



ED-2873



Contenidos para la Gestión del Recurso Hídrico en Costa Rica:

El caso del Acuífero Sardinal.

Mario Enrique Arias Salguero

2017

Contenidos para la Gestión del Recurso Hídrico en Costa Rica:

El caso del Acuífero Sardinal.

A *Εὐα* y *Jérôme*

PRESENTACIÓN

Contenidos para la Gestión del Recurso Hídrico en Costa Rica: El caso del Acuífero Sardinal, es un aporte de la Universidad de Costa Rica al proceso que ha venido desarrollado el Comité Técnico Institucional para el manejo del acuífero.

En el marco de los objetivos específicos del proyecto de Acción Social: *La Cultura del Agua como instrumento para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico*, el contribuir por medio del análisis e investigación en Sardinal, es un procedimiento que el autor ha venido desarrollando desde el año 2008 y a partir del año 2016, ha colaborado activamente en la divulgación y capacitación sobre el tema.



Procesos divulgativos y de formación participativa realizados por el autor. Fotos: Ricardo Pastrana

Consiente de la importancia de que los actores sociales deben involucrarse activamente en la gestión del acuífero, pero que para ello; es necesario primero un proceso de educación y capacitación formal y no formal, estos **Contenidos** pretenden; explicar de manera clara, con lenguaje apropiado y apoyado en imágenes gráficas, diversos conceptos sobre la Gestión del Recurso Hídrico y su aplicación en el Acuífero Sardinal.

Con la intención de que estos **Contenidos** sean divulgados y utilizados por todos aquellos que lo requieran, se autoriza su reproducción parcial o total siempre y cuando se cite apropiadamente la fuente.

ÍNDICE

Contenido	Página
AGUA	1
El agua en el planeta	2
Ciclo Hidrotectónico	3
Ciclo Hidrológico	5
Ciclo Hidrosocial	6
Cuencas Hidrográficas	7
Agua Subterránea	9
Acuíferos	10
RECURSO HÍDRICO	13
Regulación sobre el Recurso Hídrico en Costa Rica	14
Conocimiento sobre el Recurso Hídrico	19
Aprovechamiento del Recurso Hídrico en Costa Rica	24
PROCESOS DE GESTIÓN	26
Gestión Integrada del Recurso Hídrico	27
Cultura del Agua	29
Ordenamiento Ambiental del Territorio	31
Monitoreo del Agua Subterránea	33
Protección del Agua Subterránea	36
SARDINAL	42
Distrito de Sardinal	43
Cuenca del río Sardinal	45
Poblado Sardinal	47
Acuífero Sardinal	49
Agua en el Acuífero Sardinal	53
Gestión del Riesgo	57
REFERENCIAS	60

AGUA

EL AGUA EN EL PLANETA

El agua es una sustancia química, su molécula está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, cuyo símbolo es **H₂O**.

El término agua se refiere a la sustancia en su estado líquido, aunque la misma puede hallarse en su forma sólida llamada hielo y en su forma gaseosa denominada vapor de agua.

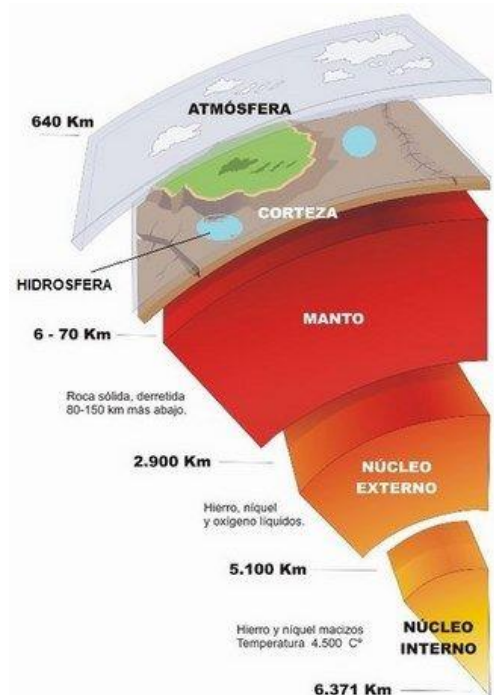
Desde el momento del origen del planeta, ocurrieron reacciones químicas a altas temperaturas en las capas internas de la Tierra, generando erupciones volcánicas que expulsaron a la atmósfera, entre otras cosas, vapor de agua. Conforme el planeta se fue enfriando, el vapor de agua presente en la atmósfera se condensó produciendo las primeras lluvias. Aunado a lo anterior, han ocurrido aportes de agua en forma de hielo por el impacto de numerosos meteoritos que han llegado en la superficie de la Tierra.

Figura 1: Capas de la Tierra. (Imagen: www.areaciencias.com)

La mayor parte del agua se encuentra química y físicamente entre las rocas y minerales de la corteza y manto terrestre, tan solo el 17 % de la cantidad total de agua presente en el planeta Tierra está libre en la hidrósfera.

El ciclo hidrotectónico, actúa en la escala del Tiempo Geológico y explica por medio de la teoría de la Tectónica de Placas la cantidad, calidad química y distribución del agua en la hidrósfera.

La Tectónica de Placas, cambia la forma de la Tierra, a través de la reorganización geográfica de los océanos y continentes, la ascensión de corteza terrestre y la formación de cordilleras, causando cambios en el clima y en la distribución del agua en la hidrósfera a nivel mundial.



CICLO HIDROTECTÓNICO

El exceso de agua de la hidrosfera del planeta Tierra procede del Manto Terrestre, una pequeña cantidad escapa hacia el espacio y otra cantidad vuelve a él a través de los procesos de la Tectónica de Placas.

Este proceso es impulsado por medio de corrientes de convección existentes en el Manto.

El magma asciende a través de las fracturas del suelo oceánico (dorsal), originando nueva corteza. En el otro lado de la celda de convección, las rocas se deprimen formando la llamada zona de subducción, donde el agua procedente del océano es arrastrada junto con la corteza a varios cientos de kilómetros de profundidad, incorporándose a las rocas fundidas que dan origen al nuevo magma.



Figura 2: Procesos del ciclo hidrotectónico. (Imagen: www.sgm.gob.mx)

Debido a la actividad volcánica y magmática, de nuevo el agua se escapa a la atmósfera.

Este mismo ciclo, explica por qué el agua de mar es salada. El proceso de salinización se debe a la intensa actividad volcánica marina ocurrida en las diferentes eras geológicas, así como a la erosión del magma, que libera sustancias químicas en el agua, otro fenómeno que contribuye con la salinidad del agua de mar son las fuentes hidrotermales que generan reacciones químicas que enriquecen la composición del agua y que están ligadas íntimamente a límites de placas tectónicas. También se reconoce un aporte en la salinidad que proviene de la disolución y filtración de elementos originarios de fluidos y desechos de organismos marinos, así como de un pequeño aporte de agua de los ríos.

La salinidad del agua del mar es debida a los distintos minerales, entre ellos: sodio, cloro, bromuro, magnesio, azufre, potasio y calcio que se han disuelto en ella.

La hidrósfera incluye los océanos, mares, ríos, lagos, agua subterránea, el hielo y la nieve. Está constituida por un 97% de agua salada que se almacena en los océanos y de un 3% de agua dulce contenida en los ríos, casquetes polares y acuíferos.

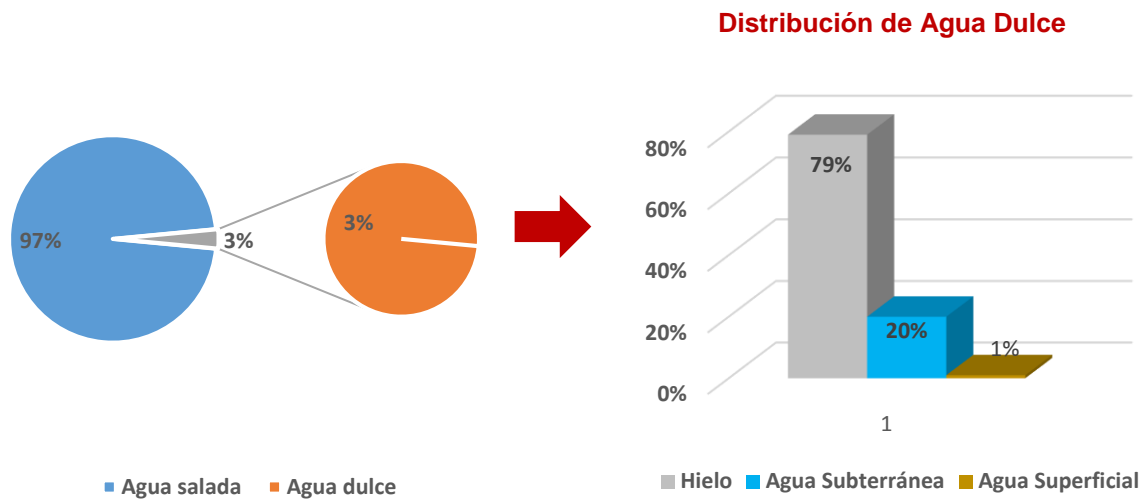


Figura 3: Distribución porcentual del agua en la Hidrósfera (Imagen: Mario Arias)

Hay otros dos ciclos relacionados con el agua en nuestro planeta, que son importantes conocer, pues su entendimiento es fundamental para el aprovechamiento sostenible y protección del agua.

El concepto de ciclo, hace referencia a un proceso continuo que se basa en el permanente movimiento o transferencia de las masas de agua, tanto de un punto del planeta a otro, como entre sus diferentes estados (líquido, gaseoso y sólido), no tiene un principio ni un final.

El agua dentro del ciclo es constante, lo que ocurre muchas veces es que la cantidad del agua en los diferentes estados del ciclo puede variar, veamos algunos ejemplos:

Cuando existe un exceso de precipitación es probable que ocurra un aumento también en la escorrentía superficial, generando inundaciones. Esto es debido a que después de un lapso de tiempo el suelo se satura y el agua no se puede infiltrar más en el suelo, por otro lado, los cauces de los ríos tienen un tamaño definido y muchas veces han sido invadidos por la infraestructura creada por el mismo ser humano (viviendas, puentes angostos), limitando aún más la capacidad del cauce para el transporte del agua de lluvia.

Otro caso tiene que ver, cuando por efectos naturales o generados por el ser humano, el agua de un río pierde su calidad y ya no es factible utilizarla para abastecer a una población, sin embargo; su calidad podría seguir siendo apropiada para otros usos (riego, navegación, generación eléctrica, entre otros).

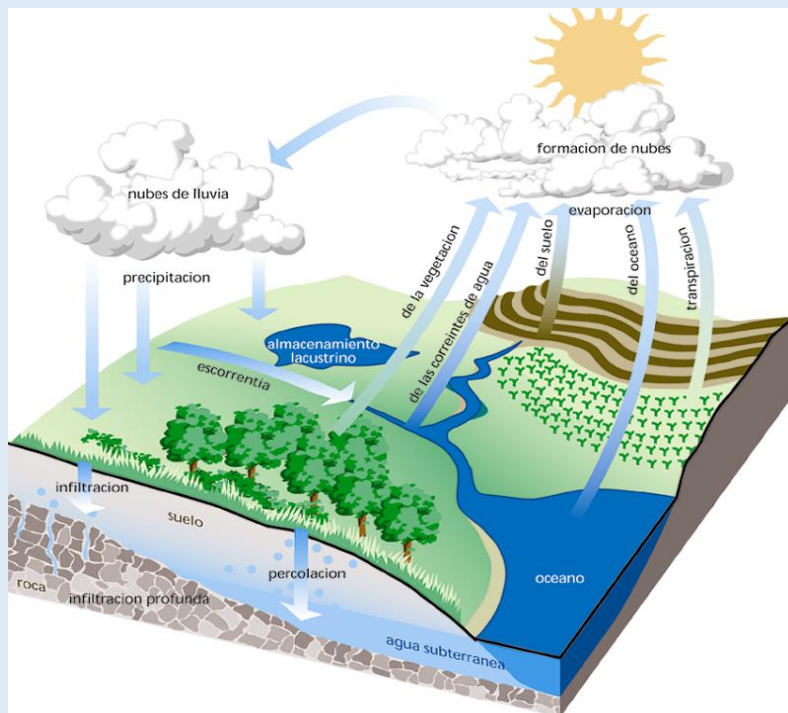
CICLO HIDROLÓGICO

Es el proceso que describe la ubicación y el movimiento del agua en la hidrósfera.

Es un proceso continuo en el que una partícula de agua evaporada del océano vuelve a él, después de pasar por las etapas de precipitación, escorrentía superficial y escorrentía subterránea.

Figura 4: Procesos del ciclo hidrológico. (Imagen: www.emaze.com)

Los diferentes procesos que ocurren en este ciclo son:



Evaporación: Debido al calor del Sol, el agua de la superficie del mar se va evaporando poco a poco. También se evapora, aunque en menor cantidad, el agua de los lagos, embalses, ríos, y zonas altas topográficamente sin cobertura vegetal. Este vapor de agua se eleva y va formando las nubes que llegan a almacenar gran cantidad de agua en forma de vapor.

Precipitación: El viento empuja las nubes que se formaron sobre el mar y muchas de ellas llegarán a tierra firme. Cuando estas nubes se enfrían, el vapor de agua que contienen se condensa y se precipita en forma de la lluvia. Si la temperatura de la atmósfera es baja, la precipitación puede producirse en forma de granizo o nieve.

Escorrentía superficial: Parte del agua caída discurre por la superficie terrestre formando arroyos y ríos que llevarán de nuevo, el agua hasta el mar.

Escorrentía subterránea: Parte del agua llovida se infiltra en el terreno y se almacena en reservorios subterráneos (acuíferos) y permitiendo a su vez, que el agua pueda moverse por los poros y fracturas de las rocas hasta salir a la superficie por medio de manantiales o como flujo base de los ríos para que siga su curso dentro del ciclo.

CICLO HIDROSOCIAL

Comprende todas las actividades humanas que afecten o cambien las condiciones naturales del agua en el ciclo hidrológico.



Figura 5: Niveles de participación en el ciclo hidrosocial (Imagen: Mario Arias)

Considera cómo el agua es percibida por la población, aprovechada y tratada a diferentes escalas (desde el nivel familiar, hasta a nivel internacional) por los actores sociales e institucionales, a través de instrumentos tales como: legislación, infraestructura requerida, requisitos de calidad, disposición de aguas servidas, prácticas culturales.

En este ciclo Hidrosocial, se incluye el Abastecimiento, Saneamiento y Reutilización.

El abastecimiento abarca las fases desde la captación de agua hasta llegar los usuarios, esta agua en nuestro país es potabilizada para que cumpla una serie de parámetros de calidad físico química y bacteriológica para que sea apta para el consumo humano. En el proceso de saneamiento, el agua que ya ha sido utilizada vuelva al ecosistema, esta agua residual se recoge y transporta hacia los diversos sistemas de depuración (tanques sépticos, biojardineras, plantas de tratamiento u otro) para reducir los riesgos ambientales de los vertidos, mismos que deben cumplir con una calidad previamente establecida en la normativa nacional. La reutilización pretende aprovechar nuevamente el agua para diferentes usos, entre ellos: agrícolas, industriales, recreativos, medioambientales.

CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Una cuenca hidrográfica es un área de captación natural del agua proveniente de la precipitación que viaja hacia un único punto de salida. Se compone básicamente de un conjunto de superficies de vertientes (zonas montañosas) y una red de drenaje (arroyos y ríos) que fluyen hasta llegar un lecho único (río principal o mar).

Su contorno o perímetro se encuentra limitado por el lomo o filo de las montañas, denominado divisoria de aguas.

Dependiendo del tamaño y del cauce del río a considerar, las cuencas hidrográficas se subdividen en Subcuencas y Microcuencas.



Figura 6: La Cuenca Hidrográfica (Imagen: fundesyram.com)

Las cuencas hidrográficas son de gran importancia para el medio ambiente, así como también para el ser humano. Actúan como importantes reservorios de agua que pueden ser aprovechados para diferentes actividades socio - económicas como la agricultura, ganadería, generación eléctrica, abastecimiento de agua a la población y a diversos ecosistemas que requieren de ella para subsistir.

Existen tres tipos de cuencas

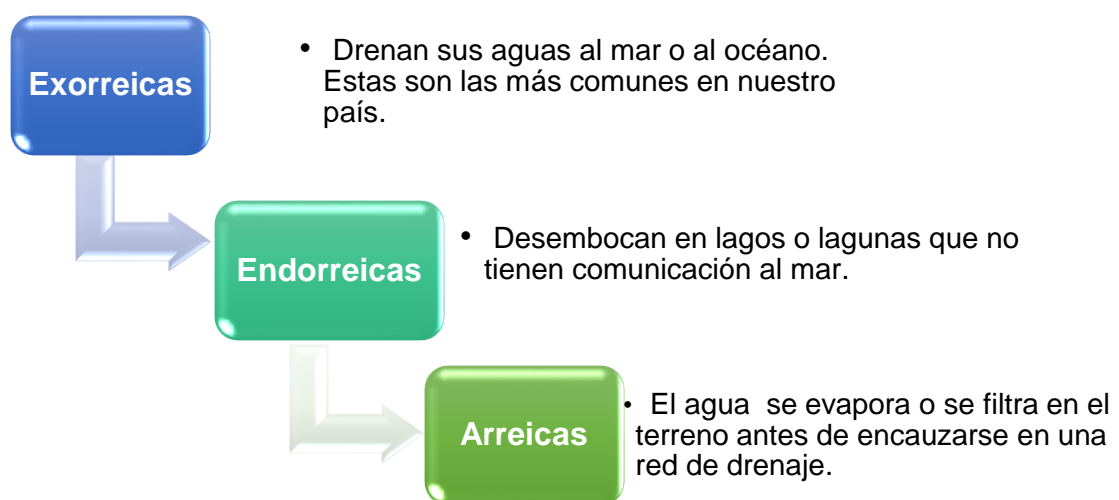


Figura 7: Tipos de cuencas hidrográficas. (Imagen: Mario Arias)

Las cuencas hidrográficas se pueden dividir en tres partes, en función de las características del río colector, ellas son:



Figura 8: Partes de la Cuenca Hidrográfica. (Fotos: Mario Arias)

En la cuenca hidrográfica se debe cuantificar las entradas y salidas de los diferentes componentes del ciclo hidrológico, por ejemplo a la cuenca ingresa una cantidad de agua, por medio de la precipitación y otras formas; de igual manera existe una cantidad de agua que sale de la cuenca por medio de su río principal en las desembocaduras, o por el aprovechamiento que le da el ser humano para diferentes usos.

