

Estrategia para el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo en una zona semiárida de Guatemala

Strategy for the use of the hydric resource underground in a semi-arid area of Guatemala

Isaac Rodolfo Herrera Ibáñez¹ Eugenio Orozco & Orozco¹ y Albi Mujica Cervantes²

RESUMEN. El agua subterránea juega un papel crítico en el mantenimiento de una alta calidad de vida para la población dentro de la zona semiárida de Guatemala. El agua subterránea suple el agua para consumo humano, industrial, comercial y uso agrícola en las partes rurales del país. Por esto, los objetivos fueron determinar las principales áreas de recarga hídrica y proponer estrategias efectivas de manejo del agua. El agua subterránea está generalmente en rocas volcánicas fracturadas y forma un acuífero local y con confinamiento. En la cuenca existe una recarga hídrica de ocho millones de metros cúbicos por año. Esto indica que la extracción de agua con el desarrollo de pozos es factible, representando una estrategia de manejo de agua. Se recomienda hacer mejoras con asistencia técnica a las municipalidades y a los pequeños sistemas de agua para desarrollar e implementar programas locales de protección de aguas subterráneas.

Palabras clave: zona semiárida, recarga hídrica, agua subterránea, manejo de agua.

ABSTRACT. Groundwater plays a critical role in the maintenance of a high life quality of population in the semiarid zone of Guatemala. Groundwater uses in the rural regions are: drinking water, industrial, commercial and agricultural water consumption. Following this concerns, the objectives of this research were to determinate the main areas of water recharge and propose effective strategies for the water management of the watershed. The groundwater is generally confined in a local aquifer in fractured volcanic rocks. The water recharge of the watershed is estimated around eight million cubic meters per year. The water budget indicate that water extraction with the development of mechanical water wells is feasible, representing a strategy to water management. As a result of this research it is recommended to improve the technical assistance to municipalities and small water systems to develop and implement local groundwater protection programs.

Keywords: semiarid zone, water recharge, groundwater, water management.

INTRODUCCIÓN

Guatemala, es un país con abundantes recursos hídricos con excepción de la zona semiárida en la parte oriental donde la problemática de escasez de agua hace importante realizar estudios para determinar la cantidad disponible de los cuerpos superficiales y los reservorios de agua subterránea, para cuantificar los volúmenes de agua que poseen adecuadas características para su aprovechamiento.

En el país el escurrimiento a través de los ríos representa 100 700 millones de metros cúbicos por año y las aguas subterráneas tienen un potencial de aproximadamente 33 699 millones de metros cúbicos (Herrera, 2002).

A nivel nacional los sectores que más demandan agua son: el agrícola con 74%, el industrial con 17% y el abasteci-

miento de agua potable con 9% (FAO, 2008). La situación del abastecimiento de agua para el consumo humano en el país es un problema que se agudiza, ya que la cobertura en el área rural, solo el 48,8% de la población tiene acceso a un sistema de agua, en tanto que en el área urbana alcanza el 91,3%. En la próxima década, en el país se espera un aumento considerable en la demanda de agua subterránea, debido a su sobre-explotación y contaminación de la calidad del agua superficial. Por ello es necesario hacer más eficiente el uso del recurso hídrico (Herrera, 2009). El pronóstico de agua potable (urbana y rural) después del año 2010 alcanzaría un total de 835 millones de m³/año (FAO, 2008).

En la zona semiárida llamada el *corredor seco*, se han presentado casos de hambruna y el gobierno ha venido desarrollando diversos planes y programas con el objetivo de

Recibido 22/07/10, aprobado 31/03/11, trabajo 34/11, investigación.

¹ M.Sc., Profesor Investigador, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, E-✉: iherrerai@hotmail.com

² Dr.C., Director del Centro de Estudios Hidrotécnicos, Facultad de Ingeniería, Universidad "Máximo Gómez Báez", Ciego de Ávila.

mejorar la calidad de vida de los habitantes de la región. Esto ha conducido a la necesidad de proponer un mejor manejo del agua y aprovechar este recurso de forma sostenible a nivel de cuenca. La subcuenca de los ríos Pansigüís y Cushapa en el municipio de San Luis Jilotepeque en el departamento de Jalapa, fue el área piloto estudiada con el objetivo de evaluar los recursos hídricos y proponer una estrategia para el aprovechamiento de las fuentes de agua. Esta investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYT) de Guatemala y la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos y esta dirigida a constituir un documento guía, para el manejo de los recursos hídricos por parte de la municipalidad de San Luis Jilotepeque, al definir las fuentes de agua a aprovechar y las áreas a proteger para asegurar la sostenibilidad del recurso hídrico.

