

**UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
ESCUELA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

Informe Escrito Final

Estado de la cobertura forestal y priorización de áreas de recuperación en las zonas de influencia de las nacientes del acueducto municipal del cantón de Jiménez, Cartago, Costa Rica.

Proyecto de graduación presentado como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Biología con énfasis en Manejo de Recursos Naturales

Estudiante: Sofía Paniagua Fuentes (401890435)

Tutora: M.Sc. Alicia Fonseca Sánchez
Asesores: M.Sc. Geannina Moraga López
Ph.D. Roberto Cordero Solórzano

**Campus Omar Dengo
Heredia, Costa Rica
2019**

Este trabajo de graduación fue APROBADA por el Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Manejo de Recursos Naturales



M.Sc. Tania Bermúdez Rojas (quién preside)

Sustituye al Decano de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



Licda. Hannia Vega Bolaños

Sustituye al Director de la Escuela de Ciencias Biológicas



M.Sc. Alicia Fonseca Sánchez

Tutora



M.Sc. Geannina Moraga López

Asesora



Dra. Marilyn Romero Vargas

Invitado especial

RESUMEN

El suministro y la calidad del agua subterránea y su conexión a los ecosistemas se encuentran cada vez más en riesgo en todo el mundo, algunas causas son: la transformación del cambio del uso del suelo, disminuyendo la retención, infiltración e interceptación de las precipitaciones y la impermeabilización del suelo. En Costa Rica un 50% del agua que se utiliza para consumo humano, comercial, agrícola e industrial de la GAM proviene de agua subterránea, a pesar de ello, se han reportado casos de contaminación en todo el país. El cantón de Jiménez abastece con agua subterránea a más de 7000 personas, y al ser una zona agrícola se encuentra amenazada por la descarga de aguas contaminadas con pesticidas y fertilizantes. El objetivo de este trabajo fue evaluar el estado de la cobertura forestal de las fuentes de abastecimiento del acueducto municipal del cantón de Jiménez, como línea base para dictar pautas y recomendaciones para la protección del agua subterránea y toda el área de influencia. El estudio se realizó en el acueducto municipal de Jiménez, del cantón de Alvarado, en la provincia de Cartago, Costa Rica. Se muestrearon nueve parcelas para determinar la caracterización estructural de la vegetación, se midió la altura, el DAP (> 5cm), el porcentaje de cobertura, LAI, GSF y AB. Se obtuvo una cobertura vegetal de 85.3% lo que se interpreta como un bosque secundario maduro y un LAI de 3.32 ± 0.79 m^2m^{-2} que representa un bosque en estado avanzado de sucesión. Para establecer áreas prioritarias se realizó una EMC en toda área de recarga de las nacientes, de la cual se obtuvo: con “prioridad baja” el área de pastizales, “prioridad media” las zonas agrícolas y una parte de los manantiales y con “prioridad alta”, la zona de protección del río Quebrada Honda, el área de los manantiales del acueducto municipal y su área de protección legal. La presente investigación confirma la realidad y necesidad de zonificar, restaurar y proteger los 200 metros para dar paso a la cobertura boscosa en estas zonas de protección establecidas en la Ley de Aguas y Ley Forestal, para la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo.

Palabras clave: Agua subterránea, Cobertura Vegetal, Zonas de Protección, Evaluación multicriterio.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue llevada a cabo gracias al proyecto de investigación del Laboratorio de Hidrología Ambiental de la Universidad Nacional: “Herramientas para la protección del agua subterránea en las subcuencas Quebrada Honda y Chiz-Maravilla, Cartago, Costa Rica”, código SIA 0280-15, financiado con Fondos FIDA.

Un agradecimiento especial a mi tutora Alicia Fonseca Sánchez por su guía, apoyo y motivación en este proceso de aprendizaje, a mi asesora Geannina Moraga López por su apoyo y sus valiosos consejos y a mi asesor Roberto Cordero Solórzano por todos sus consejos y motivación.

Agradezco mucho a todos los que en algún momento me ayudaron en el trabajo de campo: Óscar Vásquez, Andrés Rodríguez, Gabriela Quesada, Federico Granados, Anthony Esquivel, German Vargas, José Pablo Barquero y Javier Tenorio, gracias por su tiempo y apoyo. A Rolando Sánchez por su consejo con algunas pruebas estadísticas.

A mi familia que ha sido mi motivación para poder culminar este proceso, a mis abuelitos que ya no están pero que sin ellos yo no hubiera llegado hasta aquí, a mis papás, hermanas, mi hermano y en especial mis sobrinos que son mi motor y fuerza para seguir dando lo mejor y a Jason que siempre me ha dado su apoyo incondicional.

Al acueducto municipal de Jiménez y a la municipalidad de Jiménez por permitirme llevar a cabo mi investigación, por su disposición y valiosa ayuda.

Al Laboratorio de Hidrología Ambiental de la Universidad Nacional por abrirme las puertas y permitirme crecer profesionalmente.

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a la memoria de mi abuelito Juan Guillermo Fuentes Rivera, por ser un amigo, maestro y un guía incondicional, motivándome siempre a seguir adelante y dar lo mejor de mí y por una de sus enseñanzas de vida: que cada día debe vivirse como una valiosa oportunidad para aprender algo nuevo.

ÍNDICE

MIEMBROS DEL TRIBUNAL	i.
RESUMEN	ii.
AGRADECIMIENTOS	iii.
DEDICATORIA	iv.
ÍNDICE	v.
ÍNDICE DE CUADROS	vi.
ÍNDICE DE FIGURAS	vii.
ÍNDICE DE ANEXOS	viii.
ABREVIATURAS	ix.
INTRODUCCIÓN	1
MATERIALES Y MÉTODOS	6
RESULTADOS	14
DISCUSIÓN	36
CONCLUSIONES	44
RECOMENDACIONES	46
Bibliografía	47
Anexos	58

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Matriz de comparación pareada, modificada de Saaty	9
Cuadro 2. Criterios y factores para priorizar áreas de protección de las nacientes del acueducto municipal de Jiménez.	10
Cuadro 3. Resultado de la jerarquización de criterios, asignación de prioridades del método Delphi realizado a expertos sobre los criterios geofísicos, jurídicos y sociales para priorizar áreas de protección en el acueducto de Jiménez.	17
Cuadro 4. Matriz de la asignación de pesos relativos de los criterios geofísicos, jurídicos y sociales para priorizar áreas de protección del recurso hídrico subterráneo en el acueducto municipal de Jiménez	18
Cuadro 5. Lineamientos de manejo para mantener y/o recuperar la cobertura forestal y la protección del recurso hídrico en las zonas de influencia de las nacientes del acueducto municipal del cantón de Jiménez.	22

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio, nacientes del acueducto de Jiménez y su respectiva área de recarga, Cartago Costa Rica.	7
Figura 2. Distribución diamétrica del componente arbóreo presente en la zona de protección del acueducto municipal de Jiménez, Cartago.	14
Figura 3. Estratificación vertical del componente arbóreo presente en la zona de protección del acueducto municipal de Jiménez, Cartago	15
Figura 4. Correlación de Pearson entre las variables estructurales (DAP, altura y AB) y las variables lumínicas (cobertura vegetal, LAI y GSF)	16
Figura 5. Mapa del área prioritaria de las fuentes de abastecimiento del acueducto municipal de Jiménez con prioridad alta y media	19
Figura 6. Mapa del área del río Quebrada Honda que posee prioridad alta, las zonas agrícolas con prioridad media y los pastizales prioridad baja.	20
Figura 7. Mapa general de la Evaluación Multicriterio con áreas prioritarias de protección del recurso hídrico subterráneo en la zona de estudio.	21

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Criterios geofísicos, jurídicos y sociales para priorizar áreas de protección del recurso hídrico subterráneo en el acueducto municipal de Jiménez.	58
Anexo 2. Restricciones sobre criterios geofísicos, jurídicos y sociales para priorizar áreas de protección del recurso hídrico subterráneo en el acueducto municipal de Jiménez.	59
Anexo 3. Mapa del Uso de la Tierra en el área de estudio: Bosque ribereño, Bosque intervenido, Pastos, Café, Caña de azúcar, Hortalizas y verduras, Urbano.	60
Anexo 4. Mapa de Zonificación del Plan Regulador de Alvarado, ZPRQ: Zona de protección de ríos y quebradas, ZM: Zona de uso mixto, ZAG: Zona agropecuaria, ZPI: Zona de uso público institucional, ZR: Zona residencial.	61
Anexo 5. Mapa de la Zona de protección de 50 m en el río Quebrada Honda.	62
Anexo 6. Mapa de las pendientes presentes en la zona de estudio	63
Anexo 7. Mapa de fuentes lineales y puntuales de contaminación según el Índice de riesgo de contaminación hidrogeológica (IRCH) en la zona de estudio del acueducto municipal de Jiménez y su área de recarga.	64

ABREVIATURAS

AB	Área Basal
ASADAS	Asociaciones Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados comunales
EMC	Evaluación Multicriterio
GAM	Gran Área Metropolitana
GSF	Factor Global del Sitio
LAI	Índice de Área Foliar
IRET	Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas
IGN	Instituto Geográfico Nacional
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
MIRENEM	Ministerio de Recursos Naturales, Energía y Minas
SETENA	Secretaría Técnica Nacional Ambiental
SINAC	Sistema Nacional de Áreas de Conservación
UNA	Universidad Nacional de Costa Rica

INTRODUCCIÓN

El suministro y la calidad del agua subterránea y su conexión a los ecosistemas se encuentran cada vez más en riesgo en todo el mundo (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). En la última década las amenazas al recurso hídrico subterráneo han aumentado, tanto por contaminación como por invasión al mismo, alertando a nivel mundial sobre el potencial peligro que representa (Graniel & Cardona, 2002).

Las causas entre otras, se asocia a la transformación del cambio del uso del suelo de paisajes naturales a áreas urbanas y agrícolas, lo que ha resultado en una disminución en la retención, infiltración e interceptación de las precipitaciones y la impermeabilización del suelo (Morera, Pintó & Romero, 2007). Esta reducción de las áreas naturales causa un aumento en la escorrentía superficial, una reducción en la recarga acuífera y por tanto una menor calidad en el agua para consumo humano (Morera, Pintó & Romero, 2007).

Los cambios en la composición de la vegetación y la cobertura pueden alterar la recarga de acuíferos mediante la transformación de la interceptación, la infiltración, la transpiración, la escorrentía superficial, y la profundidad de las raíces (Le Maitre, Scott & Colvin, 1999). La cobertura forestal se encarga de regular el caudal a largo plazo evitando el desabastecimiento de las zonas de recarga, y mantiene un porcentaje adecuado para su uso (Levy & Xu, 2012). Por lo que hasta el menor desarrollo alrededor del agua subterránea, puede conducir a reducciones a largo plazo del caudal, lo cual puede afectar la vegetación en las zonas de ribera, que a su vez son parte fundamental del hábitat de la fauna ribereña, misma que mejora la calidad de las aguas superficiales (Alley, Reilly & Franke, 1999).

El agua subterránea también juega un papel indispensable en la ecología de los ecosistemas boscosos, al ser un recurso fundamental en el mantenimiento de la vegetación, impide indirectamente la erosión y la propagación del fuego destructivo, y modera la temperatura de las aguas superficiales durante la época seca (Levy & Xu, 2012). Autores como Le Maitre, Scott y Colvin (1999), estudiaron como la vegetación y el agua subterránea se ven afectados recíprocamente y dependen uno del otro, ya que la vegetación juega un papel clave en las interacciones entre los sistemas de aguas subterráneas y superficiales, debido a su influencia directa e indirecta en la recarga, así como la

dependencia de las comunidades vegetales al agua subterránea.

Por otra parte, en el Parque Nacional Fremont-Winema en Oregón, Estados Unidos, se llevó a cabo un estudio para determinar la relación hidro-ecológica de la profundidad del agua subterránea con la relación de las especies de plantas vasculares y briófitas, destacando la importancia de incorporar la relación entre el agua subterránea, las especies vegetales y los procesos ecológicos (Aldous & Bach, 2014).

Sin embargo, a pesar de que se conoce dicha asociación ecológica, existe poca atención a nivel nacional e internacional, los acuíferos a nivel global están bajo amenaza por la contaminación, resultado de la desordenada urbanización, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas, entre otras (Foster, Hirata, Gomes, Délia & Paris, 2003). Por ejemplo, no fue hasta 1998 que las leyes de Suráfrica le dieron el valor e importancia al agua subterránea como un recurso integrado y común, donde se reconoció que la protección de la integridad ecológica de un sistema acuático, comprende la protección biológica y del hábitat, y que representa la capacidad de un sistema para mantener una diversa, equilibrada e íntegra comunidad de organismos (Harris, Van Vliet & MacKay, 1999).

Según Reynolds-Vargas & Fraile (2002) en Costa Rica la recarga potencial anual de agua subterránea es de aproximadamente 47.000 millones de metros cúbicos por año, que representa un 20% de la precipitación. También, calculó que un 50% del agua que se utiliza para consumo humano, comercial, agrícola e industrial de la Gran Área Metropolitana (GAM) proviene de captaciones de agua subterránea, evidenciando la dependencia de esta fuente en nuestro país.

A pesar de ello, se han reportado casos de contaminación en el agua subterránea alrededor de todo el territorio nacional, en la provincia de Heredia en el acuífero Barva se detectaron sulfatos y nitratos, en otros sectores del Valle Central se ha registrado contaminación por hidrocarburos y coliformes, en las provincias de Cartago y Limón se han hallado plaguicidas como el bromacil y triadimefon y en Guanacaste se han identificado metales pesados, poniendo en riesgo la salud de los costarricenses (Astorga, 2013; Vargas, 2012; Castillo, Ruepert, Ramírez, Van Wendel, Bravo & De la Cruz, 2012).

Particularmente, el cantón de Jiménez abastece con agua subterránea a más de 7000 personas, y al ser una zona agrícola se encuentra amenazada por la descarga de aguas

contaminadas con pesticidas, fertilizantes, entre otros; los cuales podrían tener un alto impacto no solo en las aguas superficiales, sino también en las subterráneas (Jiménez, 2010).

Entre los años 2006-2009 el Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET) de la Universidad Nacional (UNA), llevó a cabo una investigación sobre la presencia y el uso de plaguicidas en suelos, aguas y hortalizas en la microcuenca de Pacayas, donde se encontró que los agricultores están utilizando plaguicidas considerados de uso restringido, como el paraquat, el clorpirifó y el endosulfán. Además, se halló hexaclorobenceno en el agua subterránea de una naciente, alertándose sobre la vulnerabilidad de esta fuente de agua con la contaminación de plaguicidas (Fournier, Ramírez, Ruepert, Vargas & Echeverría, 2010a; Fournier, Ramírez, Ruepert, Vargas & Echeverría, 2010b).

Por otra parte Jiménez (2010) identificó en la microcuenca Chiz-Maravilla que las aguas superficiales y subterráneas están expuestas a concentraciones de nitratos cerca o por encima del nivel de contaminación máximo de 10 mg/l (OMS, 2004), debido a la gran utilización de fertilizantes y tanques sépticos en la zona (Fournier et al., 2010b) y señaló como principales problemáticas el sobreuso de herbicidas, fertilizantes nitrogenados, y un inadecuado uso del suelo, que ha conllevado a su progresiva erosión (Jiménez, 2010). Anudado a esto actualmente las zonas de recarga acuífera no están identificadas, lo que ha dado paso a la realización de actividades agrícolas en sitios donde no deberían permitirse y la ausencia de zonificación tampoco permite la formulación de una regulación y protección de estas (Jiménez, 2010).

La determinación de una zona de protección se establece como una serie de áreas mayormente concéntricas que se definen superficialmente alrededor de la fuente de abastecimiento del agua subterránea, por medio de las condiciones hidrogeológicas locales y propias características de la fuente (Foster et al., 2003). Según Adams y Foster (1992) se deben establecer niveles de control con el fin de brindar protección a las nacientes según las actividades del uso del suelo que van a cambiar de acuerdo con las condiciones y necesidades locales.

Asimismo, se han establecido los perímetros de protección de captaciones de

abastecimiento urbano, los cuales se definen como, un área alrededor de una captación en la cual, se restringen o prohíben de forma parcial las actividades o construcciones, que podrían contaminar las aguas subterráneas o que afecten el caudal que es utilizado para abastecer a la población (Moreno Merino, Martínez Navarrete, López Geta & Navarrete Martínez, 1991). Desde la perspectiva legal y técnica, los perímetros se usan como instrumentos para regular el uso de la tierra y restringir actividades con el fin de proteger el recurso hídrico superficial y subterráneo en términos de calidad, cantidad y continuidad del mismo (Sagot, 2004).

En diversos países como Alemania, Holanda, Dinamarca, Francia, Estados Unidos, Reino Unido, y Australia, se han obtenido excelentes resultados después de haber establecido perímetros de protección en las captaciones de abastecimiento urbano; confirmando que son un sistema eficiente para lograr un compromiso entre una protección adecuada del recurso hídrico y en la medida de lo posible de las actividades socioeconómicas de las zonas aledañas (Martínez Navarrete, 2004).

Países pioneros como Alemania donde casi un 20% del territorio corresponden a perímetros de protección (Vorreger, 1998), contrasta con la situación de países como España que desde el año 1985 se aprobó la implementación de perímetros de protección de captaciones de abastecimientos urbanos, sin embargo, para principios del año 2000 era mínima su inclusión y llena de restricciones, a pesar de tener aval legal (Martínez Navarrete & López Geta, 2001).