En la cuenca hidrográfica existen interrelaciones aguas arriba y aguas abajo, por ejemplo, la degradación de la calidad del agua en la parte alta de la cuenca, afecta a los usuarios de la parte media y baja. Otro ejemplo clásico es cuando se capta un manantial y no se deja flujo base para que el cauce del río mantenga agua y pueda ser utilizada por otros usuarios, incluidos los ecosistemas.

La gestión de cuencas es el proceso que está dirigido a implementar acciones para lograr recursos financieros, enfocadas al aprovechamiento sostenible y protección de los recursos naturales de la cuenca.

AGUA SUBTERRÁNEA

El agua subterránea se encuentra en los poros y fracturas de las rocas, la gran mayoría de ella es producto de la infiltración del agua de lluvia en el suelo, y en algunos otros casos por interacción de lagos, ríos y otros acuíferos con los reservorios del agua subterránea.

La gestión del agua subterránea comienza con su evaluación, misma que se realiza a partir de un Estudio Hidrogeológico que depende de varios factores, sin lugar a dudas; el más importante es el Alcance del Objetivo. Así pues, un estudio hidrogeológico puede enfocarse a conocer el origen o edad del agua, o su calidad, o determinar cuáles son las zonas de protección o cuales son las zonas más apropiadas para extraer más agua por medio de la construcción de nuevos pozos.



Figura 9: Elementos que condicionan un estudio hidrogeológico. (Imagen: Mario Arias)

El estudio hidrogeológico pretende incidir en la toma de decisión para la gestión del acuífero a partir de la información técnica que aporta, entre ella:



Figura 10: Conocimiento que puede brindar un estudio hidrogeológico. (Imagen: Mario Arias)

ACUÍFEROS

El acuífero es un reservorio de agua subterránea, está definido como un estrato, formación o elemento geológico saturado que permite la circulación del agua por sus poros y/o fracturas y a partir de donde el ser humano la aprovecha por medio de pozos y/o manantiales en cantidades económicamente apreciables para satisfacer sus necesidades.

Al ser el acuífero un reservorio de agua subterránea, una de sus características principales está relacionada con la porosidad y grado de fracturación que permite el almacenamiento y flujo del agua. Así, el agua en el suelo se puede dividir en dos sectores denominados: zona no saturada del acuífero y zona saturada del acuífero.

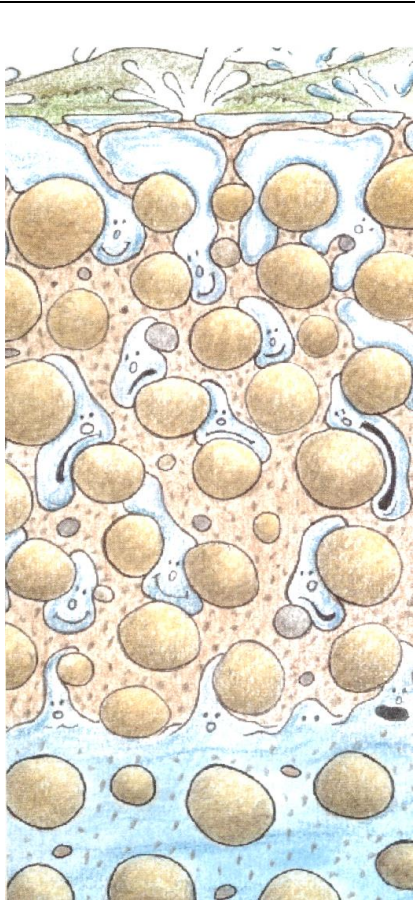
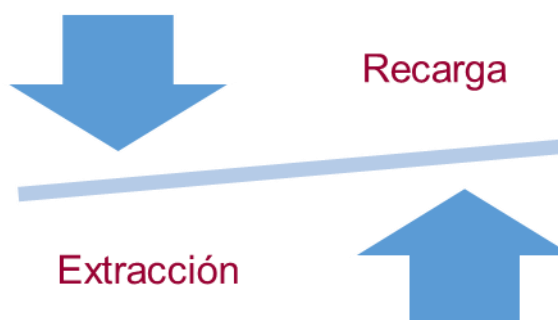
Zonas del Agua en el Suelo	Características	
Zona No Saturada (ZNS)	Se extiende desde la superficie del suelo, hasta el nivel del agua. Los poros y/o fracturas están ocupados tanto de agua como de aire.	
Zona Saturada	Su límite superior está marcado por el nivel del agua (nivel estático, nivel piezométrico). Todos los espacios vacíos están saturados de agua.	

Figura 11: Zonas del Agua en el Suelo. (Imagen: Mario Arias y UNAM, 2004)

Existen diferentes tipos de acuíferos, que se clasifican según; condición hidráulica (acuífero libre, confinado o semiconfinado), el tipo de roca que alberga al agua (acuífero volcánico, granular, kárstico, entre otros), el tipo de porosidad o fracturación por el cual viaja y se almacena el agua subterránea, en función de su ubicación geográfica (acuífero continental o costero) o incluso en función de su edad (acuífero fósil o acuífero reciente).

El acuífero es un sistema, que incluye la entrada y salida del agua en los poros y fracturas de las rocas.

Figura 12: Sistema de entradas y salidas de agua dentro de un acuífero.
(Imagen: Mario Arias)



La zona de recarga es la superficie del terreno donde el agua de lluvia se infiltra al suelo y alcanzan la zona saturada.

Se debe distinguir entre el tipo de acuífero, pues el mecanismo y el área de recarga pueden variar desde recarga directa, recarga lateral, o incluso recarga inducida. En algunos casos la recarga ocurre en las zonas altas de las montañas y en otros sobre el mismo acuífero o por aportes desde ríos, lagos u otros acuíferos superiores.

El aprovechamiento del agua del acuífero se puede dar de manera natural, por medio de la captación de los manantiales o de manera artificial por medio de la extracción de pozos.

El manantial, es conocido como nacimiento, ojo de agua o brote. Es la salida natural proveniente de un acuífero, la cual puede ser categorizada en virtud de su periodicidad (permanente o intermitente), de su caudal, de la calidad del agua, del origen del manantial, del uso del agua, o incluso de los ecosistemas que sustenta.

Los pozos son estructuras que permiten la extracción del agua, estos pueden ser excavados (realizados con pico y pala) o perforados (realizados con maquinaria especializada). A lo interno del pozo, se instala la rejilla que es un sector donde la tubería está ranurada que permite la entrada de agua del acuífero, también tiene una bomba que puede ser manual o eléctrica y que facilita el ascenso del agua hasta la superficie.

Estas relaciones de entradas y salidas del agua dentro del acuífero, deben ser determinadas y cuantificadas a partir de un Balance Hídrico, siendo este un instrumento de planificación que permite establecer regulaciones sobre la asignación del agua para diferentes usos según la normativa vigente. Así mismo, debe ser utilizado como una herramienta de proyección temporal en función de los escenarios de cambio climático.

El agua subterránea procedente del acuífero, además de ser aprovechada para diferentes usos, debe ser protegida de la contaminación y de la reducción de sus zonas de recarga.



Sámara



Los Chorrós



Ojo de Agua



Nivel de afloramiento

Playa Grande

Figura 13: Fotografías de diversos tipos de manantiales (Fotos: Mario Arias)



Pozo excavado



Pozo perforado

Figura 14: Fotografías de pozos de agua: (Fotos: Mario Arias)

RECURSO

HÍDRICO

REGULACIÓN SOBRE EL RECURSO HÍDRICO EN COSTA RICA

El concepto de Recurso Hídrico hace referencia a los recursos de aguas disponibles o potencialmente disponibles, en cantidad y calidad suficientes, en un lugar y en un período de tiempo apropiados para satisfacer una demanda identificable. En nuestro país, el Recurso Hídrico es considerado como patrimonio y un bien de dominio público del Estado.

El cuerpo legal que regula el recurso hídrico en Costa Rica lo constituye la Ley de Aguas que data del año 1942.

Adicional a esta Ley de Aguas, existen múltiples disposiciones legales (leyes y reglamentos) que norman el uso y la calidad del agua en Costa Rica, dentro de las que se destacan: Constitución Política, Ley General del Salud, Ley Orgánica del Ambiente, Ley de Conservación de Vida Silvestre, Código de Minería, Ley Forestal, Ley de Uso y Manejo de Suelos, Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, Reglamento de Perforación de Pozos.

La siguiente figura muestra una línea de tiempo con la promulgación de las principales normas que regulan el agua en nuestro país.

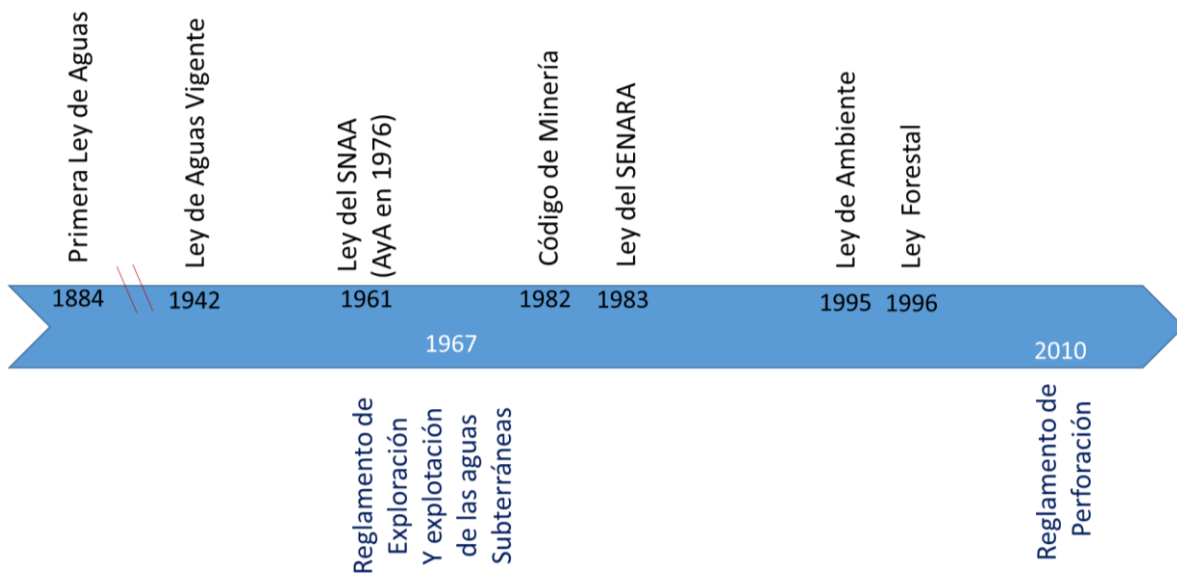


Figura 15: Línea de tiempo que muestra la promulgación de diferentes normas jurídicas que regulan el uso y aprovechamiento del agua en Costa Rica. (Imagen: Mario Arias)

El Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), es el ente rector del recurso, quien lo debe administrar e implementa políticas de protección tanto a nivel superficial como subterráneo por medio de varias dependencias, entre ellas: a) Dirección de Aguas (DA), b) Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC), c) Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA), d) Tribunal Ambiental Administrativo (TAA), y e) Fondo Nacional para el Financiamiento Forestal (FONAFIFO).

En nuestro país existen otras instituciones relacionadas y vinculadas directamente con la administración del recurso hídrico, pues sus leyes constitutivas les otorgan funciones específicas de rectoría sectorial, entre ellas:

Institución	Función
Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA)	Dirigir, fijar políticas, establecer y aplicar normas, realizar y promover el planeamiento, financiamiento y desarrollo y de resolver todo lo relacionado con el suministro de agua potable y recolección y evacuación de aguas negras y residuos industriales líquidos, lo mismo que el aspecto normativo de los sistemas de alcantarillado pluvial en áreas urbanas, para todo el territorio nacional.
Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA)	Investigar, proteger y fomentar el uso de los recursos hídricos del país, tanto superficiales como subterráneos. Así como realizar, promover y mantener actualizadas las investigaciones en las cuencas hidrográficas del país.
Ministerio de Salud (MINSA)	Dictar políticas en el área de la calidad y manejo de aguas residuales y potable, así como determinar y controlar la calidad del agua que se suministra a la población.

Cuadro 1: Instituciones con competencias sectoriales en el manejo del Recurso Hídrico en Costa Rica. (Imagen: Mario Arias)

Además, las siguientes instancias emiten criterios o comparten funciones necesarias para la administración y protección del agua en nuestro país; entre ellas: algunas municipalidades que administran el recurso hídrico para abastecimiento público; la

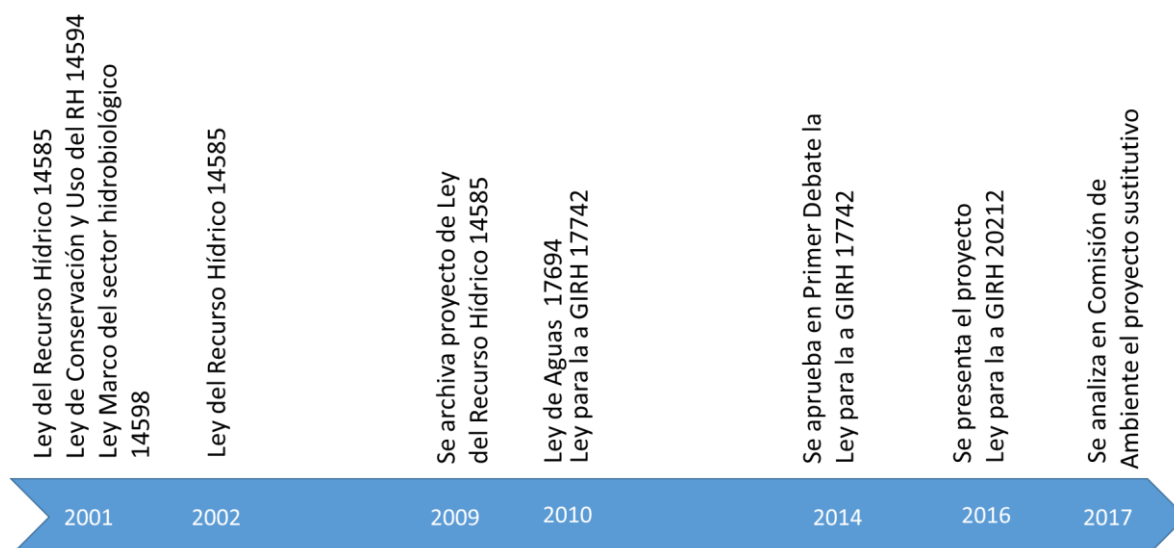
Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP) responsable de la evaluación y aprobación de las tarifas de los servicios públicos entre los que se encuentra el agua potable, el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), el Tribunal Agrario, la Contraloría General de la República, la Defensoría de los Habitantes, el Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU), Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), entre otros.

El Estado costarricense también ha creado alianzas con la empresa privada que ofrecen servicios públicos como la Empresa de los Servicios Públicos de Heredia, S.A. (ESPHSA) y la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL). Así mismo, ha delegado la prestación del servicio de abastecimiento de agua potable, de un sector importante de la población, por medio de las Asociaciones Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados (ASADAS).



Figura 16: Principales instituciones encargadas de uso y manejo del Recurso Hídrico en Costa Rica. (Imagen: Mario Arias)

Debido a la cantidad de normativa y falta de coordinación efectiva entre las instituciones y organizaciones involucradas en materia de administración hídrica en Costa Rica, así como a los cambios socio-productivos del país, en los últimos años se ha visto la necesidad de establecer una nueva ley que se enmarque en los principios de Gestión Integrada del Recurso Hídrico. Desde principio del siglo XXI, se ha presentado diversos proyectos en la Asamblea Legislativa, algunos han sido modificados, otros descartados y uno de ellos fue aprobado en primer debate, sin estar ratificado en segundo debate legislativo como ley de la república, más bien en los últimos años se han presentado otros textos sustitutivos que pretenden concertar diversos intereses.



SIGLO XXI

Figura 17: Línea de tiempo que muestra la presentación de los diferentes proyectos de ley del recurso hídrico en la Asamblea Legislativa de nuestro país. (Imagen: Mario Arias)

Otro elemento importante que regula la gestión del Recurso Hídrico en Costa Rica, son las Políticas Públicas. Las Política Públicas definen líneas de acción y se expresan en directrices, lineamientos, objetivos estratégicos y acciones sobre este tema en particular.

Las Políticas Públicas en la temática de Recurso Hídrico vienen a orientar, con una visión a mediano y largo plazo, el aprovechamiento y protección ambiental del agua en nuestro país, considerando el acceso a este recurso como un derecho humano.