En Guatemala el INFOM (2009) establece la unidad de volumen de suministro de agua entre 150 a 280 litros por habitante al día (L/hab/d). En ciudad Guatemala EMPAGUA (Empresa Municipal de Agua) determina una dotación mensual por vivienda de media paja de agua, equivalente a 30 metros cúbicos o 200 L/hab/d. El servicio actual de agua difiere en el país, oscilando desde 15 L/hab/d en áreas rurales hasta 250

L/hab/d en residencias urbanas y no existe criterio específico para cada municipio. La diferencia de servicio se deriva de la capacidad financiera de cada municipio y la voluntad de los beneficiarios de sufragar los costos de operación y mantenimiento, más que a la capacidad de las fuentes de agua. Para el altiplano de Guatemala se clasifica el nivel de servicio de acuerdo a la población. La subcuenca de los ríos Pansigüís y Cushapa actualmente presenta 18 083 habitantes y se ubica en un nivel IV con suministro de diseño de 155 L/hab/d. (INSI-VUMEH-BRGM, 1997).

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de investigación se localiza al oriente de Guatemala y presenta una superficie de 104,84 km². La subcuenca de los ríos Pansigüís y Cushapa, se ubica localmente en los municipios de San Luis Jilotepeque (81%), San Pedro Pinula (15%) y San Manuel Chaparrón (4%) en el departamento de Jalapa (Figura 1). La subcuenca se ubica dentro de las coordenadas geográficas de 14° 33' a 14° 42' latitud norte y 89° 41' a 89° 48' de longitud oeste.

