

CAPITULO X CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1 CONCLUSIONES

Geología

La secuencia estratigráfica que constituye la zona de estudio está compuesta principalmente por cuerpos lávicos de diferente edad (Formación Intracañón y Unidad San Pedro), productos piroclásticos antiguos y recientes (Unidad Sarchí, Formación Avalancha Ardiente, Unidad Rosales, Unidad Tacares), conglomerados brechosos (Unidad Providencia), paleoaluviones (Unidad Colorado), lahares y aluviones recientes (Unidad Achiote). Estos materiales están correlacionados a la estratigrafía regional, propiamente a las formaciones: Intracañón o Colima, Avalancha Ardiente o Tiribí, Andesita Poás y a la unidad de Depósitos Recientes. Según el estudio de geología de campo y el inventario de 101 pozos con registro de litología; las lavas e ignimbritas fracturadas, así como los aluviones y lahares recientes, constituyen las unidades de roca acuíferas del cantón occidental de Grecia.

La Geología estructural del cantón occidental de Grecia se relaciona con la morfotectónica y neotectónica asociadas al Valle Central y a la Cordillera Central de Costa Rica. El escarpe de la falla-pliegue de Alajuela es la evidencia topográfica más notoria de los esfuerzos que afectan el área de estudio, éste se ubica en el sector medio-inferior del cantón occidental de Grecia y su disposición geométrica podría estar asociada al sistema de fallas transcurrentes de la falla Tacares.

Existe una relación directa entre las fracturas o el diaclasamiento de las unidades geológicas aflorantes, con la infiltración hacia las tablas de agua subterráneas, la cual aparentemente depende del rumbo y la dirección de inclinación de las fracturas o diaclasas con respecto a la dirección preferencial de flujo de los ríos (NE-SW).

El patrón de drenaje presenta un marcado control estructural, además existen rasgos de origen fluvial u otros relativos al trayecto seguido por materiales lávicos (frentes de colada) o a la presencia de capas muy consolidadas de material tobáceo en los cauces.

La dirección predominante de los cauces principales de los ríos coincide con las fracturas tensionales de rumbo NE-SW. Se pueden asociar los datos de rumbo de las fracturas NW-SE con la falla-pliegue de Alajuela.

La dirección preferencial de las fracturas abiertas (tensionales) y sin relleno (rumbo NE-SW) puede favorecer la permeabilidad de los materiales de suelo o roca (conductividad hidráulica vertical), de esta forma se potencia su capacidad de infiltración. Esto justifica en parte la gran mayoría de tramos influentes en los ríos y el porqué en los balances hídricos de suelos la recarga potencial de los acuíferos se ve favorecida sobre la escorrentía.

Caracterización Geotécnica de suelos

La caracterización geotécnica de los suelos del cantón de Grecia se realizó principalmente en los suelos producto de la alteración de materiales volcánicos de la Unidad Tacares, ya que es la unidad que presenta la mayor cobertura de suelos en el área.

Las diferentes propiedades físicas determinadas presentan una variación muy amplia de valores, lo que se debe, posiblemente, a los diferentes estados de meteorización y variada granulometría de los suelos de la zona.

Los valores altos de porosidad en los suelos se relacionan con la presencia en la mayoría de las muestras, de granulometrías gruesas como las arenas y gravas o también, producto de la formación de vacíos debido a la meteorización. Igualmente, los altos valores en el grado de saturación indican que a pesar de ser materiales muy porosos son poco permeables, es decir; los materiales fácilmente acumulan agua, pero drenan muy lentamente por lo que el agua esta siendo retenida, esto debido a la presencia de materiales finos como los limos y arcillas, en ellos.

En el ensayo de corte directo (CD), las muestras MTN-04, MTN-06 y MTN-09, con más de 15% de arenas, presentan un comportamiento friccionante, es decir; que la resistencia de esos suelos proviene principalmente de la fricción interna de las partículas. Por el contrario las muestras MTN-02 y MTN-03, con menos del 4% de arenas, presentan una resistencia producto de la cohesión que se origina por el desarrollo de materiales arcillosos producto de la meteorización.

De las 22 muestras de suelo analizada, sólo 13 presentan límites de consistencia que se clasifican como Limos de plasticidades Alta y Muy Alta y sólo una presenta Plasticidad Intermedia, esto indica que son suelos capaces de admitir grandes cantidades de agua antes de comportarse como un líquido viscoso y por lo tanto son materiales que pueden sufrir deformaciones plásticas considerables.

Debido a que los suelos están constituidos por materiales de caída expulsados por el volcán Poás, presentan una granulometría muy variada, lo que origina una gran diversidad de tipos de suelos. Sin embargo; tomando en cuenta sólo la presencia de partículas tamaño arena en cada muestra, se dividió el cantón en tres unidades: Unidad San Miguel: localizada al norte del cantón y por lo tanto más cerca de la fuente de emisión, en donde predominan lo suelos de granulometrías gruesas como las arenas; Unidad Grecia: ubicada en la parte central de cantón y que está formada por suelos con una combinación de granulometrías gruesas y finas; finalmente la Unidad Rosales: localizada en la parte sur y que está constituida en su mayoría, por suelos de granulometrías finas como los limos.