Costa Rica no es la excepción, ya que desde el año 1942 por medio de la Ley de Aguas, se dictó el establecimiento de perímetros de protección, por medio del artículo 31 inciso a, que dicta: “*200 metros de perímetro, en un radio de protección desde la captación o de tomas surtidoras de agua potable*”. Por su parte la Ley Forestal declara en su artículo 33, áreas de protección: “*Las áreas que bordeen nacientes permanentes, definidas en un radio de cien metros medidos de modo horizontal*”. Sin embargo, a pesar de esta legislación, que exige el establecimiento de zonas de protección con cobertura forestal que resguarde el recurso hídrico subterráneo, en la actualidad no se respetan ni se implementan dichos perímetros de protección.

No obstante, algunos autores sugieren que para la protección del recurso hídrico,

existen otras medidas como utilizar el concepto de cuenca hidrográfica (sin importar que el sitio de estudio sea un límite administrativo), ya que permite ver a nivel global la dinámica del agua, detectar la presencia de fuentes puntuales y difusas de contaminación y futuros conflictos (Birkel, 2007; Benegas & León, 2009). También recomiendan desarrollar zonas prioritarias de forma teórica y práctica, basándose en distintos criterios que valoren el importante rol ambiental que cumplen en la protección del agua. La implementación de un mapa con zonas prioritarias es de gran valor para elaborar planes de manejo sostenible del agua, desarrollar estrategias, tomar decisiones, generar datos inexistentes y así poder realizar investigaciones sobre el utilización del recurso hídrico superficial y subterráneo y cuantificar su vulnerabilidad (Birkel, 2007).

Por lo anterior, esta investigación consistió en la evaluación del estado de la cobertura forestal de las zonas de influencia de las fuentes de abastecimiento del acueducto municipal del cantón de Jiménez, como línea base para dictar pautas y recomendaciones para su conservación y manejo integral. Se establecieron tres objetivos específicos, siendo: (I) Determinar el estado de la cobertura forestal de las zonas de influencia de las fuentes de abastecimiento; (II) Determinar áreas prioritarias de recuperación de cobertura forestal, utilizando criterios geofísicos, jurídicos y sociales en la zona de influencia de las nacientes del acueducto municipal del cantón de Jiménez; (III) Proponer lineamientos que permitan mantener y/o recuperar la cobertura forestal como un medio de manejo para la conservación de las zonas de influencia del acueducto municipal del cantón de Jiménez.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El estudio se realizó en cinco fuentes de abastecimiento del acueducto municipal de Jiménez (agrupadas en fuentes 1, 2 y 3 y fuentes 4 y 5; por la cercanía entre sí), las cuales se ubican en el cantón de Alvarado, en la provincia de Cartago, Costa Rica; durante el año 2016 y 2017, las cinco nacientes se localizan entre las coordenadas 9°55'9" N y 83°47'20" O y en términos topográficos pertenecen a la microcuenca del río Quebrada Honda.

Para determinar las zonas prioritarias y la propuesta de lineamientos se definió el área de recarga de las nacientes por medio de la delimitación de la microcuenca del río Quebrada Honda, según las curvas de nivel topográficas, la cual incluye las zonas de protección legal y la cota de altura de recarga de las nacientes del acueducto municipal de Jiménez, misma que se determinó según un estudio realizado por el Laboratorio de Isótopos Estables de la Escuela de Química de la Universidad Nacional, con el agua de las nacientes y el agua de lluvia, la altura de recarga se estimó que se encuentra a los 1888 m.s.n.m. (Ley de aguas, 1942; Sánchez-Murillo, 2018) (Fig. 1).

De forma general en el cantón de Alvarado se encuentran zonas de vida de bosque muy húmedo premontano, seguido de bosque pluvial premontano y montano bajo (Holdridge, 1967). La precipitación varía entre los 2500 y 3500 mm anuales y presenta una temperatura media anual de 20°C (Ramírez & Zúñiga, 2014). En el territorio existe una densa red hídrica donde es posible identificar 13 microcuencas, cuatro de ellas se encuentran por completo dentro del cantón de Jiménez y, las nueve restantes son compartidas con los cantones de Paraíso, Turrialba y Alvarado. Por tal razón en algunos sectores se ha generado una gran presión sobre los recursos hídricos, debido a que mayormente se usan para la industria de la caña, el café y hortalizas (Jiménez, 2010).

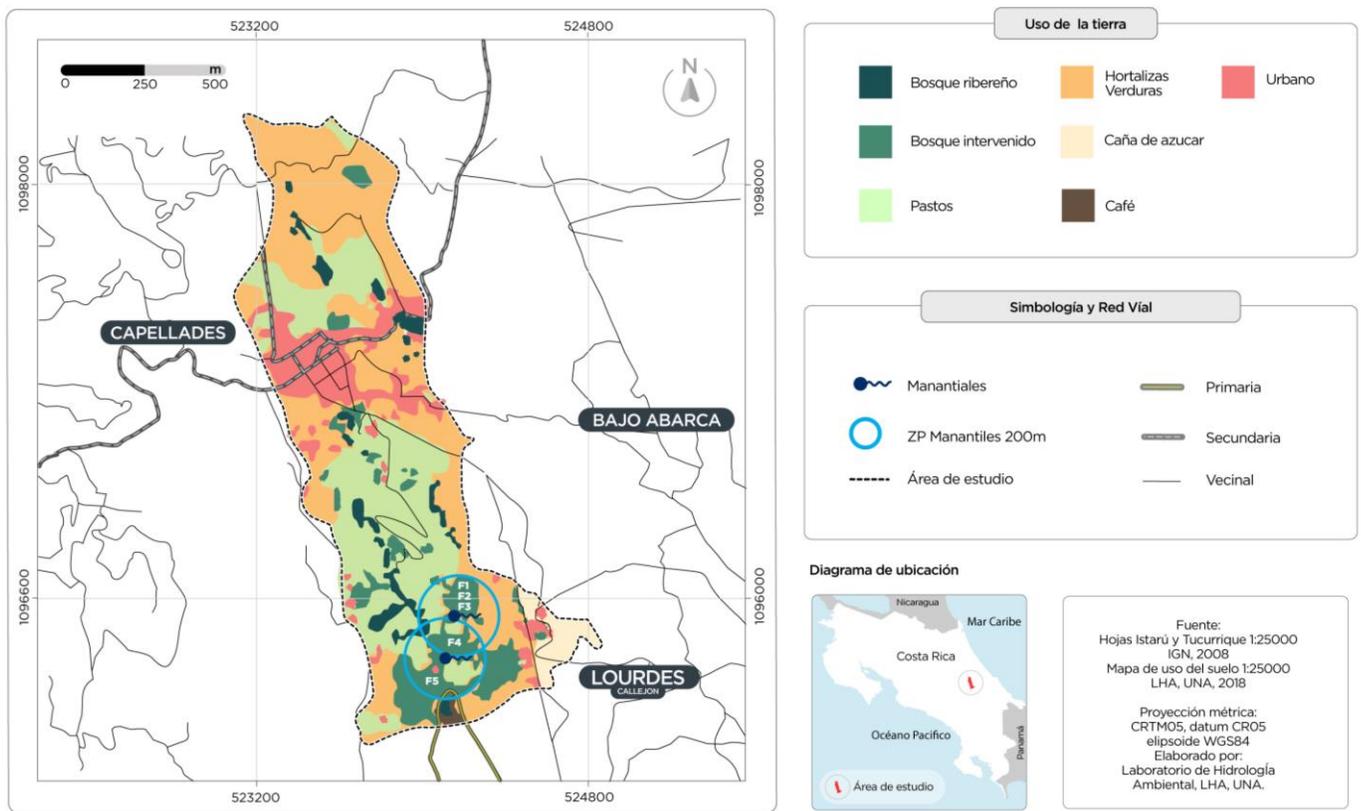


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio, nacientes del acueducto de Jiménez y su respectiva área de recarga, Cartago Costa Rica.

Caracterización estructural de la vegetación

Diseño experimental

En el sitio de estudio se establecieron nueve parcelas rectangulares de 30m de largo x 10 m de ancho, de manera estratificada distribuidas a lo largo de las cinco fuentes de abastecimiento, en las fuentes F1, F2 y F3 cuatro parcelas y en la zona de F4 y F5 cinco parcelas.

La estructura de la vegetación se muestreó en las cinco fuentes de abastecimiento, correspondientes a la nacientes de Quebrada Honda abarcando los 200 metros de protección establecidos por la Ley de Aguas, con el fin de determinar el estado del ecosistema boscoso. En las parcelas se tomaron las siguientes mediciones:

Porcentaje de cobertura

El porcentaje de cobertura (*CV%*) se calculó con base en la metodología descrita por Rich (1990), por medio de fotografías hemisféricas utilizando una cámara digital Sigma SD14 digital SLR, la cual se colocó horizontalmente sobre un trípode a 1.7 m de altura sobre el nivel del suelo a la cámara se le colocó un lente tipo ojo de pez de 180° de ángulo de visión y en cada fotografía el polo norte magnético se ubicó en la parte superior de la misma, para facilitar el posterior análisis de las imágenes.

Cada parcela se subdividió en seis subparcelas de 5m de largo x 2,5m de ancho. En el centro de cada subparcela se tomaron tres fotografías hemisféricas a una apertura de 2.8mm, 5mm y 10mm, para obtener un total de 18 fotografías por parcela. Posteriormente se realizó el análisis de las fotografías en el programa HemiView 2.1 SR4 (Delta-T Devices Ltd), para estimar el porcentaje de cobertura, el Índice de Área Foliar (LAI, por sus siglas en inglés) m² de hojas por m² de suelo y el Factor Global del Sitio (GSF, del inglés *global site factor*) que expresa el porcentaje de luz disponible a partir de la relación entre el área de claros y el área total de la imagen capturada.

Densidad de tallos

Se tomaron en cuenta todos los árboles dentro de la parcela con un diámetro superior a los cinco centímetros a la altura del pecho (*DAP*), a cada uno se le midió la altura (*h*) y el (*DAP*). Con estos datos se determinó el área basal (*AB*) m² individual por tallo, mediante la siguiente fórmula:

$$AB = \frac{\pi}{4} DAP^2$$

Se realizó un análisis de la distribución diamétrica y vertical de los árboles presentes, y mediante correlaciones simples de Pearson se relacionaron las características estructurales: *DAP*, área basal, y la altura, con las características lumínicas: LAI, GSF y la cobertura vegetal, para identificar si existía algún grado de correlación entre las mismas, para todos los análisis estadísticos y los gráficos se utilizó el programa de manejo de datos y estadística R. versión 3.6.0. (R Core Team, 2018).

Selección de áreas prioritarias de protección del recurso hídrico subterráneo

Para localizar las áreas prioritarias se utilizaron el área de recarga de las nacientes de Quebrada Honda y técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC), por medio del software IDRISI Selva (Eastman, 1997). La EMC es un grupo de métodos que se usan en la decisión multidimensional y los modelos de evaluación, para la toma de decisiones, basado en valores de preferencia según distintos criterios (Barredo & Bosque-Sendra, 1998).

El módulo de EMC en el SIG IDRISI utiliza el método de Combinación Lineal Ponderada, integrado por Eastman (1997), el cual consiste en una matriz con número de filas y columnas según el número de criterios a ponderar, también conocida como matriz de comparación pareada, este procedimiento fue desarrollado por Saaty (1980) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Matriz de comparación pareada, modificada de Saaty

1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1
Extremadamente		Fuertemente		Moderadamente		Ligeramente		Igual
Menos importante			←————→			Más importante		

Fuente: Elaboración propia

Esta relación, establece importancia relativa de la primera variable con respecto a la segunda y así sucesivamente; el resultado de la matriz es la comparación simultánea por pares. Esta escala inicia de 1/9 que denota una extremadamente baja importancia del primer criterio con respecto al segundo, hasta llegar a 1 para el caso de igual importancia de un criterio con respecto a otro.

Para priorizar las áreas de protección de las nacientes los criterios a utilizar en la EMC se generaron a partir de mapas geofísicos, jurídicos y sociales del área de estudio, de los cuales se definieron seis criterios para la obtención del mapa final de idoneidad para la protección del agua subterránea los criterios utilizados fueron: 1) índice de riesgo de contaminación hidrogeológica, 2) zona de protección de 200 metros en nacientes, 3) zona

de protección de 50 metros en ríos, 4) cobertura de uso de la tierra 5) pendiente y 6) mapa de zonificación de uso de la tierra (Cuadro 2).

Cuadro 2. Criterios y consideración para priorizar áreas de protección de las nacientes del acueducto municipal de Jiménez.

Criterio	Justificación	Metadato	Consideración para la priorización de recuperación
Mapa de índice de Riesgo de Contaminación Hidrogeológica	El índice de Riesgo de contaminación hidrogeológica señala las zonas con mayor riesgo potencial a la contaminación, tomando en cuenta la amenaza de contaminación (fuentes lineales, puntales y difusas de contaminación) y la vulnerabilidad del acuífero (profundidad del agua subterránea, grado de confinamiento y ocurrencia del sustrato).	Fuente: Fonseca-Sánchez et al., 2019 Escala del mapa: 1:25.000 Tipo de criterio: científico Fuente: Plan Regulador Territorial del Cantón de Alvarado (2016) Escala del mapa: 1:25.000 Tipo de criterio: legal	Se priorizan las áreas con alto riesgo de contaminación hidrogeológica, por su validación científica.
Zona de protección de 200m en nacientes	La ley de Aguas establece 200 metros de perímetro medidos horizontalmente, en un radio de protección desde la captación o de tomas surtidoras de agua potable.	Fuente: Ley de Aguas N°276 (1942) Tipo de criterio: legal Fuente: Se realizó trabajo de campo donde tomaron fotografías hemisféricas para comprobar el estado de la cobertura forestal que poseen las zonas de protección de las nacientes municipales, además se midió la altura y el DAP para determinar el área basal del bosque que alberga las zonas de protección de las nacientes. Tipo de criterio: científico	Se prioriza toda la zona de protección, porque la conservación de la cobertura boscosa en las zonas de protección del agua subterránea es primordial para la protección de la calidad y abastecimiento a largo plazo. La mayor prioridad la tienen las zonas de protección establecidas por ley.

Criterio	Justificación	Metadato	Consideración para la priorización de recuperación
Zona de protección de 50m en ríos	La Ley Forestal define en su artículo 33, que se declaran áreas de protección a la <i>“franja de quince metros en zona rural y de diez metros en zona urbana, medidas horizontalmente a ambos lados, en las riberas de los ríos, quebradas o arroyos, si el terreno es plano, y de cincuenta metros horizontales, si el terreno es quebrado”</i> .	Fuente: Ley Forestal N°7575 (1996) Tipo de criterio: legal Fuente: Plan Regulator Territorial del Cantón de Alvarado (2016) Escala del mapa: 1:25.000 Tipo de criterio: legal	Se prioriza toda la zona de protección del río Quebrada Honda, según la Ley Forestal.
Mapa de cobertura de uso de la tierra	Se refiere a la utilización de un terreno de la estructura física asentada o incorporada a él, o de ambos casos, en cuanto a clase, forma e intensidad de su aprovechamiento. En el área de estudio las clases de uso son bosque intervenido, bosque ribereño, café, caña de azúcar, pastos, hortalizas y verduras, y urbano.	Fuente: Laboratorio de Hidrología Ambiental de la UNA, 2017 Escala del mapa: 1:10.000 Tipo de criterio: social La cobertura de uso de la tierra se obtuvo de las fotografías aéreas del Instituto Geográfico Nacional (IGN), también apoyada de imágenes satelitales, con validación de campo durante el año 2017 con error de estimación del 5%.	Se priorizan las áreas que presentan poca o ninguna cobertura forestal, porque corren mayor riesgo de sufrir erosión que las tierras que poseen algún tipo de cobertura vegetal.
Pendiente	Según el Plan Regulator del cantón Alvarado se definirá una zona de protección o conservación de terrenos, aquella que cuente con más de un 30% de pendiente, además se establece una zona de protección en ríos y quebradas en terrenos planos	Fuente: Laboratorio de Hidrología Ambiental de la UNA, (2019) a partir de curvas de nivel del IGN, 2008. Plan Regulator del cantón de Alvarado (2016)	Se priorizan las áreas con mayor pendiente porque presentan mayor riesgo de erosión y posibles usos no conformes en zonas con fragilidad ambiental.

Criterio	Justificación	Metadato	Consideración para la priorización de recuperación
	con una pendiente hasta 40% de 15 metros, y en terrenos quebrados con una pendiente mayor a 40% de 50 metros horizontales.	Decreto Ejecutivo N°32967 MINAE-SETENA Decreto Ejecutivo N°36786-MINAE Decreto Ejecutivo N°23214 MAG-MIRENEM Escala del mapa: 1:25:000 Tipo de criterio: legal La cobertura de pendientes se calcula con el modelo de superficie del terreno a partir de las curvas de nivel 1:25.000 en un Sistema de Información Geográfica.	
Mapa de zonificación de uso de la tierra	Se refiere a la división de una demarcación territorial en zonas de uso de la tierra, para efecto de su desarrollo racional, o mapa de zonificación del Plan Regulador Territorial.	Fuente: Plan Regulador Territorial del Cantón de Alvarado (2016) Escala del mapa: 1:25.000 Tipo de criterio: legal	Se priorizan las áreas que presenten altos valores de fragilidad ambiental, por su viabilidad legal y técnica para recuperación.