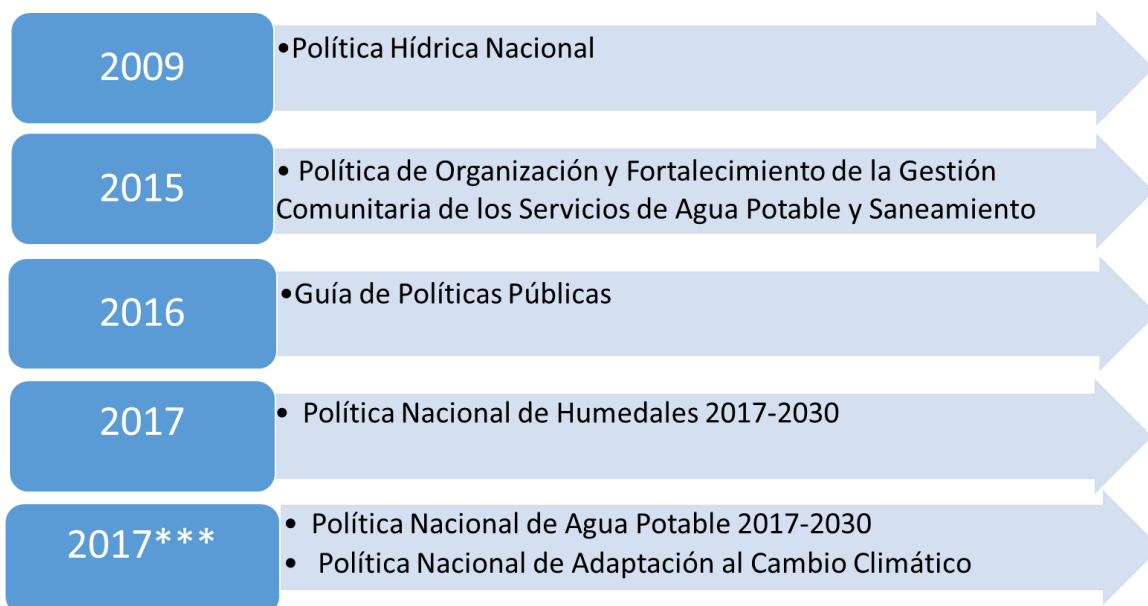


Figura 18: Evolución histórica de la promulgación de Políticas Públicas en la temática de Recursos Hídricos en Costa Rica. (Imagen: Mario Arias)

*** Léase: Propuestas sin aprobación o presentación pública a octubre del 2017.

Algunos de los principios que rigen las políticas hídricas en nuestro país, son:

El acceso al agua potable constituye un derecho humano inalienable y debe garantizarse para sostener la vida, la salud, el desarrollo y el medio ambiente.

El agua debe ser considerada dentro de la legislación como un bien de dominio público, su conservación y uso sostenible son de interés social.

El uso prioritario del agua es para consumo humano, como elemento de protección de la salud pública.

La gestión del Recurso Hídrico debe ser integrada, descentralizada y participativa partiendo de la cuenca hidrográfica como unidad de planificación y gestión.

Se debe reconocer el valor social, ambiental y económico del agua en sus usos múltiples.

El Recurso Hídrico debe ser desarrollado, asignado y gestionado equitativamente en todos los sectores y usuarios, conservando la cantidad, calidad, continuidad y seguridad deseada del agua en forma sostenible.

La gestión del Recurso Hídrico debe inspirarse en un planteamiento basado en la participación de los usuarios y los diversos actores sociales en los diferentes niveles de gestión.

El Estado debe garantizar la internalización de los costos ambientales y sociales de la contaminación, de manera que dichos costos los asuma quien los provoca.

Acceso por parte de los operadores de servicios públicos a las fuentes de agua como un bien de dominio público, sin distinción de ubicación geográfica de la fuente proveedora del recurso, para garantizar sin discriminación, en justicia y respeto cultural, el abastecimiento de agua a toda la población.

Cuadro 2: Principios que rigen las Políticas Hídrica en Costa Rica. (Imagen: Mario Arias)

CONOCIMIENTO SOBRE DEL RECURSO HÍDRICO

Costa Rica, posee una riqueza hídrica muy importante, gracias al alto grado de precipitación y a las características de los suelos que permiten; ya sea su escorrentía formando ríos, o infiltración del agua promoviendo la recarga a los acuíferos.

Tenemos tantos ríos y arroyos que con solo un mapa de la ubicación de algunos de ellos, se puede delimitar la forma de nuestro país.

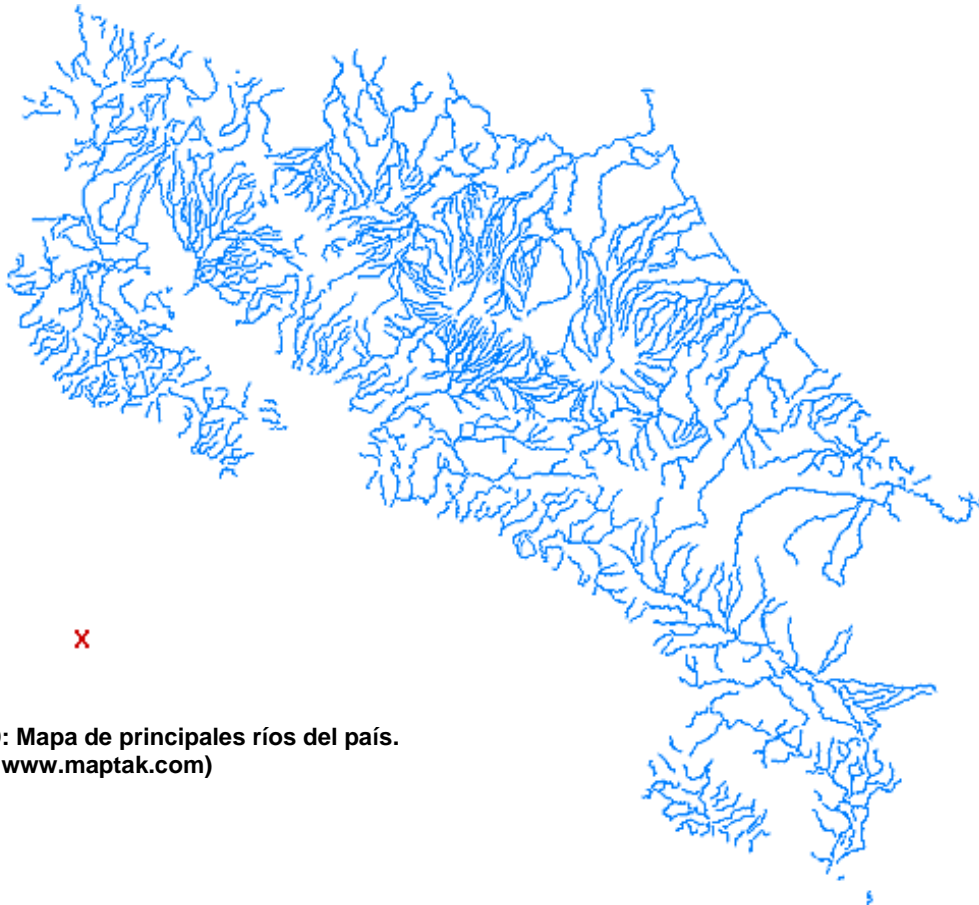


Figura 19: Mapa de principales ríos del país.
(Imagen: www.maptak.com)

El sistema montañoso que se extiende de noroeste a sureste en el país se convierte en el límite natural para que nuestros ríos transporten sus aguas, lo que hace posible que el sistema hidrográfico costarricense pueda dividirse en tres vertientes.

La Vertiente Norte: los ríos drenan hacia el lago de Nicaragua y posteriormente al río San Juan, generalmente son ríos largos, caudalosos y navegables, entre ellos están: río Frío, río San Carlos, río Sarapiquí.

Vertiente Caribe: muchos de ellos son torrentosos, y en sus partes bajas permiten ser navegables, destacándose el río Tortuguero, río Reventazón y río Sixaola.

La Vertiente Pacífica, caracterizada por ríos cortos y caudalosos, entre ellos: ríos Tempisque, río Grande de Tárcoles y río Grande de Térraba.

A partir del drenaje, se han delimitado las 34 cuencas hidrográficas de nuestro país, las cuales se representan en la siguiente figura y se caracterizan en el cuadro 3.

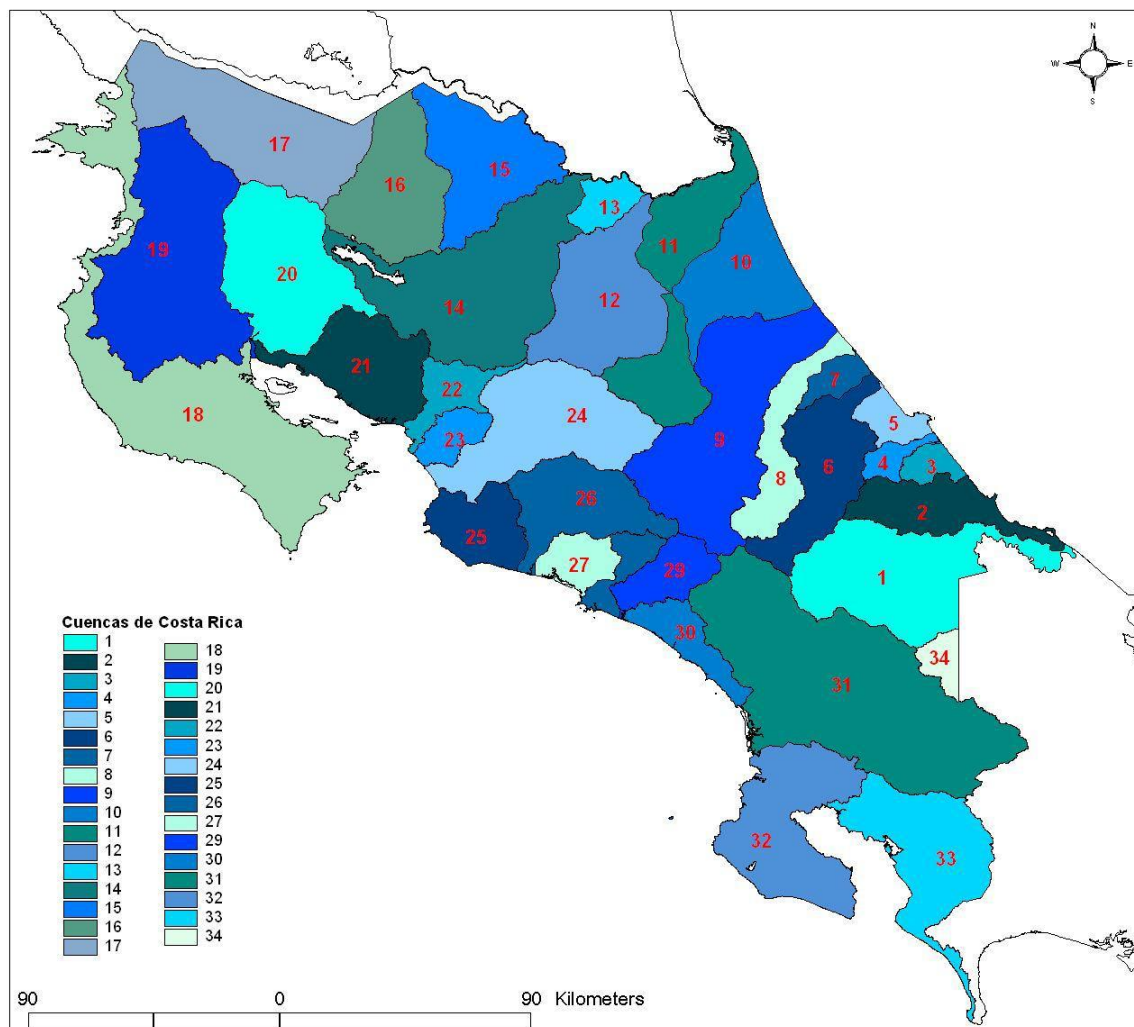


Figura 20: Mapa de las cuencas hidrográficas de Costa Rica. (Imagen: Calvo, J. 2010)

No	Nombre de la Cuenca	Area km ²	% País	Lluvia media mm
1	Sixaola-CR	2331	4,6	3955
2	La Estrella	1002	2,0	3521
3	Banano	204	0,4	5720
4	Bananito	205	0,4	4318
5	Moin	362	0,7	3883
6	Matina	1416	2,8	4109
7	Madre de Dios y otros	234	0,5	3793
8	Pacuare	882	1,7	4060
9	Reventazón y Parismina	2950	5,8	3568
10	Tortuguero	1644	3,2	4682
11	Chirripo	1635	3,2	5459
12	Sarapiquí	1923	3,8	4785
13	Cureña	343	0,7	3237
14	San Carlos	2646	5,2	3473
15	Pocosol	1641	3,2	2415
16	Frío	1551	3,1	3054
17	Zapote	2594	5,1	3032
18	Península Nicoya-Costa Norte	4202	8,3	1928
19	Tempisque	3405	6,7	1709
20	Bebedero	2050	4,0	1664
21	Abangares	1363	2,7	2128
22	Barranca	505	1,0	2710
23	Jesús María	359	0,7	2490
24	Grande de Tárcoles	2169	4,3	2500
25	Tusubres y otros	830	1,6	3402
26	Parrita	1273	2,5	3257
27	Damas	458	0,9	4243
28	Naranjo	332	0,7	5282
29	Savegre	594	1,2	4466
30	Baru y otros	562	1,1	3982
31	Grande de Terreba	5077	10,0	3292
32	Península de Osa	1968	3,9	4934
33	Esqueinas	1828	3,6	4300
34	Changuinola-Costa Rica	256	0,5	3040

Cuadro 3: Características de las Cuencas de Costa Rica: (Fuente: Calvo, J. 2010)

Con respecto al Agua Subterránea, en nuestro país se comienza a estudiar desde los años de 1940, sin embargo en la actualidad no contamos con un mapa hidrogeológico que muestre la ubicación, caracterización y potencial de todos los acuíferos de Costa Rica.

Lo que disponemos son mapas de algunas localidades donde se han realizado estudios específicos, ya sea por instituciones del estado (SENARA, AyA) o por la academia: Escuela Centroamericana de Geología y Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, ambos de la Universidad de Costa Rica.

Un esfuerzo interesante, realizado en el año 2003, fue el Mapa de Geoaptitud Hidrogeológica de Costa Rica, que define el potencial que tiene una formación rocosa para albergar un acuífero tipo libre, tomando en cuenta atributos intrínsecos de ésta y aplicando una escala cualitativa para caracterizar su potencial. Su importancia está en que permite de una manera muy general tener una idea para la planificación territorial y aprovechamiento del recurso hídrico.

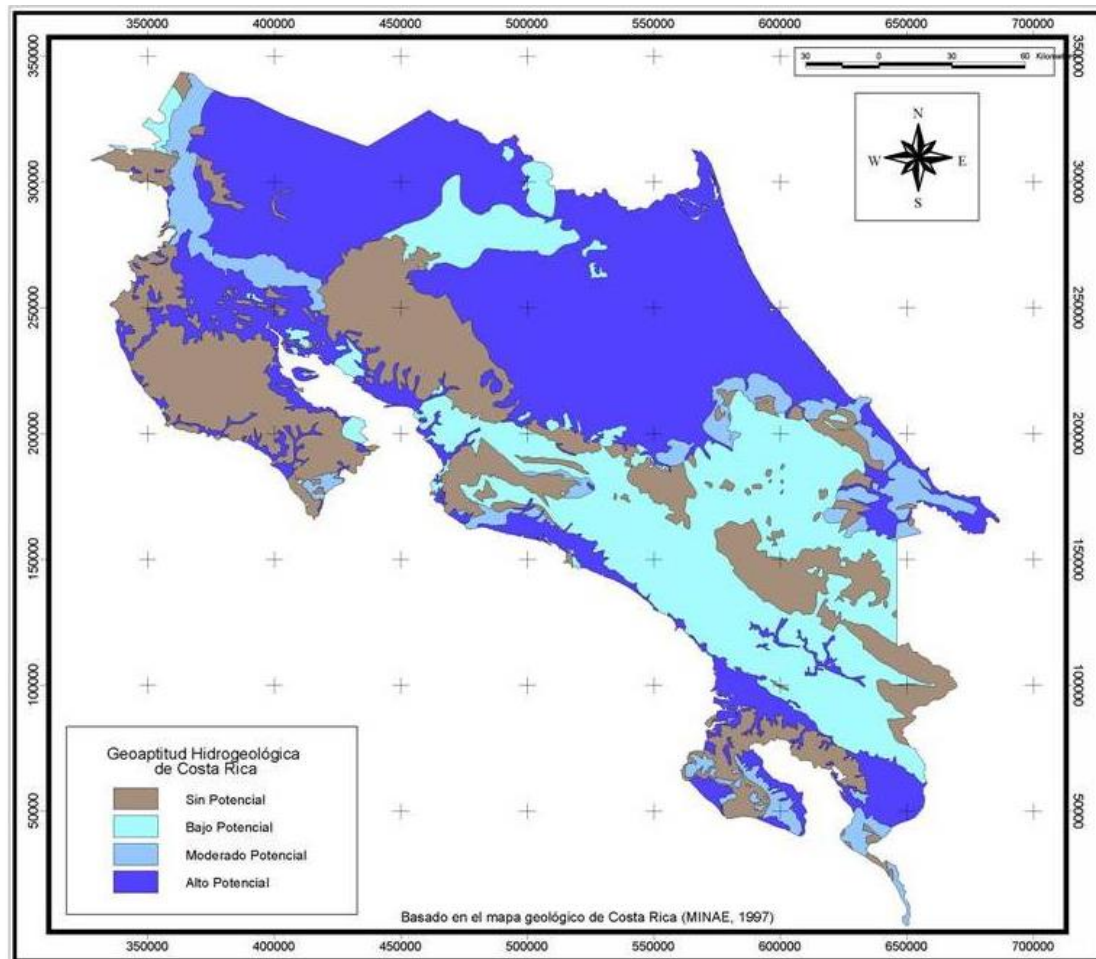


Figura 21: Mapa de Geoaptitud Hidrogeológica de Costa Rica. (Imagen: Astorga & Arias, 2003)

La categoría sin potencial del mapa de Geoaptitud Hidrogeológica para el desarrollo de acuíferos libres, representa el 24% del territorio costarricense. Es importante destacar que esta unidad se localiza predominantemente en las áreas rurales generalmente caracterizadas por una densidad de población de baja a muy baja.

El 76% del territorio nacional tiene algún grado de potencial hidrogeológico, es decir que puede disponer de un acuífero libre en la parte superior del subsuelo, este espacio se divide en tres subcategorías:

Las áreas calificadas como bajo potencial representan el 25 % del espacio terrestre del país, esta unidad se presenta en particular en la mitad sur de Costa Rica. Por su parte; los terrenos con una condición de moderado potencial, representan solamente un 7%. Las zonas con potencial alto de geoaptitud hidrogeológica se presentan en el 44% del territorio nacional y se ubican geográficamente en el sector del Valle Central y en la parte norte del país, es importante señalar que precisamente en estas regiones, es donde se desarrolla al menos el 60 % de las actividades productivas nacionales.