En general, los valores de conductividades hidráulicas o permeabilidad para los suelos del cantón de Grecia, varían entre Moderada a Poco Permeables, lo que se considera una permeabilidad relativamente baja, sin embargo; es importante considerar que estos resultados son de la cobertura superficial originada por el material piroclástico que son materiales que se encuentran depositados sobre lavas con un intenso fracturamiento y con permeabilidades posiblemente mucho más altas, lo que explicaría la forma como están siendo recargados los acuíferos y ríos de la zona.

Se observa una predominancia de permeabilidades clasificadas como Moderadas hacia el sector norte y central del cantón, en los suelos de las unidades San Miguel Arriba y Grecia que son los suelos que presentan mayores porcentajes de partículas tamaño arena, mientras que hacia el sur, en los suelos de la Unidad Rosales, la mayoría de las permeabilidades son clasificadas como Poco Permeables debido a que es la zona en la que son más frecuentes los suelos compuestos principalmente por limos.

Cuencas hidrográficas

La mayor parte de la red hidrográfica del cantón occidental de Grecia es de carácter influente (recarga acuíferos) y corresponde con los cursos de agua de las cuencas de los ríos Sarchí, Agualote y Rosales, todas ellas cuencas menores de la macrocuenca del río Grande. Las aguas superficiales escurren hacia la confluencia del río Grande con el río Poás. Las cuencas de estos ríos se caracterizan por ser alargadas en sentido NE-SW, desarrollando principalmente un patrón de drenaje de tipo paralelo a subparalelo.

A partir del método del flotador y molinete, se realizaron aforos diferenciales determinándose tramos de la red hidrográfica donde existe una conexión hidráulica con el sistema acuífero del área de estudio, esto es donde los ríos presentan un comportamiento efluente o influente. En el área evaluada predominan los sectores de influencia, donde los ríos o quebradas le aportan agua a los acuíferos, por lo que estas trayectorias son indicio de verdaderas zonas de recarga al sistema. Los tramos efluentes constituyen sitios de descarga de aguas subterráneas hacia la superficie.

Pendientes

En el sector Occidental del cantón de Grecia existe una predominancia de las pendientes de clase Moderada (8° - 16°) y Fuerte (16° - 35°). La zona norte del cantón se caracteriza por presentar principalmente terrenos de pendientes Fuertes, ya que son las áreas que constituyen las laderas del Volcán Poás y son las más cercanas a la cúspide del mismo, mientras que hacia el centro y sur empiezan a disminuir las pendientes por lo que predominan las áreas de pendientes Moderadas.

Las pendientes de clase Muy Fuerte ($> 35^{\circ}$) se observan también más desarrolladas hacia el sector norte del cantón, sin embargo también se localizan en algunos sectores hacia el centro y sur de éste ya que, en su mayoría, corresponden con las laderas de ríos y quebradas y éstos presentan una mayor densidad hacia las partes altas del cantón debido a que aquí se encuentran los mayores gradientes y por lo tanto los cauces son más estrechos y escarpados, mientras que en la parte sur la densidad de drenaje es menor. Finalmente, las áreas de pendientes Bajas (0° - 8°) se restringen a zonas muy puntuales y se presentan sólo como parches aislados, especialmente en el sector central y sur del cantón.

Balance Hídrico de Suelos

Los materiales que conforman la cobertura de los acuíferos del cantón son principalmente de origen volcánico. Se tiene que para los suelos de las cuencas de los ríos Sarchí, Rosales, Agualote y del cantón occidental de Grecia, la infiltración básica (f_c) promedio es de 1087,73 [mm/d], el coeficiente de infiltración por textura del suelo (K_{fc}) promedio es de 0,97631 y la densidad (DS) promedio es de 2,61 [g/cm³]. Por otro lado, el factor de infiltración por pendiente (K_p) promedio es de 0,125; la capacidad de campo (CC) de los suelos del cantón es de 21,20% y el punto de marchitez permanente (PMP) es de 9,60%. Por último, el coeficiente de infiltración por vegetación (K_v) promedio es de 0,17; un 12% de lluvia es interceptada por el follaje y existe una profundidad de raíces promedio de 2 m.

Las capas superficiales de tobas de cenizas y lapilli y sus transiciones a suelos, se comportan como superficies que transmiten lentamente el agua de forma vertical y contra estas condiciones, el constante aprovechamiento de los pozos de extracción que se

encuentran concentrados principalmente en sentido NE-SW, específicamente en San Roque, San Isidro, Grecia, Puente de Piedra y San José, contribuyen a que los niveles de las tablas de agua de los acuíferos superficiales se mantengan bajos en la época seca.

La escorrentía superficial no se ve favorecida sobre la recarga potencial de los acuíferos, debido más que todo al factor de retención de agua por parte de la cobertura vegetal (ampliamente distribuida) y a que eventualmente “toda el agua producto de la precipitación se infiltra”.

Se estima que durante Setiembre y hasta principios de Diciembre los suelos del cantón están a capacidad de campo. Se estima que a mediados de Diciembre este comportamiento cambia y el sistema deja de acumular agua.