Fuente: Elaboración propia

En este caso, para establecer el orden jerárquico de los criterios se aplicó el método Delphi, según la opinión de experto, por ser una condición requerida en la función; la asignación de prioridades de las variables en el método Delphi se realizó con nueve expertos de las áreas de Geografía, Biología e Ingeniería Forestal. Además, se definieron los atributos de cada criterio correspondiente, y sus restricciones que conciernen a sitios donde no se puede realizar ningún tipo de acción, debido a su naturaleza, en este caso fueron: los ríos y canales, carreteras, mancha urbana y el poliducto (Anexo 1 y 2).

Entre los geoprocесamientos realizados, se transformaron los mapas en formato shape

de ESRI a formato raster, posteriormente a formato ASCII para ser leídos por el software IDRISI Selva (Eastman, 1997). Seguidamente se realizó una normalización de los datos cuantitativos y cualitativos con el algoritmo FUZZY, el cual evalúa la posibilidad de que cada píxel pertenezca a un conjunto difuso al evaluar cualquiera de una serie de conjuntos difusos de las funciones de pertenencia, este proceso de normalización reduce la subjetividad asociada con los pesos asignados, al examinar los pesos normalizados de los criterios por consistencia tal y como lo recomienda Saaty (1980).

Recomendaciones de Manejo

Con base en los resultados que se obtuvieron se generaron recomendaciones de manejo para que sirvan como un plan piloto para la protección del agua subterránea y toda el área de influencia donde se encuentran los manantiales o fuentes de abastecimiento, el cual pueda ser considerado por el acueducto municipal de Jiménez, la municipalidad de Alvarado, la oficina regional del SINAC-MINAE Turrialba, los vecinos, agricultores y dueños de fincas aledañas a las nacientes. Para que de esta manera se pueda llevar a cabo un adecuado proceso de protección y gestión del recurso hídrico subterráneo.

RESULTADOS

Caracterización estructural de la vegetación

Una vez realizada la caracterización estructural de la vegetación se pudo comprobar el estado de cobertura boscosa en las zonas de protección. Se determinó que la mayoría de clases diamétricas están distribuidas entre los 10 a 30 cm de diámetro (fig.2), características que describen a un bosque secundario maduro, además de una estratificación vertical distribuida entre los 5 y 20 metros de altura (fig.3).

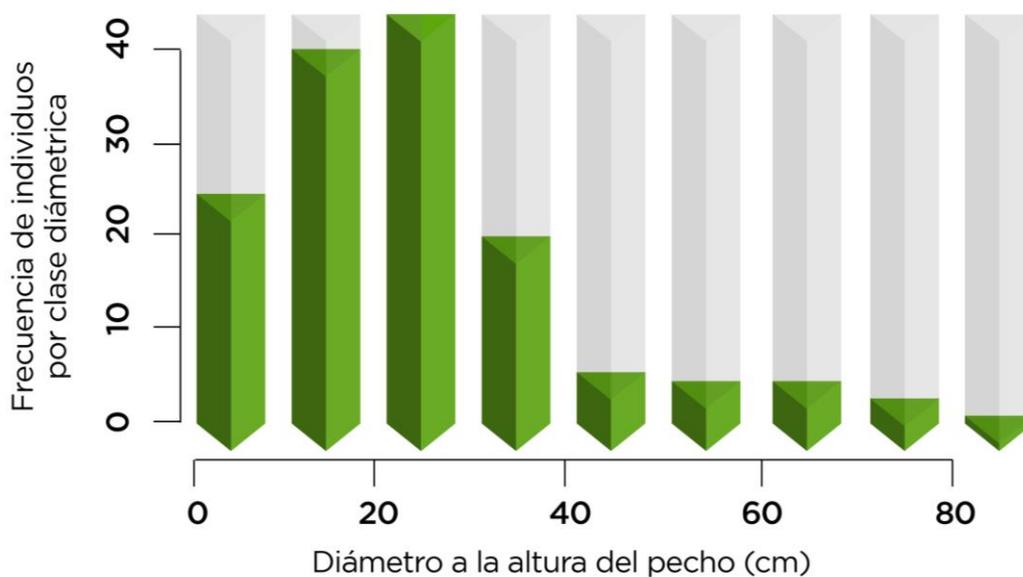


Figura 2. Distribución diamétrica del componente arbóreo presente en la zona de protección del acueducto municipal de Jiménez, Cartago.

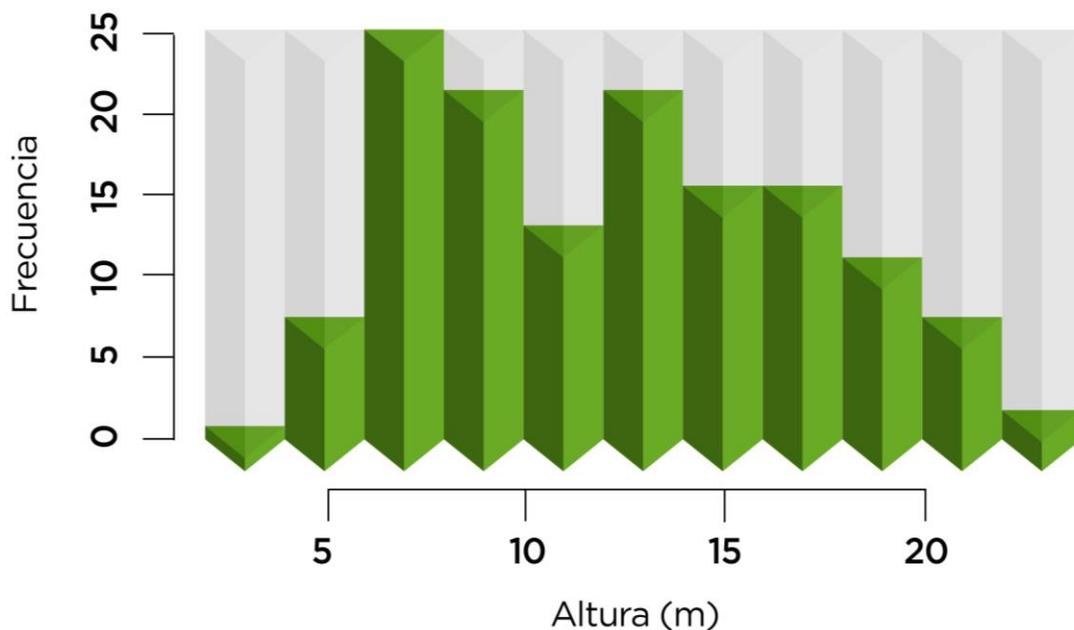


Figura 3. Estratificación vertical del componente arbóreo presente en la zona de protección del acueducto municipal de Jiménez, Cartago

A partir del análisis de fotografías hemisféricas se obtuvo que la cobertura vegetal (cálculo de la fracción de claros en el cielo) en el parche de bosque donde se encuentran las fuentes de abastecimiento fue de un 85.3%, el Índice de área foliar (LAI) (se refiere a los metros cuadrados de biomasa por metro cuadrado y va a incrementarse conforme el grado de complejidad del bosque) de $3.32 \pm 0.79 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ y el GSF $0.08 \pm 0.04 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ lo que se interpreta como un estado avanzado de sucesión.

Al establecer correlaciones simples de Pearson entre las variables estructurales (DAP, la altura y el área basal), con las variables lumínicas arrojadas de las fotografías hemisféricas (cobertura vegetal, LAI y GSF), se obtuvo una correlación positiva entre la cobertura vegetal y el área basal. Una correlación negativa del área basal con el índice de Área Foliar (LAI) y el GSF (fig.4).

La altura se correlacionó positivamente con el DAP, y la cobertura vegetal se correlacionó negativamente con LAI (fig. 4), todas estas correlaciones fueron significativas ($p < 0.05$).

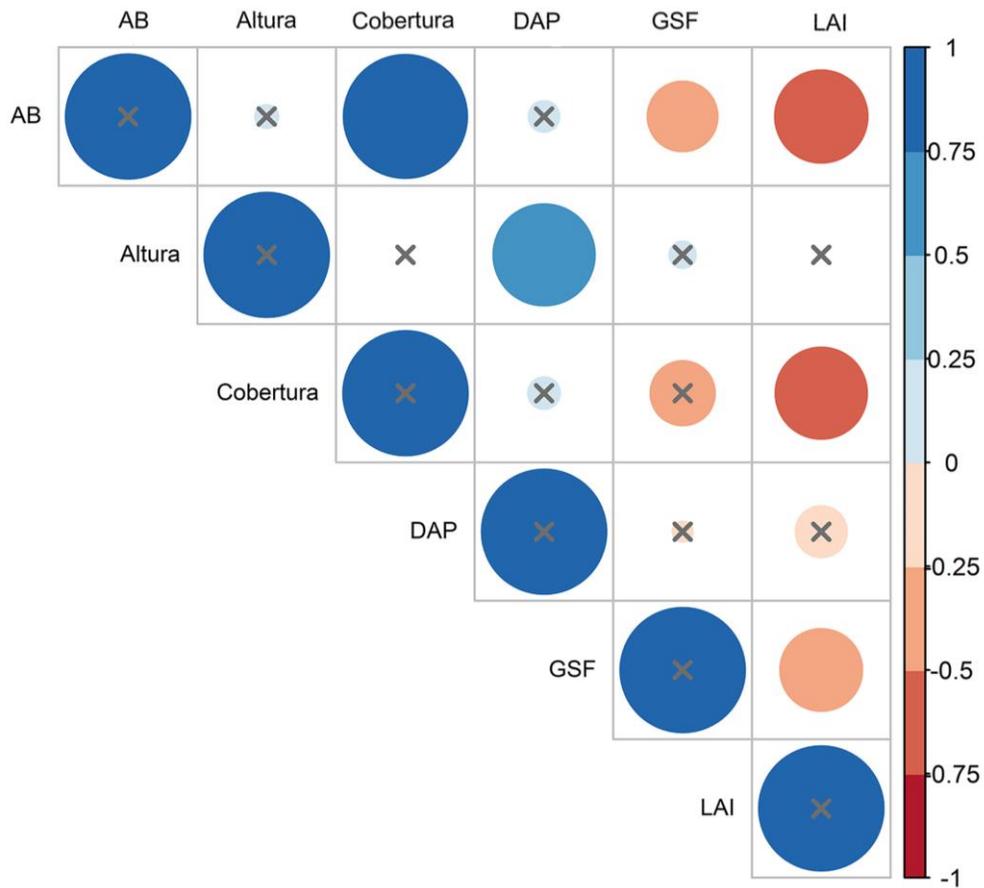


Figura 4. Correlación de Pearson entre las variables estructurales (DAP, altura y AB) y las variables lumínicas (cobertura vegetal, LAI y GSF), abreviaturas: DAP: Diámetro a la altura del pecho, AB: Área basal, LAI: Índice de área foliar, GSF: Factor global del sitio. O: $p < 0.05$, X: $p < 0.001$

Evaluación Multicriterio

Los resultados obtenidos del proceso de consulta a expertos, para la jerarquía de los criterios para aplicar en la priorización de áreas de recuperación; en primer orden es el índice de contaminación hidrogeológica, seguido de la zona de protección de 200 metros en nacientes, zona de protección de 50 metros en ríos, cobertura de uso de la tierra, pendiente y por último el mapa de zonificación de uso de la tierra (Cuadro 3) (Anexos 3, 4, 5, 6 y 7)

Cuadro 3. Resultado de la jerarquización de criterios, asignación de prioridades del método Delphi realizado a expertos sobre los criterios geofísicos, jurídicos y sociales para priorizar áreas de protección en el acueducto de Jiménez.

Campo Profesional de los expertos	Mapa de zonificación de uso de la tierra	Índice de riesgo de contaminación hidrogeológica	Zona de protección de 200 metros en nacientes	Zona de protección de 50 metros en ríos	Cobertura de uso de la tierra	Pendiente
Geografía	4	1	6	5	3	2
Biología Tropical	6	2	1	3	4	5
Biología tropical	6	1	3	4	2	5
Ingeniería Forestal	6	1	2	3	4	5
Ingeniería Forestal	1	2	3	4	6	5
Biología Tropical	5	6	2	1	4	3
Biología Tropical	2	1	3	4	5	6
Ingeniería Forestal	6	4	1	2	5	3
Biología Tropical	6	1	2	3	4	5
Priorización	6	1	2	3	4	5

Fuente: Elaboración propia

Una vez determinada la estructura jerárquica, dada por los expertos, se estableció la comparación pareada por pesos de los criterios, resultando lo detallado en el cuadro 4.

Cuadro 4. Matriz de la asignación de pesos relativos de los criterios geofísicos, jurídicos y sociales para priorizar áreas de protección del recurso hídrico subterráneo en el acueducto municipal de Jiménez

	IRCH	ZP 200m nacientes	ZP 50 m ríos	CUT	Pendiente	MZUT
IRCH	1					
ZP 200 m nacientes	1/2	1				
ZP 50 m ríos	1/7	1/9	1			
CUT	1/2	1/2	1/2	1		
Pendiente	1/5	1/3	1/3	1/7	1	
MZUT	1/3	1/2	1/2	1/5	1/3	1

IRCH: Índice de riesgo de contaminación hidrogeológica, ZP200m nacientes: Zona de protección de 200 metros en nacientes, ZP 50m ríos: Zona de protección de 50 metros en ríos, CUT: Cobertura de uso de la tierra, Pendiente y MZUT: Mapa de zonificación de uso de la tierra.

Al examinar los pesos normalizados de los criterios, el radio de consistencia obtenido fue aceptable, en este caso de 0.06. Obtenida la EMC, se clasificaron tres intervalos para la representación final del mapa de zonas prioritarias, siendo “prioridad baja”, “prioridad media” y “prioridad alta”, las zonas de los manantiales del acueducto municipal y su área de protección legal resultaron en áreas con prioridad alta y media (fig.5). Las zonas de protección del río Quebrada Honda obtuvieron prioridad alta, las zonas agrícolas cercanas al río con prioridad media y los pastizales prioridad baja (fig. 6).

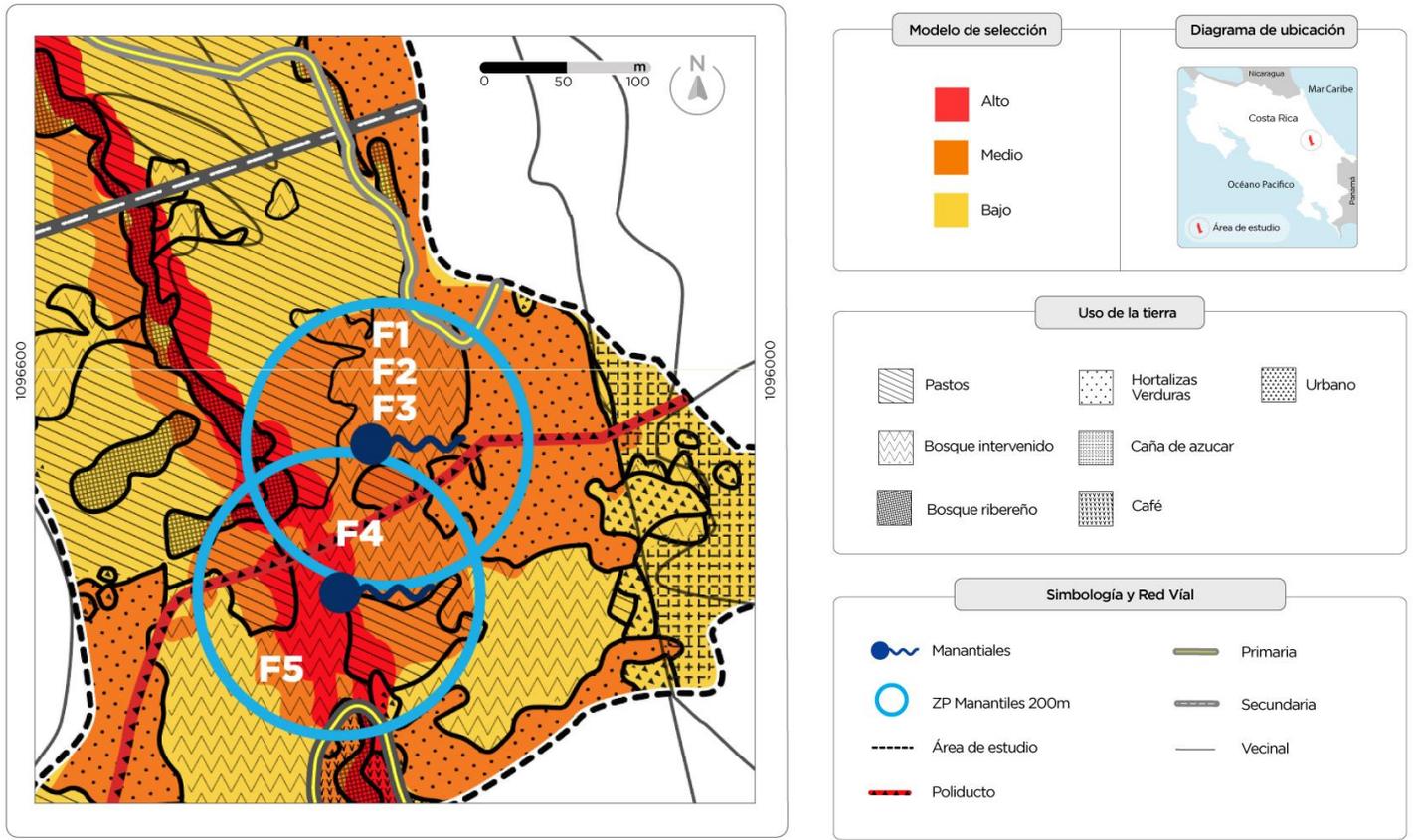


Figura 5. Mapa del área prioritaria de las fuentes de abastecimiento del acueducto municipal de Jiménez con prioridad alta y media