A partir del mapa de Geoaptitud Hidrogeológica de Costa Rica se desprende que una gran parte del sector interno de la Península de Nicoya presenta una geoaptitud sin potencial al desarrollo de acuíferos libres. Por su parte, existen en la zona costera, una serie de acuíferos pequeños con un alto potencial de geoaptitud hidrogeológica a la existencia de acuíferos libres y por ende vulnerables a la contaminación por el mismo proceso de recarga. Estos acuíferos costeros son los que actualmente abastecen tanto a la mayoría de las poblaciones como a la infraestructura turística de la zona.

En Costa Rica, al menos el 90% de las actividades humanas y cerca del 95% de la población del país habita y realiza actividades de diversa índole sobre estas áreas potenciales de recarga.

APROVECHAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO EN COSTA RICA

Con respecto al aprovechamiento del Recurso Hídrico, en el año 2014 se concesionaron aproximadamente 138 millones de metros cúbicos de agua, de los cuales el 75,6% fue captado de fuentes superficiales y el 24,4% correspondiente a fuentes subterráneas.



Figura 22: Fotografía que muestra el uso turístico y recreativo del agua. (Foto: Mario Arias)

Cada concesión del recurso hídrico en el país es otorgada por la Dirección de Agua del MINAE; excepto el AyA, quien por ley se encuentra autorizado para aprovechar las aguas de dominio público con fines de abastecimiento poblacional y el ICE, institución que tiene autorización para su uso con fines hidroeléctricos. Sin embargo, ambos entes tienen la obligación de registrar los caudales que aprovechan para efectos del balance hídrico.

La demanda de agua, en el año 2016, para las actividades productivas que dinamizan la economía del país, en forma combinada incluye los siguientes usos: hidráulico, agropecuario, agroindustrial, industrial, riego y turismo representando el 78% del agua concesionada, mientras que para el abastecimiento humano fue del 22 % del total aprovechado.

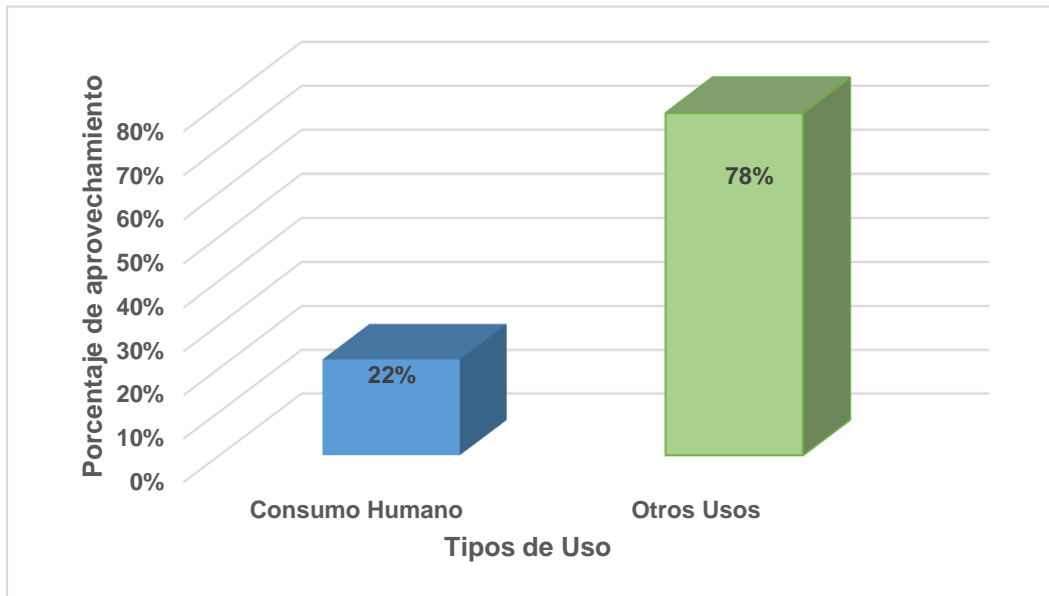


Figura 23: Distribución porcentual del uso del agua en Costa Rica.
(Imagen: Mario Arias, con datos del MINAE, 2016)

En nuestro país tenemos diversos usos no consuntivos, que son aquellos casos en los que el agua no se gasta y puede volver a utilizarse para otra finalidad, como el uso recreativo, navegación e hidroeléctrico.



Figura 24: Fotografía que muestra el uso de agua para navegación. (Foto: Mario Arias)

PROCESOS

DE

GESTIÓN

GESTIÓN INTEGRADA DEL RECURSO HÍDRICO

La gestión integrada del recurso hídrico (GIRH) es un **proceso** que promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados.

Como **proceso**, utiliza una serie de principios y componentes económicos, sociales y ambientales, con el fin de aplicar varios instrumentos de gestión que brinden una visión integral de la problemática hídrica y como contribuir a su resolución.

Uno de los principales retos en este **proceso** es promover y hacer efectivos los siguientes cambios socioculturales que permitan una gestión efectiva del recurso.

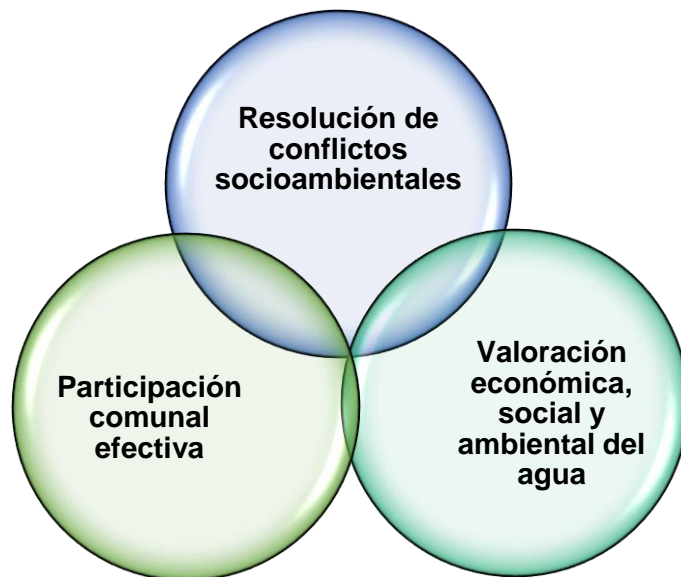


Figura 25: Componentes del enfoque integrado. (Imagen: Mario Arias)

Como **proceso** de gestión, su objetivo debe enfocarse a establecer una estrategia integrada pero diferenciada del agua superficial y del agua subterránea, en función de las condiciones de cada sitio, tomando en cuenta las características hidrológicas del recurso, entre ellas: origen, calidad, cantidad, accesibilidad, impactos por extracción, vulnerabilidad, persistencia a la contaminación, así como factores socio económicos relacionados con el recurso, entre ellos: percepción de la población, costo del aprovechamiento y estilo de desarrollo.

Las metas que procura la GIRH se deben enmarcan en los siguientes contextos:

Contexto	El Recurso Hídrico debe ser gestionado:
Internacional	Con los acuerdos y convenciones internacionales, incluyendo el concepto de “buen vecino”, en la evaluación, aprovechamiento y protección de los recursos transfronterizos, superficiales y subterráneos.
Nacional	Para apoyar el logro de las metas nacionales y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.
Satisfacción de necesidades	De tal forma que; sea accesible para todos y se satisfagan las necesidades humanas y los requerimientos de los ecosistemas.
Principios de gestión	Incluyendo la descentralización de responsabilidades al nivel más bajo apropiado, gestión y toma de decisiones participativas que incluyan integración de géneros y gestión dentro de unidades hidrológicas ya sea a nivel de cuencas o de acuíferos.

Cuadro 4: Metas de la Gestión Integral del Recurso Hídrico. (Imagen: Mario Arias)

Además, para una gestión apropiada del recurso es necesario promover varios tipos de evaluaciones, entre ellas:



Figura 26: Tipos de evaluaciones que promueve la GIRH. (Imagen: Mario Arias)

CULTURA DEL AGUA

La Cultura del Agua es el conjunto de saberes, valores, costumbres, actitudes y hábitos construidos con las comunidades y demás actores para una conciencia social hacia el uso racional, justo, disponible y eficiente de este recurso.



Figura 27: Hacia una Cultura del Agua. (Fuente: Arias, 2002)

Su objetivo es favorecer el conocimiento y actitudes en la población sobre la adecuada gestión del recurso hídrico para su aprovechamiento sostenible y protección efectiva.

La Cultura del Agua en nuestro país se enmarca no solamente en la toma de conciencia de la importancia de preservar este recurso tanto en cantidad como calidad; si no también de reconocer el valor económico, social y ecológico de agua.

El fortalecimiento de los siguientes valores en nuestra sociedad, es esencial, para reforzar la Cultura del Agua.

- **Conciencia colectiva:** consiste en darnos cuenta que existe un ciclo de este recurso, producto del equilibrio entre los componentes superficiales y subterráneos, el cual violentamos cuando las actividades antrópicas se desarrollan indebidamente, ejemplo de ello es la urbanización en zonas de recarga efectiva o la sobreexplotación de pozos en las zonas costeras de interés turístico.

- **Solidaridad:** entender que el agua es un bien colectivo, que atiende a necesidades sociales. De esta manera, el agua que una persona desperdicia es la que le falta a otra. De la misma manera todas las acciones que realicemos en el presente tendrán irremediablemente efectos en el futuro.
- **Disciplina:** para fijar reglas de uso del agua y responsabilidad individual y colectiva para acatarlas e incorporarlas a nuestra vida diaria.
- **Justicia:** para pagar por lo que realmente disfrutamos, aunque al agua en su estado natural es difícil establecerle un precio; su extracción, captación, procesamiento, conducción e introducción a los hogares implica un costo que debe ser justamente cubierto por los consumidores.
- **Sabiduría:** para implementar y aceptar los avances tecnológicos sobre el reuso y/o reciclado del agua.

Otras acciones concretas que deben ser aplicadas para el cambio hacia la Cultura del Agua son:



Figura 28: Acciones necesaria para la Cultura del Agua. (Imagen: Mario Arias)

La Cultura del Agua implica que todos nosotros conozcamos la realidad de este recurso, concientizar sobre el desperdicio y contaminación, y reforzar las diversas acciones para su protección efectiva y aprovechamiento sostenible.

ORDENAMIENTO AMBIENTAL DEL TERRITORIO

El ordenamiento ambiental del territorio consiste en el inventario, diagnóstico y definición de las condiciones naturales del ambiente de un espacio geográfico dado, con el fin de establecer las limitantes de uso y sus condiciones de aptitud para el desarrollo de determinadas actividades humanas.

Para lograr ese objetivo, es necesario planificar el desarrollo de actividades humanas en las cuencas y acuíferos existentes; considerando las características propias de estos. Así la caracterización del sistema acuífero, la determinación de la vulnerabilidad hidrogeológica, la evaluación del riesgo y la definición de las zonas de protección ambiental serán herramientas efectivas para el establecimiento de dicho ordenamiento.

La conveniencia de un desarrollo industrial, inmobiliario o agrícola, depende de una gama de factores, incluidos obviamente los geológicos pues estos limitan el medio soportante. La viabilidad de estos proyectos dependerá de las características físicas de cada sitio en particular, así como del diseño ingenieril y estructural de los mismos proyectos. Desde el punto de vista de las Ciencias Geológicas, los siguientes factores deben de ser considerados en la etapa de evaluación, pre factibilidad y construcción de los diversos proyectos.

Geoaptitud del Terreno	Incluye: dureza del material geológico, intensidad y relaciones de la fracturación, grado de meteorización de las rocas, espesor y contenido de arcilla de los suelos, porosidad y permeabilidad aparente.
Geodinámica Externa	Contempla categorías de pendiente, la rugosidad del terreno, densidad del drenaje, importancia de las áreas y tipos de erosión y sedimentación activa.
Factor Hidrogeológico	Evalúa: unidades hidrogeológicas, caracterización y modelo conceptual de los acuíferos, delimitación y zonas de protección de manantiales, pozos de abastecimiento público y del mismo acuífero, determinación de zonas de recarga directa, grado de importancia del terreno para la recarga lateral, evaluación de la vulnerabilidad intrínseca.
Estabilidad de Laderas	Incluye: espesor de suelos y formaciones superficiales, condiciones de precipitación, categorías de pendientes, factor de sismicidad, tipo de cobertura vegetal, presencia de fallas geológicas activas o potencialmente activas, importancia de procesos de erosión/sedimentación.
Amenazas Geológicas	Integra: grado de sismicidad, potencial de licuefacción del terreno, potencial de fractura en superficie por fallamiento geológico activo o potencialmente activo, amenaza volcánica, potencial afectación por Tsunamis en zonas marino – costeras y amenaza por inundación.

**Cuadro 5: Factores geológicos que inciden en el Ordenamiento Ambiental del Territorio.
(Imagen: Mario Arias)**

El ordenamiento ambiental del territorio, debe ser impulsado desde las mismas instituciones estatales y promovido por la sociedad civil. Es fundamental que la temática hidrogeológica sea valorada en su justa dimensión, pues la existencia o no del recurso hídrico, tanto en calidad como en cantidad, condiciona el desarrollo de cualquier tipo de actividades.

En la gestión territorial ambiental se han venido desarrollando, y con frecuencia aplicando, diferentes conceptos y enfoques basados en la cuenca hidrográfica como unidad de planificación, los cuales se pueden extrapolar también al acuífero.

La cuenca hidrográfica, así como el acuífero, sirven entonces de escenario principal, para que el ser humano desarrolle diferentes acciones tendientes a su manejo, gestión y cogestión. Aunque todos estos enfoques tienen como objetivo común el uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y el ambiente, pueden diferir, al menos parcialmente, en la visión, en quiénes y el cómo llevar a cabo la implementación de los procesos y acciones necesarias para lograr ese objetivo.

Manejo	Gestión	Cogestión
Consiste en el uso y aprovechamiento de los recursos naturales de la cuenca o acuífero, donde generalmente existe un ente estatal que ejerce de manera principal la responsabilidad de implementar acciones para manejar esos recursos. Implica ordenar, ejercer autoridad, disponer, organizar, los recursos naturales en ese territorio.	Incluye el concepto de manejo, pero desde el enfoque sistemático, socioambiental, integral, multi e interdisciplinario e intersectorial. Además enfatiza en los procesos y acciones (la gestión) necesarias para lograr los recursos humanos, económicos, logísticos y administrativos requeridos.	Enfatiza en la participación plena y real de los actores en la toma de decisiones, en los procesos de empoderamiento comunitario y de organización local, pero armonizados y vinculados a las competencias de los diversos niveles y sectores nacionales relacionados con el manejo y la gestión de cuencas y acuíferos.

Cuadro 6: Enfoques de Gestión. (Imagen: Mario Arias)

El enfoque más democrático es la Cogestión, en el cual; diferentes actores locales como productores, grupos organizados, gobiernos locales, empresa privada, organizaciones no gubernamentales, instituciones nacionales, organismos donantes y cooperantes integran esfuerzos, recursos, experiencias y conocimientos para desarrollar procesos dirigidos a lograr impactos favorables y sostenibilidad en el manejo de los recursos naturales y el ambiente en las cuencas hidrográficas y acuíferos, en el corto, mediano y largo plazo, por medio de lineamientos consensuados entre las partes.

MONITOREO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El monitoreo del agua subterránea, es una actividad científica que incluye un programa de medición continua de variables climáticas, hidrogeológicas y de calidad de agua subterránea. Su objetivo es: recolectar, procesar y analizar los datos sobre la cantidad y calidad de las aguas subterráneas, a partir del establecimiento de una Línea Base, que permita reconocer el estado y las tendencias del nivel de pronóstico debido a procesos naturales o por la actividad antrópica a lo largo del tiempo.

El término monitoreo implica seguimiento y por lo tanto, se refiere a mediciones y muestreos reiterados.

La periodicidad del monitoreo, depende de variados factores, entre ellos:



Figura 29: Elementos que condicionan la periodicidad del monitoreo del agua subterránea. (Imagen: Mario Arias)

Los objetivos de una estrategia de monitoreo de aguas subterráneas pueden incluir:

- Proveer datos representativos sobre el estado natural y las tendencias del sistema hidrogeológico con fines de planeación, manejo y toma de decisiones sobre la protección y conservación de las aguas subterráneas.
- Disponer de datos precisos y confiables para ayudar a identificar la existencia de fuentes puntuales y difusas de contaminación.
- Producir datos para estudiar los cambios en el espacio y en el tiempo en la calidad de los sistemas hidrogeológicos debido a procesos naturales.

El desarrollo de la estrategia debe tener en cuenta que los objetivos de monitoreo dependen del nivel (nacional, regional, local), de las prioridades, de los intereses y de las necesidades de los usuarios para:

- Identificar las propiedades físicas, químicas y biológicas del sistema de aguas subterránea.
- Definir el estado, en cantidad y calidad, de las aguas subterráneas (identificar formaciones geológicas, características hidrogeoquímicas).
- Identificar los efectos de los procesos naturales y los impactos humanos de los sistemas hidrogeológicos.
- Pronosticar a largo plazo las tendencias en cantidad y calidad de las aguas subterráneas.
- Definir el grado de vulnerabilidad de los sistemas hidrogeológicos.
- Definir medidas a ser adoptadas para prevenir la degradación de las aguas subterráneas o restaurar los acuíferos que ya han sido afectados.
- Determinar prioridades y conflictos entre los usuarios de los recursos hídricos subterráneos y otros recursos naturales.

Cuadro 7: Objetivos del monitoreo del agua subterránea. (Imagen: Mario Arias)

El sistema de monitoreo incluye las siguientes actividades:



Figura 30: Actividades esenciales para la estrategia de monitoreo. (Imagen: Mario Arias)

La selección de los sitios para el muestreo de la calidad y cantidad de las aguas subterráneas debe diseñarse a partir del modelo hidrogeológico conceptual y de los sistemas acuíferos presentes en cuencas y/o subcuencas hidrogeológicas.