La necesidad de riego de los suelos ocurre de Diciembre a Julio, siendo más inminente entre Febrero y Mayo, alcanzando su pico máximo en Abril (meses en los que no se da recarga potencial a los acuíferos).

Durante los meses secos, el fenómeno que predomina es la descarga de acuíferos, los cuales aportan caudal a la red hidrográfica del cantón. Se estima que la recarga potencial al sistema debida a la precipitación y a los coeficientes de infiltración de los suelos se da de forma efectiva en el período que va de Agosto a Noviembre. En los otros meses se da tanto recarga como descarga.

Zonas de recarga

Mediante el análisis de los parámetros estudiados en esta investigación (tipos de suelos, conductividad hidráulica o permeabilidad, pendientes y uso actual del suelo) y que afectan la capacidad de infiltración en el suelo se determinaron las áreas con mayor y menor Potencial de Infiltración del agua para el cantón de Grecia.

A partir de los mapas de precipitación y modelos de infiltración por lluvia se evidencia el efecto de estacionalidad. En la época seca la precipitación se distribuye de forma decreciente con rumbo NE-SW y generando zonas potenciales de infiltración en ese sentido; mientras que en la época lluviosa la repartición de las lluvias cambia de NW-SE, con una pequeña desviación N-S, lo que da por resultado áreas de infiltración potencial con una distribución en esas direcciones. En los meses secos, la Precipitación que infiltra (P_i) es insuficiente para que se dé la recarga potencial de acuíferos; en tanto que en los lluviosos la P_i da la máxima recarga potencial (setiembre).

Los sectores que presentan mayor recarga a los acuíferos, se pueden restringir y delimitar mejor durante la época lluviosa y se hacen más notorios en los meses de Agosto a Noviembre, cuando se da la recarga potencial por lluvia; por esta razón, las zonas de recarga modeladas presentan una distribución NW-SE con una desviación NE-SW hacia la parte baja del área de estudio.

En todo caso, el patrón de flujo de las aguas subterráneas del sistema acuífero del cantón occidental de Grecia es con dirección preferencial NE-SW; debido a que la dirección de flujo no solo se relaciona con la distribución de la precipitación en la zona de estudio durante el año (y la subsecuente recarga), sino que tiene que ver también con los coeficientes de infiltración de los suelos, la capacidad de las rocas de almacenar y transmitir el agua, la distribución de la red hídrica superficial (tramos influentes o

efluentes) y la ubicación, extensión y disposición de las fallas y diaclasas presentes en el área de estudio, así como las zonas de extracción de aguas subterráneas (pozos y manantiales); esto además de considerar que regionalmente el agua se está moviendo desde una elevación potenciométrica mayor (N-NE), a una menor (S-SW), donde el flujo natural del agua subterránea se da por efecto de gradientes hidráulicos bajos.

Las zonas de recarga acuífera son principalmente los suelos de mayor permeabilidad y los tramos de ríos influentes. Las zonas de descarga son los tramos de ríos efluentes, las nacientes y los pozos de extracción. Algunas de las fracturas abiertas y sin relleno se comportan como zonas de recarga y/o de descarga; unas descargan el agua subterránea al cortar las tablas de agua de los acuíferos que afectan y otras recargan los acuíferos, cuando favorecen la permeabilidad secundaria de los materiales que cortan, permitiendo una infiltración más efectiva del agua desde la superficie hasta los acuíferos; estos comportamientos de las diaclasas y fallas se observan mejor en función de la estación: en la época lluviosa la recarga y en la seca la descarga.

La recarga potencial a los acuíferos con cobertura de suelos de origen volcánico del cantón occidental de Grecia es de 520,91 milímetros por año, esto quiere decir que de los 605,52 mm de humedad disponible esperada en el sistema, al menos 520,91 mm de agua recargaron los acuíferos de la zona de estudio y un excedente de 84,61 mm fue posiblemente desviado en el proceso o retenido subsuperficialmente, o sea, fue almacenado por los suelos. En otras palabras, el rango de agua disponible en estos materiales (principalmente tobas de ceniza, tobas de lapilli y regolita producto de la meteorización de lavas, ignimbritas y depósitos recientes) es utilizado en un 86,03% para la recarga potencial de los acuíferos del cantón.

Relación agua superficial-agua subterránea

Actualmente el cantón occidental de Grecia tiene un potencial hídrico importante, se calculó que en el área al menos se están generando 74 000 000 m³ por año de recarga estimada por lluvia. Lo que se ve favorecido por el patrón de drenaje que es principalmente de carácter influente, o sea, que la red hídrica alimenta a los acuíferos superficiales del sistema y también a que prácticamente toda el agua de lluvia se infiltra, sin embargo, es evidente que durante la mayor parte del año (de Diciembre a Julio) las cuencas evaluadas presentan un problema de recarga potencial hacia los acuíferos.

Se ha observado en el campo que durante las campañas de aforos, los caudales de los ríos y sus principales afluentes son altos y que son realmente pocas las quebradas que se secan del todo cuando se ha establecido el verano, por otro lado, el balance hídrico de los suelos establece que estos meses no presentan recarga potencial a los acuíferos. Ambos comportamientos se relacionan con tres factores, el primero es la naturaleza de los suelos del cantón, que en muchos casos conforman el material del lecho de los ríos y que constituyen la cobertura del sistema acuífero; el segundo se vincula de forma preponderante con el carácter influente o efluente de la red de drenaje y el último tiene que ver en menor grado con la explotación de aguas subterráneas por medio de pozos de bombeo (que obtienen 250 l/d o más) o nacientes de gran caudal (>100 l/s).