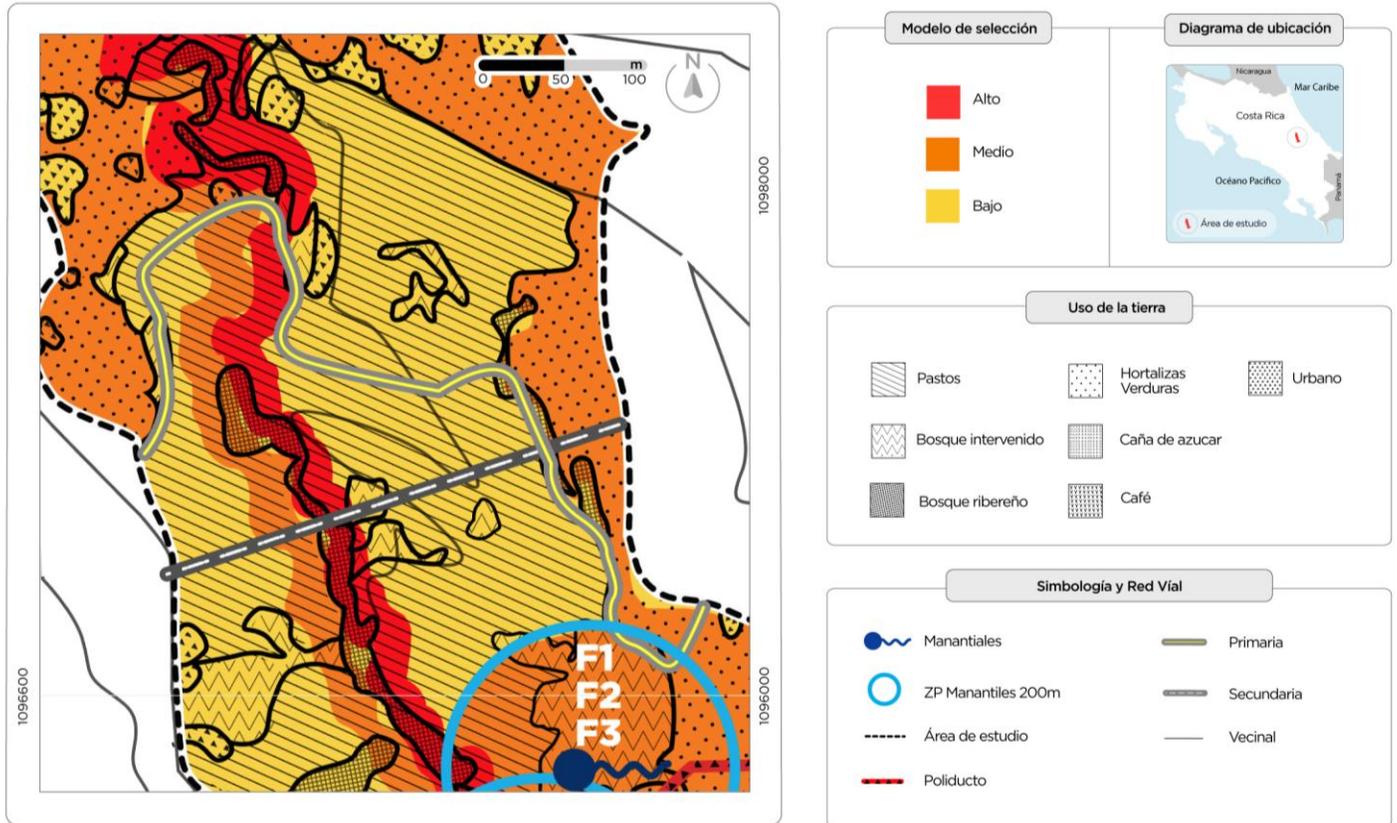


Figura 6. Mapa del área del río Quebrada Honda que posee prioridad alta, las zonas agrícolas con prioridad media y los pastizales prioridad baja.

El mapa general obtenido de la Evaluación Multicriterio muestra las áreas prioritarias de protección del recurso hídrico subterráneo en la zona de estudio (fig. 7).

Según la EMC se obtuvieron los siguientes valores: con “prioridad baja” 108.73 ha que corresponden a los pastizales, con “prioridad media” se obtuvieron 103.44 ha, comprendidas por las zonas agrícolas y una parte del área de protección legal las fuentes de abastecimiento y con “prioridad alta” 12.37 ha, que corresponden a la zona de protección de 50 metros del río Quebrada Honda y el área de las nacientes del acueducto municipal.

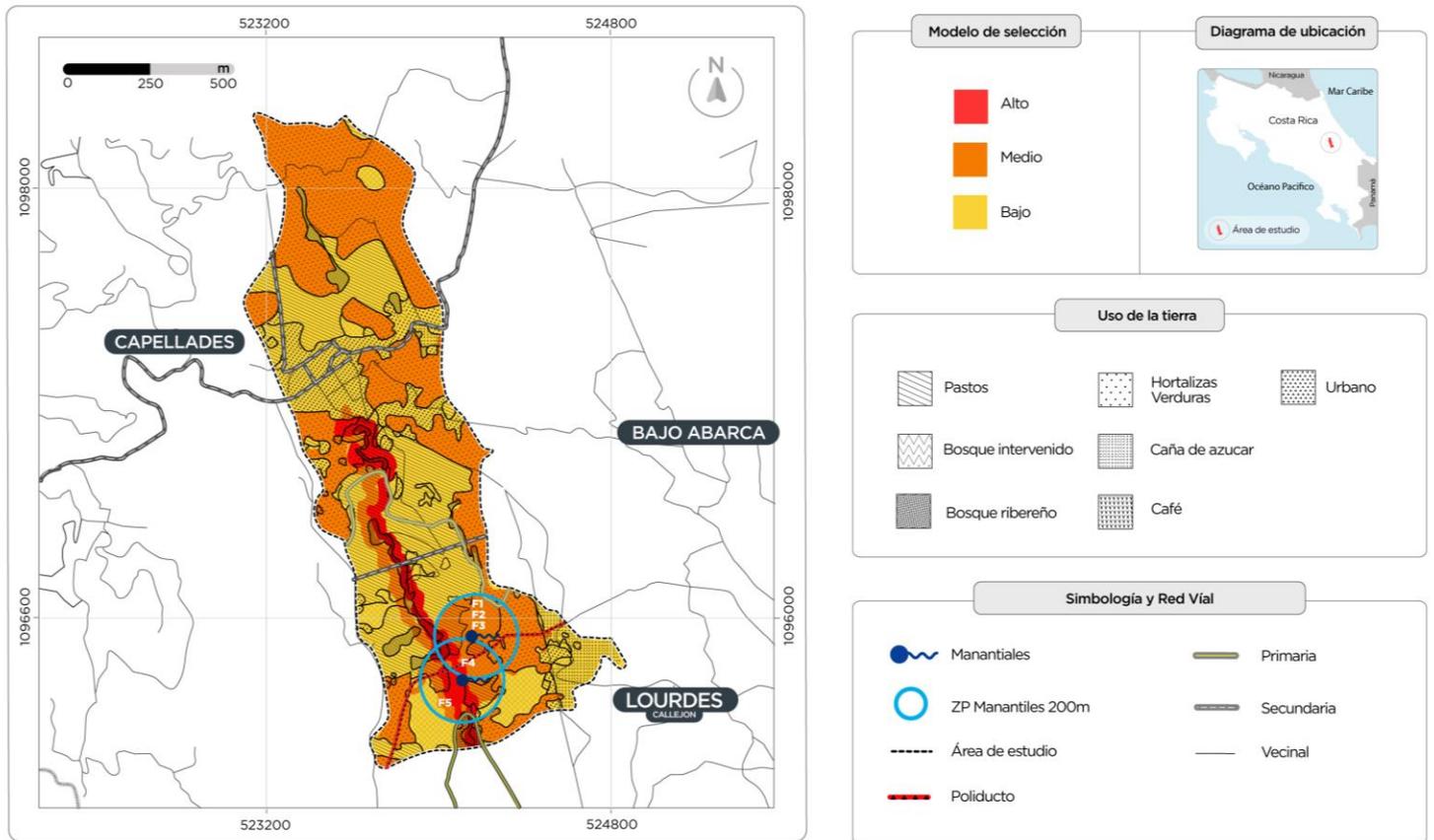


Figura 7. Mapa general de la Evaluación Multicriterio con áreas prioritarias de protección del recurso hídrico subterráneo en la zona de estudio

Recomendaciones de Manejo

Con base en los resultados obtenidos en la caracterización estructural de la vegetación (porcentaje de cobertura boscosa, DAP, altura, LAI, GSF, AB) y de acuerdo a la Evaluación Multicriterio donde se obtuvieron las áreas prioritarias (zona de protección de 200 metros de las nacientes, zona de protección de 50 metros del río Quebrada Honda, área de pastizales y el área de cultivos estacionales de hortalizas y verduras) para recuperar la cobertura forestal, se generaron lineamientos de manejo para la protección del recurso hídrico en las zonas de influencia de las nacientes del acueducto municipal del cantón de Jiménez, descritos en detalle en el cuadro 5, los cuales incluyen el área prioritaria a recuperar, indicador de alerta, medidas de manejo (lineamientos de reforestación, especies nativas de árboles y arbustos recomendadas con base en el estudio de Morales (2009) y el trabajo de campo realizado), aspectos legales que sustentan las medidas de manejo, responsables de llevar a cabo y el plazo para llevar a cabo las mismas.

Cuadro 5. Lineamientos de manejo para mantener y/o recuperar la cobertura forestal y la protección del recurso hídrico en las zonas de influencia de las nacientes del acueducto municipal del cantón de Jiménez.

Área Prioritaria	Indicador de alerta	Medida de manejo	Legislación ambiental	Responsable	Plazo
Zona de Protección de 200 metros de las nacientes	Escorrentía superficial. Reducción en la recarga acuífera. Menor infiltración.	Aumentar la cobertura boscosa en los 200m de zona de protección con las siguientes especies nativas: <i>Malpighia glabra</i> L. Familia: Malpighiaceae Nombre común: Acerola, quesito Hábito: Árbol Uso agroforestal: demarcación de senderos, cultivos mixtos estacionales o permanentes. Importancia ecológica: protección de mantos acuíferos, alimentación de aves silvestres, rehabilitación de áreas	Ley de Aguas, No. 276 Art. 34. Prohíbe la corta o eliminación de árboles en las áreas de protección descritas en el artículo 33. Art. 58. Tipifica como delito la invasión de las áreas de conservación o protección de los ríos, estableciendo una pena de prisión de 3 meses a	Municipalidad de Jiménez Municipalidad de Alvarado MINAE-SINAC de Turrialba	Empezar a sembrar desde el primer año de inicio de las medidas de manejo. Del primer año al quinto año debe aumentarse la cobertura boscosa entre un 5% a 10%.

Área Prioritaria	Indicador de alerta	Medida de manejo	Legislación ambiental	Responsable	Plazo
		<p>degradadas, estabilizador de cauces fluviales.</p> <p><i>Miconia</i> spp. Familia: Melastomataceae Nombre común: Lengua de vaca Hábito: Árbol, arbusto Uso agroforestal: para cercas vivas, para sombra de cultivos permanentes como el café. Importancia ecológica: protección de mantos acuíferos, conservación y protección de suelos, alimento de avifauna silvestre, estabilizador de cauces fluviales y restauración de suelos degradados.</p> <p><i>Conostegia xalapensis</i> (Bonpl.) D. Don Familia: Melastomataceae Nombre común: Lengua de vaca, capulín Hábito: Árbol Uso agroforestal: en corredores riparios, cercas vivas. Importancia ecológica: protección de mantos acuíferos, recuperación de áreas degradadas, estabilizador de cauces fluviales, dieta de avifauna silvestre.</p> <p><i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Kunth ex Walp. Familia: Fabaceae Nombre común: Madero negro Hábito: Árbol Uso agroforestal: cercas vivas, abono</p>	<p>3 años.</p> <p>Ley Forestal, No. 7575</p> <p>Art. 53. Establece que el MINAE y los demás entes públicos deben fomentar la restauración, recuperación y rehabilitación de los ecosistemas, las especies y los servicios ambientales que brindan, mediante planes y medidas que contemplen un sistema de incentivos.</p> <p>Ley de Biodiversidad, No. 7788</p> <p>Art. 54. Señala que, ante un daño ambiental a un ecosistema, el Estado debe decidir qué medidas tomar para restaurarlo, recuperarlo y rehabilitarlo, pudiendo suscribir contratos con instituciones de educación superior, privadas o públicas, empresas e instituciones científicas, nacionales o internacionales. Cuando la restauración tenga</p>		<p>A partir de los cinco años en adelante debe aumentarse la cobertura boscosa entre un 15% a 25% como mínimo.</p>

Área Prioritaria	Indicador de alerta	Medida de manejo	Legislación ambiental	Responsable	Plazo
		<p>verde, árboles aislados en potreros para sombra de ganado, sombra en cultivos de café.</p> <p>Importancia ecológica: control de la erosión, protección de mantos acuíferos, recuperación de suelos (especie fijadora de nitrógeno) y de áreas degradadas (por ser una planta pionera) estabilizador de cauces fluviales.</p> <p><i>Trichilia havanensis</i> Jacq. Familia: Meliaceae Nombre común: Uruca Hábito: Árbol Uso agroforestal: en corredores riparios, como cercas vivas, en cultivos mixtos estacionales o permanentes. Importancia ecológica: protección y resguardo de acuíferos, en la conservación del suelo, alimento de aves.</p> <p><i>Tecoma stans</i> (L.) Juss. ex Kunth Familia: Bignoniaceae Nombre común: Vainillo Hábito: Árbol Uso agroforestal: como cercas vivas, en corredores ribereños como árboles aislados en potreros para refugio y sombra del ganado. Importancia ecológica: protección y resguardo de acuíferos, conservación del suelo.</p> <p><i>Vismia baccifera</i> (L.) Triana & Planch.</p>	<p>que hacerse en terrenos privado, el Estado también podrá intervenir, según los artículos 51, 52 y 56 de esta misma ley.</p>		

Área Prioritaria	Indicador de alerta	Medida de manejo	Legislación ambiental	Responsable	Plazo
		<p>Familia: Hypericaceae Nombre común: Achiotillo Hábito: Árbol Uso agroforestal: como cercas vivas, en corredores ribereños. Importancia ecológica: protección y resguardo de mantos acuíferos, conservación del suelo, alimento para avifauna, estabilizador de cauces fluviales.</p> <p>Reforestación de parches que forman parte de los 200 m de protección y el área de amortiguamiento de las zonas de protección con las siguientes especies nativas:</p> <p><i>Piper</i> spp. Familia: Piperaceae Nombre común: Cordoncillo Hábito: Arbusto Uso agroforestal: en corredores riparios, como cercas vivas, cortinas rompevientos. Importancia ecológica: protección de mantos acuíferos, alimento de avifauna, protección y conservación de suelos, y restauración de suelos degradados.</p> <p><i>Clethra</i> spp. Familia: Clethraceae Nombre común: Nance macho Hábito: Árbol</p>			

Área Prioritaria	Indicador de alerta	Medida de manejo	Legislación ambiental	Responsable	Plazo
		<p>Uso agroforestal: en corredores riparios, árboles aislados en potreros para sombra de ganado, sombra para cultivos no estacionales.</p> <p>Importancia ecológica: estabilizador de cauces fluviales, protección de mantos acuíferos y restauración de áreas degradadas.</p> <p><i>Sapium glandulosum</i> (L.) Morong Familia: Euphorbiaceae Nombre común: Yos Hábito: Árbol</p> <p>Uso agroforestal: como cercas vivas, establecer o delimitar caminos o servidumbres, en corredores riparios, como sombra en cultivos permanentes.</p> <p>Importancia ecológica: protección de acuíferos, y contra la erosión, restauración suelos degradados.</p> <p><i>Senna reticulata</i> (Willd.) H.S. Irwin & Barneby Familia: Fabaceae Nombre común: Saragundí Hábito: Árbol</p> <p>Uso agroforestal: en corredores riparios, delimitar caminos, servidumbres.</p> <p>Importancia ecológica: protección de mantos acuíferos, recuperación, conservación y enriquecimiento del suelo ya que es una especie fijadora de nitrógeno.</p>			