Es importante destacar que las variaciones naturales de los niveles y la calidad de las aguas subterráneas están íntimamente relacionadas con las variaciones espaciales y temporales de variables meteorológicas e hidrológicas que definen las diferentes épocas climáticas.

Desde el punto de vista hidrogeológico es importante conocer el tipo de acuífero a monitorear teniendo en cuenta los siguientes factores geológicos.

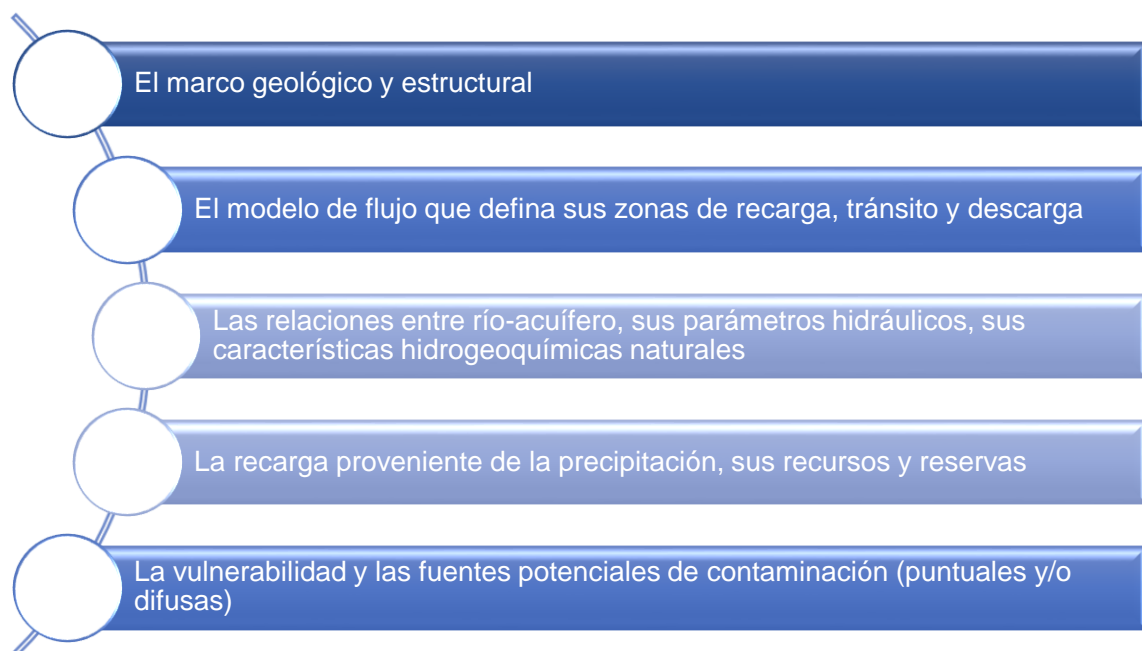


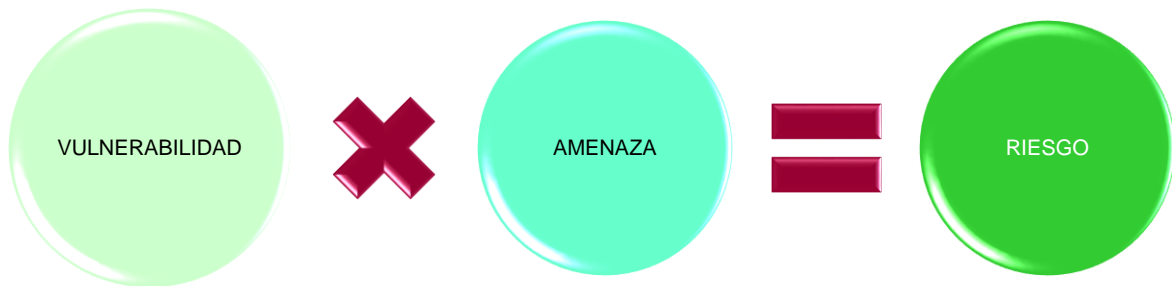
Figura 31: Factores geológicos que inciden en el monitoreo de aguas subterráneas.
(Imagen: Mario Arias)

La mayoría de estos factores inciden también en la distribución y separación de los pozos para monitoreo, cuya principal virtud consiste en que sean hábiles para brindar valores representativos de los niveles de agua subterránea y para permitir un muestreo que también sea representativo de la calidad del acuífero.

PROTECCIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

La protección efectiva del agua subterránea, se debe realizar de una manera diferenciada en función de la escala de trabajo, sea a nivel de acuífero o a nivel de manantial o pozo.

La **protección del acuífero** debe considerar la interrelación existente entre la vulnerabilidad hidrogeológica y las fuentes potenciales de contaminación que inciden en el riesgo para el acuífero, así las cosas:



Vulnerabilidad Hidrogeológica	Amenaza	Riesgo Hidrogeológico
<p>Depende de las características físicas del acuífero: profundidad del agua subterránea, tipo de acuífero (libre, confinado), tipos de rocas en la zona no saturada.</p> <p>Es considerada como una variable pasiva que no depende de las actividades humanas y que no cambia perceptiblemente con el tiempo</p>	<p>Depende de las diversas actividades productivas que se desarrollan en el suelo que se encuentra sobre el acuífero, entre ellas: urbanística, agrícola, ganadera, industrial.</p> <p>Es considerada como una variable activa que depende directamente de las actividades humanas y que puede cambiar con el tiempo.</p>	<p>Es el peligro del deterioro de la calidad del acuífero, por la existencia real o potencial de sustancias contaminantes en su entorno y es concebido como la interacción de la parte pasiva (Vulnerabilidad), y la parte activa (Amenaza).</p>

Cuadro 8: Características del riesgo hidrogeológico en función de la vulnerabilidad y amenaza.
(Imagen: Mario Arias)

El concepto de vulnerabilidad hidrogeológica está basado en la asunción de que el ambiente físico puede proveer algún grado de protección a las aguas subterráneas producto de los impactos naturales y antrópicos.

Los mapas de vulnerabilidad son particularmente útiles para regular, manejar y tomar decisiones a nivel gubernamental, son una buena herramienta para hacer una valoración local y regional del potencial grado de afectación, identificando áreas susceptibles a la contaminación, diseñando redes de monitoreo, y evaluando el grado de contaminación difusa. Estos mapas también son de gran ayuda en el proceso educativo e informativo para los tomadores de decisión en la protección del agua subterránea.

Existen varias metodologías para evaluar la vulnerabilidad, las cuales se deben aplicar tomando en consideración tanto la calidad y cantidad de información disponible del acuífero, como sus características de formación (tipos de rocas, acuíferos libres o confinados). Entre las técnicas más utilizadas se pueden citar:

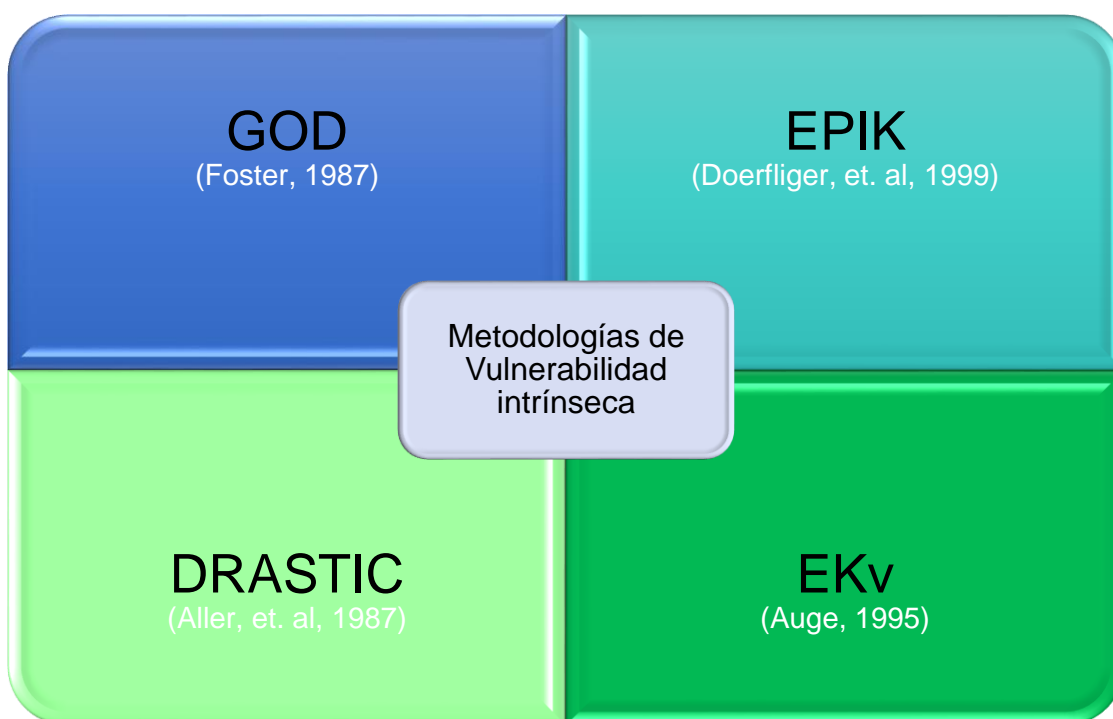


Figura 32: Principales metodologías hidrogeológicas para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos. (Imagen: Mario Arias)

La amenaza, está expresada como la carga contaminante *que es, será o pudiera ser* aplicada al suelo como resultado de las actividades humanas. Estas amenazas o fuentes potenciales de contaminación pueden diferenciarse entre puntuales (ocurren en un lugar determinado, por ejemplo un derrame de una gasolinera) o difusas (ocurren en un área en la cual no es posible determinar la fuente de origen de contaminación, por ejemplo las actividades agrícolas).

La contaminación de los acuíferos ocurre cuando la carga de contaminantes generados por descargas o lixiviados de actividades urbanas, industriales, agrícolas, mineras u otras, no es controlada adecuadamente, y en ciertos componentes excede la capacidad natural de atenuación del subsuelo.

Los horizontes del suelo contribuyen a la disminución de muchos contaminantes, gracias al proceso de degradación química y biológica que se puede producir durante el transporte subterráneo por la zona no saturada.

En la evaluación de esta carga contaminante se debe considerar los siguientes elementos:



Figura 33: Componentes a considera en la evaluación de la Carga Contaminante.
(Imagen: Mario Arias)

En términos prácticos, la evaluación del riesgo involucra la superposición de los resultados del inventario de cargas contaminantes del subsuelo con el mapa de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos, y para ello se utilizan diferentes metodologías, como la siguiente matriz de cuantificación y evaluación, desarrollada por el autor.

Valor			Zonas de Vulnerabilidad				
			Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
			1	2	3	4	5
Carga contaminante	Reducida	1	1	2	3	4	5
	Moderada	2	2	4	6	8	10
	Elevada	3	3	6	9	12	15
Riesgo de contaminación			Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
			1-2	3-5	6-8	9-11	12-15

Figura 34, Matriz de determinación del riesgo hidrogeológico a partir del índice de vulnerabilidad y de la carga contaminante. (Imagen: Mario Arias)

Las zonas en riesgo crítico, se presentan donde hay actividades capaces de generar carga contaminante elevada en un área de alta o extrema vulnerabilidad del acuífero, y es en ellas donde se deben establecer mayores restricciones al uso del suelo.

La evaluación del riesgo de contaminación del acuífero es un requisito esencial para la protección de los recursos hídricos subterráneos, ya que identifica aquellas actividades humanas que tienen la mayor probabilidad de tener impactos negativos sobre el acuífero, permitiendo priorizar las medidas de control y mitigación necesarias.

En el caso de la **protección de manantiales y pozos** de extracción de agua, nuestra legislación ya establece zonas de protección de radio arbitrario, donde se prohíbe la corta de árboles, veamos el siguiente ejemplo:

Ley de Aguas	Ley Forestal
<p><i>Artículo 31:</i> declara como reserva a favor de la Nación, las tierras que circundan los sitios de captación o tomas surtidoras de agua potable, en un perímetro no menor de doscientos metros de radio. En el <i>artículo 149</i>, se establece la prohibición de destruir, tanto en los bosques nacionales como privados, los árboles situados a menos de setenta metros de los manantiales que nazcan en cerros o a menos de cincuenta metros de los que nazcan en terrenos planos.</p>	<p><i>Artículo 33:</i> señala como áreas de protección las áreas que bordean nacientes permanentes, definidas en un radio de cien metros medidos de modo horizontal y en el <i>artículo 34</i> de esta ley, se prohíbe la corta o eliminación de árboles en las áreas de protección descritas en el artículo anterior, excepto en proyectos declarados por el Poder Ejecutivo como de conveniencia nacional.</p>
<p>Ventaja de su aplicación</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Existe la norma jurídica que regula los radios de protección. * Permite una atención inmediata ante una contaminación inminente. * No requiere estudio técnico del sitio. * El costo económico de su aplicación es mínimo.
<p>Desventaja de su aplicación</p>	<ul style="list-style-type: none"> * No es una medida regulatoria basada ni en la ciencia, ni en la técnica. * No toma en consideración las características propias de cada manantial (origen, caudal). * Delimita zonas que no necesariamente permiten una protección efectiva ante la contaminación y/o reducción del caudal. * Tiende a generar conflictos por el uso del suelo, especialmente aguas abajo de la naciente.

Cuadro 9: Comparación de las zonas de protección arbitraria establecidas en la legislación. (Imagen: Mario Arias).

Desde el punto de vista técnico, la zona de protección de un manantial, puede ser definida como el área de captura de la recarga (tubo de flujo), es decir; el perímetro en el que la recarga al acuífero será captada por el manantial de abastecimiento de agua en consideración.

Existen diversas metodologías, que toman en consideración las características propias del manantial; ya sea su caudal, la porosidad del suelo, si el agua procede de un acuífero libre o confinado, la vida media del potencial contaminante (por ejemplo coliformes fecales), entre otros parámetros.

A continuación se presenta un ejemplo realizado en la zona norte de nuestro país.

En la figura 35, se ha delimitado el tubo de flujo de las nacientes El Altar y Las Caobillas (un solo tubo para ambas, pues desde el punto de vista hidrogeológico se consideran como parte del mismo sistema).

En la parte interna del tubo de flujo, se ha zonificado (Z1, Z2, Z3) en función de la recomendación de uso del suelo que se le puede dar.

Así mismo se superpusieron los radios arbitrarios establecidos en la Ley de Aguas (200 m), para poner en evidencia la diferencia entre la protección efectiva establecida a partir de un estudio técnico y la protección jurídica a partir de radios arbitrarios.

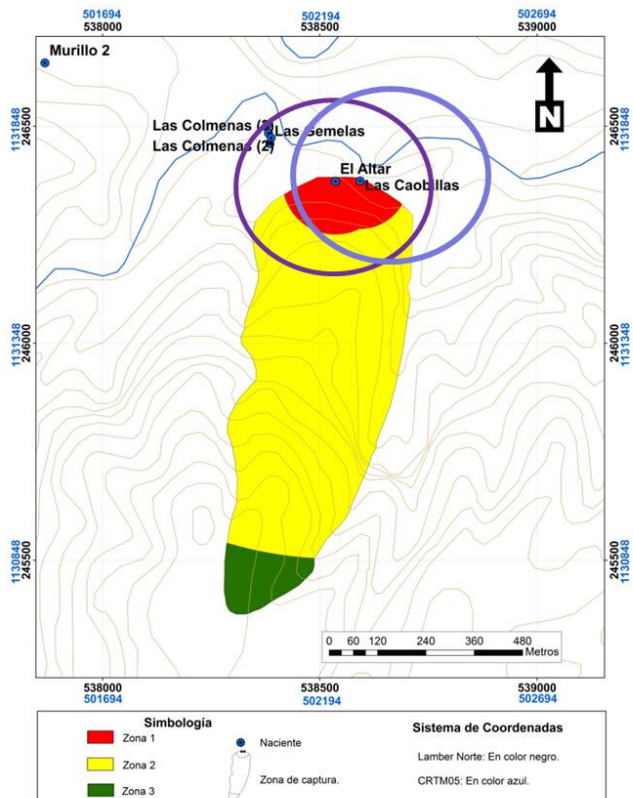


Figura 35: Zonas de protección técnica de manantiales. (Imagen: Mario Arias)

El propósito del estudio técnico, y de la delimitación de las zonas de protección de manantiales está enfocado a:

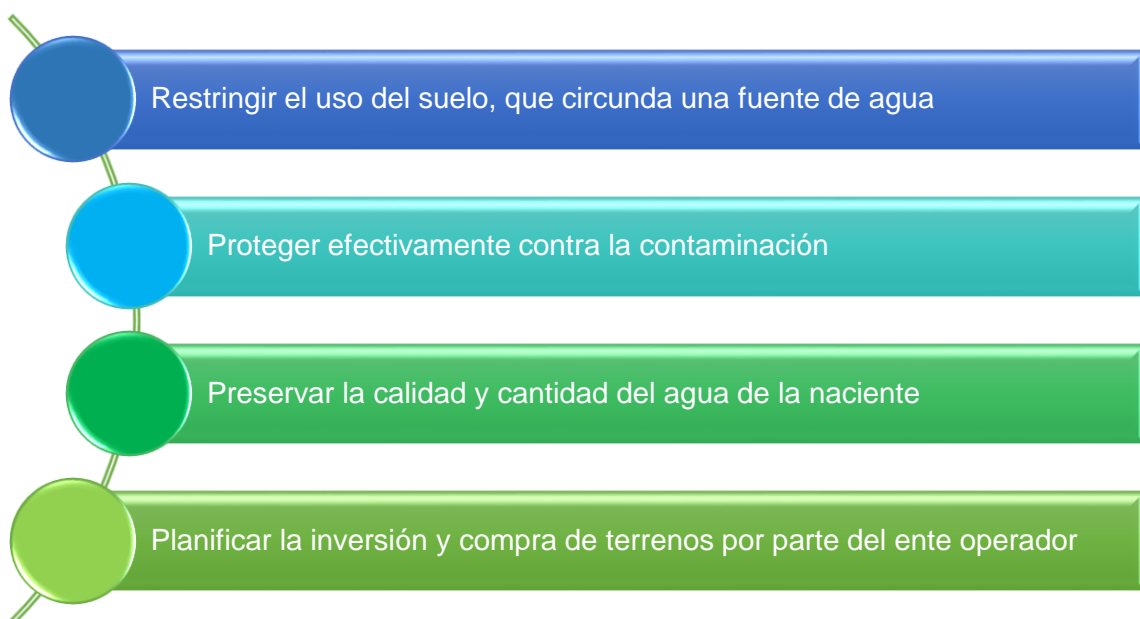


Figura 36: Objetivos de delimitación técnica de las zonas de protección de manantiales. (Imagen: Mario Arias)

SARDINAL

DISTRITO DE SARDINAL

Sardinal es el distrito tercero del cantón de Carrillo, ubicado en la provincia de Guanacaste.