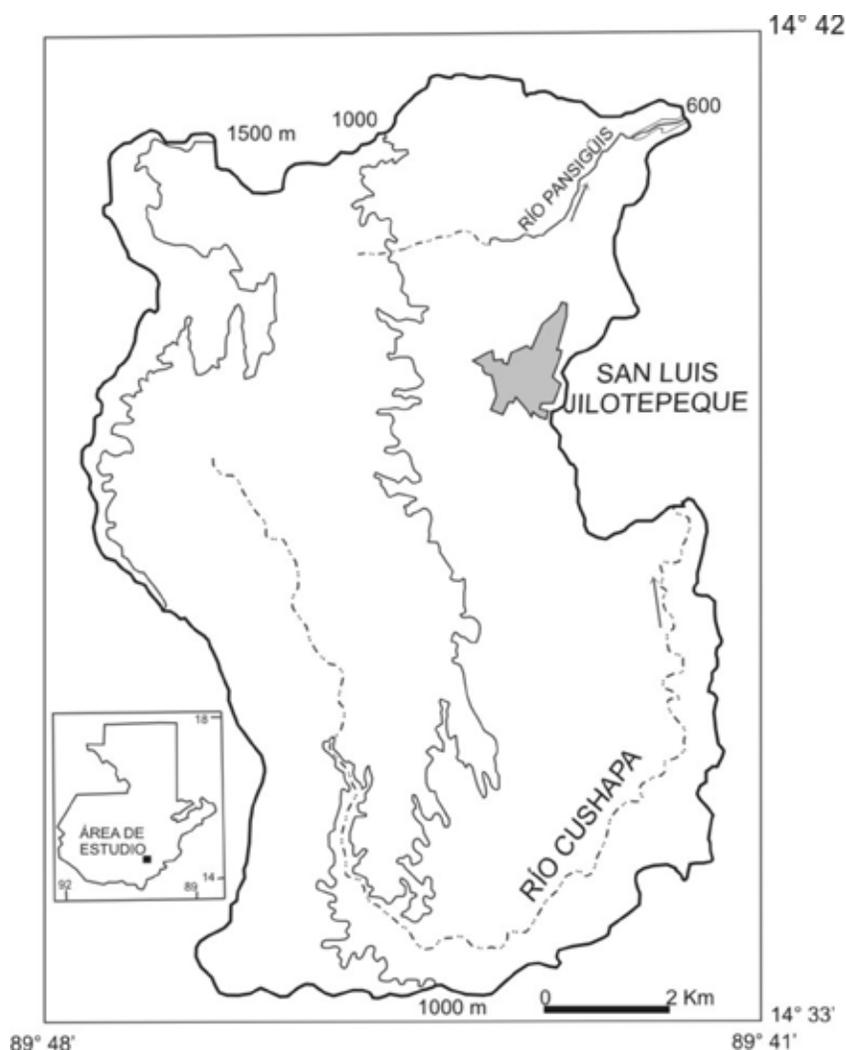


FIGURA 1. Ubicación de la subcuenca de los ríos Pansigüís y Cushapa

La caracterización hidrogeológica se realizó por el método de correlación entre la geología superficial y subterránea, que en este caso fue el más factible a utilizar y es aplicable a zonas con una buena información de afloramientos de campo y buen control de litología de pozos (INSIVUMEH, 1981). La determinación de las direcciones preferenciales de movimiento del agua subterránea y por lo tanto, de su red de flujo se determinó de acuerdo a la medición de niveles de pozos. Los parámetros hidrogeológicos del acuífero (transmisividad y coeficiente de almacenamiento) se determinaron mediante el método de la *prueba de bombeo*, y se aplicaron los métodos de Theis y Jacob (Herrera, 2002; Custodio, 2005).

Para la determinación de la cantidad disponible de agua superficial en la subcuenca, se construyeron dos estaciones hidrométricas tipo vertedero rectangular, una en el río Pansiguis y otra en el río Cushapa a partir del mes de diciembre del 2006. La realización de aforos del río se efectuó por el *método de sección velocidad* (Herrera, 2009). De acuerdo a la medición de distintos caudales durante el año, se obtuvo la curva de duración calibración.

La metodología utilizada para estimar la recarga hídrica se dividió en dos fases:

- i) La obtención del mapa de unidades de recarga hídrica de acuerdo a la geomorfología y al uso actual de la tierra utilizando los software MAP INFO y ARCVIEW;
- ii) El cálculo de la recarga hídrica de cada unidad obtenida se realizó por el método de Schosinsky y Losilla (2000).

Los parámetros meteorológicos determinados fueron precipitación pluvial, temperatura, humedad relativa y la evapotranspiración, por medio de dos estaciones climáticas tipo C, una en la parte alta en La Cumbre a una elevación de 1 552 msnm y otra en la parte baja de la subcuenca en San Luis Jilotepeque a 762 msnm (Herrera, 2009; Herrera *et al.*, 2007).

La estrategia para el aprovechamiento del recurso hídrico se estableció dentro del contexto económico-social local y en base a las actuales condiciones naturales que presenta la subcuenca de los ríos Pansiguis y Cushapa en el departamento de Jalapa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las unidades hidrogeológicas de la subcuenca son dos: la unidad volcánica, formada por rocas andesíticas altamente fracturadas que constituyen la zona saturada; y la unidad sedimentaria, formada por rocas detríticas (conglomerados, areniscas y lutitas), constituyen un acuícludo y subyacen a las rocas volcánicas, mientras que las rocas carbonatadas que pueden formar acuíferos profundos, representan la base de las unidades estratigráficas presentes en la subcuenca.

En el área de estudio existe un acuífero local constituido por rocas volcánicas terciarias, el cual es captado por los pozos perforados a menos de 200 m. Los límites al norte y al oeste, corresponden en gran medida con los de la subcuenca hidrográfica. Sin embargo, en sus partes sur y este, sobrepasan los límites de la subcuenca hidrológica superficial, siendo la cuenca hidrogeológica mucho más amplia, principalmente hacia Ipala.

Los límites están en concordancia a las estructuras geológicas mayores: Falla de Jocotán (al norte), Horst de Pinula (al oeste), Graben de Ipala (al este) y Volcán de Ipala (al sur), los cuales hacen un control volcano-tectónico, que ha dado lugar al basculamiento de bloques geológicos. La dirección del flujo del agua subterránea tiene una tendencia de oeste a este, por lo que el flujo está controlado por el horst de Pinula y el graben de Ipala, con una recarga desde las partes altas al oeste.