Las capas de tobas de cenizas y lapilli se comportan como superficies que transmiten lentamente el agua de forma vertical y contra estas condiciones, el constante aprovechamiento de los pozos de extracción que se encuentran concentrados principalmente en sentido del eje longitudinal de la zona estudiada (NE-SW),

específicamente en San Roque, San Isidro, Grecia, Puente de Piedra y San José, contribuyen a que los niveles de las tablas de agua de los acuíferos superficiales se mantengan bajos en la época seca.

La relación existente entre los cursos de agua superficiales, el material de sus lechos, el suelo del área en general y los acuíferos someros es complicada. Durante la época seca las tobas y demás materiales de la cobertura juegan el papel de almacenes de agua de lluvia (a nivel de poros), mientras que los tramos influentes de los ríos sirven solo como recolectores del agua de precipitación y de la que proviene de los tramos efluentes, por lo tanto no se recarga el sistema acuífero. En consecuencia, los niveles de agua observados en los tramos de ríos efluentes forman parte del nivel base de las tablas de agua de los acuíferos someros, los cuales en esta temporada llenan los ríos junto con aquellos manantiales permanentes que afloran prácticamente en el cauce.

Durante los meses secos el fenómeno que predomina es la descarga de acuíferos, los cuales aportan caudal a la red hidrográfica del cantón. Se estima que la recarga potencial al sistema debida a la precipitación y a los coeficientes de infiltración de los suelos se da de forma efectiva en el período que va de Agosto a Noviembre. En los otros meses se da tanto recarga como descarga.

Sistema Acuífero de Grecia

Es un cuerpo heterogéneo de materiales permeables y poco permeables intercalados, que funcionan como una unidad hidrogeológica regional. Está compuesto por una espesa secuencia de unidades lávicas y productos piroclásticos interdigitados; los cuales presentan distintos grados de porosidad, compactación, soldamiento, fracturación y retrabajo; estos materiales se acompañan de depósitos aluviales, conglomerádicos y laháricos, principalmente. En resumen, comprende tres acuíferos de materiales volcánicos y uno de origen sedimentario clástico, separados por tres unidades confinantes de origen volcánico, que se comportan como acuitardos.

Las unidades más permeables son de lavas e ignimbritas fracturadas y zonas brechosas que se encuentran a la base o en el techo de las mismas, las cuales por lo general, están interrumpidas lateralmente por depósitos de tobas; o más superficialmente por materiales aluviales, piroclásticos recientes o laháricos. Esto dificulta darle seguimiento en superficie a las unidades acuíferas, ya que sus afloramientos son por lo general discontinuos.

La parte densa de las lavas e ignimbritas se encuentra en la mayoría de los casos diaclasada de forma vertical o subvertical, muchas veces formando columnas. Algunas presentan fracturas parcialmente rellenas, lo que reduce la permeabilidad en comparación con las zonas brechosas; además, los depósitos de tobas de grano fino que las acompañan tienen un efecto directo en las propiedades hidráulicas de éstas (disminuyen la conductividad hidráulica vertical). A pesar de ello, las lavas e ignimbritas son las unidades hidrogeológicas de mayor producción del sistema acuífero del cantón occidental de Grecia.

El espesor de los depósitos piroclásticos (tobas), especialmente si presentan intercalaciones de diferentes granulometrías, afectan parcialmente el movimiento y el almacenamiento del agua subterránea en los acuíferos. A pesar de ello, los acuitardos del sistema acuífero del cantón occidental de Grecia no interrumpen el movimiento del agua subterránea, por lo tanto, no afectan la continuidad hidráulica regional del sistema.

Los cuerpos de origen netamente volcánico están distribuidos en tres subsistemas acuíferos fracturados y porosos denominados: Colima, Tiribí y Poás. Cada uno está constituido por un acuífero fracturado (lávico o piroclástico): Intracañón, Avalancha Ardiente y San Pedro; así como un acuitardo poroso tipo piroclástico: Sarchí, Rosales y Tacares; respectivamente. Por otro lado, el Acuífero Achiote (sedimentos aluviales y laháricos), es una unidad porosa de menor importancia, tanto a nivel local como regional.

Se ha correlacionado el sistema acuífero secundario Colima con la Formación Colima, asimismo; el sistema acuífero secundario Tiribí con la Formación Tiribí y el sistema acuífero secundario Poás, con los materiales de la Formación Andesita Poás; por otro lado, el acuífero Achiote con la unidad de Depósitos Recientes.