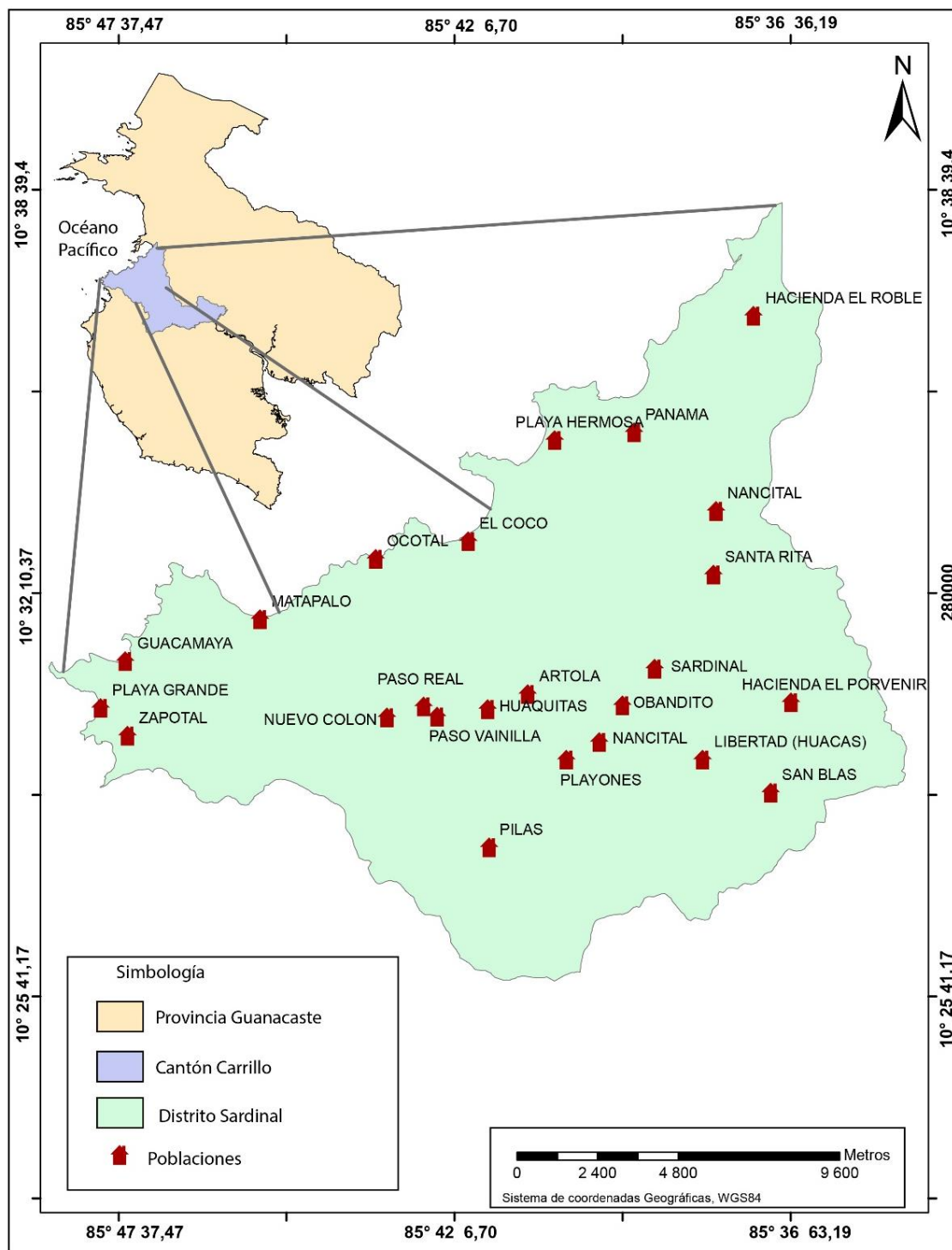


Figura 37: Mapa de distribución del Distrito de Sardinal (Imagen: J. D. López)

El distrito de Sardinal, incluye varios poblados, entre ellos: Zapotal, Playa Grande, Guacamaya, Matapalo, Ocotal, El Coco, Playa Hermosa, Panamá, Nancital, Santa Rita, Hacienda Porvenir, Libertad, San Blas, Pilas, Playones, Obandito, Sardinal, Artola, Huaquitas, Paso Vainilla, Paso Real, Nuevo Colón.

El distrito de Sardinal es el más grande en territorio y población del cantón de Carrillo, tiene una extensión de 240,45 km². Según los resultados del Censo Nacional del año 2011, cuenta con una población de 14 912, distribuida de la siguiente manera: 7 338 mujeres y 7 574 hombres. La densidad de población es 62 habitantes por km², y el 58,2 % de la población se considera urbana.

La distribución porcentual de la población por edades se muestra en el siguiente gráfico.

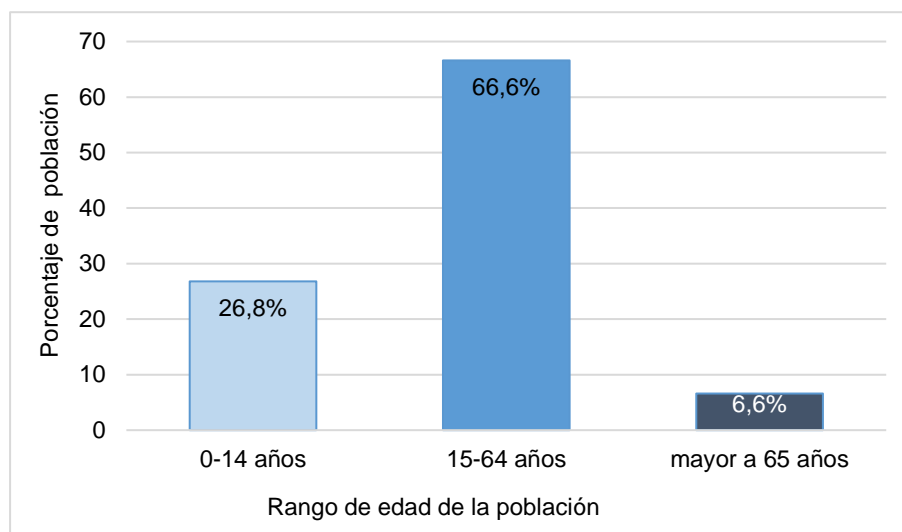


Figura 38: Distribución porcentual de la población en función de la edad en el distrito de Sardinal (Imagen: Mario Arias con datos del INEC, 2011)

El Censo Nacional del año 2011 indica que; el 81,6 % de la población entre las edades de 5 a 15 años asiste o recibe educación básica y el 19,3 % de las personas con edades de los 17 años en adelante tienen educación superior.

CUENCA DEL RÍO SARDINAL

La cuenca hidrográfica del río Sardinal, se ha delimitado a partir de la distribución de los ríos que desembocan en el cauce del río Sardinal, hasta su confluencia con el río Las Palmas.

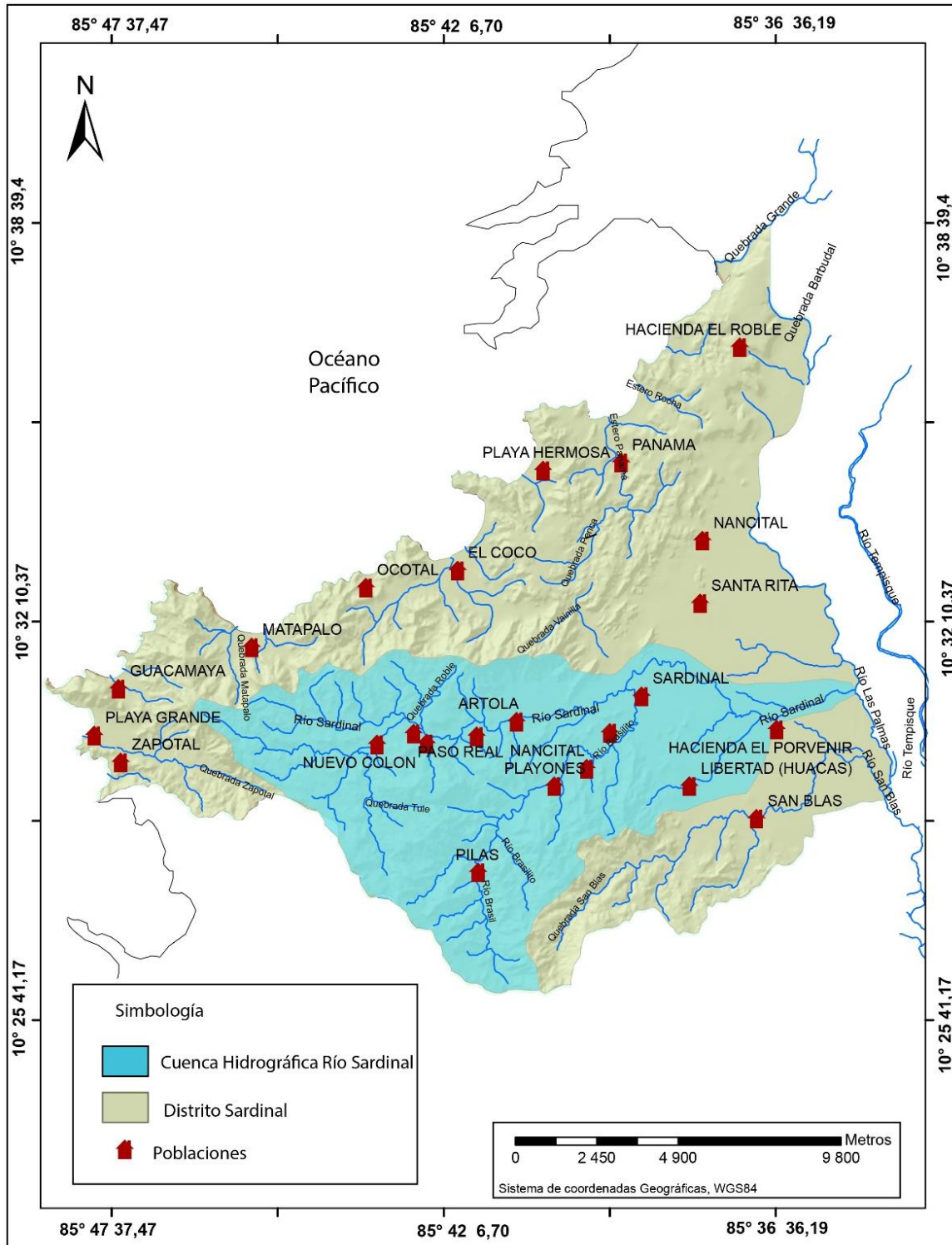


Figura 39: Mapa de la Cuenca hidrográfica del río Sardinal, hasta su confluencia con el río Las Palmas. (Imagen: J. D. López)

La cuenca hidrográfica del río Sardinal, se caracteriza porque el agua de los ríos viaja preferencialmente hacia el este, tiene un área de 99 km², y el río principal tiene el mismo nombre del poblado principal y del tercer distrito del cantón de Carrillo. Otros poblados que se ubican dentro de la cuenca del río Sardinal son: Nuevo Colón, Paso Real, Artola, Nancital, Playones, Hacienda Porvenir, Libertad y Pilas.

La cuenca del río Sardinal, se puede considerar como una microcuenca, que es parte del subcuenca del río San Rafael, siendo a su vez este un tributario de la cuenca del río Tempisque.

El uso del suelo en la cuenca del río Sardinal está dominado por bosque tanto primario como secundario, cultivos y en menor proporción el uso urbano, veamos algunas fotografías.



Figura 40: Usos del suelo en la cuenca del río Sardinal. (Fotos: Mario Arias)

POBLADO SADINAL

El poblado es conocido desde la segunda mitad el siglo XVIII y fue establecido como cuadrante desde principios del siglo XIX. Actualmente, el desarrollo urbano está limitado al oeste y norte por el río Sardinal y el sector este por el desarrollo de actividades agrícolas.



Figura 41: Vista aérea del cuadrante de Sardinal y uso del suelo aledaño. (Imagen: Google Earth)

En el poblado de Sardinal se cuenta con diversos servicios básicos y recreativos, entre ellos:





Escuela Bernardo Gutiérrez



Colegio Técnico Profesional



EBAIS



Asociación de Desarrollo



Cámara de Ganaderos/MAG



Parada de Autobuses



Actividades Comerciales y recreativas



Campo Deportivo

Figura 42: Servicios básicos en el Poblado de Sardinal. (Fotos: Mario Arias)

ACUÍFERO SARDINAL

El acuífero Sardinal, cubre parcialmente el área de la cuenca del mismo nombre. Su delimitación se realizó en función de la divisoria de aguas de los ríos y en el sector este en función de las curvas isofreáticas del acuífero. El área del acuífero es de 89 km²

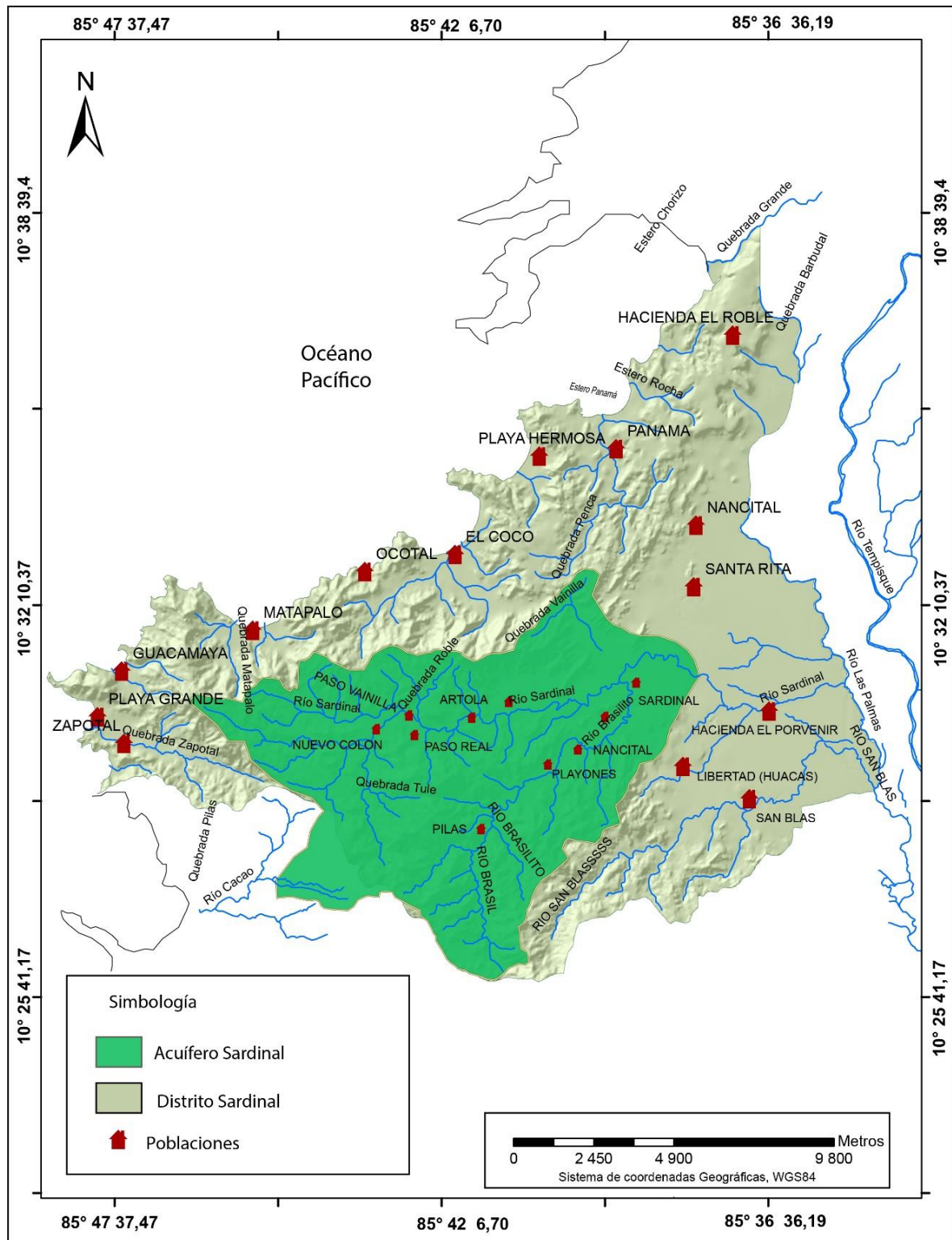


Figura 43: Mapa del Acuífero Sardinal. (Imagen: J. D. López con datos del CTI Sardinal)

El acuífero Sardinal, es un reservorio de agua subterránea, la cual se encuentra almacenada y puede moverse en medio de los poros y fracturas de dos tipos de rocas que existen en el acuífero: aluviones que representan el 27 % del área y rocas volcánicas que representan el 73 % restante del área del acuífero.

Los aluviones son rocas sedimentarias, que han sido acarreados por los ríos, producto de la erosión y sedimentación después de eventos de inundación. Estos materiales, generalmente presentan intercalaciones de rocas de diferente composición, tamaño y grado de porosidad, que por lo general actúan como acuíferos muy productores.