La transmisividad en la subcuenca varía de de 17 a 55 m²/día y de acuerdo al espesor aproximado del acuífero de 150 metros, se obtiene una conductividad hidráulica de 0,11 a 0,37 m/día. El coeficiente de almacenamiento es de 3×10^{-4} , que indica que es un acuífero confinado, y se correlaciona con la estratigrafía superficial que presenta capas de ceniza volcánica (arcilla) que constituyen capas confinantes.

La subcuenca de estudio se divide en dos microcuencas: río Pansiguis que presenta un área de 28,76 km² y un caudal medio de 0,13 m³/s, y la microcuenca del río Cushapa con 76,06 km² y un caudal medio de 0,08 m³/s. Estas cantidades de agua superficial son muy bajas para ser aprovechadas y su potencial no es adecuado para el suministro.

En la subcuenca se distinguen dos unidades geomorfológicas: el Horst de Pinula representado por la Montaña Pinula, y el Graben de Ipala que constituye los valles de San Luis Jilotepeque e Ipala.

Los valores de lluvia de la parte alta de la subcuenca son de 1 137 mm, con una evapotranspiración potencial de 1 743 mm/año representados por la estación climática La Cumbre, mientras que en la parte baja se presentan 949,5 mm de lluvia por año y una evapotranspiración de 1 845 mm en la estación San Luis Jilotepeque.

El uso actual del suelo en la subcuenca es de arbustos y matorrales (66%), granos básicos (maíz y frijol) con 22,67%, bosque (4,61%), frutales como jocote y cítricos (3,26%), café (1,3%) y poblados (1,94%).

Con el traslape de las unidades de los mapas de geomorfología y uso actual del suelo, se determinaron 23 unidades de recarga hídrica, a las cuales se les realizó su respectivo cálculo de lamina de recarga potencial y se estimó un volumen de recarga en la subcuenca de 8,28 millones m³/año. Las unidades se clasifican como: *áreas de alta recarga hídrica*, con volúmenes de recarga hídrica entre 150 000 a 300 000 m³/km², *áreas con recarga media* oscilan entre 50 000 a 150 000 m³/km², las *áreas de baja recarga*, presentan volúmenes menores de 50 000 m³/km².

Analizando la recarga total anual de las aguas subterráneas que se produce en la subcuenca de $8,28 \times 10^6$ m³/año y comparándola con la explotación actual de aproximadamente $1,28 \times 10^6$ m³/año, se tiene un balance positivo de 7×10^6 m³/año. Esto indica que existe un potencial hídrico subterráneo es relativamente alto en la subcuenca, donde la explotación actual representa aproximadamente el 15,5% del recurso temporal, es decir, existe un 84,5% de excedente de agua subterránea.

Los ríos que existen en la subcuenca son tributarios pequeños, con un caudal medio muy pequeño entre 0,08 m³/s (río Cushapa) a 0,13 m³/s (río Pansiguis) y en algunas partes contaminados por las aguas servidas y basuras, que hace di-

facil la utilización de estas fuentes. También los manantiales utilizados como fuentes públicas de agua presentan bajo caudal (menor de 1 L/s). La estrategia para el aprovechamiento del recurso hídrico en la subcuenca, se sustenta en el desarrollo de las aguas subterráneas en base a los resultados del análisis del balance hídrico presenta una producción diaria de 2 048 m³. Además, la estrategia es producto del énfasis que se tiene actualmente al agua subterránea, que es la principal fuente de abastecimiento de las comunidades.

La subcuenca hidrográfica se localiza dentro de una cuenca subterránea tipo horst y graben, donde el acuífero consiste de lavas y capas de lapilli. De acuerdo a esto, la captación de agua subterránea debe dirigirse por medio de la perforación de pozos, en los lugares donde exista una mayor permeabilidad y producción de agua, que generalmente está asociada con la intensa fracturación de las rocas del subsuelo. La profundidad de perforación debe de ser de 250 metros (aproximadamente 820 pies) ó más, para tener una buena columna de agua. Los pozos se deben entubar en 8", 10" o 12" de diámetro, evitando construir pozos de 4" y 6" de diámetro.

En la subcuenca de los ríos Pansigüís y Cushapa hay un buen potencial del recurso hídrico subterráneo, que ofrece la oportunidad de ser desarrollado para habilitar áreas bajo riego y llenar los requerimientos de agua potable. Sin embargo se

debe efectuar un manejo conjunto de los recursos naturales, para asegurar una planificación, protección y gestión del agua subterránea. La estrategia también comprende áreas de conservación y manejo forestal de las partes altas de la subcuenca, que son tierras para uso forestal y agroforestal.