El acuífero Achiote es superficial (promedio <5 mbns y hasta 20 mbns), libre, sin cobertura de tobas o suelo (excepto algunos lahares), de muy baja producción y se restringe casi exclusivamente al sector medio del área de estudio. El acuífero Intracañón es el más profundo (50 mbns o mayores), semiconfinado a confinado; con trasmisividades de 500 a 907,8 m²/d y abarca la zona media y sur. Los acuíferos Poás y Avalancha Ardiente se pueden considerar someros o de profundidades intermedias (promedio: 20 mbns), son predominantemente semiconfinados y abarcan casi todo el cantón occidental de Grecia. Tanto el acuífero San Pedro como el acuífero Avalancha Ardiente presentan un comportamiento libre cuando afloran parcial o totalmente; o por otro lado, confinado cuando tienen una gruesa capa de materiales que los sobreyacen. El acuífero San Pedro presenta trasmisividades de 10-600 m²/d y el acuífero Avalancha Ardiente un promedio de 1,35 a 4,45 m²/d hasta un máximo de 48,7 m²/d.

Las unidades hidrogeológicas de mayor producción son los acuíferos fracturados Intracañón, Avalancha Ardiente y San Pedro; los cuales están siendo explotados por medio de pozos de extracción, captación de manantiales y tomas de agua de tramos de ríos efluentes. Estos acuíferos son actualmente y en con mayor razón en un futuro las fuentes de abastecimiento público del cantón occidental de Grecia, e incluso de otras localidades aledañas.

Los manantiales de mayor caudal (80-140 l/s), que han sido correlacionados con las lavas del acuífero Intracañón son: el campo de nacientes Rosales, Ojo de Agua, Fuente Amelia, Fuente Patal y Los Chorros. Las nacientes correlacionadas con las ignimbritas del acuífero Avalancha Ardiente (30-40 l/s), son: El Trapiche, Salguero y Río Sarchí. Las asociadas a las lavas del acuífero San Pedro (10-17 l/s): Gladys1, Naciente 23, Baro 2, Marlene Henderson 1, Santa Gertrudis 2, La Arena 1, Naciente 24, El quinto, Luis Alberto, Calle Porvenir y La Cueva. Existen otras con caudales menores que son aprovechadas principalmente para riego y uso doméstico.

Las propiedades físicas de todas las rocas en el sitio de estudio están controladas por inconformidades o discontinuidades, pliegues y fallas, por lo cual tienen sus variaciones laterales y verticales. Las estructuras geológicas y la disposición de las unidades de roca afectan en diferentes grados la recarga y descarga de los acuíferos, pero el sistema ha acoplado su patrón de flujo a estos rasgos y el agua subterránea se mueve por lo general con gradientes hidráulicos uniformemente bajos, desde las partes altas hasta el límite sur de la zona estudiada (dirección predominante NE-SW).

Las líneas isopotenciales, tienen rumbo preferencial NW-SE y tienden a juntarse en las zonas con más incidencia de fracturas o alineamientos relacionados con fallas o estructuras geológicas importantes. También convergen donde existe una alta concentración de pozos y/o nacientes (aprovechados para el riego y el abastecimiento para consumo), estos sitios coinciden con algunos de los centros distritales de población.

Las líneas de flujo del agua subterránea, tienen dirección preferencial NE-SW y tienen dos tendencias: cerca de las trazas de falla, fracturas o alineamientos geológicos, unas flechas van desde las trazas y otras hacia ellas. Esto coincide con la dirección del flujo en las inmediaciones de los drenajes principales: una es desde los colectores primarios de la red hídrica y otra es hacia los cauces de estos; la variación tiene que ver con los tramos influentes o efluentes de los ríos, respectivamente.

Lo anterior es importante, ya que tiene incidencia directa respecto al tema de contaminación de acuíferos, bajo el supuesto de que si se somete el sistema a una carga contaminante (dependiendo del tipo y cantidad), ésta se comportará como un flujo advectivo o no y así se moverá con el agua siguiendo la dirección de flujo preferencial o por otro lado, se acumulará.

Calidad físico-química del agua

En el área evaluada predominan las aguas bicarbonatadas-cálcico-magnésicas. Las leves variaciones de composición química de las aguas del cantón occidental de Grecia son: bicarbonatada cálcica a bicarbonatada magnésica (Intracañón-Avalancha Ardiente), bicarbonatada (Intracañón-Avalancha Ardiente-Poás) y finalmente cálcica a sulfatada cálcica (Poás).

Los resultados del análisis de calidad físico-química del recurso hídrico utilizado como fuente de consumo humano en el cantón occidental de Grecia, reflejan que excepto el pH de las muestras SR 24 (río Vigía, en el límite distrital Bolívar-San Roque) y SR 26 (río Achote, en el límite distrital San Isidro-San José), todas las muestras están en regla de acuerdo al Reglamento para la Calidad del Agua Potable, para todos los parámetros de calidad analizados.

Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos

A partir de la evaluación del índice de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos Achote, San Pedro, Avalancha Ardiente e Intracañón, se puede observar las siguientes tendencias generales.

- La vulnerabilidad aumenta cuando el grado de confinamiento hidráulico disminuye. En otras palabras, los tramos de acuíferos con régimen libre, especialmente los no cubiertos, son los más vulnerables, por ejemplo los aluviones del acuífero Achote; mientras que los confinados con una unidad suprayacente gruesa son menos vulnerables, como las lavas del acuífero Intracañón.
- La vulnerabilidad aumenta cuando existe predominancia de un sustrato suprayacente de carácter no consolidado (sedimento) o cuando la cobertura es de roca consolidada con algún grado de fracturación y una baja capacidad de atenuación.