Las rocas volcánicas existentes en la zona, corresponden al denominado Complejo de Nicoya, el cual incluye a las rocas más viejas de nuestro país y la mayoría de ellas son de origen oceánico. Se caracteriza por que presenta un variable grado de fracturación y no siempre son buenas productoras de agua subterránea.



Figura 44: Tipos de rocas en las que se puede almacenar agua subterránea en el acuífero Sardinal. (Fotos: Mario Arias)

El aprovechamiento del agua subterránea en el acuífero Sardinal, se realiza por medio de pozos perforados y excavados, tanto para uso poblacional, así como agrícola y de abrevadero.



Figura 45: Pozos excavados y perforados que aprovechan el Acuífero Sardinal, las fotografías son tomadas en los poblados de: Sardinal, Obandito, Artola y Nuevo Colón. (Fotos: Mario Arias)

Es importante indicar, que la mayoría de los pozos excavados presentan un alto riesgo de contaminación para el agua del acuífero, pues muchos de ellos no tiene una tapa apropiada, tampoco tienen una cerca que impida la entrada de animales ni personas que puedan provocar algún tipo de contaminación, así mismo; están expuestos a excretas de animales que pastean en los alrededores.

Con el objetivo de conocer varias condiciones hidrogeológicas del acuífero, se realizan perfiles o cortes hidrogeológicos a partir de la correlación de información de pozos de la zona. En este tipo de diagramas, se representa la topografía del lugar, la ubicación y características de los pozos seleccionados, incluyendo: nombre del pozo, la profundidad a la cual se ubica la zona de rejilla por donde ingresa el agua subterránea, la profundidad del nivel de agua y los diferentes tipos y espesores de rocas y suelo.

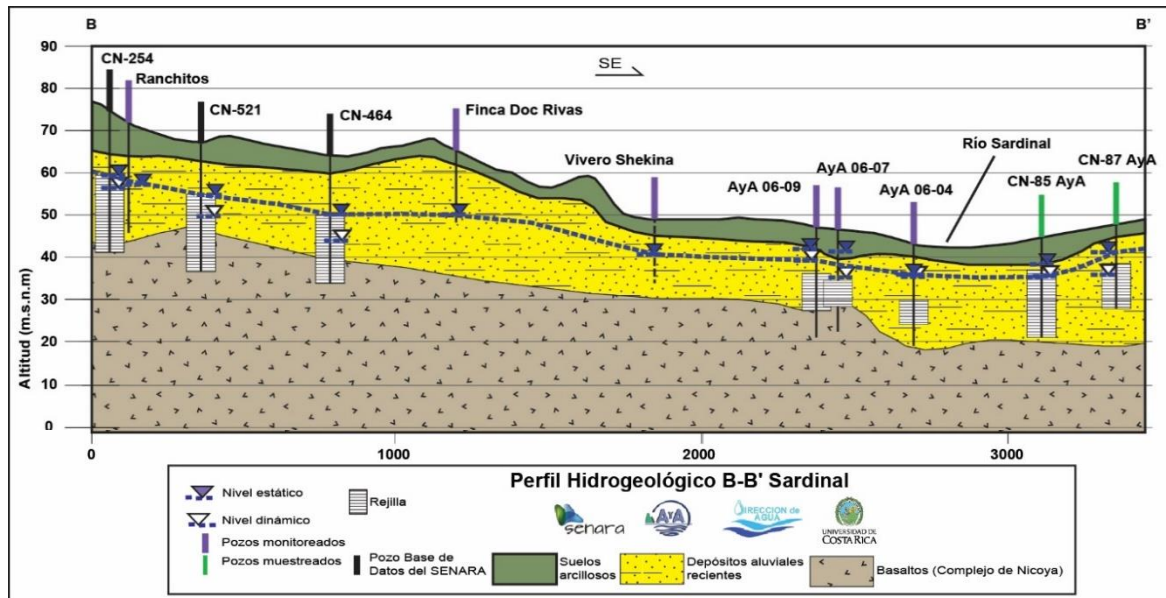


Figura 46: Perfil hidrogeológico de un sector del acuífero Sardinal. (Fuente: CTI, 2017)

Del análisis de este perfil hidrogeológico, se puede decir que el espesor de suelo es variable a lo largo de la zona estudiada, con espesores máximos de hasta 15 m, el cual; dependiendo del porcentaje de arcillas que pueda tener, incidirá en la condición hidráulica del acuífero (libre, semiconfinado o confinado).

En esta figura 46, queda claro que la zona no saturada del acuífero Sardinal, está compuesta en parte por el suelo y en parte por aluvión.

La zona saturada, abarca tanto parte del aluvión, por debajo del nivel del agua, como parte de las rocas volcánicas, pues existe rejilla en estos materiales, lo que indica que de ahí también se extrae agua subterránea.

Como se aprecia en el perfil, algunos pozos captan agua solo de la zona saturada del aluvión (AyA 06-04) mientras que otros, captan agua tanto del aluvión como de las rocas volcánicas (CN-464), obteniendo al final una mezcla de aguas de ambos tipos de rocas, lo cual puede incidir en el caudal de extracción, así como en la calidad de la misma.

AGUA EN EL ACUÍFERO SARDINAL

La recarga al acuífero en el sector donde están expuestas rocas de tipo aluvión se da principalmente por la precipitación directa sobre los suelos y como recarga lateral de las zonas montañosas en las cuales existen las rocas del Complejo de Nicoya. Por su parte, en los sectores donde están estas rocas volcánicas, la recarga ocurre de forma directa por la infiltración efectiva de la lluvia en las fracturas de las rocas.

Tanto el río Brasilito, como el río Sardinal, presentan una estrecha relación con el acuífero, pues en algunos tramos claramente identificados en los estudios técnicos, ambos ríos recargan agua al acuífero, mientras que en otros, es el acuífero que aporta agua a estos ríos, permitiendo mantener un flujo base en ciertas épocas del año.

A partir del balance hídrico de suelos del acuífero, se determinó que la cantidad de agua que se recarga es de 1100 l/s (año 2011). Con el evento de sequía que se presentó en el año 2015, la recarga se estimó en 622 l/s. Ésta disminución en la recarga se debió claramente al descenso de la precipitación, tal y como lo muestran los datos registrados en la estación meteorológica que se instaló en el Colegio Técnico Profesional Agropecuario de Sardinal en el año 2012.

Periodo abril a marzo	Precipitación acumulada (mm)
2012-2013	1249,4
2013-2014	1473,3
2014-2015	1072
2015-2016	845,8
2016-2017	1487,8

En el periodo 2015-2016 fue donde se presentó el mayor déficit de precipitación, debido al Fenómeno del Niño que se consideró como fuerte a intenso. Por su parte, en el periodo 2016-2017, se evidencia la recuperación de la precipitación, con los valores máximos en todo el ciclo de registro de esta estación meteorológica.



Figura 47: Estación meteorológica en el CTP Sardinal. (Foto: CTI, 2017)

Para observar la variación de la profundidad del agua en función del tiempo, y correlacionarla con el aumento o disminución de precipitación y/o extracción se ha establecido un monitoreo de niveles de agua subterránea en el acuífero Sardinal.

La red de mediciones de niveles de aguas en Sardinal, cuenta, en el mes de octubre del año 2017, con 30 pozos para monitoreo manual. El monitoreo manual consiste en medir mensualmente la profundidad del nivel del agua subterránea en el pozo, para ello se utiliza una sonda que permite determinar esa distancia, la cual se refiere siempre a nivel del suelo.

En la mayoría de los pozos del acuífero Sardinal se mide el nivel estático, es decir cuando el pozo no está en producción, esto para conocer la profundidad natural del agua bajo esas condiciones y se representa por medio de gráficos como los de la figura 48.

La línea roja con cuadros en los tres gráficos, representa los datos del año 2010, muestran a partir del mes de junio que los niveles de agua subterránea se encuentran más superficiales, esto debido a la entrada de la época lluviosa, donde el año 2010 se caracterizó como un año con exceso de lluvia.

La línea verde limón con asteriscos en los tres gráficos, representa los datos del año 2016 y muestra, hasta el mes de mayo los niveles más profundos de agua en los pozos, debido a que ese año presentó en sus primeros meses un déficit importante de lluvia. Sin embargo; a partir de junio, con la entrada de la época lluviosa, se observa como los niveles de agua subterránea ascienden, es decir se recuperan gracias a la recarga directa de lluvia sobre el acuífero, alcanzando los valores del año 2009 (línea celeste con círculos), mismo que se caracterizó como un año promedio típico desde el punto de vista climático.

En lo que respecta al registro del año 2017, línea color naranja con cruces, evidencia que el nivel de agua subterránea sigue estable cercano o ligeramente superior a los niveles registrados en el 2009 (año promedio típico) y por encima de los mínimos registrados en los periodos de mayor sequía (2014-2015 y 2015-2016), esto gracias a la recuperación en las lluvias que inciden en la recarga natural al acuífero.

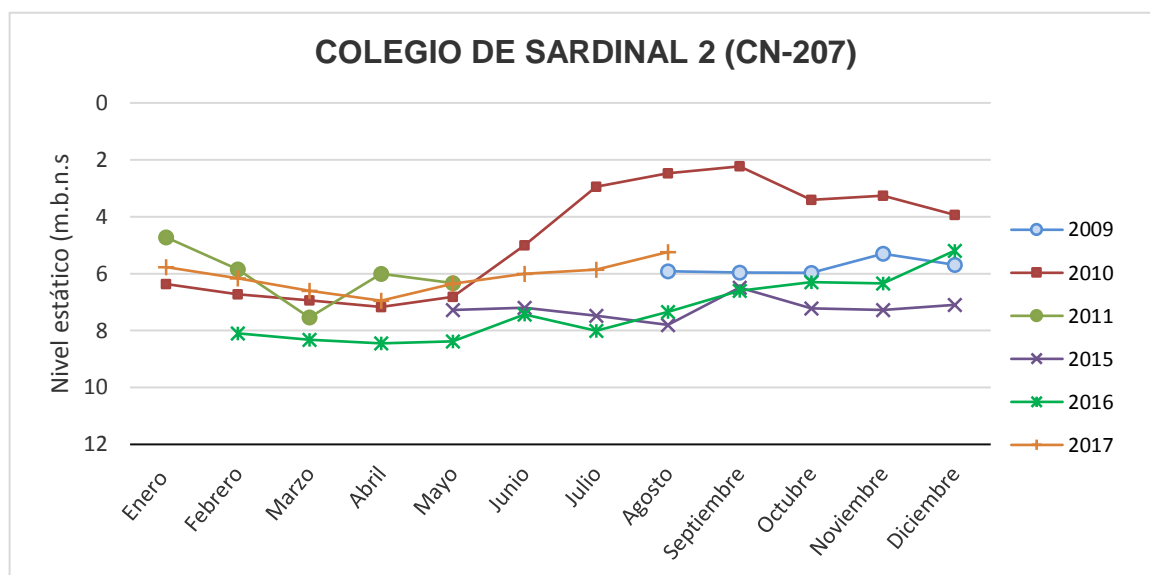
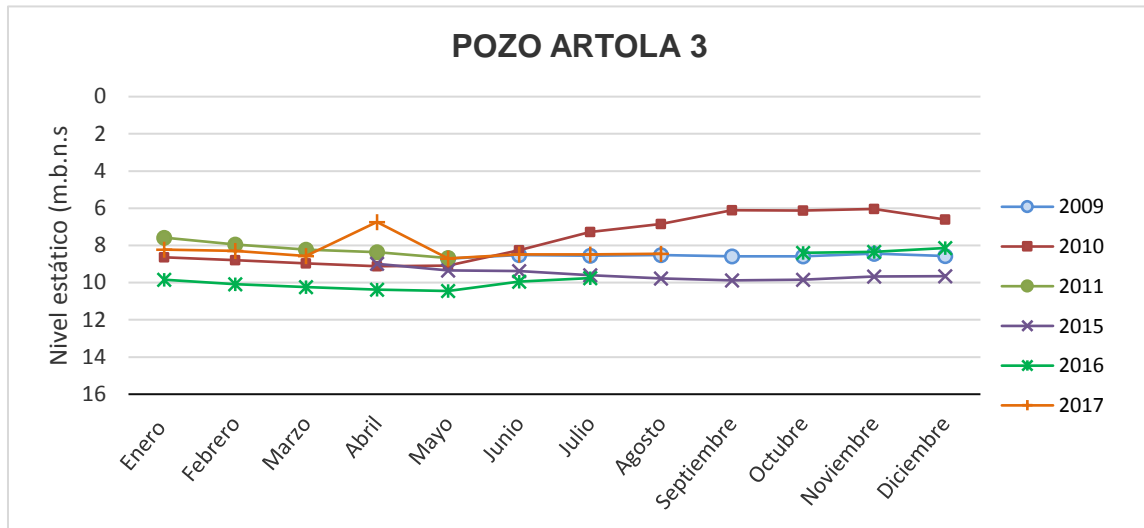
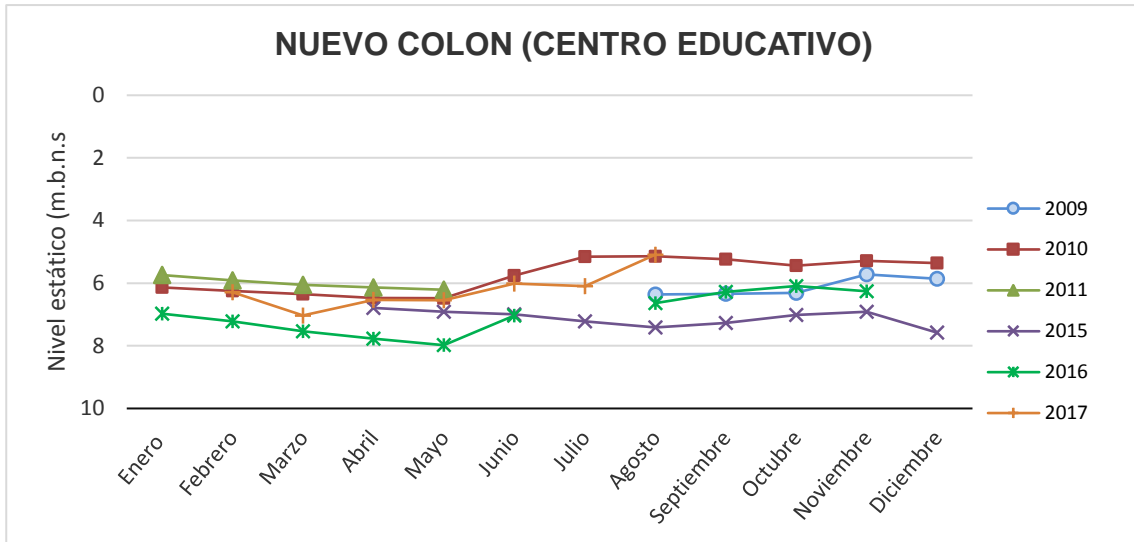


Figura 48: Gráficos de las variaciones en los niveles de agua subterránea. (Imagen CTI, 2017)

La calidad del agua en el acuífero, es evaluada semestralmente. Para el mes de octubre del año 2017, la red de monitoreo estaba constituida por 12 pozos en los cuales se analizan parámetros físicos, químicos y bacteriológicos, según lo establece el Reglamento de Calidad de Agua Potable vigente en nuestro país. Es importante aclarar, que varios de los pozos seleccionados en el muestreo de calidad, no son utilizados para abastecimiento población, sino para riego o abrevadero.

A partir de los dos análisis puntuales realizados en el año 2017, se evidencia que desde el punto de vista físico químico, las muestras de agua cumplen en su mayoría con los parámetros de potabilidad. Por su parte, desde el punto de vista bacteriológico hay algunos pozos que reportan pérdida en su calidad de agua, por esta razón es muy importante continuar con el monitoreo semestral para determinar alguna tendencia y proponer medidas correctivas.

Los reportes del monitoreo de niveles de agua subterránea, como de calidad del agua en el Acuífero Sardinal, se reportan en un boletín semestral que edita el Comité Técnico Institucional (CTI) y que se puede descargar de la página de la Dirección de Aguas del MINAE, <http://www.da.go.cr/acuiferos/>.

GESTIÓN EL RIESGO

La ubicación geográfica de Sardinal, condiciona la existencia permanente de amenazas naturales, que junto con las antrópicas deben ser caracterizadas para gestionar su riesgo a partir del nivel de exposición.

Las amenazas hidrometeorológicas se evidencian con la afectación que sufrió la comunidad de Sardinal por efecto de la *Tormenta Tropical Nate*, a partir del 4 de octubre del año 2017.

El aumento de precipitación por efecto de la tormenta, las características arcillosas de los suelos y las condiciones hidráulicas de los ríos Brasilito y Sardinal, incidieron en el aumento de la escorrentía superficial y en el incremento del caudal de ambos ríos, generando inundaciones en el poblado y afectación en la infraestructura del lugar. Situación que se vio favorecida por la carencia de bosque en las márgenes de los cauces de ambos ríos, tal y como lo establece nuestra legislación, que pudieron haber mitigado el efecto de la inundación.

Por ejemplo, el nivel del agua en el parque central, llegó hasta la altura del kiosco y de los asientos del parque, tal y como lo evidencian las siguientes fotografías tomadas dos semanas después de la ocurrencia de la tormenta.



**Figura 49: nivel del agua producto de la inundación, marcado en el parque central de Sardinal.
Fotos: Mario Arias**

La cantidad de agua y la fuerza de la corriente de los ríos Brasilito y Sardinal, generó el arrastre de árboles, la erosión de sus cauces, el deslizamiento de sectores cercanos a viviendas y pérdidas económicas a los habitantes del lugar. Las siguientes fotografías, tomadas el 19 y 20 de octubre del año 2017, ejemplifican este tipo de afectación.



Figura 50: Efectos de la inundación en Sardinal. Fotos: Mario Arias

Las amenazas al agua subterránea en Sardinal dependen en parte; del uso del suelo que se desarrolle sobre el acuífero y en parte; en función del régimen de extracción de agua en el mismo.