En la subcuenca es importante que en los terrenos con pendientes fuertes que se dedican a la agricultura, se incorporen prácticas de conservación de suelos para evitar los efectos de la erosión y escurrimiento superficial. La conservación y reforestación de los bosques en las partes altas y de laderas, debe hacerse a través del Instituto Nacional de Bosques y la Facultad de Agronomía de la USAC, con apoyo de autoridades locales como la municipalidad y los comités de agua. Se recomienda además, realizar una correcta protección de los manantiales, para conservar éstas salidas de agua subterránea y mantener los caudales de agua.

En la Tabla 1 se muestran los datos de producción diaria de agua subterránea (2 055 m³/d) y el rendimiento de los pozos entre 3,5 a 10 L/s (300 a 864 m³/día). La demanda de agua se estimó multiplicando la población de la subcuenca por el volumen de suministro diario de diseño por habitante (18 083 hab x 0.155 m³/d = 2 803 hab·m³/d). Comparando la demanda (2 803 m³/d) y la producción de agua (2 048 m³/d) se tiene un déficit de 755 m³/d para suplir el servicio a 4 871 habitantes.

TABLA 1. Producción actual de agua subterránea en la subcuenca

Tipo de captación	Caudal, L/s	Hora/día bombeo	Producción de agua actual, m ³ /día
Pozo Barrio San Sebastián	10,0	3	108
Pozo Lotificación Nuevo San Luis	1,11	2,5	10
Pozo Cantón El Llano (sin funcionar)	0	0	0
Pozo Cantón Santa Cruz	8,70	3	94
Pozo Cantón Los Izotes	3,90	5	70,2
Pozo Cantón El Calvario	3,50	12	151,2
Pozo Aldea Palo Blanco	4,23	4,15	63,2
Pozo De Fabio Duarte	0,19	2,2	1,5
Pozo La Cumbre (sin funcionar)	0	0	0
Pozo Aldea Cushapa	5,55	6,00	120
Pozo Barrio La Bolsa (sin funcionar)	0	0	0
Manantial El Tempiscón	15,6	12	674
Manantial La Cumbre	0,85	12	37
Manantial Pampomaye	0,625	12	27
Manantial Agua Azufrada	0,28	12	0
Manantial Los Magueyes	0,075	12	3,2
Manantial El Manguito	0,23	12	10
Manantial Pampacaya	15,72	12	679
Total			2 048

Analizando el total de personas que cuentan con servicio de agua potable actualmente (Tabla 2) se obtiene un déficit de demanda de agua para 4 800 habitantes, que de acuerdo al suministro de diseño (155 L/hab/d) se calculó un déficit en volumen de 744 m³/d. Este valor es aproximado a 755 m³/d, calculado en base a la producción actual de agua subterránea en la subcuenca, por lo que existe confiabilidad en la estimación del déficit de agua.

En la Tabla 2 es importante observar que la cabecera municipal de San Luis Jilotepeque es la que presenta el mayor número de habitantes (3 250) sin servicio de agua potable, específicamente en los barrios de La Bolsa, El Llano y El Calvario.

Las acciones a ejecutar están encaminadas a la construcción de pozos, donde la capacidad de producción de un pozo es de 5 L/s (432 m³/d) a 10 L/s (864 m³/d). Sin embargo, los resultados de perforación en el área y de acuerdo a la hidrogeología de zonas falladas, los pozos pueden presentar una mayor producción.