- La vulnerabilidad aumenta donde el techo del acuífero se encuentra más somero y evidentemente, donde el nivel del agua está a menos de 20 m de profundidad.
- Para los subsistemas secundarios de origen netamente volcánico (Poás, Tiribí y Colima), la vulnerabilidad aumenta donde los espesores de toba son menores de 15 m o donde las lavas e ignimbritas afloran parcial o totalmente en superficie.

La vulnerabilidad de todo el sistema acuífero del cantón occidental de Grecia está principalmente en función de qué tan vulnerables sean las unidades hidrogeológicas más someras: Achiote (zona media) y subsistema Poás, principalmente. Los resultados reflejan que el acuífero Achiote y el San Pedro son los más vulnerables.

Según la escala de vulnerabilidad, los acuíferos Avalancha Ardiente (subsistema Tiribí) e Intracañón (subsistema Colima) son poco vulnerables a la contaminación, excepto si han sido expuestos a contaminantes de tipo conservativo de larga persistencia, que hayan sido descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo en el área de estudio; por otro lado, en ciertos sectores se constatan espesores importantes de las unidades confinantes Rosales (subsistema Tiribí) y Sarchí (subsistema Colima), aunados a la presencia de otras que engrosan la sección estratigráfica; todo este paquete de material suprayacente a los acuíferos Avalancha Ardiente e Intracañón, se encarga de reducir el riesgo de contaminación para esas áreas hasta hacerlo despreciable.

Para la toma de decisiones acerca de la zonificación de la protección de los acuíferos por medio de los mapas de vulnerabilidad, se consideró con antelación integrar el mapa del sistema acuífero secundario Poás con el mapa del acuífero Achiote, ya que en realidad estas son las unidades más someras; además, el subsistema acuífero Poás es el de mayor extensión de toda el área de estudio; por lo tanto, las vulnerabilidades de los acuíferos que se encuentran por debajo de ellos son sustancialmente dependientes de las vulnerabilidades de los primeros.

Zonas de protección de los manantiales

La delimitación de los tubos de flujo de los manantiales que están asociadas a las unidades hidrogeológicas de mayor producción, es de suma importancia, ya que dichos perímetros pueden ser utilizados en la definición de zonas de protección más funcionales para el resguardo de las fuentes.

Para todos los casos, los tiempos de tránsito de contaminantes patógenos fueron mayores a 100 días, por lo que el método de isocronas no tiene que ser utilizado necesariamente para definir las zonas de protección internas del tubo de flujo de los manantiales en cuestión. Debido a esta situación y para evitar confusiones posteriores, se trazaron los tubos de flujo de los manantiales, con una extensión máxima de 200 m aguas arriba del punto de afloramiento del manantial, longitud equivalente al radio máximo de resguardo o protección de la zona de captura, estipulado por la Ley de Aguas de Costa Rica. Cabe aclarar que en realidad, los tubos de flujo no tienen una longitud tan limitada, sino que se extienden hasta la divisoria hidrogeológica más cercana.

Se sugiere entonces, aplicar circunferencias de radio arbitrario de 200 m (Ley de Aguas de 1942), para establecer las zonas de protección de las 21 nacientes con rango de caudal de 150 a 10 l/s y hasta los 3 l/s (25 nacientes). Para las nacientes de gran caudal ($Q > 10$ l/s), la circunferencia de 200 m estará establecida en el sector interno de los tubos

de flujo y estará limitada por la geometría del tubo, para las otras se deberá aplicar la circunferencia completa alrededor de la fuente (a menos que se establezcan los tubos de flujo de cada una de ellas). Ejemplo de las primeras son: Fuente Amelia, Fuente Patal, el área de manantiales Los Chorros (margen izquierda del río Prendas) y otras dos que se encuentran a menos de 2 km fuera del área de estudio. Para manantiales con caudales menores de 3 l/s, que no están siendo captadas actualmente o que tienen otros usos diferentes al abastecimiento público, ya sean permanentes o no, se recomienda emplear una circunferencia de radio fijo de 100 m (Ley Forestal de 1996).

Más allá de los límites de las áreas de protección, se debe establecer una zona con un alcance mínimo de 12 km de radio (zona alejada, Foster et al., 2002), donde se debe regular el asentamiento poblacional, industrial u otra actividad, obra o proyecto que implique grandes áreas de construcción que impermeabilicen las zonas de recarga natural directa del o los manantiales.

10.2. RECOMENDACIONES

Tanto las aguas superficiales como las subterráneas del cantón occidental de Grecia deben de ser protegidas, monitoreadas y fuertemente controladas por los entes locales pertinentes y en general por los habitantes del lugar. Las primeras en función de las segundas, especialmente si el agua de escorrentía infiltra o da hacia ríos de carácter influente; las segundas en función de las primeras, en el caso de que los acuíferos abastezcan de agua a los ríos (tramos efluentes). Debe hacerse un esfuerzo por mantener la calidad del agua de las fuentes de abastecimiento público (pozos, nacientes y ríos) y tener en cuenta que la identificación de actividades que generan potenciales cargas contaminantes es una prioridad.