Para gestionar el riesgo hidrogeológico, es necesario el inventario de las fuentes potenciales de contaminación y la elaboración del mapa de vulnerabilidad intrínseca. También, es preciso ordenar y regular la extracción del agua en los pozos legalmente registrados, y el levantamiento y procesamiento de pozos ilegales, con el fin de alcanzar el control de la extracción de recurso hídrico.

Estas acciones se deben acompañar de un proceso participativo, como el Plan de Aprovechamiento Sostenible (PAS SARDINAL), que permita establecer lineamientos de manejo, regulación, aprovechamiento y protección del recurso hídrico en el acuífero.

El PAS SARDINAL, busca integrar las propuestas de manejo que se establecen a partir de los diversos estudios hidrogeológicos y del monitoreo del acuífero, bajo un marco conciliador y de respeto, en donde se valore su aplicabilidad considerando las características ambientales, sociales y económicas del entorno.

Para que este PAS SARDINAL sea legítimo, es necesario la participación efectiva de los diversos actores sociales. Esta participación debe iniciar con procesos formativos que permitan entender la mecánica del agua subterránea en el acuífero y de los diversos procesos que inciden en la recarga, la extracción, la calidad, la protección y el aprovechamientos sostenible del recurso.

REFERENCIAS

- ARIAS, M. E. 2002: "Hacia una cultura del agua". Revista Rescatemos el Virilla, Año 8, N. 19.
- ARIAS, M. E., 2004: Proyecto de ley y gestión integrado del recurso hídrico en Costa Rica. V Congreso Geológico Nacional, San José, 31-32.
- ARIAS, M. E. 2004: Acuíferos costero de Costa Rica. Escuela Centroamericana de Geología, San José, (informe inédito).
- ARIAS, M. E., LOSILLA, M. & ARREDONDO, S., 2006: Estado del conocimiento del agua subterránea en Costa Rica. Boletín Geológico y Minero, 117 (1): 63-73.
- ARIAS, M. E., 2008: El agua subterránea en Costa Rica. Boletín Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo. 27- año VII.
- ARIAS, M. E., 2008: Desarrollo Inmobiliario en Guanacaste y Geología. Revista AMBIENTICO, 172, 15-16, enero.
- ARIAS, M. E., 2008: Criterio sobre los estudios técnicos hidrogeológicos presentados por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados a la Defensoría de los Habitantes de la República, como fundamento para la ejecución del acueducto en Sardinal. Universidad de Costa Rica (Informe inédito).
- ARIAS, M. E., 2008: Análisis del documento titulado: Informe Técnico para la Gestión de la Seguridad Hídrica del Acuífero de Sardinal, presentado por el MINAET, AyA, SENARA, IMN y SINAC, a solicitud de la Defensoría de los Habitantes de la República. Universidad de Costa Rica (Informe inédito).
- ARIAS, M. E. & ZÚÑIGA, E. 2008. Efectos del cambio global en Costa Rica y la afectación en la Recarga del acuífero de Santa Cruz. En - El efecto de los Cambios Globales sobre los Recursos Hídricos y Ecosistemas Marino Costeros. Programa CYTED, Red 406RT0285.
- ARIAS, M. E., 2009: Previniendo el riesgo comunal: abordaje educativo con enfoque de género. Informe Interno, proyecto ED-2463, Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica, 97 págs.
- ARIAS, M. E., 2009: La Geología y el Desarrollo Inmobiliario en Guanacaste. Boletín Colegio de Geólogos de Costa Rica. V., julio.
- ARIAS, M. E., 2009: Análisis del Plan de Monitoreo propuesto para la Gestión de la Seguridad Hídrica. En: Sardinal: ¿ejemplo de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico? Informe del Consejo Universitario, Universidad de Costa Rica. 124 p.
- ARIAS, M. E., 2009: El Ordenamiento Ambiental del Territorio en Guanacaste: Importancia de la Componente Hidrogeológica. En: Informe sobre la seguridad hídrica de Sardinal. Consejo Universitario, Universidad de Costa Rica.
- ARIAS, M. E., 2009: Sardinal: ¿Ejemplo de la Gestión Integral del Recurso Hídrico? En: Informe sobre la seguridad hídrica de Sardinal. Consejo Universitario, Universidad de Costa Rica.

- ARIAS, M. E., 2009: Diagnóstico Biofísico, Indicadores y línea base. - en Curso Nacional de Gestión de Cuencas Hidrográficas (módulo I). CATIE, TEC, UCR (informe interno).
- ARIAS, M. E., 2010: Acuíferos en Costa Rica. - en Curso Nacional de Gestión de Cuencas Hidrográficas (módulo II). CATIE, TEC, UCR (informe interno).
- ARIAS, M. E., 2010: Aguas Subterráneas. - en Curso Nacional de Gestión de Cuencas Hidrográficas (módulo II). CATIE, TEC, UCR (informe interno).
- ARIAS, M. E., 2010: Manantiales. - en Curso Nacional de Gestión de Cuencas Hidrográficas (módulo II). CATIE, TEC, UCR (informe interno).
- ARIAS, M. E., 2010: Estudios Hidrogeológicos: una ventana de oportunidad. Informe del Estado de la Nación (XVI) p. 213.
- ARIAS, M. E., 2010: Rectoría del Agua Subterránea. Informe del Estado de la Nación (XVI) p. 213.
- ARIAS, M. E., 2010: Importancia del Agua Subterránea en el Parque Nacional Marino Las Baulas. Revista AMBIENTICO, 202, 11-12.
- ARIAS, M. E., 2011. Gestión del Recurso Hídrico y uso del agua año 2010. Ponencia preparada para el Decimoséptimo Informe Estado de la Nación. San José, Programa Estado de la Nación.
- ARIAS, M., 2011: Estudio Hidrogeológico Regional de la Cuenca del Río Frio. 134 pág. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas, Universidad de Costa Rica. [Informe Interno].
- ARIAS, M. E., 2012: Vulnerabilidad y Protección del Agua Subterránea: Valor de la Matriz del Uso del Suelo del SENARA: Revista AMBIENTICO, 208, 9-13,
- ARIAS, M. E., 2013: El monitoreo del agua subterránea como instrumento de gestión. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas. Univ. de Costa Rica (Informe Interno), 10 págs.
- ARIAS, M. E., 2017: Apuntes del curso G-5127: Manejo de Recursos Hídricos. Escuela Centroamericana de Geología. Univ. De Costa Rica (informe inédito).
- ARIAS, M. E., 2017: Jornadas Informativas: Monitoreo de Acuíferos. Colegio Técnico Profesional de Sardinal, 23 de mayo (presentación pública).
- ARIAS, M. E., 2017: Control y Seguimiento del Acuífero Sardinal, Presentación del Comité Técnico Institucional, 24 de mayo (presentación pública).
- ARIAS, M. E., 2017: Control y Seguimiento del Acuífero Sardinal, Presentación del Comité Técnico Institucional ante el Consejo Municipal de Carrillo, 19 de octubre (presentación pública).
- ASTORGA, A., & ARIAS, M. E., 2003: Mapa de Geoaptitud Hidrogeológica de Costa Rica: Implicaciones respecto a la gestión ambiental del desarrollo. Rev. Geól. América Central: 29, 48-62.

- AyA, 2015: Política de Organización y Fortalecimiento de la Gestión Comunitaria de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento. 68 p.
- AUGE, M., 1995: Primer curso de Posgrado de Hidrogeología Ambiental. UBA: 1-65. Buenos Aires.
- BID, 1998: Estrategia para el manejo integrado de los recursos hídricos. Departamento de Desarrollo Sostenible. División de Medio Ambiente, N. ENV-125, 38 págs.
- CALVO, J. 2010. Etapa de nivelación: Introducción al Balance Hídrico. -en Curso Nacional de Gestión de Cuencas Hidrográficas (módulo II). CATIE, TEC, UCR (informe interno).
- CALVO, J., 2010: Medición y estimación de componentes del Balance Hídrico.-en Curso Nacional de Gestión de Cuencas Hidrográficas (módulo II). CATIE, TEC, UCR (informe interno).
- CAPNET, GWP, & PNUD, 2005: Planes de Gestión Integrada del Recurso Hídrico: Manual de capacitación y guía operacional.
- COMITÉ TÉCNICO INSTITUCIONAL, 2016: Análisis del impacto de la sequía en el acuífero Sardinal 2015. Dirección de Aguas del MINAE, SENARA, AyA y UCR, (informe técnico), 15 págs + anexos.
- COMITÉ TÉCNICO INSTITUCIONAL, 2017: Boletín 1, Acuífero Sardinal, Dirección de Aguas del MINAE, SENARA, AyA y UCR, mayo 2017.
- COMITÉ TÉCNICO INSTITUCIONAL, 2017: Boletín 2, Acuífero Sardinal, Dirección de Aguas del MINAE, SENARA, AyA y UCR, octubre 2017.
- DOERFLIGER, JEANNIN, and ZWAHLEN, 1999: Water Vulnerability Assessment in Karst Environments: A new method of defining protection areas using a multi attribute approach and gis tools (EPIK method). Environmental Geology, 39 (2), 165-176.
- FAUSTINO, J.; JIMÉNEZ, F.; CAMPOS, J.J. 2006. Bases conceptuales de la cogestión adaptativa de cuencas hidrográficas. Turrialba, Costa Rica. CATIE. Programa Focucenas CATIE-ASDI. 20 p.
- FOSTER, S., 1987: Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. Proceedings of International Conference: Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants. Noordwijk, Países Bajos.
- FOSTER, S., HIRATA, R., GÓMEZ, D., D' ELIA, M., & PARIS, M., 2002: Protección de la calidad del agua subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Banco Mundial, 115 p.
- IDEAM, 2007: Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. Bogotá, Colombia. 162 p.
- IDEAM, 2002: Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. Bogotá, Colombia, 83 p.

- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS Y CENSO (INEC), 2011: X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda: Resultados Generales. Censos. --1 ed.-- San José, C.R, 140 págs. il. : 28 cm.
- JIMENEZ, F., 2009: Introducción al Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas. - en Curso Nacional de Gestión de Cuencas Hidrográficas (módulo I). CATIE, TEC, UCR (informe interno).
- LA GACETA, 1942: Ley de Aguas 276. Publicado en La Gaceta N. 190 del 2 de agosto.
- LA GACETA, 1953: Ley General de Agua Potable. Publicado en La Gaceta N. 223 del 2 de octubre.
- LA GACETA, 1961: Ley Constitutiva del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados N° 2726 y sus reformas. Publicado en La Gaceta N. 89 del 20 de abril.
- LA GACETA, 1973: Ley General de Salud N° 5395. Publicado en La Gaceta N. 222 del 24 de noviembre.
- LA GACETA, 1979: Reglamento para la Prestación de Servicios de Agua y Alcantarillado de la Empresa de Servicios Públicos de Heredia No. 322. Publicado en La Gaceta N. 161 del 30 de agosto.
- LA GACETA, 1996: Ley Orgánica del Ambiente No. 7554. Publicado en La Gaceta N. 7575 del 13 de febrero.
- LA GACETA, 2010: Reglamento de Perforación del Subsuelo para la Exploración y Aprovechamiento de Aguas Subterráneas DE-35884-MINAET, Publicado en La Gaceta N. 3 del 4 de enero.
- LA GACETA, 2015: Reglamento para la calidad de agua potable. Decreto Ejecutivo 38924-S,. Publicado en La Gaceta N. 124 del 1 de setiembre.
- MINAET, 2009: Política Hídrica Nacional, 46 p.
- MINAET; 2009: Informe Técnico para la Gestión de la Seguridad Hídrica del Acuífero de Sardinal: informe final, 21 documentos, anexos y apéndices, (Informe inédito).
- MINAE, MINISTERIO DE SALUD, AyA, 2016: Política Nacional de Saneamiento de Aguas Residuales, 109.
- MINAE, MINISTERIO DE SALUD, AyA, 2017: Política Nacional para el subsector de Agua Potable de Costa Rica 2017-2030, 88 p.
- MINAE, 2017: Política Nacional de Humedales 2017-2030, 96 p.
- PROGRAMA ESTADO DE LA NACIÓN. 2007. Informe: Desarrollo Turístico e inmobiliario costero y preocupaciones ambientales.-en: Décimo tercer Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible.
- PROGRAMA ESTADO DE LA NACIÓN. 2011. Armonía con al Naturaleza.-en: Décimoséptimo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible.

- PROGRAMA ESTADO DE LA NACIÓN. 2016. Armonía con la Naturaleza -en: Vigésimo segundo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible.
- PROGRAMA HIDROLÓGICO INTERNACIONAL, 2002: El Ciclo Global del Agua.- Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico .p 13-29. IGME, España.
- PROGRAMA HIDROLÓGICO INTERNACIONAL, 2015: Estrategia regional para la evaluación y gestión de acuíferos transfronterizos en las Américas. SERIE ISARM AMÉRICAS N° 4.
- SENARA, 200: Estudio hidrogeológico detallado del acuífero de la Parte Alta de la Cuenca del Río Sardinal Carrillo-Costa Rica. 20 págs, (informe interno).
- SENARA, 2011: Determinación de la recarga y rendimiento sostenible del acuífero Sardinal, Carrillo, Guanacaste. 40 págs + anexos (informe interno)
- TORKIL J.C., 2004: La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos”, Curso Técnico, (Informe inédito).
- TOOLBOX, 2003: Guía de Políticas y Herramientas Operacionales para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Caja de herramientas de GIRH, GWP, 236 p.
- UNAM, 2004: La Hormiguita y el Ratón: Material didáctico en aguas subterráneas. Centro de Geociencias, Querétaro, 65 págs.
- UNESCO, 2006: Evaluación de los recursos hídricos: Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas. Documento Técnico del PHI-LAC N° 4.

Recursos en línea:

- <https://water.usgs.gov/gotita/earthgwaquifer.html>, La Ciencia del Agua para Escuelas USGS, revisado 16 de agosto del 2017.
- <http://www.siagua.org> Sistema Iberoamericano de Información sobre el Agua, revisado el 5 de setiembre del 2017.
- <https://www.municarrillo.go.cr/>, Página de la municipalidad de Carrillo, revisado el 12 de setiembre del 2017.
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo, Ríos de Costa Rica](https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo,Ríos_de_Costa_Rica), revisado el 12 de setiembre, 2017.
- Google Earth Pro. Sardinal de Carrillo, Guanacaste, revisado el 13 de setiembre del 2017.
- <http://www.areaciencias.com/geologia/las-capas-de-la-tierra.html>. Capas de la Tierra, revisada el 16 de setiembre 2017.
- <http://www.maptak.com/cr/xray/xray.html#>. Ríos de Costa Rica, revisado 16 de setiembre 2017.
- <http://da.go.cr>. Acuífero de Sardinal, revisado el 27 de octubre del 2017.
- <https://www.youtube.com/watch?v=j-w5JwUzawM>, video de inundación en Sardinal, revisado el 27 de octubre del 2017.

MARIO ENRIQUE ARIAS SALGUERO

Es geólogo de formación, obtuvo su bachillerato y licenciatura en la Universidad de Costa Rica. Sus estudios de Posgrado los realizó en el Laboratorio de Geofísica Aplicada de la Universidad Pierre et Marie Curie, en París, Francia.

Su actividad profesional se ha enfocado en la temática de la Gestión del Recurso Hídrico, investigación Hidrogeológica, investigación en Geofísica de Prospección, Docencia y Administración Universitaria.

Es autor de varios artículos publicados a nivel nacional e internacional, así como gran cantidad de trabajos técnicos, resúmenes y presentaciones en congresos internacionales, cursos de capacitación impartidos por él y divulgación de sus investigaciones en los medios de comunicación nacional y ante diversas comunidades locales.

Trabajó en el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento y ha colaborado con varias investigaciones de instituciones públicas (Programa del Estado de la Nación, Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, Dirección de Aguas del MINAE). De igual manera ha emitido criterios técnicos para el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, Sistema Nacional de Áreas de Conservación, Contraloría General de la República, Defensoría de los Habitantes, Asamblea Legislativa, Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos, Organismo de Investigación Judicial, Consejo Nacional de Rectores, Ministerio de Ambiente y Energía, Ministerio de Salud, Sala Constitucional, Municipalidades, Consejo Universitario y organizaciones comunales.

Fue coordinador a nivel regional del proyecto Red Centroamericana de Recursos Hídricos, además miembro directivo de Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo y fue el primer Secretario

General del capítulo costarricense de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos. Colaboró además con la puesta en marcha del Diplomado en Administración y Manejo del Recurso Hídrico, del Colegio Universitario de Alajuela, convirtiéndose en su primer director.

Desde hace más de 20 años, labora como docente - investigador en la Universidad de Costa Rica. Desde el año 2006 es el profesor titular del curso de Manejo de Recursos Hídricos correspondiente al nivel de Licenciatura de la carrera de Geología.

En su haber cuenta con 33 investigaciones científicas como profesor principal, 11 investigaciones como profesor asociado, así como varios proyectos de Acción Social. Sus más recientes estudios están relacionados con evaluaciones geofísicas e hidrogeológicas que contemplan modelos hidrogeológicos, determinación de la recarga, evaluación de la vulnerabilidad hidrogeológica y determinación de las zonas de protección de fuentes de agua en diferentes partes del país, apoyando así la toma de decisiones para la gestión adecuada de los recursos geológicos, del ordenamiento del territorio y del riesgo, además de promover el aprovechamiento sustentable de los georecursos.

En la Universidad, fue director del Programa de Posgrado Centroamericano en Geología y coordinador de la maestría en Manejo de Recursos Hídricos e Hidrogeología, desempeñó además, la subdirección de la Escuela Centroamericana de Geología y por dos periodos consecutivos fue el director del Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas.

Ha estado vinculado con Sardinal a partir del año 2008, desde el año 2016 es el representante oficial de la Universidad de Costa Rica, ante el Comité Técnico Institucional (CTI) conformado para el manejo del Acuífero Sardinal.