TABLA 2. Población con servicio de agua potable dentro de la subcuenca

Aldea o caserío y municipio	Número de habitantes	% de la población con servicio		Déficit
		%	%	habitantes
Cabecera municipal de San Luis Jilotepeque	10 862	70	30	3 250
Aldea Palo Blanco (San Luis Jilotepeque)	1 292	60	40	517
Aldea Pampacaya (San Luis Jilotepeque)	1243	100	0	0
Aldea Trapichitos (San Luis Jilotepeque)	670	90	10	67
Aldea La Montaña (San Luis Jilotepeque)	467	80	20	93
Aldea San José (San Luis Jilotepeque)	400	50	50	200
Aldea Cushapa (San Luis Jilotepeque)	394	100	0	0
Aldea Granada (San Luis Jilotepeque)	334	100	0	0
Aldea Pansigüis (San Luis Jilotepeque)	279	90	10	28
Aldea El Paterno (San Luis Jilotepeque)	228	100	0	0
Aldea La Lagunilla (San Luis Jilotepeque)	118	0	100	118
Caserío Los Magueyes (San Luis Jilotepeque)	77	0	100	77
Aldea San Francisco (San Luis Jilotepeque)	65	100	0	0
Caserío Agua Caliente (San Luis Jilotepeque)	48	50	50	24
Aldea La Cumbre (San Pedro Pinula)	140	0	100	140
Aldea Laguna Seca (San Pedro Pinula)	650	90	10	65
Aldea La Laguna (San Pedro Pinula)	362	100	0	0
Aldea Aguamecate (San Pedro Pinula)	353	40	60	212
Caserío La Joya (San Pedro Pinula)	35	40	60	21
Aldea Carrizal (San Manuel Chaparrón)	66	20	80	53
TOTAL	18 083			4 800

Fuente: INE (2002), Municipalidad de San Luis Jilotepeque (2003) y entrevistas.

En la Tabla 3, se presentan las acciones a tomar en cada comunidad. Por ejemplo en la cabecera municipal de San Luis Jilotepeque la demanda para 3 250 personas, se puede cubrir con la habilitación del pozo La Bolsa para 2 000 personas, la producción del pozo El Llano para 500 personas y la construcción de otro pozo en el barrio El Calvario para suplir los requerimientos de ese sector.

TABLA 3. Fuente para suplir el volumen faltante de agua

LUGAR	No. Habitantes con déficit	Demanda de agua, m ³ /d	Requerimiento de agua, m ³ /d	
			Habitantes (No. pozos)	Manantial
Cabecera San Luis	3 250	504	504 (3 pozos)	---
Aldea Palo Blanco	517	80	80 (1 pozo)	---
Aldea Pampacaya	0	0	---	---
Aldea Trapichitos	67	10,4	---	10,4
Aldea La Montaña	93	14,4	---	14,4
Aldea San José y Caserío Agua Caliente	200	31	34,7 (1 pozo)	---
Aldea Pansigüis	28	4,3	---	4,3
Aldea La Lagunilla	118	18,3	18,3 (1 pozo)	---
Caserío Los Magueyes	77	11,9	---	11,9
Aldea La Cumbre	140	22	---	22
Aldea Aguamecate y Caserío La Joya	212	32,4	36,2 (1 pozo)	---
Aldea Carrizal	53	8,2	---	8,2
TOTAL	4 800			

En la aldea Palo Blanco se debe construir un pozo para un requerimiento de 80 m³/d para 517 personas. En San José y Agua Caliente también se puede construir un pozo para un requerimiento de 35 m³/d para dar servicio a 224 personas.

La construcción de pozos también es factible en las aldeas La Lagunilla y Aguamecate como se observa en la Figura 2.

Otra alternativa para suplir la demanda de agua potable de algunas comunidades con menor número de habitantes, es

la adecuada y mejor captación de manantiales como en las aldeas Trapichitos, La Montaña, Los Magueyes, Carrizal, y La Cumbre. Además en estas comunidades se puede captar el agua de lluvia por medio de aljibes o depósitos plásticos. El establecimiento de aguadas puede mejorar el aprovisiona-

miento de agua para el ganado vacuno principalmente.

La estrategia de aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo tiene como acción principal la construcción de pozos de agua como se resume en la Tabla 4.