Se recomienda llevar a cabo un monitoreo de la calidad de las aguas de las fuentes para abastecimiento público (que incluya análisis físico-químico, bacteriológico, metales pesados y agroquímicos), según la frecuencia de análisis que estipula el Reglamento para la Calidad del Agua Potable (Decreto Ejecutivo N°32 327-S), publicado en el diario oficial La Gaceta N° 84 del Martes 3 de mayo del 2005.

Es necesario una buena administración y gestión del Recurso Hídrico del Cantón, priorizando el inventariado de nuevos sitios para captar agua y minimizar el uso de los que están en áreas de alta vulnerabilidad hidrogeológica, esto con el fin de suplir a cabalidad las necesidades de usuarios presentes y futuros, evaluando el costo y el beneficio de éstas en el tiempo y de la evolución de la ocupación del terreno; el desarrollo de actividades, obras o proyectos en el cantón y los posibles aportes de estos a la contaminación potencial de sus fuentes de agua.

La municipalidad de Grecia debe implementar esta información en el Plan Regulador, a partir de los Índices de Fragilidad Ambiental (IFA) y tener la coordinación necesaria entre los diversos departamentos municipales para asegurar una política ambiental acorde con el Desarrollo Integral del Cantón, dichos instrumentos de coordinación deben ser ejecutables acuciosamente.

Ninguna zona de protección se debe realizar de forma aislada, es necesario contemplar el contexto hidrogeológico regional, el modelo conceptual (en dependencia de los diversos niveles acuíferos existente) y del grado de vulnerabilidad hidrogeológica, entre otros factores. En este caso particular, y a partir de los resultados de este proyecto, se evidencia la existencia de varios niveles de agua subterránea en las inmediaciones de las 21 fuentes de gran caudal analizadas, lo cual indica que es necesario evaluar el riesgo de contaminación de esos niveles ante las diversas actividades antrópicas que se desarrollen en el sector aledaño a cada una de las nacientes.

Las zonas delineadas a partir del tubo de flujo de las nacientes, deben servir además para priorizar el monitoreo de la calidad del agua subterránea, las inspecciones y regulaciones a las infraestructuras antrópicas y establecimiento de medidas de mitigación de la contaminación, entre ellas el establecimiento de una primer zona entre 20 y 50 metros de radio para proteger la zona de operación de la fuente. Es recomendable que esta área sea propiedad y este bajo el control del ente que realiza la explotación del manantial, en ella no se deberían permitir actividades que no estén relacionadas con la extracción misma del agua y aun así; estas actividades necesitan ser evaluadas y controladas cuidadosamente para evitar la posibilidad de que los contaminantes alcancen la fuente, ya sea en forma indirecta o a través de alteraciones del terreno en las cercanías, además una práctica usual en este sector es la colocación de una cerca perimetral.

En cumplimiento con lo establecido en la Ley de Aguas de Costa Rica, se recomienda establecer la zona correspondiente a los 200 m de radio, en el sector interno del tubo de flujo calculado para cada una de las 21 nacientes de gran caudal analizadas.

Las restricciones específicas al uso de la tierra que se impongan en el área comprendida en el tubo de flujo de cada naciente dependerán de diversos factores: tipo de actividad, densidad o área en la que se desarrolle, grado potencial de contaminación que genere dicha actividad y correlación con los mapas de vulnerabilidad hidrogeológica del acuífero.

El desarrollo del cantón occidental de Grecia se está dando actualmente, en las regiones más vulnerables de acuíferos; de seguir dándose la expansión en éstas áreas es posible que a corto o mediano plazo, el sistema acuífero tendrá índices más altos de contaminación (por aguas negras y grises: aguas residuales de tanques sépticos, lixiviados de desperdicios agroindustriales, plaguicidas, fertilizantes; entre otros desechos). Esto hará muy difícil y de elevado costo económico y ambiental cualquier acción mitigadora o remediadora para descontaminarlo, en vista de que el sistema acuífero del cantón occidental de Grecia es fracturado y complejo. Además, ninguno de los métodos actuales en el tema de remediación de contaminación de acuíferos da garantía de un 100% de recuperar el medio y la calidad del agua para consumo, una vez dada la contaminación, por lo anterior:

Es necesario implementar de forma inmediata el uso de los modelos de áreas de vulnerabilidad de acuíferos para el cantón occidental de Grecia y las restricciones acerca del uso del terreno recomendadas; la entrada en vigencia de la delimitación de las zonas de protección de las principales fuentes de agua y utilizar el mapa de zonificación para el manejo y la protección del recurso hídrico subterráneo en la toma de decisiones, principalmente respecto a factores (actividades, obras o proyectos) que afecten la integridad ambiental y socioeconómica del cantón o sus distritos.

El desarrollo en las zonas de baja y mediana vulnerabilidad, deben ser fuertemente controladas por la municipalidad y las instituciones del estado competentes “desde la fase de diseño de las actividades, obras o proyectos que se quieren instaurar” y a la postre, ser monitoreadas por éstas en busca del cumplimiento de todos los “compromisos ambientales” que se declaren y se adquieren al dar paso al desarrollo. Este proceso siempre se debe mediar en un ambiente de participación donde intervengan todos los interesados; donde se escuche la opinión de las personas de las comunidades o poblados vecinos que estén dentro del radio de influencia del desarrollo, así como de representantes de las oficinas locales del MINAE en Grecia, personeros del sector salud, ASADAS u otros, tal y como lo dicta la ley.

