor detalle.		Puntual	Municipalidad de Santa Cruz
2)	Respetar las zonas de protección a fuentes de agua			permanente	Municipalidad de Santa Cruz
3)	Evitar el vertido de aguas, sustancias y materiales contaminados a los ríos y quebradas de la zona			permanente	Municipalidad de Santa Cruz y MINAE
4)	Restringir del desarrollo de actividades de alto impacto y alta cobertura en zonas de alta y media recarga			permanente	Municipalidad de Santa Cruz



Líneas estratégicas	Acción			Tipo de medida	Instituciones Involucradas
	Corto (a 1 año)	Mediano (1 a 3 años)	Largo (4 a 5 años)		
13.2 CONSTRUCCIÓN DE LOS PAS					
	elaborar la estrategia para la construcción de los PAS en consenso con los actores			puntual	SENARA
	Divulgación de los resultados del estudio y propuestas de manejo			permanente	SENARA
	Creación de una comisión para la Gestión de los Recursos Hídricos, la cual debe llevar a cabo la construcción, seguimiento y control de los PAS			puntual	Municipalidad de Santa Cruz y SENARA
		Capacitación a los miembros de la comisión y tomadores de decisión		permanente	Comisión
		Construcción del PAS del acuífero Huacas Tamarindo en consenso con los actores		puntual	Comisión
		Seguimiento y control de los PAS.		permanente	Comisión

14. Referencias

1. ARIAS, M.E. Vulnerabilidad intrínseca en el sector de Tamarindo, Guanacaste. Universidad de Costa Rica. Enero 2008.
2. AyA. Traspaso acueducto de Beko-Tamarindo al AyA. La Gaceta 61 – Viernes 27 de enero del 2009.
3. BEKO S.A., Plan Maestro para el Acueducto de Tamarindo de Noviembre del 2006
4. CUSTODIO, E. & LLAMAS, M.R., Hidrología subterránea. Editorial Omega, Barcelona, España, (2001).
5. ECHANDI, E. Agosto del 2004. Aspectos hidrogeológicos de la cuenca del río Matapalo y del acuífero litoral de Tamarindo.
6. ECHANDI, E. Julio del 2006. Diagnóstico hidrogeológico efectuado con el propósito de definir las áreas de protección inmediata de los pozos de Servicios BEKO S.A.
7. ECHANDI, E. Agosto del 2006. Nuevas valoraciones efectuadas para la investigación de las aguas subterráneas en el sector inferior de las cuencas de los ríos San Andrés y Matapalo.
8. FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A., Groundwater. Editorial Prentice Hall. New York, USA, (1979).
9. FOSTER, S.: Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. Proceedings and Information of International Conference: Vulnerability of Soil and Ground Water to Pollutants, 38 69-86 (1987).
10. FOSTER, S., HIRATA, R., GOMES, D., D'ELIA, M. & PARIS, M., Protección para la calidad del agua subterránea. Banco Mundial, Washington, D.C., (2003).
11. Global Water Partnership. <http://www.gwp.org/es/GWP-Sud-America/PRINCIPALES-DESAFIOS/Que-es-la-seguridad-hidrica/>
12. GOMEZ, A & ARREDONDO, S. Hidrología isotópica del Valle del Río Tempisque, Provincia de Guanacaste, Costa Rica. OIEA, Estudios de hidrología isotópica en América Latina 1994. 119-138 (1994).
13. INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL, Registro de estaciones meteorológicas.
14. INEC. X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda 2011. <http://www.inec.go.cr/Web/Home/GeneradorPagina.aspx>
15. IPS-SENARA, 2003. Diagnóstico de Información para el Plan de Manejo Integrado de los Recursos Hídricos en el sector de la cuenca del Río Cañas, Río Nimboyores, y cuencas aledañas Costeras, Península de Nicoya, Guanacaste.
16. MINAET, AyA & SENARA. Metodologías hidrogeológicas para la evaluación del recurso hídrico. La Gaceta N° 243 – Miércoles 15 de diciembre 2010.
17. PONCE, V. Rendimiento sostenible. Universidad de California. <http://rendimiento.sdsu.edu, © 2007>
18. RODRIGUEZ, C., VARGAS, N., JARAMILLO, O., PIÑEROS. A. & CAÑAS, H., 2010: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia. <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/021888/ENA2010Cap4.pdf>
19. SCHOSINSKY, G. & LOSILLA, M., Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. Revista Geológica de América Central, 23 43-55, (2000).
20. SENARA. Evaluación del potencial y demanda hídrica subterránea en el acuífero costero Huacas - Tamarindo, Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica. (2003)
21. SENARA, Contratación Directa N° 2008cd-000098-OC, Balances hídricos de suelos acuíferos costeros. 2009.
22. SENARA. ASUB-043-2009, Mapas de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación para el acuífero Huacas Tamarindo, Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica. Enero 2009.



SENARA, Evaluación hidrogeológica, hidrogeoquímica e isotópica del acuífero Huacas Tamarindo, Abril 2013.

23. SENARA. DIGH-172-2009, Modificación de mapas de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación para el acuífero Huacas Tamarindo, Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica. Abril 2009.
24. SENARA. Estudio Hidrogeológico de los acuíferos de Playa Potrero y Playa Brasilito. Diagnóstico del potencial de explotación y rendimiento sostenible del acuífero. Junio 2012.
25. SENARA – UCR. Geología, suelos y geofísica de las cuencas Matapalo, San Andrés y el estero Ventanas, Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica (2009).
26. SENARA – UCR. Detalle de los depósitos cuaternarios. Anexo al Proyecto: Geología, suelos y geofísica de las cuencas Matapalo, San Andrés y el estero Ventanas, Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica (2009).
27. SENARA. Archivo Nacional de Pozos y Nacientes.
28. SENARA. Base de datos de clima.