Área Prioritaria	Indicador de alerta	Medida de manejo	Legislación ambiental	Responsable	Plazo
<p>Zona de protección de 50 metros del río Quebrada Honda</p>	<p>Fragmentación del paisaje.</p> <p>Pérdida de la cobertura forestal.</p> <p>Pérdida de hábitat.</p> <p>Pérdida de especies, amenaza para especies en peligro de extinción, o bajo categoría de amenaza.</p>	<p>Uso de cercas vivas en los terrenos colindantes a la zona de protección de 50m del río Quebrada Honda. (Especies descritas en la sección de área de pastizales).</p> <p>Reforestación de las zonas de ribera según lo establece la Ley Forestal con las siguientes especies:</p> <p><i>Alnus acuminata</i> Kunth Familia: Betulaceae Nombre común: Jaúl Hábito: Árbol Uso agroforestal: como cortinas rompeviento, abono verde, en cultivos mixtos como: frijol y maíz, para delimitar linderos, sirve como sombra en cultivo de café. Importancia ecológica: recuperación de suelos (por ser una especie fijadora de nitrógeno), resguardo de cuencas hidrográficas.</p> <p><i>Acnistus arborescens</i> (L.) Schltld. Familia: Solanaceae Nombre común: Güitite Hábito: arbusto Uso agroforestal: en corredores riparios, cercas vivas, Importancia ecológica: protección de mantos acuíferos, recuperación de áreas degradadas, dieta de avifauna silvestre.</p> <p><i>Cecropia</i> spp. Familia: Cecropiaceae Nombre común: Guarumo</p>	<p>Ley de Aguas, No. 276</p> <p>Art. 32. Cuando en un área mayor de 200 mts exista peligro de contaminación ya sea en las aguas superficiales o en las subterráneas, el Poder Ejecutivo, por medio de la Sección de Aguas Potables, dispondrá las medidas que juzgue oportunas para evitar el peligro de contaminación.</p> <p>Art. 148. Obligación de los propietarios de terrenos atravesados por ríos o arroyos, o en los que existan manantiales, de sembrar árboles en los márgenes de estos cuando hayan sido destruidos los bosques que les servían de protección.</p> <p>Arts. 150, 151 y 165. Establecen la prohibición de destruir, tanto en los bosques nacionales como en terrenos particulares, árboles situados a menos de cinco metros de los ríos o arroyos que</p>	<p>Municipalidad de Jiménez</p> <p>Municipalidad de Alvarado</p> <p>MINAE-SINAC de Turrialba</p> <p>Dueños de fincas</p>	<p>De seis meses a un año para que los dueños de fincas que colindan siembren árboles y arbustos como cercas vivas en la totalidad de sus fincas.</p> <p>A partir de los seis años debe existir un 50% de reforestación de las zonas de ribera del río Quebrada Honda.</p>

Área Prioritaria	Indicador de alerta	Medida de manejo	Legislación ambiental	Responsable	Plazo
		<p>Hábito: Árbol Uso agroforestal: en corredores riparios y en sistemas agroforestales cafetaleros. Importancia ecológica: importante en la dieta de fauna silvestre y en la restauración de áreas degradadas.</p> <p><i>Conostegia xalapensis</i> (Bonpl.) D. Don Familia: Melastomataceae Nombre común: Lengua de vaca, capulín Hábito: Árbol Uso agroforestal: en corredores riparios, cercas vivas. Importancia ecológica: protección de mantos acuíferos, recuperación de áreas degradadas, estabilizador de cauces fluviales, dieta de avifauna silvestre.</p> <p><i>Hauya elegans</i> DC. Familia: Onagraceae Nombre común: surá guayabo Hábito: Árbol Uso agroforestal: en corredores riparios, como cercas vivas, sombra de cultivos permanentes como el café. Importancia ecológica: estabilizador de cauces fluviales, recuperación de áreas degradadas, protección de acuíferos.</p> <p><i>Heliocarpus appendiculatus</i> Turcz Familia: Malvaceae Nombre común: Burío Hábito: Árbol</p>	<p>discurran por sus predios.</p> <p>Ley de Biodiversidad, No. 7788</p> <p>Art. 53. Establece que el MINAE y los demás entes públicos deben fomentar la restauración, recuperación y rehabilitación de los ecosistemas, las especies y los servicios ambientales que brindan, mediante planes y medidas que contemplen un sistema de incentivos.</p> <p>Art. 54. Señala que, ante un daño ambiental a un ecosistema, el Estado debe decidir qué medidas tomar para restaurarlo, recuperarlo y rehabilitarlo, pudiendo suscribir contratos con instituciones de educación superior, privadas o públicas, empresas e instituciones científicas, nacionales o internacionales. Cuando la restauración tenga</p>		

Área Prioritaria	Indicador de alerta	Medida de manejo	Legislación ambiental	Responsable	Plazo
		<p>Uso agroforestal: en corredores riparios, sombra en cultivos permanentes.</p> <p>Importancia ecológica: protección de mantos acuíferos, estabilizador de cauces fluviales, alimento de aves silvestres, rescate de áreas degradadas.</p> <p><i>Croton draco</i> (Schltdl. & Cham). Familia: Euphorbiaceae Nombre común: Targuá Hábito: Árbol</p> <p>Uso agroforestal: cercas vivas, en corredores riparios.</p> <p>Importancia ecológica: Protección de mantos acuíferos, recuperación de áreas degradadas, dieta de avifauna, estabilizador de cauces fluviales.</p> <p>Implementación de las zonas prioritarias de protección arrojadas en esta investigación.</p> <p>Brindar protección a fauna vulnerable y en algún estado de amenaza: que vecinos se organicen para denunciar a quienes atenten o cacen fauna silvestre, por medio de la oficina regional del MINAE-SINAC de Turrialba o a la línea telefónica 1192.</p>	<p>que hacerse en terrenos privado, el Estado también podrá intervenir, según los artículos 51, 52 y 56 de esta misma ley.</p> <p>Ley Orgánica del Ambiente, No. 7554</p> <p>Art. 64. Para evitar la contaminación del agua, la autoridad competente regulará y controlará que el manejo y el aprovechamiento no alteren la calidad y la cantidad de este recurso, según los límites fijados en las normas correspondientes.</p>		
Área de pastizales	Escorrentía superficial. Aumento de la erosión.	<p>Uso de cercas vivas en los terrenos colindantes a las nacientes con las siguientes especies nativas:</p> <p><i>Acnistus arborescens</i> (L.) Schltdl.</p>	<p>Ley de Biodiversidad, No. 7788</p> <p>Art. 53. Establece que el MINAE y los demás</p>	Municipalidad de Jiménez Municipalidad de Alvarado	Uso de cercas vivas en los terrenos colindantes a las nacientes: 6 meses

Área Prioritaria	Indicador de alerta	Medida de manejo	Legislación ambiental	Responsable	Plazo
		<p>Familia: Solanaceae Nombre común: Güitite Hábito: arbusto Uso agroforestal: en corredores riparios, cercas vivas, en huertos. Importancia ecológica: Protección de mantos acuíferos, recuperación de áreas degradadas, dieta de avifauna silvestre.</p> <p><i>Conostegia xalapensis</i> (Bonpl.) D. Don Familia: Melastomataceae Nombre común: Lengua de vaca Hábito: Árbol Uso agroforestal: en corredores riparios, cercas vivas. Importancia ecológica: Protección de mantos acuíferos, recuperación de áreas degradadas, dieta de avifauna silvestre, estabilizador de cauces fluviales.</p> <p><i>Croton draco</i> (Schltdl. & Cham). Familia: Euphorbiaceae Nombre común: Targuá Hábito: Árbol Uso agroforestal: cercas vivas, en corredores riparios. Importancia ecológica: Protección de mantos acuíferos, recuperación de áreas degradadas, dieta de avifauna silvestre, estabilizador de cauces fluviales.</p> <p><i>Erythrina</i> spp. Familia: Fabaceae</p>	<p>entes públicos deben fomentar la restauración, recuperación y rehabilitación de los ecosistemas, las especies y los servicios ambientales que brindan, mediante planes y medidas que contemplen un sistema de incentivos.</p>	<p>Acueducto municipal de Jiménez Agricultores Dueños de fincas</p>	<p>a 1 año. Reforestación de parches y fincas con suelo desnudo: primer año cubrir del 5% al 10% de parches de suelo desnudo.</p>

Área Prioritaria	Indicador de alerta	Medida de manejo	Legislación ambiental	Responsable	Plazo
		<p>Nombre común: Poró Hábito: Árbol Uso agroforestal: cercas vivas, delimitación de linderos, en cultivos mixtos p.e: maíz, yuca, sombra en cultivos de café. Importancia ecológica: recuperación de suelos (especie fijadora de nitrógeno) y de áreas degradadas, estabilizador de cauces fluviales.</p> <p><i>Ficus costaricana</i> (Liebm.) Miq. Familia: Moraceae Nombre común: Higuieron Hábito: Árbol Uso agroforestal: cercas vivas. Importancia ecológica: dieta de avifauna silvestre, protección de mantos acuíferos, estabilizador de cauces fluviales.</p> <p><i>Malvaviscus arboreus</i> Cav. Familia: Malvaceae Nombre común: Amapola Hábito: Arbusto Uso agroforestal: como cercas vivas, para delimitar linderos o servidumbres. Importancia ecológica: alimento de fauna silvestre, restauración y recuperación de áreas degradadas, resguardo de mantos acuíferos, estabilizador de cauces fluviales.</p> <p>Reforestación de parches y fincas con suelo desnudo con las siguientes</p>			

Área Prioritaria	Indicador de alerta	Medida de manejo	Legislación ambiental	Responsable	Plazo
		<p>especies nativas:</p> <p><i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Kunth ex Walp. Familia: Fabaceae Nombre común: Madero negro Hábito: Árbol Uso agroforestal: cercas vivas, abono verde, árboles aislados en potreros para sombra de ganado, sombra en cultivos de café. Importancia ecológica: control de la erosión, protección de mantos acuíferos, recuperación de suelos (especie fijadora de nitrógeno) y de áreas degradadas (por ser una planta pionera) estabilizador de cauces fluviales.</p> <p><i>Cordia alliodora</i> (Ruiz & Pav.) Oken Familia: Boraginaceae Nombre común: Laurel Hábito: Árbol Uso agroforestal: árboles dispersos en pastizales para sombra y refugio para el ganado, como cortinas rompevientos, en cultivos mixtos como: café, maíz y pastos, plantaciones en linderos. Importancia ecológica: recuperación de áreas degradadas, control de erosión, preservación del suelo, estabilización de bancos de arena.</p> <p><i>Inga</i> spp.</p>			

Área Prioritaria	Indicador de alerta	Medida de manejo	Legislación ambiental	Responsable	Plazo
		<p>Familia: Fabaceae Nombre común: Guaba Hábito: Árbol Uso agroforestal: en cultivos mixto, sombra para cultivos permanentes como el café. Importancia ecológica: importante en la recuperación de suelos (por ser una especie fijadora de nitrógeno), alimentación de avifauna silvestre, protección de cuencas hidrográficas.</p> <p><i>Hampea appendiculata</i> (Donn. Sm.) Standl. Familia: Malvaceae Nombre común: Burío blanco Hábito: Árbol Uso agroforestal: árboles en senderos o caminos. Importancia ecológica: estabilizador de cauces fluviales, importante alimento de aves silvestres, recuperador de suelos al ser un árbol pionero de rápido desarrollo y gran follaje permanente.</p> <p>Reforestación de las zonas de ribera según lo establece la Ley Forestal con las siguientes especies: <i>Alnus acuminata</i>, <i>Acnistus arborescens</i>, <i>Cecropia</i> spp., <i>Conostegia xalapensis</i>, <i>Hauya elegans</i>, <i>Heliocarpus appendiculatus</i>, <i>Croton draco</i>. Descritas anteriormente en el área prioritaria de la zona de protección de 50m del río Quebrada Honda.</p>			

Área Prioritaria	Indicador de alerta	Medida de manejo	Legislación ambiental	Responsable	Plazo
Cultivos estacionales de hortalizas y verduras	Contaminación de aguas subterráneas y superficiales por uso de agroquímicos y plaguicidas en cultivos agrícolas.	<p>Ejecución de buenas prácticas ambientales: Cada agricultor debe elaborar un Plan Integral de Manejo de Aguas Residuales, con el fin de evitar y/o prevenir cualquier tipo de contaminación que sus prácticas puedan generar en el agua superficial o subterránea.</p> <p>Exclusión de agroquímicos y pesticidas en cultivos sobretodo los circundantes a las fuentes de abastecimiento, así como lo establece el Manual de Buenas Prácticas Ambientales: <i>“Es necesario sustituir los productos peligrosos por sustancias menos contaminantes y más amigables con el medio ambiente, preferiblemente orgánicas, biodegradables o bioestimulantes”.</i> *</p> <p>Los agroquímicos deben almacenarse bajo techo, en recipientes que se encuentren en perfecto estado (herméticos y resistentes), identificados correctamente, preferiblemente en cajas de madera con una cama de 10 cm de arena para posibles derrames y evitar que caigan al suelo y con medidas de prevención de derrames, debe haber un extintor. Cuando se sale al campo los envases deben quedar guardados en la bodega jamás en la intemperie. La bodega debe tener acceso solo al personal capacitado y se debe llevar un</p>	<p>Ley de Aguas, No. 276</p> <p>Art. 32. Cuando en un área mayor de 200 mts exista peligro de contaminación ya sea en las aguas superficiales o en las subterráneas, el Poder Ejecutivo, por medio de la Sección de Aguas Potables, dispondrá las medidas que juzgue oportunas para evitar el peligro de contaminación.</p> <p>Ley Orgánica del Ambiente, No. 7554</p> <p>Art. 63. Para evitar y controlar el deterioro atmosférico, el Poder Ejecutivo, emitirá las normas técnicas correspondientes y exigirá la instalación y operación de sistemas y equipos adecuados para prevenir, disminuir y controlar las emisiones que sobrepasen los límites permisibles.</p> <p>Art. 64. Para evitar la contaminación del agua, la autoridad competente</p>	<p>Municipalidad de Jiménez</p> <p>Municipalidad de Alvarado</p> <p>Acueducto municipal de Jiménez</p> <p>Agricultores</p>	<p>Se debe implementar de inmediato, el agricultor tendrá de 3 a 6 meses para llevar a cabo las medidas de manejo respectivas.</p> <p>La municipalidad de Alvarado y Jiménez deben promover y propiciar la agricultura orgánica, y sus beneficios.</p> <p>Debe darse por lo menos una charla trimestralmente a los agricultores, comunidad en general.</p>

Área Prioritaria	Indicador de alerta	Medida de manejo	Legislación ambiental	Responsable	Plazo
		<p>registro de control de cuales productos se compraron y su fecha de vencimiento.</p> <p>Evitar la fumigación de cultivos de forma aérea y sí debe realizarse procurar que sea en horas de menor radiación solar para evitar su absorción por medio de la piel, no fumigar con presencia de vientos y lluvias fuertes.</p> <p>Implementar zonas de amortiguamiento entre los cultivos y las nacientes del acueducto municipal de Jiménez, con el fin de evitar la contaminación de cuerpos de agua por agroquímicos y la muerte y/o daño de fauna y flora cercana.</p> <p>Programas de educación ambiental con los agricultores y comunidad en general.</p> <p>Promover e implementar agricultura orgánica.</p> <p>Certificación de agricultura orgánica.</p>	<p>regulará y controlará que el manejo y el aprovechamiento no alteren la calidad y la cantidad de este recurso, según los límites fijados en las normas correspondientes.</p> <p>Art.69. Las actividades productivas evitarán descargas, depósitos o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en el suelo.</p>		

* Hernández, G. (2010). Manual de Buenas Prácticas Ambientales en Costa Rica. Compilación ilustrada del Tribunal Ambiental Administrativo. *Infoterra Editores S.A.*

DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos sobre la caracterización estructural de la vegetación, la mayoría de árboles se encuentran en clases diamétricas menores, lo que indica que se trata de un bosque secundario maduro, ya que conforme aumenta el promedio del diámetro, la edad del bosque es mayor (Redondo, Vílchez & Chazdon, 2001), además los bosques secundarios se distinguen por clases diamétricas menores a las que se hallan en un bosque primario y mayor presencia de especies de características heliófilas (Viquez, 1993), un área basal menor como es el caso de este estudio que fue de 6.9 m²/ha, ya que según investigaciones realizadas en bosques primarios en la zona de Sarapiquí se han reportado valores de 30.8 m²/ha (Camacho, Finegan & Orozco, 1999) y 28.83 m²/ha (Guaritagua et al., 1997).

Dentro de la caracterización de la estructura vegetal, la técnica con fotografías hemisféricas permitió determinar la cobertura vegetal y el LAI de las zonas de protección de las fuentes de abastecimiento, ubicando este bosque en un estado avanzado de sucesión, ya que según una revisión global de LAI realizada sobre distintos ecosistemas, para bosques tropicales siempre verdes se obtuvieron valores de LAI de 4.8±1.7 m²m⁻² (Asner, Scurlock & Hicke, 2003). El valor del LAI de este estudio se encuentra por debajo de dicho valor, sin embargo, es adecuado, tomando en cuenta que se está comparando con bosques tropicales maduros y que no han sido intervenidos por el hombre; ya que el LAI es mayor en bosques que poseen un dosel maduro y cerrado (Welles & Cohen 1996; Wirth, Weber & Ryel, 2001).

Así que una recuperación o aumento del área foliar a través del crecimiento del dosel del bosque va a incrementar la sombra, reduciendo así la temperatura del suelo y la evaporación del agua en el suelo (Guaritagua & Ostertag, 2001), asimismo va a actuar como filtro mejorando la pureza del agua y protegiendo al suelo al evitar su degradación y contaminación (FAO, 2015). Por ejemplo, el crecimiento de las raíces, independientemente de la especie, ayuda a reducir la erosión del suelo y permite que las plantas puedan absorber nutrientes que de otra forma podrían ser lixiviados (Guaritagua & Ostertag, 2001).

Ahora bien según la correlación de Pearson la altura se correlacionó de forma positiva con el DAP, ya que se ha determinado que se puede predecir la altura de un árbol, solo con la medida del DAP debido a la relación estrecha que poseen, inclusive la calidad de un bosque o plantación forestal puede interpretarse basándose en esta relación (Arias-Aguilar, 2004), de igual forma la cobertura vegetal está relacionada con el área basal de la misma manera que lo están la altura y el DAP (Mitchell & Popovich, 1997), la cobertura vegetal es una variable importante que transforma los procesos biofísicos sobre el suelo que van a afectar la estructura del sotobosque (Evenson et al., 1980 citado por Mitchell & Popovich, 1997) y su relación con las demás variables estructurales es fundamental para comprender la caracterización de la vegetación.