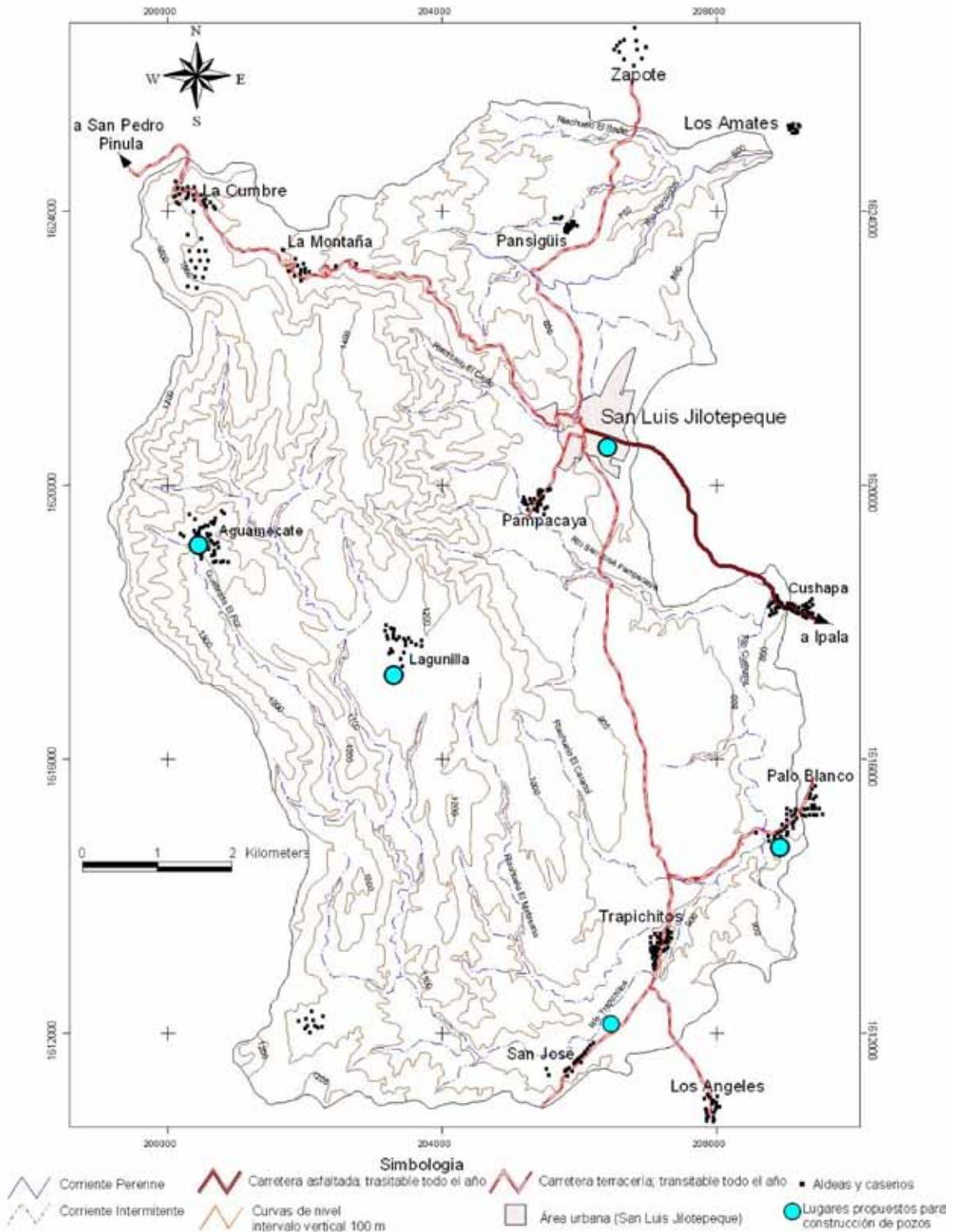


FIGURA 2. Lugares de perforación de pozos de agua

TABLA 4. Estrategia de desarrollo del recurso hídrico subterráneo

Acciones	Área geográfica	Responsables	Beneficiarios	Costo	Período
Desarrollar un plan de ordenamiento territorial de la subcuenca con las áreas a conservar y manejar para mantener la recarga hídrica	Montaña Pinula y laderas	Oficina Municipal de Planificación (OMP) de San Luis Jilotepeque y San Pedro Pinula, instituciones de manejo territorial	Comunidades, municipalidades de San Luis Jilotepeque y San Pedro Pinula	\$ 5 000 (Q.40 000)	1 año
Perforación de pozos mecánicos	Cabecera San Luis Jilotepeque (1), Aldea Palo Blanco (1), Aldea San José (1), Aldea Lagunilla (1), Aldea Aguamecate (1)	Consejo Departamental de Desarrollo, Municipalidad de San Luis Jilotepeque, Consejos comunitarios de desarrollo (COCODES) y comités pro-mejoramiento local.	Comunidades, municipalidad de San Luis Jilotepeque y San Pedro Pinula	\$ 111 600 (Q.892 800) por pozo terminado	1 a 3 años
Adecuación y mejoramiento de los lugares de captación de manantiales	Aldeas Pansigüis, Trapichitos, La Montaña, La Cumbre, Caserío Los Magueyes, Aldea Carrizal	Consejo Departamental de Desarrollo, Municipalidad de San Luis Jilotepeque, COCODES, comités pro-mejoramiento local	Comunidades, municipalidades de San Luis Jilotepeque, San Pedro Pinula, San Manuel Chaparrón	\$ 1 500 (Q.12 000) por manantial	1 a 2 años
Protección de áreas de captación de pozos y manantiales	Subcuenca y alrededores	Oficina municipal de planificación, comunidades	Comunidades usuarias del agua, municipalidades	\$ 2 000 (Q.16 000) por área	Permanente
Monitoreo de los niveles y producciones de pozos	Subcuenca y alrededores	Oficina municipal de planificación de San Luis Jilotepeque y San Pedro Pinula	Comunidades usuarias del agua, municipalidades	\$ 2 000/año (Q.16 000)	Permanente
Sistematizar y compartir la información con los comités y otras municipalidades	Subcuenca y alrededores	Oficina municipal de planificación de San Luis Jilotepeque y San Pedro Pinula, otras instituciones	Comunidades usuarias del agua, municipalidades, instituciones gubernamentales	\$ 1 000/año (Q. 8 000)	Permanente
Lograr la participación de las comunidades para su desarrollo económico y social	Subcuenca	Instituciones gubernamentales, ONG's municipalidades	Comunidades, municipalidades, gobierno central	\$ 1 300/año (Q.12 000)	Permanente
Formación de la mancomunidad San Luis Jilotepeque, San Pedro Pinula y San Manuel Chaparrón	Parte alta y al oeste de la subcuenca	Municipalidades de San Luis Jilotepeque, San Pedro Pinula y San Manuel Chaparrón	Comunidades, municipalidades	\$ 200 (Q.1 600)	1 año