A partir de la coordenada de latitud Lambert 228000N y hasta el límite norte del cantón occidental de Grecia, no es recomendable la edificación de grandes proyectos urbanísticos, industriales o cambios en el uso actual del terreno y del suelo, si no media un estudio técnico detallado que evidencie la no impermeabilización de las zonas de recarga natural de acuíferos del cantón y su no afectación a la dinámica de las aguas, así mismo que garantice a partir de un diseño apropiado el mínimo impacto potencialmente significativo en la cantidad o calidad futura de los recursos hídricos.

La Comisión de Recurso Hídrico y el Departamento de Gestión Ambiental de la Municipalidad de Grecia, deben capacitarse constantemente y consolidarse en sus funciones. Por su parte, el municipio les debe dar los recursos económicos necesarios para que puedan gestionar entre otros, los siguientes estudios específicos:

- Balances hídricos de suelos en las cuencas por lo menos cada dos años; plazo establecido entre cada cambio de gobierno a nivel nacional y local; los balances deben realizarse a mediados del período efectivo de cada administración, en pos de que la información no se pierda o archive, si no más bien que sea implementada para la toma de decisiones municipales con respecto al uso del terreno y del agua, que sea de dominio para las personas competentes y no pierda validez o importancia de un gobierno a otro. Estos balances resultan ser una manera confiable, sencilla y barata de monitorear la disponibilidad de los recursos hídricos subterráneos en cualquier época del año y en cualquier sitio del cantón.
- Mapas de uso del terreno actual; mapas de capacidad de uso del suelo en función de la intensidad de uso actual de la tierra; determinar si existe un sobreuso actual del terreno; hacer mapas de uso potencial de la tierra, para ver si se puede cambiar un uso actual por otro más amigable con el ambiente y mapas de susceptibilidad del terreno a cambios de uso del suelo, todos estos mapas para evidenciar si existe o evitar la existencia de degradación del recurso suelo y efectos posteriores en el recurso agua.
- Mapas con la ubicación y estado actual de los acueductos y las tomas de agua, incluyendo la localización de las líneas de conducción (desde las captaciones -ya sean superficiales, de pozos o nacientes hasta los tanques de almacenamiento) y localización de las líneas de distribución (ubicación de tuberías desde los tanques de almacenamiento hasta cada una de las infraestructuras beneficiarias)
- Inventario detallado de las fuentes potenciales de contaminación que existen en el cantón y clasificarlas según sean: puntuales, difusas o lineales, así como a su origen.

- Integrar la información de fuentes potenciales de contaminación con los mapas de vulnerabilidad intrínseca para determinar el Riesgo de Contaminación del sistema acuífero existente en el Cantón Occidental de Grecia.
- Evaluar la vulnerabilidad específica a contaminantes determinados, posterior de un análisis exhaustivo de plaguicidas típicos que deberán definirse en función del uso del suelo agrícola (caña, helechos y café), así como de posibles contaminantes industriales.
- Determinar la tasa de crecimiento poblacional para cada uno de los distritos del cantón occidental de Grecia, para establecer las necesidades futuras de abastecimiento de agua por habitante, con el fin de realizar las modificaciones necesarias en el acueducto y buscar otras alternativas de fuentes de agua que puedan suplir la demanda.
- Hacer uso de técnicas para evitar la erosión en las partes altas de las cuencas; por ejemplo: barreras vivas o muertas en las zonas cercanas a los cauces de ríos, especialmente si es evidente un alto grado de reptación, deslizamientos de suelo o caída de rocas; practicar la técnica de tipos de cultivos por pendiente y clima, o disponer los sembradíos en hileras paralelas en contra de la pendiente.
- La reforestación de las parte altas de las cuencas que han sido sometidas a cambios drásticos de uso de suelo (en los últimos 5 años) es una prioridad. Se recomienda utilizar especies autóctonas de arbustos o árboles caducifolios, ya que estos minimizan su consumo de agua en la época seca, sus raíces favorecen la infiltración en la época lluviosa y la caída de sus hojas permite engrosar la capa de humus en los suelos, favoreciendo la regeneración de los mismos.

En caso de sospecha de la existencia de una sobreexplotación de acuíferos, la autoridad administrativa competente (MINAE, SENARA, AyA) puede declarar ese estado; para revertirlo a través de la ordenación, restricción y reparto de las extracciones o aprovechamientos preexistentes, para lograr una explotación racional y la inmediata suspensión de las solicitudes nuevas o de la modificación de concesiones pendientes a ese momento. Desde luego que también se pueden implementar medidas de ahorro y buena utilización de los recursos. Concluido a partir del VC 2004-01923.

Finalmente, pero no menos importante; la Municipalidad del Cantón de Grecia, debe fomentar la divulgación de los resultados de este proyecto, con el fin de brindar a los habitantes del cantón su derecho a la información, así mismo; con esta acción estará proyectándose como el Gobierno Local que es.