Por otra parte, sabemos que el recurso hídrico subterráneo es imprescindible para un adecuado desarrollo de la vida, por lo que su consumo de manera segura es una necesidad primordial para el ser humano (Foster et al., 2003). Al ser la fuente vital que sustenta los ecosistemas, las especies acuáticas y las comunidades humanas en todo el mundo, se enfrenta a una creciente demanda, que conlleva a su disminución, disponibilidad y calidad, haciendo actualmente que su gestión se haya convertido un conflicto (Aldous & Bach, 2014). El garantizar la potabilidad del recurso se ha convertido en una situación compleja a nivel mundial, debido al crecimiento poblacional, el aumento de la contaminación del agua tanto superficial como subterránea ya que la demanda en muchos casos no logra satisfacer las necesidades mínimas de una población en cantidad y calidad (Saravanakumar & Kumar, 2011; Grischek, Nestler, Piechniczek & Fischer, 1996).

Esta investigación permite un avance en la protección del recurso hídrico subterráneo al identificar áreas prioritarias para la protección y lineamientos de manejo para estas áreas, ya que en Costa Rica más del 60% del agua subterránea es para abastecimiento humano, sin embargo, en áreas agrícolas los cultivos localizados cerca o en las zonas de recarga de los manantiales, son amenazas a la calidad de estas fuentes de captación para consumo humano (Astorga, 2010). No obstante por medio de la evaluación multicriterio se lograron determinar cuatro áreas para la protección del agua subterránea y superficial, con prioridad alta se encuentra la zona de protección de 50 metros del río Quebrada Honda su margen izquierdo y derecho y una parte de la zona de protección de 200 metros de las fuentes de

abastecimiento, la cual es atravesada por el río; las otras áreas con prioridad media, son la zona de protección de 200 m de las nacientes, los pastizales en abandono que se encuentran dentro del acueducto municipal y el área que bordea el río Quebrada Honda; y por último, los cultivos estacionales de hortalizas y verduras que se encuentran en la parte alta, media y baja del área de recarga.

El nacimiento del río Quebrada Honda con sus respectivos márgenes tienen prioridad alta ya que han sido irrespetados por los propietarios de las fincas que colindan con el mismo, con la siembra de cultivos de hortalizas y verduras, el desecho inadecuado de los agroquímicos y plaguicidas, el desagüe de aguas negras y jabonosas, entre otras actividades que amenazan la calidad del agua superficial. Además se ha irrespetado dejando sus márgenes sin o poca cobertura boscosa, aunque la Ley Forestal exija lo contrario, acelerando así los procesos erosivos que traen como consecuencia un fuerte impacto en el ecosistema (Suárez, 2001; Laporte & Porras, 2002; González, 2003), con más razón en este caso donde se presentan pendientes elevadas de más de 30° y en la mayoría del margen del río de más de 60° (anexo 6) lo que incrementa el arrastre y depósito de sedimentos, aguas abajo debido a la escorrentía superficial (Suárez, 2001; Centeno, 2004; Hernández, 2011). Trayendo como consecuencia la contaminación, sedimentación y turbidez del agua, influyendo en la disminución de la productividad y el potencial biológico y un menor refugio para especies ribereñas (Navarro, 2002; Navarro et al., 2006).

A mediano y largo plazo este irrespeto a la cobertura vegetal va provocar un cambio en el régimen hidrológico y en el ecosistema fluvial debido al arrastre y producción de sedimentos, al reducirse la capacidad de infiltración del agua de lluvia en áreas con nada o poca cobertura forestal, trayendo con sí fuertes avenidas que alteran el lecho y márgenes del río (Navarro et al., 2006) generando deslizamientos e inundaciones (Gastezzi-Arias, Alvarado-García & Pérez-Gómez, 2017).

Esta situación debe ser atendida por la municipalidad de Alvarado, dado que las nacientes que abastecen el acueducto Municipal de Jiménez se localizan en este territorio, lo que inicia con la delimitación de la zona ribereña, para protegerla según lo establecido en la Ley Forestal. Esto implica, negociar con los propietarios de las fincas circundantes al río Quebrada Honda, ceder una franja para la restauración de sus márgenes.

Con la institución encargada del ordenamiento del territorio, se puede planificar e implementar sistemas de tratamiento y redistribución de las aguas negras y jabonosas. Por otro lado, la implementación de buenas prácticas agrícolas disminuye los sobrantes de agroquímicos que por escorrentía llegan al río. Otra medida, con valor agregado, son los programas de educación ambiental a los diversos grupos que conforman la población que habita en la microcuenca.

La zona de protección de 200 metros de las nacientes de Quebrada Honda posee aproximadamente 6.28 ha de zona de protección que corresponde a un 78.3% de bosque secundario intervenido (Fonseca-Sánchez et al., 2019), y es un área prioritaria ya que en la zona de protección la atraviesa el poliducto el cual es una fuente lineal con potencial elevado de contaminación según el índice de riesgo de contaminación hidrogeológica, y por lo menos un 25% de la zona de protección se encuentra bajo una fuente difusa con potencial elevado a la contaminación (Fonseca-Sánchez et al., 2019), debido a que en los alrededores se encuentran cultivos estacionales de hortalizas (papa, tomate, cebolla) que representan fuentes de contaminación difusa con potencial elevado, debido a su nivel potencial de generación de carga contaminante, ya que la mayoría de las veces los agricultores usan cantidades que superan las recomendaciones técnicas y desechan los sobrantes de forma inadecuada (Fournier et al., 2010a; Ramírez & Zúñiga, 2014), y más preocupante es que actualmente el dueño de la finca que colinda con el acueducto en la parte norte o alta de las nacientes, ha ido invadiendo el terreno que pertenece al acueducto municipal de Jiménez eliminando el bosque, como se pudo comprobar en el trabajo de campo, con cultivos estacionales que tiene en su propiedad donde aplica fertilizantes, plaguicidas, entre otros, poniendo en riesgo el agua subterránea y el bosque que la protege.

Otros autores han confirmado dichas cifras ya que alrededor de un 15% de la zona de protección de las fuentes de abastecimiento, presentaron amenaza de contaminación por fuentes difusas con elevado potencial, debido a las grandes cantidades de fertilizantes y plaguicidas que se utilizan en los cultivos de hortalizas que se encuentran en las cercanías (Bravo et al., 2013; Ramírez & Zúñiga, 2014).

Los fertilizantes, herbicidas y plaguicidas, afectan la calidad del agua subterránea, debido su tasa de desplazamiento y persistencia en el suelo y el agua, (Blanco, 2017),

poniendo en riesgo la salud de más de 7000 habitantes del cantón de Jiménez. Así mismo, este tipo de sustancias si se aplican de forma crónica se incrementa el riesgo de disminuir los nutrientes en el suelo, se deteriora la salud del bosque, la calidad del agua se ve comprometida con efectos perjudiciales en organismos acuáticos y los suelos boscosos se acidifican por medio de la degradación atmosférica del nitrógeno o el azufre (Blanco, 2017).

En ese contexto, la cobertura forestal juega un rol fundamental, no solo para la supervivencia de los ecosistemas, sino para la protección misma del agua subterránea, ya que los bosques se encargan de resguardar el recurso hídrico subterráneo de contaminantes gracias a la acción filtrante que realizan los suelos forestales (FAO, 2009).

Además, se ha comprobado que la vegetación puede ser total o parcialmente dependiente de la descarga del agua subterránea, inclusive en las zonas de ribera donde hay agua superficial disponible (Le Maitre, Scott & Colvin, 1999). Por tanto, el mantener la cobertura boscosa es fundamental ya que permite que la estructura del suelo, presente mejores condiciones, además incrementa su espacio poroso por lo que reduce la velocidad del agua de escorrentía, aumentando así el agua que se infiltra y que va hacia al manto freático (Martínez Tuna, 2000).

Asimismo, que en el Plan Regulador del cantón de Alvarado no estén delimitadas las zonas de protección de 200 metros de las fuentes de abastecimiento de Quebrada Honda, es un factor de alto riesgo para la protección y permanencia de la cobertura boscosa en estas fuentes de abastecimiento del cantón de Jiménez. Dada esta ausencia legal, en el mapa de priorización fue de clase media y no alta como era de esperarse. Esto evidencia el divorcio que existe entre algunos gobiernos locales en materia de gobernanza del agua, con la no protección de las fuentes de agua subterránea aunque no sean para consumo de su propia población.

El área de pastizales a lo largo del río Quebrada Honda posee prioridad media ya que en ausencia de una cobertura arbórea continua, la escorrentía superficial puede lavar el suelo, arrastrando roca, suelo e inclusive árboles (Blanco, 2017), y se ha evidenciado que a mayor intensidad de lluvia se da un mayor golpeteo de lluvia en suelos donde no hay

cobertura boscosa, traduciéndose en una mayor escorrentía y por lo tanto un mayor “lavado” de plaguicidas al suelo que pueden contaminar con más facilidad el agua subterránea (Sánchez-Murillo, 2018).

Otras investigaciones en áreas degradadas, demuestran que la cobertura forestal intermedia puede incrementar la recarga del agua subterránea, lo que permite una mayor infiltración, así como una evapotranspiración e intercepción moderadas (Ilstedt et al., 2016). Se ha comprobado que sembrar árboles en zonas de pasto ayuda a reducir la escorrentía superficial, ya que incrementa la infiltración y porosidad del suelo (Faustino et al., 2013), por lo que esta área se convierte en un sitio ideal para reforestar y/o restaurar con especies nativas.

En un escenario ideal es que el área delimitada para la regeneración, o restauración se encuentre lo más cerca posible del bosque, pues favorece el desarrollo del bosque secundario (Aide & Cavelier 1994; Zimmerman, Pascarella & Aide, 2000; Tabarelli & Peres, 2002; Hooper, Legendre, & Condit, 2005; Twedt, 2006). En este contexto favorece conocer el tipo de zona de vida y la altitud, así como sus variaciones, ello permite seleccionar las especies adecuadas, inclusive para el crecimiento natural de árboles y arbustos pioneros que sean tolerantes a ambientes con mucho sol y a suelos pobres (Morales, 2009).

Lo anterior, promueve las interacciones entre la flora y la fauna, por lo que una fuente de semillas no será suficiente, se necesita de la fauna nativa que juega un rol protagonista en la recuperación de un bosque (Ganzhorn et al., 1999; Hamann & Curio, 1999; Tabarelli & Peres, 2002; Dunn, 2004; Clarke, Rostant & Racey, 2005; Nyhagen et al., 2005; Mayfield, Ackerly & Daily, 2006).

Según el punto de vista ecológico, la forma más sencilla para restaurar es la eliminación de la fuente de perturbación (ganados, incendios, entre otros) y dejar que el ecosistema se regenere de forma natural, sobre todo cuando existen pocos recursos económicos y el área esta poco degradada (Lamb & Gilmour, 2003 citado por Celentano et al., 2011).

Algunos investigadores afirman que la sucesión natural es el mejor método que brinda mayor diversidad estructural y funcional del ecosistema (Prach et al., 2007). Sin embargo, la restauración pasiva o abandono del terreno no siempre resulta en el desarrollo de sucesión deseado y puede ser muy lenta (Schrautzer et al., 2007).

Por lo que en áreas de pastizales abandonados se recomienda realizar regeneración por cultivo sucesivo, ya que sembrar especies pioneras ayuda a incrementar la tasa de sucesión secundaria, y algunas especies deben plantarse en etapas posteriores de la sucesión como mecanismo para superar las barreras naturales que impiden la regeneración del bosque (Zimmerman, Pascarella & Aide, 2000).

En un área agrícola, es recomendable iniciar cultivando plantas pioneras correspondientes a la zona de vida, siguiendo un orden sucesivo: i) hierbas, arbustos y árboles pioneros, ii) árboles con adaptación a bosques secundarios jóvenes, iii) árboles de bosques maduros y iv) epífitas trepadoras, y especies terrestres esciófitas (Morales, 2009).

Finalmente, el área de cultivos estacionales representa un peligro para el agua subterránea, como es el caso de esta investigación, donde las fuentes de abastecimiento y la zona de recarga sufren de amenaza por fuentes lineales y difusas de contaminación como ya se mencionó anteriormente.

Según los estudios realizados por el laboratorio de Hidrología Ambiental de la UNA, la parte alta de la cuenca está amenazada con potencial elevado de contaminación por el uso de plaguicidas en cultivos de hortalizas, la parte media con potencial moderado debido a los cultivos de caña y café, y en la parte baja con potencial reducido debido a la menor cantidad de plaguicidas utilizados en los pastizales para uso ganadero; mientras que el uso urbano (distribuido a nivel de poblados) lo determinaron con potencial moderado ya que no existe servicio de alcantarillado (Fonseca-Sánchez et al., 2019).

Según el estudio de Fournier y colaboradores (2010b) en las cuencas Pacayas-Plantón, contiguas a la zona de estudio, el 86% de los agricultores lavan el equipo de aplicación de plaguicidas en el terreno donde cultivan, el 19% en la bodega de almacenamiento, y un 24% bota y entierra los envases ya utilizados de plaguicidas; representando una importante amenaza de contaminación con elevado potencial, en caso de

que estas sustancias se lixivien hacia el agua subterránea, poniendo en riesgo la contaminación del acuífero y por lo tanto la calidad del agua para consumo humano.

Todo el contexto evidenciado, sugiere que la municipalidad de Alvarado y Jiménez articulen esfuerzos de planificación y ordenamiento del territorio, intervengan con programas de educación ambiental a los agricultores y a la población en general.

En conclusión las técnicas utilizadas en esta investigación (EMC, fotografías hemisféricas, caracterización estructural de la vegetación) confirman la realidad y necesidad de zonificar, restaurar y proteger los 200 metros para dar paso a la cobertura boscosa en estas zonas de protección establecidas en la Ley de Aguas y Ley Forestal, para la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo.

CONCLUSIONES

De acuerdo con las variables utilizadas para la caracterización estructural de la vegetación, se logró determinar que la mayoría de los árboles se encuentran en clases diamétricas menores, con un dosel definido y una estratificación vertical en categorías menores, lo que indica que se trata de un bosque secundario maduro.

El uso técnicas de caracterización estructural de la vegetación permiten utilizar la información que generan para la toma de decisiones, en este caso permitió evaluar el estado de la cobertura forestal de la zona de protección de las nacientes, la cual se utilizó como un criterio de priorización para poder determinar áreas a recuperar y/o mantener con cobertura forestal.

La zona de protección de 200 metros establecida por la legislación no se respeta ni se cumple para ninguna de las fuentes de abastecimiento, dicha situación representa vulnerabilidad ya que las mismas resguardan agua de consumo humano que en un futuro cercano pueden verse afectadas por la cercanía de cultivos que son amenazas de fuentes puntuales de contaminación por el uso de agroquímicos, herbicidas, plaguicidas y fertilizantes.

De acuerdo con la Evaluación Multicriterio se obtuvieron cuatro áreas prioritarias a recuperar para proteger el recurso hídrico, la zona de protección de 200 metros de las nacientes y la zona de protección de 50 metros del río Quebrada Honda, el área de cultivos estacionales de hortalizas y verduras y el área de pastizales, con prioridad alta, media y baja respectivamente.

Esta investigación aporta una línea base de cómo se encuentra el estado boscoso de las zonas de protección de las fuentes de abastecimiento del acueducto municipal de Jiménez y brinda acciones concretas a implementar en estas zonas y en otras que presentan alta prioridad de protección, mismas acciones que aseguran la protección y su mantenimiento, para que los actores principales (agricultores, propietarios de fincas, municipalidad, ASADA, MINAE-SINAC), las implementen y velen por que se lleven a

cabo, respaldados por la legislación nacional pertinente.

El uso de la metodología multicriterio es una herramienta de gran importancia que se puede traslapar a áreas más grandes de estudio y a otros campos de investigación, ya que ofrece datos certeros y permite evaluar varios factores simultáneamente, para trabajar e implementar en tiempo presente y además brinda un panorama para prever a futuro y poder tomar acciones pertinentes.

En general en nuestro país el manejo y la regulación del agua subterránea es deficiente, y en muchos casos existe un descuido por parte de las entidades involucradas para generar una respuesta, esto a pesar de existir un marco legal que reglamenta y establece que deben existir zonas de protección con una cobertura boscosa alrededor de las áreas de recarga ya sean estas superficiales o subterráneas, que las amortigüe y resguarde; todos estos aspectos fueron considerados en la elaboración de la propuesta de lineamientos de recuperación forestal, la cual se basó en la caracterización estructural del bosque y las zonas prioritarias que resultaron de la evaluación multicriterio.

RECOMENDACIONES

- El área de protección no debe ser solo de 200 metros según lo establece la legislación nacional, debe tomarse en cuenta toda el área de influencia, ya que el criterio legal no es un criterio respaldado científicamente.
- Se deben delimitar zonas vulnerables a la contaminación y diseñar medidas de protección más estrictas para evitar la contaminación del agua subterránea y superficial por fertilizantes y plaguicidas.
- Las municipalidades de Alvarado y Jiménez deben trabajar en conjunto por y para la protección del agua subterránea, acciones que deben realizarse hoy en día para asegurar dicho recurso a futuro.
- Los gobiernos locales deben hacer valer la legislación nacional en materia de agua tanto subterránea como superficial, obligando a los dueños de propiedades a que respeten los límites que decreta la Ley de Aguas y la Ley Forestal respectivamente.
- Las municipalidades de Alvarado y Jiménez deben tomar en cuenta este tipo de estudios científicos, para que lleven acciones concretas en pro de la conservación del recurso hídrico subterráneo como las recomendadas en la presente investigación.
- Se recomienda que las municipalidades de Alvarado y Jiménez realicen una evaluación de índole social para conocer la anuencia de los dueños de las propiedades y realizar procesos de sensibilización con las personas que habitan en los sitios prioritarios a recuperar.
- Se recomienda a las municipalidades, grupos de instituciones y actores de la zona utilizar los lineamientos propuestos en dicha investigación para la recuperación de las áreas determinadas como prioritarias para la protección del agua subterránea y superficial.