CONCLUSIONES

- La recarga total anual de las aguas subterráneas que se produce en la subcuenca es de ocho millones de metros cúbicos por año y tiene lugar principalmente en las partes altas de la subcuenca. Estos resultados demuestran que existe un buen potencial hídrico subterráneo de 85% de excedente de agua subterránea.
- La estrategia de aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo tiene como acción principal la construcción de pozos de agua como se resume en la Tabla 4.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CUSTODIO, E.: Hidrodinámica, hidrogeoquímica y calidad de las aguas subterráneas en la gestión sustentable de los recursos de agua, con énfasis en la hidrogeología volcánica, En: **Congreso de Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos**, CARA, Nicaragua, 2005.
- FAO: Manejo integral de cuencas hidrográficas, CONAP, En: **Seminario taller “Manejo ambiental de cuencas, visión y perspectivas”**, Chile, 2008.
- GUATEMALA, INSTITUTO DE FOMENTO MUNICIPAL (INFOM): *Introducción de abastecimiento de agua potable en Chuq Muc, municipio de Santiago Atitlán, departamento de Sololá*, 115pp., Guatemala, 2009.
- GUATEMALA, INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (INE): *Censos nacionales*, 272pp., XI de Población y VI de Habitación, República de Guatemala, 2002.
- HERRERA, I. I.: *Hidrogeología Práctica*, 345pp., Primera edición, Red Centroamericana de Manejo de Recursos Hídricos, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2002.
- HERRERA, I. I.: *Determinación de las áreas principales de recarga hídrica y propuesta de aprovechamiento sostenible del agua subterránea, superficial y de lluvia en la subcuenca de los ríos Pansigüis y Cushapa*, 165pp., Jalapa, CONCYT-FAUSAC, Guatemala, 2009.
- HERRERA, I. I.; E. OROZCO y T. PADILLA: *Guía para el manejo de cuencas hidrográficas*, 135pp., Primera edición. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2007.
- INSIVUMEH: *Informe hidrogeológico del pozo Guacalate (Jocotenango I)*, Sección de aguas subterráneas. Guatemala, (Informe interno), 1981.
- INSIVUMEH-BRGM: *Modelización del transporte de agua y solutos en los estratos volcánicos y sedimentarios en la ciudad de Guatemala*, 144pp., Proyecto de Cooperación Franco-Guatemalteco. Guatemala, 1997.
- SCHOSINSKY, G. y M. LOSILLA: “Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual” *Revista Geológica de América Central*, (23): 43-55, 2000.