Bibliografía

- Adams, B. & Foster, S. S. D. (1992). Land Surface Zoning for Groundwater Protection. *Water and Environment Journal*, 6 (4), 312-319.
- Aide, T. M. & Cavelier, J. (1994). Barriers to lowland tropical forest restoration in the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Restoration Ecology*, 2(4), 219-229.
- Aldous, A. R., & Bach, L. B. (2014). Hydro-ecology of groundwater-dependent ecosystems: applying basic science to groundwater management. *Hydrological Sciences Journal*, 59(3-4), 530-544.
- Alley, W.M., Reilly, T.E. & Franke, O.L (1999). *Sustainability of groundwater resources*. Denver, Colorado, USA: US Government Printing Office.
- Arias-Aguilar, D. (2004). Estudio de las relaciones altura-diámetro para seis especies maderables utilizadas en programas de reforestación en la Zona Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 1(2), ág-33
- Asner, G. P., Scurlock, J. M., & A. Hicke, J. (2003). Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography*, 12(3), 191-205.
- Astorga, Y. (2010). *Gestión del recurso hídrico y uso del agua*. Decimosexto informe. Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. San José, Costa Rica: Programa Estado de la Nación.
- Astorga, Y. (2013). *Gestión del recurso hídrico y uso del agua*. Decimonoveno informe. Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. San José, Costa Rica: Programa Estado de la Nación.

- Barredo, J. I. & Bosque-Sendra, J. (1998). Multi-criteria evaluation methods for ordinal data in a GIS environment. *Geographical Systems*, 5, 313-328.
- Blanco, J. A. (2017). Bosques, suelo y agua: explorando sus interacciones. *Revista Ecosistemas*, 26(2), 1-9.
- Bravo, D. V., de la Cruz, M. E., Herrera, L. G. & Ramírez, M, F. (2013). Uso de plaguicidas en cultivos agrícolas como herramienta para el monitoreo de peligros en salud. *Uniciencia*, 27(1), 351-376.
- Benegas, L. & León, J. (2009). Criterios para priorizar áreas de intervención en cuencas hidrográficas: la experiencia del Programa Focucenas II. Serie Técnica. *Informe Técnico. No. 378*.
- Birkel, D. C. (2007). Delimitación empírica de áreas prioritarias para el manejo del recurso hídrico en Costa Rica. *Revista Reflexiones*, 86(2), 39-49.
- Camacho, M., Finegan, B., & Orozco, L. (1999). Dinámica de la estructura y del crecimiento de bosques húmedos tropicales manejados del noreste de Costa Rica: Primera década de investigación. In *Taller Dinámica de los Bosques en Costa Rica y sus Implicaciones para el Manejo Forestal 9 Abril 1999 La Geroma, Pavas (Costa Rica)* (No. 634.92 T147 1999). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago (Costa Rica). Escuela de Ingeniería Forestal.
- Castillo, M. L., Ruepert, C., Ramírez, F., Van Wendel, B., Bravo, V. & De la Cruz, E. (2012). *Plaguicidas y otros contaminantes*. Decimoctavo informe. Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. San José, Costa Rica: Programa Estado de la Nación.
- Celentano, D., Zahawi, R. A., Finegan, B., Casanoves, F., Ostertag, R., Cole, R. J. & Holl, K. D. (2011). Restauración ecológica de bosques tropicales en Costa Rica: efecto de

varios modelos en la producción, acumulación y descomposición de hojarasca. *Revista de Biología Tropical*, 59(3), 1323-1336.

Centeno, F. A. (2004). Ingeniería biotécnica y bioingeniería. *Nuevas tendencias de la geotecnia para las obras de tierra, la estabilización de taludes y el control de la erosión. En: XVII Seminario Venezolano de Geotecnia. Caracas, Venezuela.* 30pp.

Clarke, F. M., Rostant, L.V. & Racey, P. A. (2005). Life after logging: post - logging recovery of a neotropical bat community. *Journal of Applied Ecology*, 42(2), 409-420.

Decreto Ejecutivo N°23214 MAG-MIRENEM. (1990). Metodología para la Determinación de la Capacidad del Uso de las Tierras de Costa Rica. República de Costa Rica.

Decreto Ejecutivo, N°32967 MINAE-SETENA. (2006). Manual de Instrumentos Técnicos para el Proceso de Evaluación del Impacto Ambiental (Manual de EIA)-Parte III. República de Costa Rica.

Decreto Ejecutivo, N°36786-MINAE. (2008). Manual para la clasificación de tierras dedicadas a la conservación de los recursos naturales dentro de la Zona Marítimo Terrestre en Costa Rica. República de Costa Rica.

Dunn, R. R. (2004). Recovery of faunal communities during tropical forest regeneration. *Conservation Biology*, 18(2), 302-309.

Eastman, J. R. (1997). IDRISI for Windows: Advanced Student Manual: Special topics, version 2.0. Clark Labs, Clark University.

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2009). Los bosques y el agua. Estudio FAO Montes 155. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*, Roma, Italia.

- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). Guía de campo para una evaluación rápida de las funciones protectoras del bosque del suelo y el agua.
- Faustino, M. J., Gómez, F.M., Vega, I. D., Watler, R. W., Ríos, R. J., Benegas, N.L. & Brenes, R.E. (2013). *Plan de Manejo de la Microcuenca Piloto para el Proyecto y Priorizar las intervenciones de la Cuenca Morote*. Primer informe. Fondo Nacional de Financiamiento Forestal. San José, Costa Rica.
- Fonseca-Sánchez, A., Madrigal-Solís, H., Núñez-Solís, C., Calderón-Sánchez, H., Moraga-López, G. & Gómez-Cruz, A. (2019). Evaluación de la amenaza de contaminación al agua subterránea y áreas de protección a manantiales en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica. *Uniciencia*, 33(2), 76-97.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., Délia, M. & Paris, M. (2003). Protección de la calidad del agua subterránea. Banco Mundial.
- Fournier, M.L., Ramírez, F., Ruepert, C., Vargas, S. & Echeverría, S. (2010a). *Agroquímicos en ecosistemas hortícolas y pecuarios en la microcuenca de las quebradas Plantón y Pacayas en Cartago, Costa Rica*. Documento Técnico No. 16. IRET, San José, C.R.: UNA.
- Fournier, M.L., Ramírez, F., Ruepert, C., Vargas, S. & Echeverría, S. (2010b). *Diagnóstico sobre contaminación de aguas, suelos y productos hortícolas por el uso de agroquímicos en la microcuenca de las quebradas Plantón y Pacayas en Cartago, Costa Rica*. Informe Final, IRET, San José, C.R.: UNA.
- Ganzhorn, J. U., Fietz, J., Rakotovao, E., Schwab, D. & Zinner, D. (1999). Lemurs and the regeneration of dry deciduous forest in Madagascar. *Conservation Biology*, 13(4), 794-804.

- Gastezzi-Arias., P, Alvarado-García, V. & Pérez-Gómez, G. (2017). La importancia de los ríos como corredores interurbanos. *Biocenosis*, 31(1-2).
- González, E. (2003). La importancia de la conservación del suelo frente a la erosión. *Vida rural*, 169, 22-24.
- Graniel, E. & Cardona, A. (2002). Planes de contingencia y su relación con las zonas de protección de pozos. *Ingeniería*, 6 (1), 39-47.
- Grischek, T., Nestler, W., Piechniczek, D. & Fischer, T. (1996). Urban groundwater in Dresden, Germany. *Hydrogeology Journal*, 4(1), 48-63.
- Guariguata, M. R., Chazdon, R. L., Denslow, J. S., Dupuy, J. M. & Anderson, L. (1997). Structure and floristics of secondary and old-growth forest stands in lowland Costa Rica. *Plant ecology*, 132(1), 107-120.
- Guariguata, M. R., & Ostertag, R. (2001). Neotropical secondary forest succession: changes in structural and functional characteristics. *Forest ecology and management*, 148(1-3), 185-206.
- Hamann, A., & Curio, E. (1999). Interactions among frugivores and fleshy fruit trees in a Philippine submontane rainforest. *Conservation Biology*, 13(4), 766-773.
- Harris, J., Van Vliet, HR. & MacKay, HM (1999). Water resource quality policy: the approach adopted by the Department of Water Affairs and Forestry under the Water Law principles. *Water Science Technology*, 29(10-11), 31-37.
- Hernández, G. (2010). *Manual de Buenas Prácticas Ambientales en Costa Rica*. Compilación ilustrada del Tribunal Ambiental Administrativo. Infoterra Editores S.A.

- Hernández, D. (2011). *Influencia de la pendiente y la precipitación en la erosión de taludes desprotegidos*. (Tesis de Ingeniería Civil). Universidad del Bio Bío, Chile.
- Holdridge, L. R. (1967). *Life Zone Ecology Rev. ed.* San José, Costa Rica: Tropical Science Center.
- Hooper, E., Legendre, P. & Condit, R. (2005). Barriers to forest regeneration of deforested and abandoned land in Panama. *Journal of Applied Ecology*, 42(6), 1165-1174.
- Ilstedt, U., Tobella, A. B., Bazié, H. R., Bayala, J., Verbeeten, E., Nyberg, G., Benegas, L., Murdiyarsa, D., Laudon, H., Malmer A. & Sheil, D. (2016). Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics. *Scientific reports*, 6, 21930.
- Jiménez, M. (2010). *Intervenciones basadas en la planificación y gestión territorial de los riesgos del agua y del medio ambiente con enfoque de multiculturalidad y género en el Cantón de Jiménez, Cartago, Costa Rica*. (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Plan Regulador Territorial del Cantón de Alvarado (2016). La Gaceta, alcance N°94. Municipalidad de Alvarado, Cartago, Costa Rica.
- Laporte, G. & Porras, G. (2002). Uso de la vegetación para la estabilización de taludes. VIII Seminario Nacional de Geotecnia, III Encuentro Centroamericano de Geotecnistas, Costa Rica. 18pp.
- Le Maitre, D.C., Scott, D.F & Colvin, C. (1999). A review of information on interactions between vegetation and groundwater. *Water South Africa*, 25(2), 137–152.
- Levy, J. & Xu, Y. (2012). Review: Groundwater management and groundwater/surface-water interaction in the context of South African water policy. *Hydrogeology Journal*, 20 (2), 205-226.

- Ley de Aguas, No. 276 (1942). Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica.
- Ley de Biodiversidad, No. 7788 (1998). Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica.
- Ley Forestal, No. 7575 (1996). Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica.
- Ley Orgánica del Ambiente, No. 7554 (1995). Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica.
- Martínez Navarrete, C. & López Geta, J. A. (2001). Perímetros de protección de aguas subterráneas y del medio ambiente relacionado. In *Las aguas subterráneas en el Plan Hidrológico Nacional* (pp. 89-98). Mundi Prensa Libros SA.
- Martínez Navarrete, C. (2004). Propuesta metodológica para la delimitación de perímetros de protección en acuíferos detríticos y su implementación en el territorio español: aplicación a las captaciones de abastecimiento urbano de Villacastín (Segovia). Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones.
- Martínez Tuna, M. (2000). Propuesta de algunos métodos de cuantificación física y estimación del valor económico de los bienes y servicios ambientales que prestan los bosques de las fincas Santa Victoria, Sololá y San Jerónimo, Baja Verapaz. Guatemala, *Informe de Consultoría*. Facultad Latinoamericana de Ciencias sociales. Instituto Nacional de Bosques. 97 pp.
- Mayfield, M. M., Ackerly, D. & Daily, G. C. (2006). The diversity and conservation of plant reproductive and dispersal functional traits in human-dominated tropical landscapes. *Journal of Ecology*, 94(3), 522-536.
- Mitchell, J. E., & Popovich, S. J. (1997). Effectiveness of basal area for estimating canopy cover of ponderosa pine. *Forest Ecology and Management*, 95(1), 45-51.

- Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Millennium ecosystem assessment synthesis report*. Washington, DC: Island Press.
- Morales, C. O. (2009). Caracterización florística y estructural de tres fragmentos boscosos secundarios en Cartago, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 57(1) 69-82.
- Moreno Merino, L., Martínez Navarrete, C., López Geta, J. A. & Navarrete Martínez, P. (1991). *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. Madrid: IGME.
- Morera, C., Pintó, J. & Romero, M. (2007). *Paisaje, procesos de fragmentación y redes ecológicas: aproximación conceptual y experiencia en América*. San José, Costa Rica: Imprenta Nacional.
- Navarro, J. (2002). *Control de la erosión en desmontes originados por obras de infraestructura viaria: aplicación al entorno de Palencia capital*. (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Navarro, J., Vélez, M., Sáiz, A., Cruz, P. & Sanz, F. J. (2006). Efectos de las carreteras en los ríos; estudio preliminar de producción y emisión de sedimentos en las obras de la A-63 en Asturias. In: *Homenaje al Douro/Duero y sus ríos*. Zamora.
- Nyhagen, D. F., Turnbull, S. D., Olesen, J. M. & Jones, C. G. (2005). An investigation into the role of the Mauritian flying fox, *Pteropus niger*, in forest regeneration. *Biological Conservation*, 122(3), 491-497.
- OMS, Organización Mundial de la Salud (2004). Rolling Revision of the WHO Guidelines for Drinking-Water Quality: Draft for review and comments nitrates and nitrites in drinking-water.
- Prach, K., Marrs, R., Pyšek, P. & van Diggelen, R. (2007). Manipulation of succession. In

Linking restoration and ecological succession (pp. 121-149). Springer, New York, NY.

R Core Team. (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

Ramírez, P., Zúñiga, H. (2014). Estudio hidrogeológico en el distrito de Juan Viñas, Cartago. Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

Redondo, A. B., Vílchez, B. A. & Chazdon, R. L. (2001). Estudio de la dinámica y composición de cuatro bosques secundarios en la región Huetar Norte, Sarapiquí-Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente*, (36).

Reynolds, J. & Fraile, J. (2002). Presente y futuro de las aguas subterráneas en el Valle Central. En Reynolds Vargas, Jenny (editora), *Manejo integrado de aguas subterráneas. Un reto para el futuro* (pp 19-32). San José, C.R.: EUNED.

Rich, P. M. (1990). Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote sensing reviews*, 5(1), 13-29.

Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process; Planning, Priority Setting Resource Allocation*: New York, McGraw-Hill, 287 p.

Sagot, A. (2004). *Jurisprudencia del Recurso Hídrico y Forestal*. San José, Costa Rica: Investigaciones Jurídicas S.A.

Sánchez-Murillo, R. (2018). Variabilidad micro-climática e hidrogeológica en las subcuencas Quebrada Honda y Chiz-Maravilla a través del análisis de isótopos estables del Proyecto: Herramientas para la protección del agua subterránea en la subcuencas Quebrada Honda y Chiz-Maravilla, Cartago, Costa Rica. (Datos sin

publicar)

- Saravanakumar, K. & Kumar, R. (2011). Analysis of water parameters of groundwater near Ambattur industrial area, Tamil Nadu, India. *Indian Journal of Science and Technology*, 4 (5), 660-663.
- Schrautzer, J., Rinker, A., Jensen, K., Müller, F., Schwartz, P., & Dierßen, K. (2007). Succession and restoration of drained fens: perspectives from northwestern Europe. In *Linking restoration and ecological succession* (pp. 90-120). Springer, New York, NY.
- Suárez, J. (2001). Control de erosión en zonas tropicales. Bucaramanga, CO. División Editorial y de Publicaciones *Universidad Industrial de Santander*. 545p.
- Tabarelli, M. & Peres, C. A. (2002). Abiotic and vertebrate seed dispersal in the Brazilian Atlantic forest: implications for forest regeneration. *Biological Conservation*, 106(2), 165-176.
- Twedt, D. J. (2006). Small clusters of fast-growing trees enhance forest structure on restored bottomland sites. *Restoration Ecology*, 14(2), 316-320.
- Vargas, I. (2012). *Recurso Hídrico y Saneamiento*. Decimoctavo informe. Estado de La Nación en Desarrollo Humano Sostenible. San José, Costa Rica: Programa Estado de la Nación.
- Viquez, M. (1993). El manejo de bosques secundarios: una oportunidad para los agricultores. San José, Costa Rica, *Departamento de Desarrollo Campesino Forestal, DGF*.
- Vorreyer, C. (1998). Delineating surface source water protection areas in Germany. *Source water assessment and protection*, 98, 61-64.

- Welles, J. M. & Cohen, S. (1996). Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. *Journal of Experimental Botany*, 47(9), 1335-1342.
- Wirth, R., Weber, B. & Ryel, R. J. (2001). Spatial and temporal variability of canopy structure in a tropical moist forest. *Acta Oecologica*, 22(5-6), 235-244.
- Zimmerman, J. K., Pascarella, J. B. & Aide, T. M. (2000). Barriers to forest regeneration in an abandoned pasture in Puerto Rico. *Restoration ecology*, 8(4), 350-360.

Anexos

Anexo 1. Criterios geofísicos, jurídicos y sociales para priorizar áreas de protección del recurso hídrico subterráneo en el acueducto municipal de Jiménez

Criterio	Dato	Atributo	Fuente
Mapa de zonificación de uso de la tierra	ZAG ZPRQ	Límite Cantonal	Plan Regulador Territorial del Cantón de Alvarado, 2016
		Poliducto	
		Red Vial Nacional	
		Red Vial Secundaria	
		ZAG, Zona agropecuaria	
		ZM, Zona de uso mixto	
		ZPRQ, Zona de protección de ríos y quebradas	
		ZPI, Zona de uso público institucional	
ZR, Zona residencial			
Índice de riesgo de contaminación hidrogeológica	Moderado Elevado	Bosque	Fonseca-Sánchez et al., 2019
		Elevado	
		Moderado	
		Reducido	
Zona de protección de 200m en nacientes	Área de 200 m	Perímetro de 200 metros de radio	Artículo 31, Ley de Aguas, N°276
Zona de protección de 50m en ríos	Área de 50 m	50 metros medidos horizontalmente desde la margen del río o quebrada	Artículo 33, Ley Forestal, N°7575
Cobertura de uso de la tierra	Pastos Caña de azúcar	Bosque intervenido	LHA, 2017
		Bosque ribereño	
		Café	
		Caña de azúcar	
		Hortalizas y verduras	
		Pastos	
Pendiente	≥60% 31% - 59.9%	≥60%	Plan Regulador del cantón de Alvarado Decreto Ejecutivo N°32967 MINAE-SETENA Decreto Ejecutivo N°36786-MINAE Decreto Ejecutivo N°23214 MAG-MIRENEM
		31% - 59.9%	
		=30%	

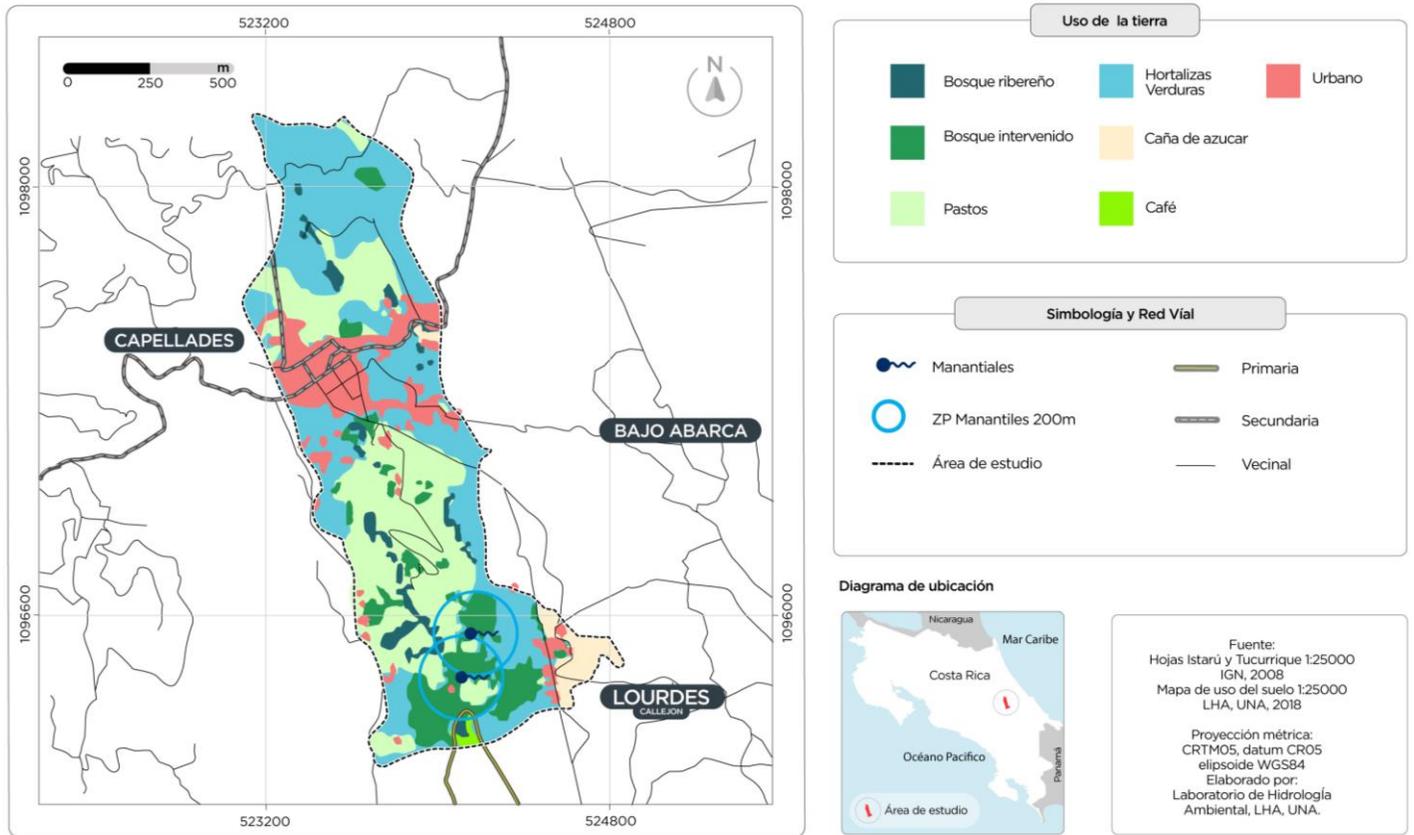
Fuente: Elaboración propia

Anexo 2. Restricciones sobre criterios geofísicos, jurídicos y sociales para priorizar áreas de protección del recurso hídrico subterráneo en el acueducto municipal de Jiménez.

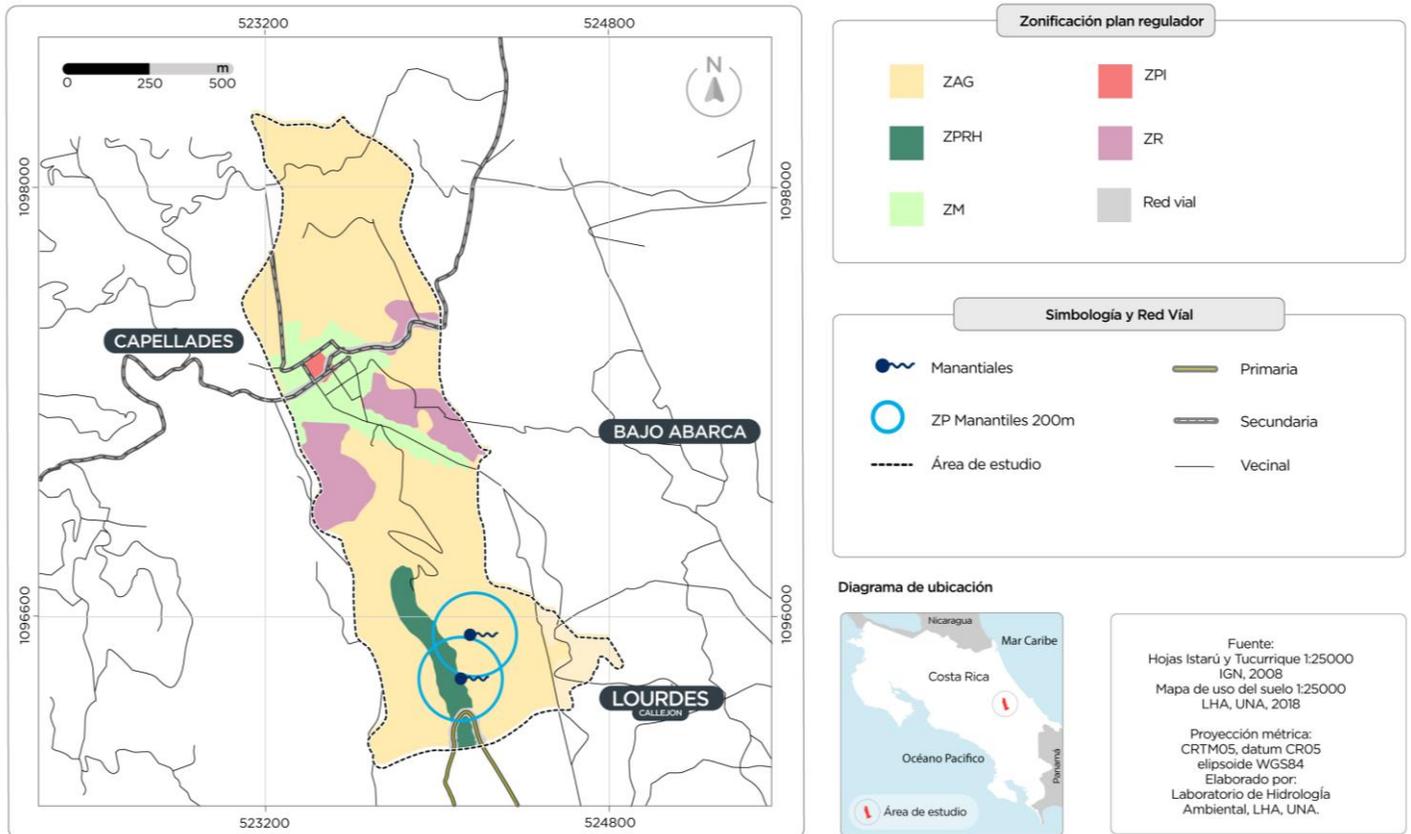
Restricciones	Fuente	Escala
Ríos y canales	IGN, 2005 Comprobación de campo 2017	1:5.000
Carreteras	IGN, 2005	1:5.000
Mancha Urbana	LHA y Municipalidad de Alvarado	1:5.000 y 1:25.000
Poliducto	Municipalidad de Alvarado	1:25.000

Fuente: Elaboración propia

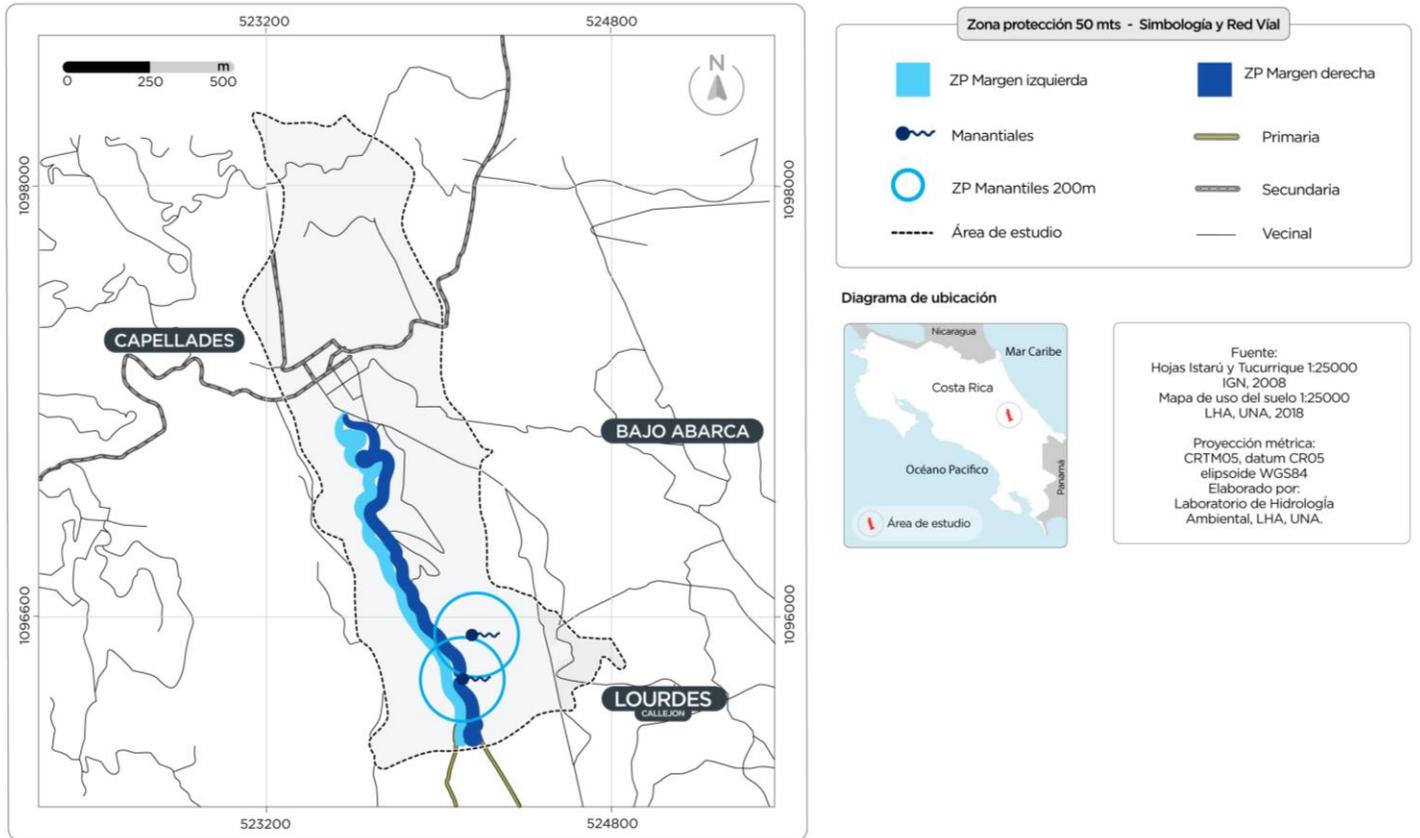
Anexo 3. Mapa de cobertura del uso de la tierra en el área de estudio: Bosque ribereño, Bosque intervenido, Pastos, Café, Caña de azúcar, Hortalizas y verduras, Urbano.



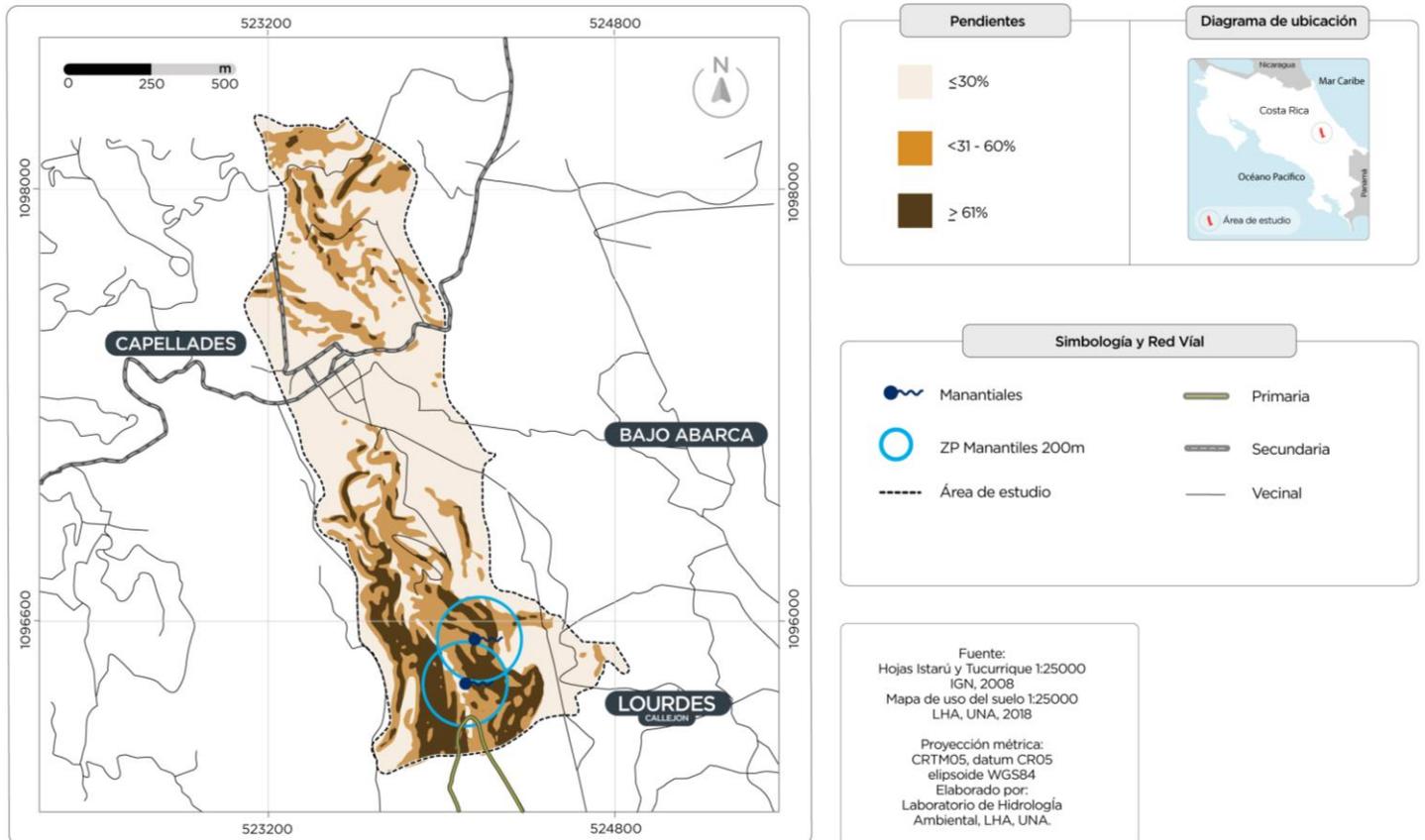
Anexo 4. Mapa de Zonificación del Plan Regulador de Alvarado, ZPRQ: Zona de protección de ríos y quebradas, ZM: Zona de uso mixto, ZAG: Zona agropecuaria, ZPI: Zona de uso público institucional, ZR: Zona residencial.



Anexo 5. Mapa de la Zona de protección de 50 m en el río Quebrada Honda.



Anexo 6. Mapa de las pendientes presentes en la zona de estudio



Anexo 7. Mapa de fuentes lineales y puntuales de contaminación según el Índice de riesgo de contaminación hidrogeológica (IRCH) en la zona de estudio del acueducto municipal de Jiménez y su área de recarga.

